

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ ИМ. О. Ю. ШМИДТА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

к.ф.-м.н.,
Лукин С.В.

Москва — 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление	2
Введение	4
Глава 1. Современные методы использования скважинных исследований для реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния	12
1.1 Практические задачи геомеханики месторождений углеводородов	13
1.1.1 Расчет устойчивости ствола скважины	13
1.1.2 Гидроразрыв пласта	16
1.1.3 Эволюция фильтрационных свойств пород в ходе разработки	19
1.2 Методы оценки параметров напряженного состояния.....	24
1.2.1 Тектонофизические методы оценки напряжений	26
1.2.2 Использование скважинных исследований	28
1.3 Косвенная оценка параметров напряженного состояния	33
1.3.1 Анализ проявлений при бурении	34
1.3.2 Прочие подходы к оценке горизонтальных напряжений	39
1.3.3 Экстраполяция профилей напряжений	42
1.4 Реконструкция профилей напряжений по прямым измерениям	45
1.5 Выводы к главе 1	49
Глава 2. Реконструкция профилей горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости	51
2.1 Связь критически напряженных и флюидопроводящих трещин	51
2.2 Формулировка обратной задачи и алгоритм ее решения	60
2.3 Апробация подхода на синтетических данных.....	67
2.4 Выводы к главе 2	75

Глава 3. Реконструкция профилей горизонтальных напряжений в отсутствие прямых измерений параметров напряженного состояния	77
3.1 Полигон напряжений и аналитическое решение	77
3.2 Оценка напряжений вдоль скважин месторождения России	87
3.3 Доопределение профилей напряжений по данным миниГРП	98
3.4 Выводы к главе 3	101
Глава 4. Восстановление напряжений по стандартному набору геофизических исследований скважин	103
4.1 Недостатки разработанного подхода	103
4.2 Модификация подхода к анализу трещиноватости	105
4.3 Исследование напряженного состояния региона желоба Нанкай	114
4.4 Выводы к главе 4	128
Заключение	129
Список сокращений и условных обозначений	131
Список литературы	134

ВВЕДЕНИЕ

Геофизические исследования скважин (ГИС) являются одним из важным источников информации о напряженно-деформированном состоянии верхних слоев земной коры. Именно исследования, проводимые в скважинах, позволяют прямо или косвенно судить о некоторых параметрах, характеризующих напряженное состояние, в котором пребывают породы в околоскважинном пространстве. Часто результаты интерпретации таких исследований, выполненной для оценки параметров напряженно-деформированного состояния, используются для решения важных задач геомеханики месторождений углеводородов, все чаще возникающих на практике [Zoback, 2007]. К практическим задачам геомеханики, о которых идет речь, можно отнести: прогноз геометрии трещины гидроразрыва пласта (ГРП) [Афанасьев и др. 2009], расчет траектории распространения трещины повторного ГРП [Siebrits et al., 2000] и траектории авто-гидроразрыва пласта (автоГРП) [Nagoort et al., 1980]; оценку эволюции фильтрационно-емкостных свойств пород, слагающих месторождение, по мере его разработки вследствие вызываемого разработкой изменения напряженно-деформированного состояния [Schutjens et al., 2004]; расчет устойчивости ствола скважины [Bradley, 1979]. Во всех перечисленных случаях при решении поставленных задач выполняется анализ напряженно-деформированного состояния и его эволюции в ходе рассматриваемого процесса. Наиболее распространена постановка задач в рамках теории насыщенной пороупругой среды с использованием модели, предложенной Био [Biot, 1962]. Для корректного решения этих задач необходимо знать как основные законы (сформулированные в модели Био), которым подчиняются исследуемые процессы, так и реологические свойства рассматриваемых пород, а также начальные и граничные условия для решаемых задач. При этом как реология, так и начальные и граничные условия могут существенно различаться для различных объектов даже при решении одних и тех же задач.

Данная работа нацелена на поиск граничных условий для различных задач геомеханики месторождений. Достаточно часто для решения этих задач используются граничные условия, сформулированные через напряжения – на границах рассматриваемой области фиксируются современные значения различных параметров, характеризующих тензор напряжений [Zoback, 2007], и их эволюция в ходе рассматриваемых процессов. Существует целый ряд методов определения этих параметров по их косвенным проявлениям. В первую очередь, необходимо отметить тектонофизические методы анализа структуры пород, а именно, имеющихся в породах трещин и разрывов, для определения напряженного состояния, в котором они образовались, и современного напряженного состояния. Первые такие подходы были сформулированы в работах [Anderson, 1951; Гзовский, 1954], подробное описание современных методов может быть найдено в работе [Ребецкий, 2007]. Эти подходы позволяют судить о напряженном состоянии целых регионов.

С другой стороны, скважинные исследования также являются важным источником информации о напряженном состоянии массивов горных пород, правда, на сравнительно небольших пространственных масштабах – данные ГИС позволяют достаточно подробно описывать лишь состояние пород околоскважинного пространства. Тем не менее, методы использования данных ГИС могут дополнить тектонофизические подходы для решения задач геомеханики месторождений углеводородов, если в качестве границ используются траектории пробуренных на месторождении скважин. Некоторые задачи геомеханики, в первую очередь, расчет устойчивости ствола скважины, и вовсе могут быть решены при рассмотрении только околоскважинной области.

Необходимо понимать, что, несмотря на то, что скважинные исследования позволяют достаточно подробно изучить породы околоскважинного пространства, исследование напряженного состояния с помощью таких методов сопряжено с рядом трудностей. Напряженное состояние среды может быть описано шестью независимыми параметрами – часто используются три главных

компоненты тензора напряжений (далее – главные напряжения) и три Эйлеравых угла, характеризующие направления главных осей тензора напряжений [Родионов и др., 1986]. В геомеханике месторождений углеводородов в основном применяется [Zoback, 2007] гипотеза субвертикальности одной из главных осей тензора напряжений, обосновываемая малыми глубинами изучаемых объектов по сравнению с характерными масштабами изменения траекторий главных напряжений, что сводит количество неизвестных до четырех, так как два угла Эйлера в этом случае определяются автоматически. Скважинные исследования позволяют сравнительно легко оценивать вертикальное напряжение, определяемое в рамках гипотезы как вес вышележащих пород. С определением оставшихся параметров напряженного состояния остаются некоторые проблемы. Так, скважинные исследования позволяют выполнить прямую оценку лишь одного такого параметра – речь идет о прямом измерении значения минимального главного напряжения с выполнением тестов на приемистость или проведением мини-гидроразрыва пласта [Ward, Beique, 2000]. Остальные параметры напряженно-деформированного состояния могут быть оценены лишь косвенным методом, после решения обратной задачи реконструкции напряжений по различным наблюдаемым индикаторам [Ljunggren et al., 2003]. Важным источником информации о напряженном состоянии пород околоскважинного пространства являются возникающие при бурении вывалы и трещины растяжения [Zoback et al., 1986], позволяющие на соответствующих глубинах определять возможные значения главных горизонтальных напряжений и остающийся неизвестным угол Эйлера. Таким образом, скважинные исследования формально позволяют определить все параметры тензора напряжений, однако подход, основывающийся на анализе вывалов, требователен к аккуратной интерпретации скважинных исследований (являющейся сложной задачей с возможностью внесения субъективной ошибки) и может быть применен лишь в интервалах вывалообразования [Zoback et al., 2003]. В то же время, попытки распространить выполненные оценки на интервалы безаварийного бурения в рамках

существующих моделей [Prats, 1981] приводят к введению большого количества дополнительных параметров и резкой неустойчивости реконструированных напряжений по отношению к зашумлению входных данных [Zoback, 2007].

Указанные недостатки ведут к необходимости создания дополнительных подходов к интерпретации скважинных исследований для определения параметров тензора напряжений. В данной работе акцент сделан на скважинные исследования, позволяющие исследовать мелкие структурные нарушения, наблюдаемые в породах околоскважинного пространства, а именно, сдвиговые трещины, наблюдаемые с помощью расширенного комплекса ГИС. Результатом работы явился новый подход к интерпретации скважинных исследований, позволяющий оценивать параметры напряженного состояния по характеристикам трещин в породах околоскважинного пространства.

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

Создание 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.

Защищаемые положения

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 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, несущих 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 профилей 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 27 печатных работ, из которых 2 статьи в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации, и 7 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), 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 (Макухари, 2016, 2017).

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, 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», в особенности, к.ф.-м.н. А.П. Рощектаеву, к.ф.-м.н. А.А. Пустовских и д.г.-м.н. М.А. Тугаровой 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 E.-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.

Глава 1. Современные методы использования скважинных исследований для реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния

В последнее время в области разработки месторождений углеводородов возникает все больше прикладных задач, связанных с геомеханикой. Рассматриваются две группы геомеханических параметров – физико-механические свойства пород, слагающих коллектор, и напряженно-деформированное состояние, в котором эти породы находятся. Источниками информации касательно этих параметров служат разномасштабные исследования, проводимые на этапе освоения месторождения – сейсмические, скважинные и лабораторные исследования. При этом часто только скважинные исследования позволяют делать заключение о параметрах напряженно-деформированного состояния. Выполняется так называемая реконструкция профилей главных напряжений – оценка пространственных распределений главных значений тензора напряжений вдоль траектории скважины. Такая реконструкция позволяет успешно решать задачи расчета устойчивости ствола скважины – выбор оптимальной траектории скважины и условий бурения, – а также позволяет корректно ставить граничные условия при решении задач, связанных с гидроразрывом пласта, прогнозом эволюции фильтрационно-емкостных свойств пород в ходе разработки и другими задачами, возникающими на различных этапах освоения и разработки месторождения.

Кроме того, скважинные исследования позволяют, хоть и на небольшом пространственном масштабе, исследовать проявления тектонических процессов в верхних слоях земной коры. В связи с этим, наряду с промышленным бурением осуществляются и исследовательские программы бурения, примерами которых могут служить IODP (Integrated Ocean Drilling Program) и ICDP (International Continental Scientific Drilling Program). Среди проектов этих программ существуют проекты, нацеленные на тектонофизическое исследование различных регионов Земли (один из таких проектов – NanTroSEIZE, Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment – подробно рассмотрен в четвертой главе работы). В

рамках таких проектов на скважинах выполняется расширенный комплекс геофизических исследований, позволяющий исследовать напряженное состояние изучаемых регионов.

В главе представлены основные методы интерпретации данных ГИС для реконструкции профилей главных напряжений, однако перед их рассмотрением необходимо представить некоторые задачи, встречающиеся на практике при разработке месторождений углеводородов, которые могут показать, к каким геомеханическим параметрам чувствительны практические задачи.

1.1 Практические задачи геомеханики месторождений углеводородов

1.1.1 Расчет устойчивости ствола скважины

Расчет устойчивости ствола скважины является одним из наиболее очевидных приложений геомеханических исследований для решения практически значимой задачи. Задача расчета устойчивости формулируется следующим образом: необходимо определить оптимальные параметры бурения – в первую очередь, давление бурового раствора и траекторию ствола скважины – для того, чтобы не допустить разрушения пород в околоскважинном пространстве [Bradley, 1979; Zoback, 2007].

Такая задача может быть решена, если выполнена оценка напряженного состояния пород, через которые должна пройти скважина, а также известен критерий разрушения этих пород. В общем виде условие разрушения может быть записано как:

$$F\left[\sigma_{ij}(\vec{r}), C_k(\vec{r})\right] = 0, \quad (1.1)$$

где F – функция, описывающая критерий разрушения среды, связывающая между собой пространственное распределение компонент тензора напряжений $\sigma_{ij}(\vec{r})$ с прочностными параметрами среды $C_k(\vec{r})$, \vec{r} – радиус-вектор рассматриваемой точки пространства; индексы i, j изменяются от 1 до 3, а индекс k изменяется от 1

до числа прочностных параметров, характеризующих среду. В явном виде выражение (1.1) может быть выписано, например, для решения классической задачи Кирша для концентрации напряжений вокруг кругового отверстия [Kirsch, 1898]. В качестве граничных условий используется двухосное сжатие (два перпендикулярных главных напряжения S_H и S_h , $S_H \geq S_h$) на бесконечно удаленных границах и давление на отверстии P_{mud} . При этом среда считается пороупругой, насыщенной жидкостью под давлением P_{por} [Jaeger, Cook, 1979]. Схема решаемой задачи показана на рисунке 1.1.

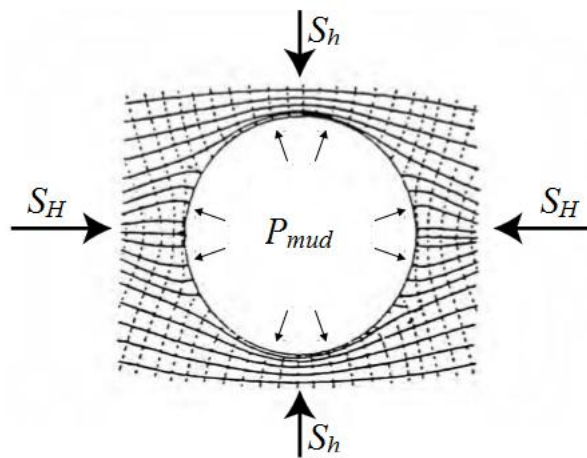


Рисунок 1.1 Концентрация напряжений вокруг цилиндрического отверстия. Вне отверстия указаны траектории главных напряжений. По [Kirsch, 1898] с изменениями.

Такая задача соответствует исследованию концентрации напряжений вокруг вертикальной скважины, вскрывающей пласт, характеризуемый поровым давлением P_{por} и горизонтально направленными тектоническими напряжениями S_H и S_h , при этом давление бурового раствора P_{mud} . Поле напряжений в окрестностях такого отверстия определяется как [Jaeger, Cook, 1979]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + (P_{mud} - P_{por}) \frac{R^2}{r^2} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\vartheta, \\ \sigma_\vartheta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - (P_{mud} - P_{por}) \frac{R^2}{r^2} - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\vartheta, \\ \tau_{r\vartheta} = -\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2\vartheta, \\ \sigma_H = S_H - P_{por}, \quad \sigma_h = S_h - P_{por}. \end{array} \right. \quad (1.2)$$

Здесь r и ϑ – координаты полярной системы координат с началом, совпадающим с центром отверстия, угол ϑ отсчитывается от направления на S_H ; R – радиус отверстия. Вместо полных напряжений S_H и S_h используются эффективные напряжения σ_H и σ_h , являющиеся, в соответствии с теорией Био, разностями между полными напряжениями и поровым давлением. Значения σ_r , σ_ϑ и $\tau_{r\vartheta}$ представляют собой соответствующие компоненты тензора эффективных напряжений в окрестности скважины. В рамках гипотезы о субвертикальности одной из главных осей тензора напряжений (более подробно рассмотренной в разделе 1.2) тензор напряжений, возникающий в окрестности рассматриваемой скважины, может быть описан как:

$$\sigma_{ij} = \begin{Bmatrix} \sigma_V & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r & \tau_{r\vartheta} \\ 0 & \tau_{r\vartheta} & \sigma_\vartheta \end{Bmatrix}, \quad (1.3)$$

где σ_V – вертикальное напряжение, действующее на глубине рассматриваемого отверстия. Для известного тензора (1.3) можно найти главные напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 (здесь и далее будет использоваться правило нумерации $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, сжимающие напряжения считаются положительными), которые могут быть использованы в критерии (1.1). Так, на практике широко распространено использование критерия неразрушения, соответствующего линейному критерию Кулона-Мора для главных напряжений [Jaeger, Cook, 1979]:

$$\sigma_1 \leq \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (1.4)$$

где введены прочностные параметры – коэффициент сцепления C и угол внутреннего трения породы φ . Вместо коэффициента сцепления также часто используется величина прочности на одноосное сжатие UCS (для линейного критерия Кулона-Мора $UCS = 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$). Выражение (1.4) отвечает условию

необразования вывалов в окрестности скважины, и его необходимо дополнить условием необразования трещин растяжения:

$$\sigma_3 \geq UTS, \quad (1.5)$$

где введен еще один прочностной параметр среды – прочность на одноосное растяжение UTS .

Таким образом, задача расчета устойчивости ствола скважины сводится к тому, чтобы определить такую траекторию бурения и вес бурового раствора P_{mud} , чтобы условия (1.4) и (1.5), в которых участвуют главные напряжения тензора (1.3), рассчитанные по выражениям (1.2), были удовлетворены вдоль всей траектории скважины. По виду выражения (1.2) ясно, что для решения этой задачи необходимо предварительно определить граничные условия на напряжения S_H и S_h , поровое давление P_{por} , а также направление действия максимального горизонтального напряжения.

1.1.2 Гидроразрыв пласта

Различные аспекты задач, связанных с гидроразрывом пласта также имеют прямое отношение к геомеханике и значениям параметров, характеризующих тензор напряжений.

В первую очередь необходимо отметить работу [Афанасьев и др., 2009], в которой было рассмотрено, насколько сильно на геометрию трещины гидроразрыва пласта влияет одномерная геомеханическая модель, содержащая

профили упруго-прочностных свойств и профили главных напряжений. В этой работе для анализа использовалась модель упругой среды, предложенная в работе [Prats, 1981]. Было показано, что данных имеющихся скважинных исследований по 15 скважинам месторождения и 32 скважино-операциям с ГРП недостаточно, чтобы определить значение максимального горизонтального напряжения. При этом показано, что различные интерпретации одномерной геомеханической модели приводят к расхождениям в оценке геометрических параметров трещины ГРП вплоть до нескольких раз.

Геомеханические параметры также могут оказывать влияние на форму трещины гидроразрыва – как показано в работе [Hossain et al., 1999], трещины ГРП могут иметь не только классическую плоскую форму, но также и так называемые Т-образную и Н-образную формы. Эти формы могут реализоваться из-за возможного «запирания» трещины при приближении к границе между слоями, обладающими существенно различающимися упруго-прочностными свойствами. При определенных условиях трещина может продолжить распространяться не по первоначальной траектории, а по самой границе между слоями. Рассматривается возможность возникновения трещин таких типов на границе между слоями с резко контрастирующими механическими свойствами или значениями горизонтальных напряжений и определяется необходимый контраст этих свойств [Hou et al., 2014; Дубиня, 2015]. Таким образом, значения главных напряжений определяют не только геометрические параметры трещины ГРП, но и ее форму.

Особенно сильно значения главных напряжений, в первую очередь, контраст между горизонтальными напряжениями, влияют на траекторию развития трещины ГРП. Это проявляется в процессе развития трещины ГРП в поле напряжений, возмущенном в ходе разработки месторождения. В частности, можно рассмотреть развитие трещины автоГРП – трещины, вызванной переводом скважины из добывающего режима в нагнетательный. В этом случае повышенное давление на скважине вызывает возникновение и дальнейший рост трещины ГРП,

распространяющейся в неоднородном поле напряжений, измененном вследствие работы соседних скважин (Рисунок 1.2) [Nagoort et al., 1980].

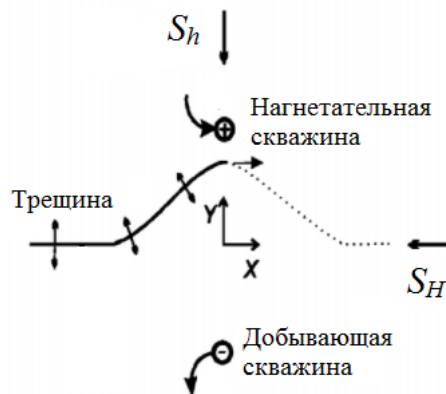


Рисунок 1.2 Схема искривления траектории развития трещины. По [Berchenko, Detournay, 1997] с изменениями.

Существуют свидетельства того, что контраст горизонтальных напряжений влияет на искривление траектории такой трещины [Berchenko, Detournay, 1996]. Кроме того, об этом свидетельствуют как результаты численного моделирования [Trimonova, Dubinya, 2015a; Trimonova, Dubinya, 2015b; Тримонова, Дубиня, 2015], так и лабораторного эксперимента [Тримонова и др., 2016]. Ясно, что учет эффекта искривления траектории трещины автоГРП необходим для корректного планирования разработки месторождения.

Наконец, контраст горизонтальных напряжений играет важную роль в вопросе переориентации трещины повторного гидроразрыва. Представленная в работе [Elbel, Mask, 1993] модель распространения трещины гидроразрыва в скважине, в которой уже присутствует трещина ГРП, допускает увеличение продуктивности скважины, при этом рассматриваются случаи, в которых начальная траектория трещины повторного гидроразрыва перпендикулярна траектории уже существующей (Рисунок 1.3) [Hidayati et al., 2001]. В этом случае в окрестности трещины первичного гидроразрыва возникает область переиндексации горизонтальных напряжений (эта область – эллипс на рисунке 1.3), то есть направление действия максимального напряжения становится направлением действия минимального и наоборот. Размеры такой области зависят от контраста между горизонтальными напряжениями и режима работы скважины.

Существуют экспериментальные [Siebrits et al., 2000] и теоретические [Li, 2007] исследования процесса распространения такой трещины. Исследование влияния контраста горизонтальных напряжений на возможность переориентации трещины повторного гидроразрыва было выполнено автором в работах [Дубиня, 2012; Дубиня, 2013].

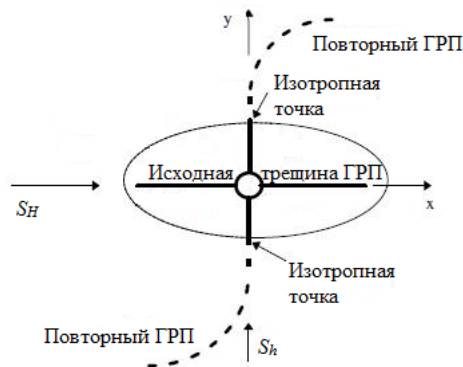


Рисунок 1.3 Схема переориентации трещины повторного ГРП. По [Hidayati et al., 2001] с изменениями.

Таким образом, проблема определения значений главных напряжений является в значительной степени актуальной для многих задач, связанных с гидроразрывом пласта.

1.1.3 Эволюция фильтрационных свойств пород в ходе разработки

Проблемы геомеханического характера также проявляются при решении задачи оптимизации режима работы скважины. Особенно ярко этот эффект проявляется при разработке месторождений трещинно-порового типа: наблюдается снижение продуктивности скважин, которое не прогнозируется расчетами на основе фильтрационных моделей. Динамический расчет напряженно-деформированного состояния с учетом фильтрации флюидов позволяет учесть факторы, которые могут внести дополнительный вклад в процессы нефтедобычи. Специфическая структура породы приводит к тому, что между напряженно-деформированным состоянием среды и ее фильтрационными свойствами возникает сложная нелинейная связь. Из-за этого при разработке

месторождения в ходе построения гидродинамической модели возникает необходимость в определении динамики поля напряжений.

Пример такого исследования описан в работе [Zoback, 2007]. Автор приводит результаты оценки изменения проницаемости при снижении порового давления для месторождения в пределах Мексиканского залива. На основе проведенных лабораторных исследований по оценке изменения проницаемости образцов керн построены зависимости проницаемости от изменения эффективного давления. Приведены расчеты накопленной добычи нефти с учетом изменения проницаемости в процессе снижения пластового давления. Авторы [Jihoon, Moridis, 2012] рассматривают математическую модель совмещения расчетов для месторождений с естественной трещиноватостью. Показано, что зависимость между течением флюида и изменением напряженного состояния имеет нелинейный характер. Расчеты показывают, что недоучет деформаций трещин за счет изменения поля напряжений приводит к ошибке в расчете потока флюида.

В работе [Lukin et al., 2015] приведены результаты лабораторных экспериментов по определению влияния изменения напряженно-деформированного состояния на проницаемость образцов горной породы для одного из месторождений России. Был проведен эксперимент для 15-ти образцов по трем циклам нагружения. Основное отличие между циклами состояло в том, что на первом цикле боковая нагрузка не меняется, в то время как во втором и третьем изменения происходят с разной интенсивностью. Исследования показали, что уменьшение проницаемости при усилении нагрузки на образец наиболее часто происходит на втором и третьем цикле. Возможно, этот эффект обусловлен возникновением дополнительных касательных напряжений около микротрещин, расположенных непараллельно образующей керн. Касательные напряжения приводят к увеличению напряжений на кончиках микротрещин, вызывая их раскрытие. Таким образом, знание изменения главных напряжений в ходе разработки необходимо для корректной оценки эволюции проницаемости.

С другой стороны, как показано в работах [Dubinya et al., 2015; Дубиня и пр., 2015], не только изменение главных напряжений в ходе разработки, но и их значения перед ее началом оказывают значительное влияние на закономерности эволюции проницаемости пород – результаты численного моделирования процесса разработки месторождений на синтетических моделях с учетом связи напряженного состояния и проницаемости показывают, что изменение начальных значений горизонтальных напряжений приводит к существенному изменению ожидаемой накопленной добычи (Рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 Влияние горизонтального напряжения на накопленную добычу, результаты численного моделирования на синтетических моделях. Точками обозначены результаты расчетов, сплошной линией – экспоненциальная линия тренда. По [Dubinya et al., 2015] с изменениями.

Следует отдельно отметить, что описанный эффект особенно сильно выражен в коллекторах трещиноватого типа. В работе [Dubinya et al., 2015] представлена теоретическая модель для среды, характеризующейся системами параллельных трещин, основанная на известной модели деформирования [Barton et al., 1985]. На этой модели показан естественный факт – если проницаемость породы обусловлена имеющимися в породе трещинами, то максимальное влияние на изменение проницаемости оказывает изменение раскрытия трещин, на что, в первую очередь, влияет изменение напряжения, направленного по нормали к трещинам преобладающей системы.

Таким образом, результаты исследований показывают, что значения горизонтальных напряжений сильно влияют на накопленную добычу при

разработке месторождения. Учет этого явления позволяет более корректно выбирать такие параметры, как расстановка скважин и режим их работы.

Поле напряжений, действующих в пласте, подчиняется определенным законам, установленным в рамках механики флюидонасыщенных пород [Coussy, 2004]. В первую очередь, компоненты тензора эффективных напряжений σ_{ij} должны удовлетворять уравнениям равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i = 0, \quad (1.6)$$

где ρb_i – компоненты вектора массовых сил, действующих в теле. К таким силам можно отнести, например, силу тяжести. При работе с флюидонасыщенными средами необходимо использовать понятие эффективных напряжений, так как напряжения σ_{ij} , характеризующие некоторый объем такой среды, зависят как от напряженного состояния породы вмещающей флюид (тензора полных напряжений S_{ij}), так и от давления флюида (P_{por}). В простейшем случае связь между полными и эффективными напряжениями может быть установлена как:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - \alpha_{ij} P_{por}, \quad (1.7)$$

где α_{ij} – компоненты тензора коэффициентов Био-Виллиса [Biot, 1962; Chesnokov et al., 2005], зависящего от различных свойств среды. Здесь и далее для полных напряжений используется обозначение S с соответствующим индексом, для эффективных – σ с соответствующим индексом. Таким образом, при решении уравнений равновесия (1.6) необходимо принимать во внимание неоднородности поля давления насыщающего породу флюида: при подстановке выражения (1.7) в уравнения (1.6) возникают члены, зависящие от градиента давления P_{por} . Поле давления P_{por} , в свою очередь, может быть определено на основании решения уравнения пьезопроводности – параболического дифференциального уравнения на P_{por} , в коэффициенты которого входят фильтрационно-емкостные и механические свойства среды [Coussy, 2004]. Исследование гидродинамических

процессов, протекающих в пласте, не является основной задачей, поставленной в данной работе.

Если рассматривать только задачу определения напряжений (при известных массовых силах, поле давления насыщающего флюида и тензоре коэффициентов Био-Виллиса), можно заметить, что система уравнений равновесия (1.6) содержит 3 уравнения и 6 неизвестных (симметричность тензора напряжений $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ обеспечивает выполнение закона сохранения момента импульса [Cousy, 2004]). В связи с этим, необходимо рассмотрение дополнительных уравнений, связывающих компоненты тензора напряжений между собой.

Эффективные напряжения, действующие в пласте, в соответствии с реологическими законами, характеризующими среду, связаны с тензором деформаций ε_{ij} . Для упругих тел такая связь может быть записана как:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (1.8)$$

где C_{ijkl} – компоненты тензора упругих модулей. Для сред с более сложной реологией соответствующая связь усложняется. Поле деформаций, связанное полем напряжений, определенным из (1.6), через связь (1.8), должно удовлетворять уравнениям совместности деформаций Сен-Венана:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \varepsilon_{ii}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jj}}{\partial x_i^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{ii}}{\partial x_j \partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\frac{\partial \varepsilon_{jk}}{\partial x_i} + \frac{\partial \varepsilon_{ik}}{\partial x_j} + \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x_k} \right), \end{array} \right. \quad (1.9)$$

Дополнение уравнений равновесия (1.6) условиями (1.9), 6 из которых независимы между собой, позволяет получить систему из 9 независимых дифференциальных уравнений с 9 неизвестными (к 6 компонентам тензора напряжений при использовании (1.9) добавляется 3 компоненты вектора смещения, через который могут быть выражены деформации ε_{ij}). Таким образом, система дифференциальных уравнений (1.6), (1.9) может быть решена, если

корректным образом поставлены граничные и начальные условия. Частичное решение задачи определения граничных условий для задачи (1.6), (1.9) является одной из приоритетных целей, поставленных в данной работе.

Помимо описанных в разделе задач расчета устойчивости ствола скважины, гидроразрыва и эволюции фильтрационно-емкостных свойств, геомеханические факторы играют важную роль в задачах выноса песка, прогноза зон трещиноватости и прочих. В этих задачах значения главных напряжений также играют существенную роль, анализ их влияния может быть найден в работе [Zoback, 2007]. Дальнейшая часть диссертационной работы посвящена оценке этих параметров по данным скважинных исследований.

1.2 Методы оценки параметров напряженного состояния

В предыдущем разделе было показано, что параметры напряженного состояния оказывают существенное влияние на процессы, рассматриваемые при освоении и разработке месторождений углеводородов. В данном разделе представлен обзор основных методов определения параметров напряженно-деформированного состояния по различным исследованиям.

Однако, прежде чем переходить к обзору методов оценки параметров напряженного состояния, необходимо сформулировать, какие параметры необходимо рассматривать. Известно [Родионов, 1986; Ребецкий, 2007], что для полного определения напряженного состояния среды необходимо в каждой ее точке определить шесть независимых параметров – это могут быть или независимые компоненты тензора напряжений (здесь и далее предполагается, что тензор напряжений симметричен, в среде отсутствуют внутренние моменты), или набор из трех главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 (по-прежнему используется правило нумерации $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, сжимающие напряжения считаются положительными) и ориентация трех главных осей. Три главных напряжения соответствуют трем главным значениям тензора напряжений σ_{ij} , существующим, если этот тензор симметричен и положительно определен [Ландау, Лифшиц, 2003]. Так как в

рамках рассматриваемых проблем геомеханики это условие выполняется [Zoback, 2007], главные напряжения могут быть использованы в качестве параметров, характеризующих напряженное состояние среды. Наряду с ними, необходимо найти в каждой точке среды направления главных осей тензора напряжений, которые могут быть определены с помощью трех независимых углов Эйлера [Ребецкий, 2007], равных углам между осями глобальной системы координат и главными осями тензора напряжений. В качестве такой глобальной системы координат будет использоваться система координат, связанная с дневной поверхностью Земли, одна из осей направлена на север, вторая направлена восток, третья сонаправлена с направлением действия силы тяжести, тем самым создается правая тройка направляющих осей. На масштабах, рассматриваемых в работе, можно пренебречь кривизной Земли [Zoback, 2007], так что описанная тройка векторов задает ортогональную систему координат. Углы Эйлера будут отсчитываться именно от такой глобальной системы координат.

В задачах геомеханики месторождений углеводородов часто используется предположение о субвертикальности одной из главных осей тензора напряжений. Это предположение обосновывается тем, что рассматриваются глубины, существенно меньшие характерного пространственного масштаба искривления траекторий главных напряжений [Zoback, 2007]. Такая гипотеза несколько сужает пределы применимости получаемых результатов, однако эти результаты, если говорить о скважинных исследованиях, все равно имеют сравнительно небольшую глубинность (первые километры) и позволяют судить лишь о верхних слоях земной коры. В этом случае, один из углов Эйлера, определяемый как угол между вертикальной главной осью тензора тектонических напряжений и третьей осью глобальной системы координат, равен нулю. В то же время, тройка главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 будет соответствовать тройке напряжений σ_V , σ_H и σ_h , где σ_V – вертикальное напряжение, σ_H – максимальное горизонтальное напряжение, σ_h – минимальное горизонтальное напряжение; направления действия σ_H и σ_h перпендикулярны друг другу. Таким образом, из трех углов Эйлера остается лишь

один, в дальнейшем в его качестве будет использоваться азимут действия максимального горизонтального напряжения θ – угол между направлением на север (направлением первой оси глобальной системы координат) и направлением действия максимального горизонтального напряжения σ_H . Таким образом, количество параметров, описывающих напряженное состояние некоторой точки среды, уменьшается до четырех.

Тем не менее, при рассмотрении задач геомеханики месторождений углеводородов необходимо учитывать насыщающий среду флюид. В рамках теории пороупругости [Biot, 1962] влияние флюида на напряженное состояние может быть описано с помощью эффективных напряжений. Таким образом, для полного описания напряженного состояния среды необходимо определить пространственные распределения шести параметров: трех главных напряжений (полных S_V , S_H и S_h или эффективных σ_V , σ_H и σ_h), азимута максимального горизонтального напряжения θ и порового давления P_{por} . Поля этих величин необходимо искать внутри рассматриваемого объема.

Далее представлен обзор некоторых подходов к реконструкции этих параметров по различным исследованиям.

1.2.1 Тектонофизические методы оценки напряжений

Прежде чем подробно изучить подходы к реконструкции параметров напряженного состояния собственно по скважинным данным, можно рассмотреть тектонофизические подходы, не нацеленные непосредственно на геомеханику месторождений углеводородов. Подробное описание различных тектонофизических подходов представлено в работе [Ребецкий, 2007].

В основе тектонофизических подходов лежит использование структурно-кинематических данных о разрывах и трещинах для восстановления параметров тензоров, характеризующих напряженно-деформированное состояние среды. Следуя классификации [Ребецкий, 2007], тектонофизические подходы могут быть разделены на три группы: методы структурного анализа, использующие

положения механики разрушения для определения ориентации главных осей тензора напряжений; методы дислокационного анализа, использующие положения теории скольжения для определения ориентации главных осей тензора напряжений и коэффициента Лоде-Надаи μ_σ , определяющего вид тензора напряжений:

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (1.10)$$

Коэффициент Лоде-Надаи изменяется в пределах от -1 до 1, при этом его равенство единице означает, что среднее главное напряжение равно наибольшему, равенство минус единице соответствует равенству между средним и минимальным главными напряжениями.

В качестве третьей группы можно выделить подходы расчета квазипластических деформаций, в рамках которых рассматривается процесс накопления необратимых деформаций при движении вдоль макроскопических трещин и разрывов.

Надо отметить, что рассматриваемые методы, в большинстве своем, используют информацию об очагах землетрясений и не всегда могут быть применены для месторождений углеводородов, в частности, если изучаемые объекты не находятся в сейсмоопасных зонах. Согласно оценкам [Heidbach et al., 2008] пятая часть данных о направлениях главных осей в Мировой Карте Напряжений (World Stress Map) получена по скважинным данным, тогда как подавляющее большинство результатов получено с использованием тектонофизических подходов. Так, в работе [Zoback, 1992] на основе данных о механизмах очагов одиночных землетрясений, выполнена реконструкция современных напряжений для большинства крупнейших сейсмоопасных областей.

С другой стороны, при решении задач геомеханики месторождений, даже находящихся в сейсмически спокойных зонах, тектонофизические методы также

могут быть использованы для оценки тех или иных параметров напряженного состояния. В этом случае источником исходной информации могут служить сейсмические исследования, по результатам которых могут быть определены положения и ориентации разломов в масштабах месторождения. В частности, [Сим, 2000] ориентация вертикальных разломов может быть использована для реконструкции полей современных тектонических напряжений.

Тем не менее, основной целью работы является именно использование скважинных данных для реконструкции параметров напряженного состояния. При этом, однако, в рамках предлагаемого подхода, данные о трещиноватости, получаемые при помощи внутрискважинных исследований, используются, как и в перечисленных выше подходах, для восстановления значений напряжений.

1.2.2 Использование скважинных исследований

В связи с тем, что на этапах освоения и разработки месторождений возникают практически важные задачи геомеханики, требующие понимания напряженного состояния пород околоскважинного пространства (Раздел 1.1), достаточно сильно развиты методы реконструкции параметров напряженного состояния по результатам скважинных исследований. Далее будут разобраны некоторые из этих методов, относящиеся к наиболее широко используемым на практике [Zoback, 2007].

Как было указано выше, будут рассматриваться следующие параметры, характеризующие напряженное состояние: тройка главных напряжений (полные S_V , S_H и S_h или эффективные σ_V , σ_H и σ_h), азимут максимального горизонтального напряжения θ и поровое давления P_{por} . Поскольку скважинные исследования позволяют судить лишь об условиях, в которых пребывают породы околоскважинного пространства, оказывается удобным говорить о профилях этих параметров: их пространственных распределений вдоль ствола скважины с набором исследований.

Вертикальное напряжение является сравнительно простым параметром для оценки. Профиль вертикального напряжения может быть рассчитан, если известна траектория скважины и профиль плотности окружающей скважину породы, поскольку вертикальное напряжение на заданной глубине обусловлено действием веса вышележащих пород. В связи с этим, для расчета вертикального напряжения на глубине z используется соотношение

$$S_v(z) = \int_0^z \rho(z) g dz, \quad \sigma_v(z) = S_v(z) - \alpha(z) P_{por}(z), \quad (1.11)$$

где $\rho(z)$ – профиль плотности пород околоскважинного пространства; $\alpha(z)$ – профиль коэффициента Био, меняющегося для горных пород от 0 до 1; $P_{por}(z)$ – профиль порового давления. Считается, что в околоскважинном пространстве все эти параметры не зависят от горизонтальных координат. Необходимо также отметить, что если скважина не вертикальна, то координата вдоль ее траектории не совпадает с глубиной. В таких случаях предполагается вертикальная трансверсальная изотропия среды; глубинные профили механических свойств могут быть связаны с профилями, полученными в результате выполнения работ ГИС в таких скважинах. Для простоты в дальнейшем будут рассматриваться только вертикальные скважины, поскольку “невертикальность” скважин не требует принципиальных изменений разрабатываемого подхода.

Профили $\rho(z)$ и $\alpha(z)$ относятся не к параметрам напряженного состояния, а к реологическим свойствам пород околоскважинного пространства и не являются основными исследуемыми в работе характеристиками. Описание основных методов их поиска и реконструкции по скважинным и лабораторным данным может быть найдено, например, в работе [Zoback, 2007].

Одним из наиболее распространенных способов построения профиля давления насыщающей жидкости является метод, предложенный в работе [Eaton, 1972]. Согласно этому методу давление жидкости определяется из соотношения:

$$P_{por}(z) = S_V(z) - (S_V(z) - P_{por}(z)) \cdot a \cdot \left(\frac{DTP}{DTP_{norm}} \right)^n. \quad (1.12)$$

Здесь DTP – интервальное время пробега продольной волны, DTP_{norm} – трендовое значение этого параметра. Параметры a и n определяются как величины, при которых P_{por} совпадает со значением, определенным прямыми способами на интервалах притока. Время пробега продольной волны определяется по результатам интерпретации акустического каротажа, наличие которого является одним из основных условий возможности оценки профиля давления насыщающего породу флюида.

В свою очередь, горизонтальные напряжения обусловлены действием не только гравитационных, но и горизонтально направленных тектонических сил, значения и азимутальные направления действия которых неизвестны. И, хотя направления тектонических сил могут быть оценены по данным ГИС, значения горизонтальных напряжений определить с высокой точностью не удастся. Величины минимальных горизонтальных напряжений могут быть количественно определены только на конкретных глубинах с использованием прямых методов, например, таких как метод гидроразрыва (ГРП) или тесты на утечки (LOT , leak-off test), причем только при условии, что минимальное главное напряжение направлено горизонтально. Надо отметить, что, согласно [Zoback, 2007, p. 206], прямые измерения минимального напряжения с помощью гидроразрыва являются единственным применимым на практике способом прямого измерения, дающим достоверные оценки вне зависимости от глубины.

В основе этих подходов лежит анализ функции давления на скважине от времени на протяжении процесса развития трещины от скважины. Впервые основные положения подхода были сформулированы в работе [Hubbert, Willis, 1957], где было обосновано, что трещина гидроразрыва будет распространяться в направлении, перпендикулярном направлению действия минимального главного напряжения σ_3 . Заключение, касающиеся значения минимального главного

напряжения были развиты в работе [Gaarenstroom et al., 1993], где было рассмотрено характерное поведение кривой давления в течение процесса развития трещины (Рисунок 1.5).

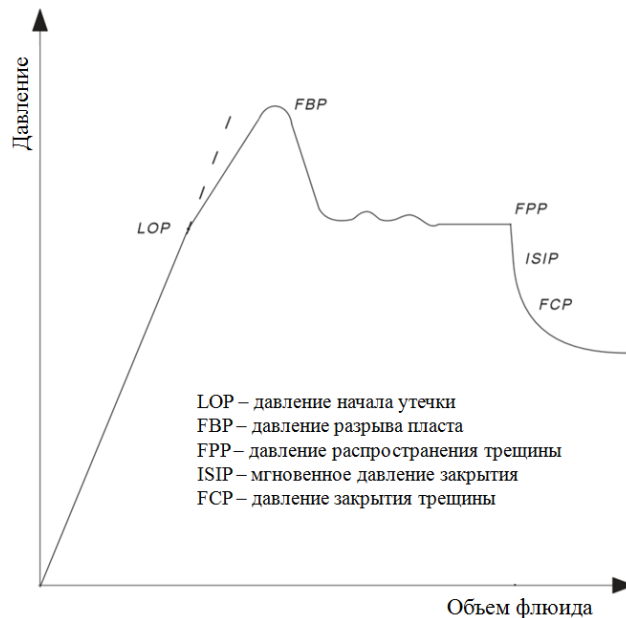


Рисунок 1.5 Схематическое поведение давления при проведении гидроразрыва или теста на приемистость. По [Gaarenstroom et al., 1993] с изменениями.

Согласно схеме, представленной на рисунке 1.5, давление закачиваемого флюида ведет себя нелинейно в течение процесса развития трещины: сначала происходит линейное его возрастание как функции от объема закачиваемого флюида (или времени, если происходит закачка с постоянным расходом). В определенный момент линейная зависимость нарушается из-за начала утечек (на рисунке 1.5 этому моменту начала утечек соответствует величина давления LOP). Разрыв породы происходит при достижении давления разрыва пласта FBP, после чего происходит уменьшение давления до величины FPP – давления распространения трещины. Согласно оценкам [Hickman, Zoback, 1983], эта величина уже является достаточно близкой к величине минимального главного напряжения σ_3 . Тем не менее, более точная оценка достижима после прекращения закачки и быстрого спада давления до величины мгновенного давления закрытия ISIP и дальнейшего спада до величины давления закрытия трещины FCP. В зависимости от условий проведения теста последние две величины могут быть близки к значению σ_3 на глубине проведения исследования [Zoback, 2007]. В

зависимости от тектонических условий в регионе эта величина соответствует или минимальному горизонтальному напряжению σ_h , или вертикальному напряжению σ_v .

Существует также подход к использованию данных о развитии трещин для оценки величины максимального горизонтального напряжения [Haimson, Fairhurst, 1969]. Согласно этому подходу, величина максимального горизонтального напряжения может быть определена по известным параметрам закачки, минимальному напряжению и прочности породы. В предложенном подходе в условие (1.5) подставляются главные значения тензора напряжений (1.3), компоненты которого определены на стенке скважины по выражениям (1.2) с условием $r = R$. При этом условие (1.5) переписывается как равенство, определяя минимальное значение напряжения, при котором происходит разрушение породы. Поскольку трещина гидроразрыва развивается перпендикулярно направлению действия минимального главного напряжения, рассматривается угол $\vartheta = 0^\circ$. В результате описанных операций можно получить следующие выражения для компонент тензора напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_r \Big|_{r=R, \vartheta=0} &= P_{mud} - P_{por}, \\ \sigma_\vartheta \Big|_{r=R, \vartheta=0} &= 3\sigma_h - \sigma_H - P_{mud} + P_{por}, \\ \tau_{r\vartheta} \Big|_{r=R, \vartheta=0} &= 0.\end{aligned}\tag{1.13}$$

Поскольку на грани развивающейся трещины гидроразрыва будут действовать напряжения σ_ϑ , критерий разрушения (1.5) позволяет определить максимальное горизонтальное напряжение σ_h как:

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_{mud} + P_{por} - UTS.\tag{1.14}$$

Если все параметры, стоящие в этом выражении справа, определены по прочим исследованиям, оно позволяет найти значение максимального горизонтального напряжения на глубине развития трещины. Несмотря на эффективность этого подхода при практических работах, проводимых на малых

глубинах [Haimson, 1987], он имеет ограниченную применимость – требуется отсутствие вывалов, высокая прочность пород, малые глубины, так что в большинстве практических задач геомеханики месторождений углеводородов этот подход неприменим для определения значения максимального горизонтального напряжения [Zoback, 2007]. Таким образом, определение значений горизонтальных напряжений и, более того, их профилей вдоль ствола скважины $\sigma_H(z)$ и $\sigma_h(z)$, по результатам интерпретации скважинных исследований остается наиболее сложной задачей ввиду отсутствия стандартных прямых способов измерения σ_H и точечного характера прямых способов измерения σ_h : операции миниГРП и тесты на приемистость позволяют определить значение напряжения только на глубине проведения.

1.3 Косвенная оценка параметров напряженного состояния

Как было отмечено в предыдущем разделе, наиболее сложными для оценки являются параметры, характеризующие напряженное состояние в горизонтальной плоскости – профили горизонтальных напряжений $\sigma_H(z)$ и $\sigma_h(z)$, а также азимут максимального горизонтального напряжения θ . Величина $\sigma_h(z)$ может быть определена лишь на некотором конечном множестве глубин z_i , на которых были проведены операции миниГРП, ГРП или тесты на приемистость. Прямые методы измерения $\sigma_H(z)$ также существуют лишь на ограниченном наборе глубин, обладая, при этом, узкой областью применимости, не покрывающей весь спектр задач геомеханики месторождений углеводородов. В связи с этим видна актуальность проблемы поиска методов реконструкции указанных параметров по скважинным исследованиям, а также необходимость формирования подхода к экстраполяции получаемых оценок параметров напряженного состояния на интервалы, в которых методы реконструкции могут быть неприменимы.

1.3.1 Анализ проявлений при бурении

Существуют различные способы оценки параметров напряженного состояния по данным скважинных исследований. Достаточно подробное описание этих подходов может быть найдено в обзорной работе [Ljunggren et al., 2003], в которой рассмотрены основные способы реконструкции напряжений, в том числе, и по скважинным данным. В работе отмечено, что на тот момент (и до сих пор) одним из наиболее часто применяемых на практике подходов является методика анализа проявлений при бурении – вывалов и трещин растяжения, – предложенная в работе [Zoback et al., 1986] и в дальнейшем развиваемая до состояния, описанного в работе [Zoback et al., 2003].

В основе этого подхода лежит изучение процесса разрушения горной породы, вызванного бурением в ней скважины. Как показано в разделе 1.1.1, при бурении вокруг сечения скважины возникает концентрация напряжений, описываемая выражениями (1.2). Величины возникающих напряжений определяются условиями бурения и значениями горизонтальных напряжений на рассматриваемой глубине. Если возникающих напряжений достаточно для того, чтобы преодолеть критерий (1.4), в окрестности скважины порода может разрушиться – образуется так называемый вывал, а сечение скважины теряет круговую форму (рисунок 1.6).

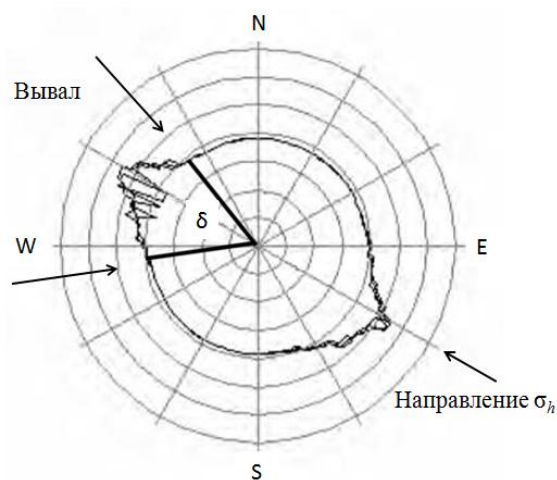


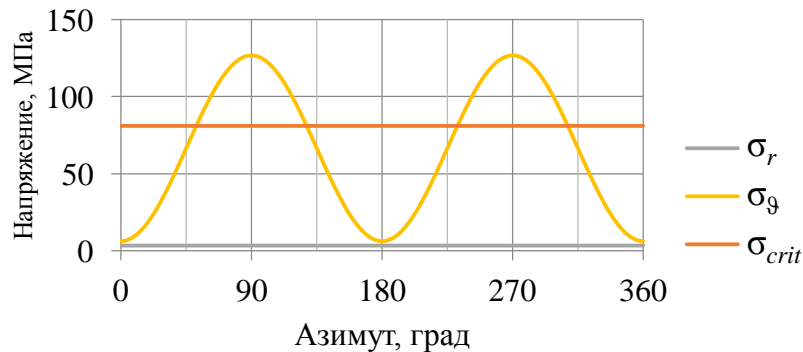
Рисунок 1.6 Вывал в окрестности скважины. По [Zoback et al., 2003] с изменениями.

На рисунке 1.6 изображено сечение скважины горизонтальной плоскостью. Видно, что на симметричных участках круговое сечение сильно искажается. Это искажение максимально в направлении действия минимального горизонтального напряжения и может быть описано с помощью угла δ , представляющего угловую меру дуги разрушенной породы.

Для математического описания этого явления используются выражения (1.2), переписанные для границы скважины – $r = R$:

$$\begin{cases} \sigma_r = (P_{mud} - P_{por}), \\ \sigma_{\vartheta} = (\sigma_H + \sigma_h) - (P_{mud} - P_{por}) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\vartheta, \\ \tau_{r\vartheta} = 0. \end{cases} \quad (1.15)$$

Соответствующие распределения главных напряжений σ_{ϑ} и σ_r как функции от азимутального угла изображены на рисунке 1.7.



Рисунке 1.7 Азимутальные распределения напряжений для условий: $P_{mud} = 35$ МПа, $P_{por} = 31.5$ МПа, $\sigma_H = 50$ МПа, $\sigma_h = 20$ МПа.

Видно, что напряжение σ_{ϑ} имеет максимумы при $\vartheta = 90$ и 270 градусов, то есть в направлении действия σ_h . Согласно условию неразрушения (1.4) вывал произойдет, если величина σ_1 (равная σ_{ϑ} в направлении действия σ_h) превысит пороговое значение σ_{crit} , определяемое как:

$$\sigma_{crit} = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (1.16)$$

Здесь в качестве σ_3 может быть использована разница $P_{mud} - P_{por}$, определяемая по первому выражению (1.15). Указанная величина также изображена на рисунке 1.7 сплошной горизонтальной линией. Таким образом, в представленном примере образуются два вывала шириной около 80° каждый.

Зная ширину вывала, прочностные характеристики породы, условия бурения, а также поровое давление и минимальное горизонтальное напряжение, можно рассчитать соответствующее этим условиям значение максимального горизонтального напряжения. Из второго выражения (1.15) можно определить σ_H :

$$\sigma_H = \frac{\sigma_3 - \sigma_h (1 + 2 \cdot \cos(2\vartheta)) + (P_{mud} - P_{por})}{(1 - 2 \cdot \cos(2\vartheta))}. \quad (1.17)$$

В это выражение можно подставить условие:

$$\sigma_3 = \sigma_{crit} = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (1.18)$$

достижимое при азимутальном угле, соответствующем границе вывала:

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2}, \quad (1.19)$$

где δ есть угол вывала (Рисунок 1.6). Таким образом, максимальное горизонтальное напряжение может быть определено из выражения:

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{crit} - \sigma_h (1 - 2 \cdot \cos \delta) + (P_{mud} - P_{por})}{(1 + 2 \cdot \cos \delta)}, \quad (1.20)$$

где σ_{crit} определяется из выражения (1.16), а угол вывала δ может быть оценен при анализе данных расширенного комплекса геофизических скважин.

Вообще говоря, угол δ может быть определен по любым данным ГИС, позволяющим определить геометрические характеристики сечения ствола скважины. Чаще всего для этой цели используются данные так называемых микроимиджеров – специальных устройств, позволяющих получать

азимутальную развертку различных свойств вмещающих скважину пород на любой глубине. Такие развертки принято называть микроимиджами. На практике используются акустический [Zemanek et al., 1970] и электрический [Chen et al., 1987] скважинные микроиджеры, позволяющие получать, соответственно, развертки акустических и электрических свойств пород околоскважинной зоны. Наличие вывалов существенно изменяет вид этих разверток, позволяя определять угол δ непосредственно из анализа развертки [Zoback et al., 2003]. Кроме того, анализ этих разверток позволяет определить азимутальный угол направления вывала, совпадающего, как видно из второго выражения (1.15) и рисунка 1.7, с направлением действия минимального горизонтального напряжения σ_h , что позволяет определить азимут θ максимального горизонтального напряжения.

В результате выражения (1.20) и (1.16) позволяют оценить значение максимального горизонтального напряжения на любой глубине, на которой присутствует вывал с определенной шириной и сделаны оценки параметров, входящих в эти выражения. Здесь можно заметить первый существенный недостаток этого подхода – он позволяет оценить максимальное горизонтальное напряжение только на тех интервалах глубин, на которых в ходе бурения образовались вывалы. Для интервалов безаварийного бурения этот метод не подходит.

Кроме того, в указанных выражениях критическую роль играют прочностные свойства пород – необходимо знать точные значения угла внутреннего трения и коэффициента сцепления. Для того, чтобы получить оценки этих характеристик на интервале вывалообразования, необходимо провести испытания на керновом материале и корректным образом построить модель механических свойств, что сопряжено с рядом проблем, связанных с разномасштабностью процессов, протекающих в околоскважинном пространстве и в лабораторных условиях [Bayuk et al., 2008].

Наконец, результаты этого подхода являются чувствительными к погрешности в определении ширины вывала. На рисунке 1.8 представлена оценка

максимального горизонтального напряжения в условиях $P_{mud} = 35$ МПа, $P_{por} = 31.5$ МПа, $\sigma_h = 20$ МПа, $C = 20$ МПа, $\varphi = 30^\circ$ (условия, для которых построен рисунок 1.7, дополнены характерными прочностными свойствами).

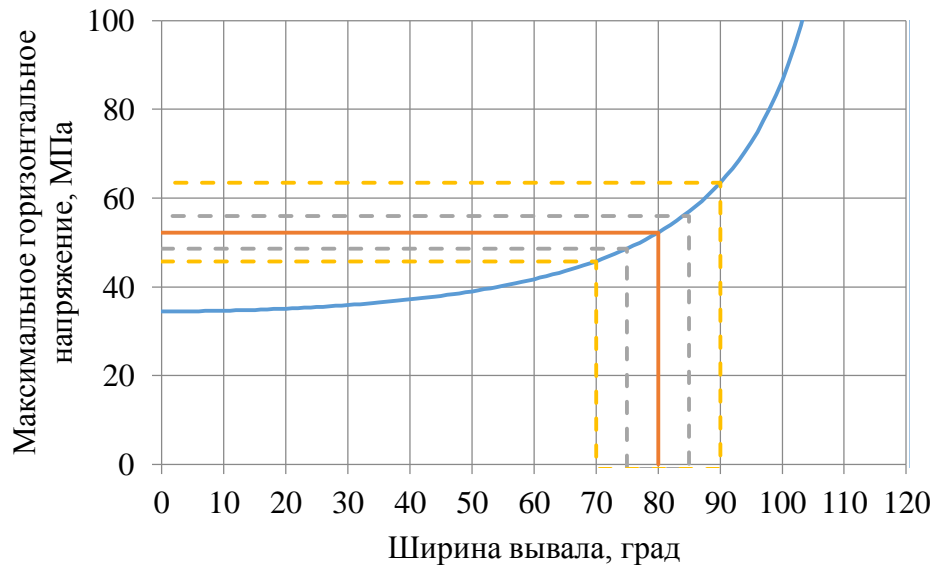


Рисунок 1.8 Чувствительность результатов реконструкции величины максимального горизонтального напряжения к ошибке, допущенной при интерпретации микроимиджа. Сплошной синей линией показана функция реконструированного параметра от ширины вывала, сплошной оранжевой показано «истинное» значение напряжения. Пунктирными линиями отображены возможные интервалы реконструированных напряжений при допущении ошибки: серым цветом ошибки в 5° , желтым – 10° .

Для рассмотренных условий в случае, если ширина вывала составляет 80° , то максимальное горизонтальное напряжение может быть оценено как 52.2 МПа. При этом ошибка в 5° в определении ширины вывала приводит к коридору возможных значений σ_H от 48.6 МПа до 55.9 МПа, ошибка в 10° ведет к коридору возможных значений 45.8 МПа – 63.4 МПа.

Из анализа рисунка 1.8 видно, что для меньших значений максимального горизонтального напряжения чувствительность метода ниже, для больших – существенно выше. Показано, что рассматриваемый метод достаточно чувствителен к ошибке в интерпретации микроимиджа, причем эта чувствительность носит нелинейный характер.

В результате можно заметить, что высокая чувствительность метода к ошибке в интерпретации данных ГИС ведет к необходимости его дополнения другими подходами, в особенности, подходами, позволяющими оценивать напряженное состояние в интервалах безаварийного бурения. Кроме того, видна необходимость формулировки подходов к экстраполяции результатов реконструкции на полный интервал глубин.

1.3.2 Прочие подходы к оценке горизонтальных напряжений

Описанные выше подходы к оценке минимального горизонтального напряжения с помощью миниГРП или тестов на утечки, а максимального – по анализу вывалов являются наиболее распространенной комбинацией методов, используемых на практике. Однако, вследствие указанных недостатков актуальна задача поиска новых методов оценки параметров напряженного состояния по различным геофизическим исследованиям. Ниже представлен обзор некоторых из таких развивающихся методов.

В первую очередь можно отметить метод оценки горизонтальных напряжений по данным акустического каротажа, имеющий наиболее долгую историю развития. В работе [Sinha, 1997] было рассмотрено распространение быстрых поперечных упругих волн в среде, находящейся в напряженном состоянии, характеризуемом значительной разницей между главными напряжениями. Было показано, что дисперсия таких волн сильно зависит от параметров напряженного состояния, а изменение частоты может быть напрямую выражено через упругие модули среды и значения главных напряжений. Такие выражения были переписаны для изменения фазовых скоростей рассматриваемых волн таким образом, что значения напряжений и упругих модулей могли быть выражены через регистрируемые характеристики волн. Пример применения этого подхода для оценки напряжений по скважинным исследованиям может быть найден в работе [Huang et al., 1999], где акустические исследования позволили определить направление действия максимального горизонтального напряжения, а

также значения горизонтальных напряжений на некотором интервале глубин. Сравнение результатов применения такого подхода с оценкой горизонтальных напряжений с помощью анализа вывалов представлено в работах [Sinha et al., 2008; Pistre et al., 2009], где показано, что в интервалах, в которых оба подхода применимы, результаты реконструкции напряжений согласуются между собой. Безусловным достоинством подхода к анализу дисперсии упругих волн является тот факт, что этот метод не нарушает структуру породы и может быть использован и в интервалах безаварийного бурения. Учитывая, что важным практическим результатом геомеханических исследований должно стать именно безаварийное бурение, в идеальном случае отсутствия вывалов по всему стволу этот подход будет предпочтителен. С другой стороны, этот подход по-прежнему страдает от ограниченной области применимости – для его успешной работы необходима существенная (вплоть до нескольких раз) разница между величинами горизонтальных напряжений. Это ведет к тому, что на практике этот подход используется нечасто, а в большинстве случаев он применяется лишь для оценки азимута максимального горизонтального напряжения [Zoback, 2007].

Другая группа методов основана на анализе температурного каротажа [Ito, Zoback, 2000; Ito et al., 2002]. В результате исследования поведения профиля температуры было обнаружено, что на некоторых глубинных интервалах наблюдаются локальные минимумы и максимумы температуры, которые могут быть объяснены только наличием на соответствующих глубинах значительного количества проницаемых или непроницаемых естественных трещин в породах околоскважинного пространства. Гипотеза связи между проницаемостью трещины и напряженным состоянием породы (которая будет подробно рассмотрена в разделе 2.1) позволила реконструировать профиль напряжений по профилю температур. К недостаткам этого метода можно отнести необходимость тщательного анализа профиля температуры и изучения каждого локального экстремума с поиском его возможных объяснений. Это ведет к возможности появления значительной ошибки при интерпретации скважинных данных,

приводящей к возможной недостоверности выполненных реконструкций. Кроме того, неоднозначность в величинах горизонтальных напряжений остается существенной.

Наконец, в последнее время активно развивается подход к использованию кернового материала для оценки напряженного состояния на глубине извлечения керна [Funato, Chen, 2005; Funato et al., 2012]. В основе этого подхода лежит исследование деформаций керна в лабораторных условиях. Представлен алгоритм, по которому могут быть определены деформации образца относительно его состояния до выбуривания, то есть условий, соответствующих текущему напряженно-деформированному состоянию пород околоскважинного пространства на глубине извлечения керна. В результате могут быть получены оценки горизонтальных напряжений на конечном интервале глубин – результат, близкий по характеру к оценкам напряжений после проведения миниГРП или тестов на утечки. Такая реконструкция позволяет снизить неоднозначность оцениваемых параметров напряженного состояния, существуют примеры ее успешного применения в некоторых исследованиях [Ito et al., 2013]. Такой подход достаточно сложно реализуем технически – необходимо контролировать все процессы, происходящие с керовым материалом с момента выбуривания и до попадания в лабораторную установку. На настоящий момент ведутся работы по реализации этого метода на практике [Ito et al., 2016], однако повсеместное применение этого подхода на практике пока затруднено.

Таким образом, описанные в данном подразделе подходы являются дополнительными по отношению к анализу вывалов, доминирующему при практических геомеханических работах. Позволяя снизить неопределенность реконструируемых значений, эти подходы, тем не менее, обладают ограниченной областью применимости и не дают возможности реконструировать профили напряжений вдоль всего ствола скважины, что ведет к необходимости создания методов экстраполяции профилей напряжений на весь глубинный интервал.

1.3.3 Экстраполяция профилей напряжений

Как было указано выше, экстраполирование оценок параметров напряженного состояния является необходимым для восстановления профилей этих параметров вдоль ствола скважины.

На сегодняшний день наиболее широкое распространение получили два подхода к восстановлению профилей горизонтальных напряжений – один, основанный на анализе каротажных кривых [Prats, 1981]; другой, максимально упрощающий нелинейную зависимость значений горизонтальных напряжений от глубины [Zoback et al., 2003].

Первый подход базируется на гипотезе о подчинении исследуемых сред линейному закону Гука. Предполагается, что действие тектонических сил обуславливает наличие в среде не зависящих от глубины (это условие обеспечивает жесткое сцепление слоев среды друг с другом и обосновано статистически [Афанасьев и др., 2009]) горизонтальных деформаций ε_h и ε_H , сонаправленных, соответственно, с векторами минимальных и максимальных горизонтально ориентированных тектонических сил. В таком случае горизонтальные напряжения, выраженные через деформации, могут быть определены из закона Гука, записанного с учетом изменения объема среды за счет влияния флюида (в терминах эффективных напряжений):

$$\begin{aligned}\sigma_h(z) &= \sigma_v(z) \frac{\nu(z)}{1-\nu(z)} + [\varepsilon_h + \varepsilon_H \nu(z)] \frac{E(z)}{1-\nu(z)^2}, \\ \sigma_H(z) &= \sigma_v(z) \frac{\nu(z)}{1-\nu(z)} + [\varepsilon_H + \varepsilon_h \nu(z)] \frac{E(z)}{1-\nu(z)^2}.\end{aligned}\tag{1.21}$$

Здесь $\nu(z)$ – профиль коэффициента Пуассона; $E(z)$ – модуля Юнга.

Анализ выражений (1.21) приводит к заключению, что значения напряжений, обусловленных действием тектонических сил, численно контролируются двумя управляющими параметрами – горизонтальными деформациями ε_h и ε_H . Можно сказать, что эти выражения полностью определяют

профили напряжений, если известны значения горизонтальных деформаций. Значения ε_h и ε_H при этом должны подбираться так, чтобы профили напряжений, рассчитанные по выражениям (1.21), максимально согласовывались с независимыми оценками (прямыми или косвенными, с помощью анализа тестов на приемистость, миниГРП или вывалов) значений напряжений на определенных глубинах.

Второй подход к определению профилей горизонтальных напряжений [Zoback et al., 2007] нивелирует основной недостаток первого – чрезмерную чувствительность к погрешностям измерений, – который выражается в том, что изменение упругих модулей может быть весьма значительным на малых интервалах, приводя к нефизичным скачкам значений горизонтальных напряжений. Во втором подходе предполагается линейная зависимость эффективных горизонтальных напряжений от глубины, благодаря чему сохраняются отношения $\sigma_h(z)/\sigma_v(z)$ и $\sigma_H(z)/\sigma_v(z)$ на некотором рассматриваемом интервале глубин. При таком подходе управляющими становятся два отношения σ_h/σ_v и σ_H/σ_v , и приоритетной задачей является поиск их значений, а профили горизонтальных напряжений определяются по простым выражениям:

$$\sigma_h(z) = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \sigma_v(z), \quad \sigma_H(z) = \frac{\sigma_H}{\sigma_v} \sigma_v(z). \quad (1.22)$$

Здесь и далее при рассмотрении задачи реконструкции профилей горизонтальных напряжений будет использоваться понятие пары управляющих параметров – двух параметров, определяющих профили горизонтальных напряжений в рамках используемой модели. Управляющие параметры в первой модели являются горизонтальными деформациями ε_h и ε_H , во второй модели их роль играют отношения σ_h/σ_v и σ_H/σ_v .

Обе модели характеризуются ограниченной областью применимости и некоторыми недостатками. Недостатки первой модели подробно рассмотрены в работе [Zoback, 2007] – к ним, в первую очередь, относится большое количество

неизвестных параметров. Действительно, для того, чтобы восстановить профили горизонтальных напряжений по выражениям (1.21), предварительно нужно определить профиль эффективного вертикального напряжения (для чего, в соответствии с выражением (1.11), предварительно должны быть определены профиль плотности, профиль порового давления и профиль коэффициента Био) и профили статических упругих модулей, что приводит к наличию целых 7 неизвестных в правой части выражений (1.21). Более того, существуют модификации этого подхода, позволяющие учитывать анизотропию среды [Amadei et al., 1987; Sayers, 2010], что приводит к дальнейшему росту числа неизвестных параметров. Таким образом, модель использует большое количество параметров, само определение которых сопряжено со значительными трудностями, что в первую очередь касается статических упругих модулей [Baouk et al., 2008]. В связи с указанным недостатком некоторые авторы не рекомендуют использовать модель (1.21) для реконструкции профилей горизонтальных напряжений [Zoback, 2007].

В свою очередь, вторая модель (выражение (1.22)) использует минимально возможное количество неизвестных параметров, максимально упрощая нелинейные эффекты. Однако сохранение отношений $\sigma_h(z)/\sigma_v(z)$ и $\sigma_H(z)/\sigma_v(z)$ не нарушается лишь на небольших интервалах глубин – наличие резкого геологически обусловленного скачка значений упругих модулей соседних слоев породы околосокажинного пространства приводит к необходимости некоторого скачка горизонтальных напряжений [Дубиня, Галыбин, 2018], что обеспечивает отсутствие горизонтального скольжения слоев породы друг относительно друга, а величина скачка может быть найдена в рамках упругой модели [Dundurs, 1969]. Таким образом, эта модель может быть использована при рассмотрении лишь достаточно малых и однородных по механическим свойствам интервалов глубин.

В результате можно отметить, что, несмотря на указанные недостатки, на практике широко используются две описанные модели, различающимися управляющими параметрами: в первой модели используются значения ε_h и ε_H , во

второй модели – отношения σ_h/σ_v и σ_H/σ_v . В общем виде задача реконструкции профилей напряжений сводится к тому, что эти параметры должны быть найдены по оценкам горизонтальных напряжений по результатам скважинных исследований, а профили напряжений восстанавливаются по выражениям (1.21) или (1.22), которые в общем виде могут быть представлены как:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_h(z) = \sigma_h(\varepsilon_h, \varepsilon_H, \sigma_v(z)) \\ \sigma_H(z) = \sigma_H(\varepsilon_h, \varepsilon_H, \sigma_v(z)) \end{array} \right. \text{ или } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_h(z) = \sigma_h\left(\frac{\sigma_h}{\sigma_v}, \sigma_v(z)\right) \\ \sigma_H(z) = \sigma_H\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_v}, \sigma_v(z)\right) \end{array} \right. \quad (1.23)$$

Поиск управляющих параметров по прямым или косвенным оценкам горизонтальных напряжений является приоритетной задачей дальнейшего исследования.

1.4 Реконструкция профилей напряжений по прямым измерениям

Как было указано в разделе 1.2.2 измерения параметров напряженного состояния, выполняемые при проведении тестов на приемистость или выполнении операции ГРП или миниГРП, являются единственным возможным прямым измерением горизонтальных напряжений. При этом для решения практических задач геомеханики месторождений углеводородов имеет смысл говорить лишь об измерении минимального горизонтального напряжения.

Тем не менее, как было показано в работе [Дубиня, Ежов, 2015b], эти измерения не позволяют в достаточной мере решить задачу определения управляющих параметров, причем даже если на скважине присутствует несколько независимо проведенных прямых измерений σ_h [Дубиня, Ежов, 2017b].

Предположим, что на скважине были проведены Z независимых измерений σ_h на глубинах z_i ($i = 1, \dots, Z$), в результате которых измерены значения минимального горизонтального напряжения на соответствующих глубинах $\sigma_h^*(z_i)$. В таком случае, при использовании первой из указанных выше моделей

экстраполяции может быть записано Z уравнений для σ_h на исследованных глубинах:

$$\sigma_h^*(z_i) = \sigma_v(z_i) \frac{v(z_i)}{1-v(z_i)} + [\varepsilon_h + \varepsilon_H v(z_i)] \frac{E(z_i)}{1-v(z_i)^2}. \quad (1.24)$$

Тогда для горизонтальных деформаций может быть записано Z уравнений:

$$\varepsilon_h + \varepsilon_H v(z_i) = \frac{\sigma_h^*(z_i) \cdot (1-v(z_i)^2) - \sigma_v(z_i) \cdot v(z_i)(1+v(z_i))}{E(z_i)}, \quad (1.25)$$

где в правой части используются измеренные значения $\sigma_h^*(z_i)$.

Несмотря на то, что выражение (1.25) состоит из Z уравнений, они являются зависимыми: величина, указанная в левой части может быть определена и по одному измерению σ_h и, при известном профиле коэффициента Пуассона $v(z)$, единственным образом определяет весь профиль минимального напряжения. В таком случае, если значения $\sigma_h^*(z_i)$ допускают независимость нескольких уравнений из системы (1.25), это говорит не о возможности точного независимого определения двух горизонтальных деформаций, а о том, что или профиль коэффициента Пуассона определен неверно, или модель неприменима для рассматриваемой скважины.

Таким образом, в рамках первой модели прямые измерения минимального горизонтального напряжения позволяют определить профили горизонтальных напряжений лишь с точностью до некоторого класса функций, которые характеризуются любыми парами управляющих параметров, удовлетворяющими условиям (1.25).

Более явно этот эффект проявляется при использовании второй модели реконструкции профилей напряжений. Если на глубинах z_i определены значения минимальных горизонтальных напряжений $\sigma_h^*(z_i)$, по первому уравнению (1.22) естественным образом определяется значение управляющего параметра σ_h/σ_v :

$$\sigma_h/\sigma_v = \sigma_h^*(z_i)/\sigma_v(z_i). \quad (1.26)$$

Как и в предыдущем случае, если в этой системе из Z уравнений находятся хотя бы два независимых, это говорит о том, что значение управляющего параметра меняется с глубиной. При этом о втором управляющем параметре σ_H/σ_V ничего сказать нельзя. В таком случае, для второй модели класс эквивалентных решений реконструкции профилей горизонтальных напряжений по прямым измерениям сводится к множеству различных управляющих параметров σ_H/σ_V .

Последствия указанной неопределенности были рассмотрены в работе [Dubinya, Ezhov, 2016a]. Была синтезирована модель механических свойств (профили статических модуля Юнга и коэффициента Пуассона, профиль коэффициента Био) и профиль эффективного вертикального напряжения, линейно возрастающего с глубиной. Профили упругих свойств изображены на рисунке 1.9.

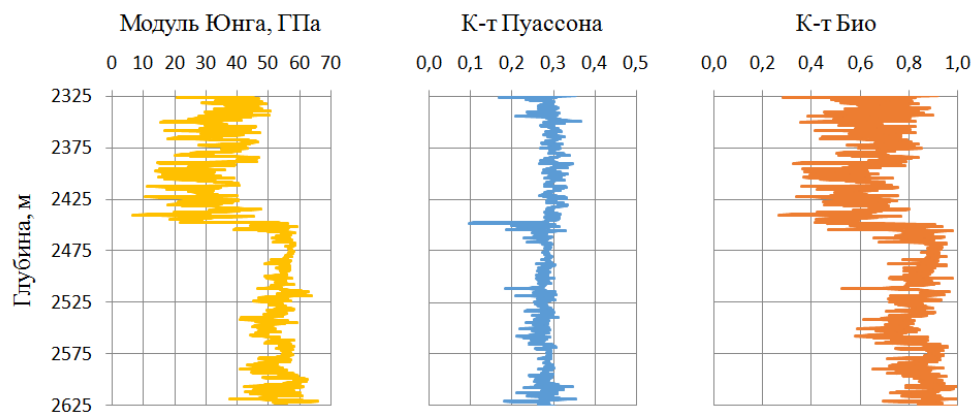


Рисунок 1.9 Профили синтезированных механических свойств.

Были также добавлены значения минимального горизонтального напряжения на нескольких фиксированных глубинах, моделирующие проведение прямых измерений σ_h . Был рассмотрен интервал глубин от 2325 до 2625 м, на глубинах 2400, 2500 и 2600 м были выбраны значения полного минимального горизонтального напряжения 360, 310 и 350 атм соответственно. При этом полное вертикальное напряжение на этих глубинах составило 625, 653 и 682 атм, поровое давление составило 235, 245 и 255 атм; модуль Юнга: 27.9, 50.2 и 58.7 ГПа, коэффициент Пуассона 0.33, 0.27 и 0.28. Величины композиции $\varepsilon_h + \varepsilon_{HV}(z_i)$ составили, соответственно, $-0.95 \cdot 10^{-4}$, $-0.91 \cdot 10^{-4}$ и $-0.92 \cdot 10^{-4}$.

Для реконструкции профилей горизонтальных напряжений была использована первая модель, использующая в качестве управляющих параметров

горизонтальные деформации. Были рассмотрены различные комбинации горизонтальных деформаций, удовлетворяющих указанному значению композиции $\varepsilon_h + \varepsilon_{H^V}(z_i)$. Реконструированные профили главных напряжений представлены на рисунке 1.10(а) и (б).

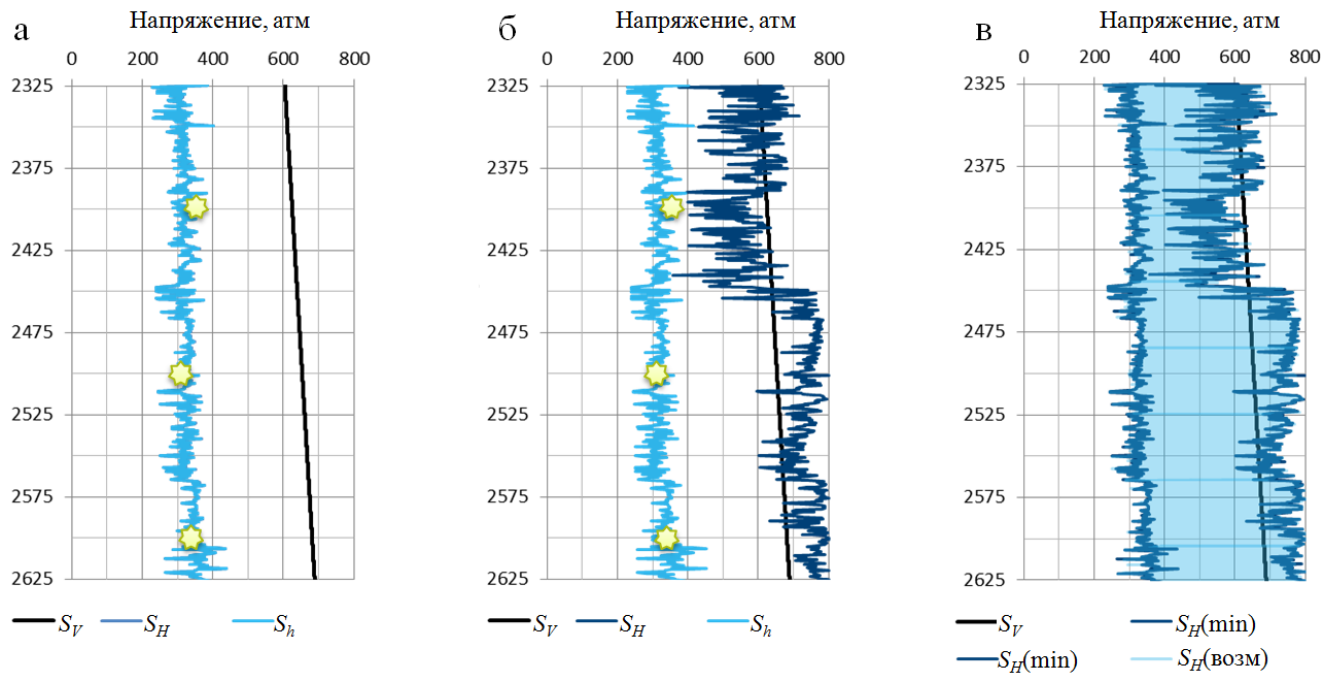


Рисунок 1.10 Реконструированные профили напряжений.

Рис 1.10(а) и 1.10(б) отличаются значениями горизонтальных деформаций, использованных в модели – в случае (а) горизонтальные деформации ε_h и ε_H выбраны максимально близкими друг к другу, в случае (б) эти величины значительно различаются. Звездочками обозначены измеренные значения $\sigma_h^*(z_i)$. Видно, что и в случае (а), и в случае (б) профиль минимального горизонтального напряжения достаточно хорошо согласуется с прямыми измерениями.

В свою очередь, профиль максимального горизонтального напряжения сильно различается в случаях (а) и (б): в случае (а) профиль максимального горизонтального напряжения практически совпадает с профилем минимального горизонтального напряжения, а в случае (б) разница значительна – на некоторых интервалах глубин максимальное горизонтальное напряжение превышает вертикальное. На рисунке 1.10(в) сплошным цветом отображен коридор возможных значений максимального горизонтального напряжения.

Таким образом, можно сделать заключение о том, что существующие методы экстраполяции оценок горизонтальных напряжений позволяют, используя только прямые измерения горизонтальных напряжений, реконструировать их профили только с точностью до некоторого класса функций, определенного выражением (1.25) при использовании первой модели или выражением (1.26) при использовании второй модели. Наибольшая неоднозначность наблюдается при реконструкции профиля максимального горизонтального напряжения. Для снижения этой неопределенности необходимо применять дополнительные косвенные подходы к оценке значений горизонтальных напряжений, в первую очередь, метод анализа вывалов, описанный в разделе 1.3.1, а также другие развивающиеся подходы к оценке горизонтальных напряжений по скважинным исследованиям. Важно понимать, что такие подходы, как правило, имеют ограниченную область применения, в частности, анализ вывалов неприменим в интервалах без вывалообразования.

1.5 Выводы к главе 1

В данной главе рассмотрены некоторые практические задачи, возникающие в области геомеханики месторождений углеводородов. Показано, что параметры, характеризующие напряженное состояние пород, оказывают существенное влияние на многие процессы, которые необходимо рассматривать при разработке месторождений. Отдельно рассмотрена ключевая роль горизонтальных напряжений в описанных процессах, выявлена необходимость их оценки по скважинным исследованиям.

Рассмотрены некоторые основные способы реконструкции параметров напряженного состояния по данным ГИС и лабораторным исследованиям. Обнаружена ограниченная применимость распространенных на практике подходов к такой реконструкции и выявлена необходимость использования моделей, позволяющих выполнить экстраполяцию оценок напряжений на весь

интервал, вскрытый скважиной. Рассмотрены две основные модели экстраполяции, указаны их преимущества и недостатки.

Отдельно исследован вопрос возможности реконструкции профилей горизонтальных напряжений по данным прямого измерения минимального горизонтального напряжения с помощью миниГРП или тестов на утечки – единственных способов прямого измерения параметров, характеризующих горизонтальные напряжения. Показано, что использование только прямых методов измерения позволяет реконструировать профили горизонтальных напряжений лишь в некотором классе эквивалентных функций. Эти классы функций выписаны для обеих рассмотренных моделей.

В результате проиллюстрирована необходимость создания дополнительных подходов к реконструкции профилей горизонтальных напряжений по скважинным исследованиям, позволяющих дополнить существующие методы, снижая неопределенность, возникающую при реконструкции, и расширяя область возможной оценки параметров напряженного состояния.

Глава 2. Реконструкция профилей горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости

Как было показано в главе 1, задача создания альтернативных подходов к реконструкции профилей горизонтальных напряжений по скважинным исследованиям остается актуальной для практических задач геомеханики месторождений углеводородов. Далее речь идет об одном таком подходе, основанном на анализе трещиноватости пород околоскважинного пространства.

В основе этого подхода лежит представление о наличии связи между трещинами с повышенными флюидопроводящими свойствами и трещинами, находящимися в критическом напряженном состоянии. Подробно эта связь описана ниже, в разделе 2.1.

Такая связь позволила сформулировать обратную задачу определения управляющих параметров (горизонтальных деформаций или отношений горизонтальных напряжений к вертикальному в соответствии с записью (1.23)) на основании анализа данных расширенного комплекса ГИС, позволяющего разделить трещины в породах околоскважинной зоны на классы по признаку флюидопроводимости.

Была рассмотрена возможность решения сформулированной обратной задачи на синтетических данных – подход показал свою состоятельность, в частности, было обнаружено, что решение обратной задачи остается устойчивым по отношению к зашумлению входных данных [Дубиня, Ежов, 2017а].

2.1 Связь критически напряженных и флюидопроводящих трещин

Возможность рассматривать трещины в породах околоскважинного пространства обеспечена использованием описанных выше микроимиджеров – акустического [Zemanek et al., 1970] и электрического [Chen et al., 1987], позволяющих получать азимутальные развертки (микроимиджи) акустических и электрических свойств пород околоскважинного пространства (Рисунок 2.1).

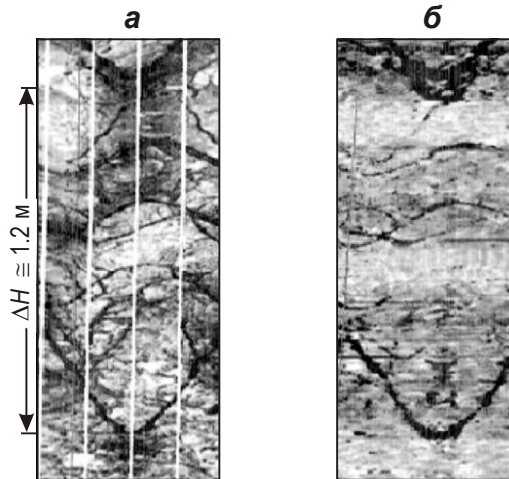


Рисунок 2.1 Примеры разверток (микроимиджей), получаемых с помощью электрического (а) и акустического (б) скважинных микроимиджеров. ΔH , м – интервал записи. По [Zoback, 2007] с изменениями.

На получаемых развертках (микроимиджах) можно заметить достаточно четко выраженные синусоидальные линии, отображающие трещины, акустические и электрические свойства которых отличаются от свойств окружающей их среды. На рисунке 2.2 приведена схема, иллюстрирующая формирование на развертках синусоидальных кривых при сечении цилиндрической поверхности (стенок скважины) разноориентированными плоскостями (трещинами).

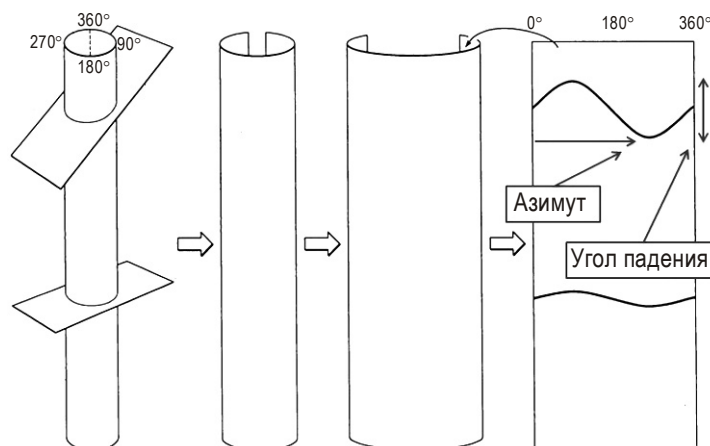


Рисунок 2.2 Схема, иллюстрирующая формирование на развертках синусоидальных кривых при сечении цилиндрической поверхности разноориентированными плоскостями и интерпретацию параметров трещин по виду кривых.

По виду кривых на развертках может быть определена пространственная ориентация трещин: азимут – по положению минимума кривой, угол падения – по

амплитуде. Наличие таких плоскостей означает присутствие на соответствующей глубине во внутренней структуре окружающих скважину пород упорядоченных неоднородностей, которые могут объясняться наличием поверхностей между слагающими породу слоями с разными механическими свойствами или трещин.

Существуют способы [Silva et al., 2003] выделения среди этих структур трещин, находящихся в среде. Эти способы базируются на том, что два микроимиджа имеют различную глубинность исследования и разрешение. Это приводит к тому, что трещина, обладающая высокой флюидопроводимостью и, следовательно, имеющая значительное простирание, будет прослеживаться на обоих микроимиджах, а непроводящая трещина будет наблюдаться только на электрическом микроимидже.

Анализ микроимиджа также позволяет оценить геометрические параметры трещин – степень раскрытия соответствует толщине синусоидальной структуры на развертке; ориентация трещины определяется двумя углами – азимутом и углом падения. На ориентированной развертке азимут может быть определен по положению минимума синусоидальной линии, а тангенс угла падения равен отношению амплитуды синусоидальной линии к радиусу скважины (чем ближе плоскость трещины к горизонтали, тем меньше амплитуда, и синусоидальная линия приближается к горизонтальной прямой). Трещины, наведенные бурением, субвертикальны, следовательно, амплитуда отображающих их синусоидальных кривых стремится к бесконечности, и вид этих трещин на микроимиджах будет близок к вертикальным линиям [Zoback et al., 2003].

Пространственная ориентация выделенных трещин и их раскрытость – важнейшие параметры в рамках предлагаемого подхода, используемые в дальнейшем в качестве входных параметров.

Выше было отмечено, что в рамках рассматриваемой задачи одну из главных осей тензора напряжений можно рассматривать как субвертикальную, а две другие – как горизонтальные. Три главных сжимающих напряжения положительны и связаны между собой соотношением $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 > 0$. В

рассматриваемом случае главными являются вертикальное напряжение σ_V и два горизонтальных – максимальное σ_H и минимальное σ_h . Порядок соответствия главных напряжений вертикальному и горизонтальным не фиксирован и зависит от тектонического режима – при сбросе вертикальное напряжение максимально ($\sigma_V \geq \sigma_H \geq \sigma_h$), при надвиге – минимально ($\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$), в случае сдвига имеет среднее значение ($\sigma_H \geq \sigma_h \geq \sigma_V$), что соответствует классификации, предложенной [Anderson, 1951].

Предположим, что по микроимиджам на некоторой глубине выделена трещина, для которой определены азимут и угол падения. Если на той же глубине известны направления действия максимальных и минимальных горизонтальных напряжений и тектонический режим (т.е. установлено, какое из главных напряжений σ_V , σ_H и σ_h минимально, а какое максимально), то могут быть определены направляющие косинусы нормали к трещине в пространстве главных осей тензора напряжений:

$$l = \cos(\vec{T}, \vec{\sigma}_1) \quad m = \cos(\vec{T}, \vec{\sigma}_2) \quad n = \cos(\vec{T}, \vec{\sigma}_3), \quad (2.1)$$

где \vec{T} – единичный вектор нормали к плоскости трещины; $\vec{\sigma}_1$, $\vec{\sigma}_2$, $\vec{\sigma}_3$ – направления действия соответствующих главных напряжений.

Если на этой глубине уже известны и значения главных напряжений, то можно определить такие параметры, как нормальное σ_n и касательное τ_n напряжения, действующие на поверхности трещины:

$$\sigma_n = \sigma_2 + l^2(\sigma_1 - \sigma_2) + n^2(\sigma_3 - \sigma_2), \quad (2.2)$$

$$\tau_n = \sqrt{\left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right)^2 + l^2(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3) - \left(\sigma_n - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}\right)^2}. \quad (2.3)$$

В общем случае напряжения σ_n и τ_n зависят от ориентации трещин. Формально их значения соответствуют разложению вектора напряжения, действующего на плоскости трещины, на нормальную и касательную

компоненты. Нормальное напряжение, таким образом, ориентировано перпендикулярно плоскости трещины, а касательное действует в этой плоскости. Тем не менее, используемый в дальнейшем математический аппарат (плоскость Мора) позволяет рассматривать только скалярные величины, соответствующие абсолютным значениям этих напряжений вне зависимости от их ориентации. Влияние ориентации проявляется при расчете напряжений по формулам (2.2) и (2.3), в которые входят два независимых направляющих косинуса l и n , определяющих пространственную ориентацию плоскости трещины.

Таким образом, для каждой трещины могут быть определены нормальное и касательное напряжения, действующие на ее поверхности, причем в том и только в том случае, когда согласно тому или иному подходу уже найдены значения двух параметров, определяющих профили горизонтальных напряжений. С другой стороны, можно воспользоваться этим результатом, если установить связь между определенной ориентацией трещины и другими ее свойствами, которые также могут быть оценены по микроимиджам.

Помимо ориентации трещин микроимиджи позволяют определить их раскрытость. Этот параметр не самый удобный для интерпретации – раскрытость может меняться вдоль самой трещины и зависит не только от текущего напряженного состояния, но и от механических параметров самой трещины, например таких, как жесткость. По результатам интерпретации записей электрического микроимиджера можно с высокой достоверностью выделить сами трещины, но невозможно оценить их фильтрационные свойства. К примеру, трещины, залеченные глинистым материалом, высокопроводящим пиритом или заполненные буровым раствором, одинаково контрастны в поле электрических свойств. Как следствие, они неразличимы по разверткам электрического микроимиджера; в таком случае для интерпретации необходима дополнительная информация, полученная другими методами. Возможным вариантом представляется привлечение данных ультразвукового имиджера, волнового акустического каротажа или результатов испытаний пласта [Silva et al., 2003].

В дальнейшем рассматриваются результаты применения комбинации электрического и ультразвукового имиджеров, что позволяет не только корректно выделять трещины разного происхождения, но и подразделять их на проницаемые и непроницаемые (залеченные). При этом используется установленная в [Barton et al., 1995] связь между описанным разделением трещин на классы и нормальным и касательным напряжениями, действующими на их поверхностях.

Скважина, рассматриваемая в работе [Barton et al., 1995], обеспечена данными ГИС высокого качества, что относится и к данным микроимиджеров. Предварительно для нее были построены профили напряжений, верифицированные на большом количестве вывалов. В итоге, для каждой трещины по формулам (2.2) и (2.3) были рассчитаны значения нормального и касательного напряжений, нанесенные затем на нормализованную диаграмму Мора (Рисунок 2.3).

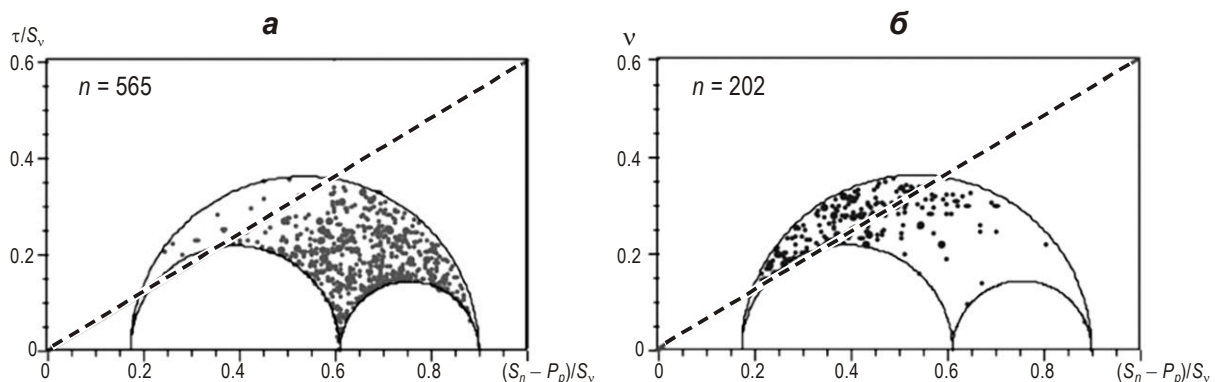


Рисунок 2.3 Использование диаграммы Мора для разделения трещин на классы по их проводящим свойствам: а – не проводящие флюид трещины, б – проводящие. Ось абсцисс – нормальное напряжение на трещине, ось ординат – касательное. n – количество трещин соответствующего класса; штриховая прямая – линия сухого трения с $\mu = 0.6$ (μ имеет смысл тангенса угла внутреннего трения). По [Barton, Zoback, Moos, 1995] с изменениями.

Точки, соответствующие трещинам, оказались внутри трехмерного круга Мора, характеризующего напряженное состояние в скважине (использовался подход, подразумевающий линейный рост горизонтальных напряжений с глубиной). Трещины были разделены на гидравлически проводящие и непроницаемые на основании того, прослеживаются они на обоих микроимиджах или только на одном. Подавляющее большинство непроницаемых трещин

оказалось ниже линии сухого трения (Рисунок 2.3(а)), указывающей на линейную связь между касательным и нормальным напряжением с коэффициентом пропорциональности $\mu=0.6$, а большинство проводящих – выше (Рисунок 2.3(б)). Критерий сухого трения имеет вид:

$$\tau_n = \mu \cdot \sigma_n . \quad (2.4)$$

Здесь используется коэффициент пропорциональности μ , имеющий смысл тангенса угла внутреннего трения среды. Если касательное напряжение превышает величину, стоящую в правой части, трещина считается находящейся в критическом напряженном состоянии. Если это не так, трещина не находится в критическом напряженном состоянии.

Полученный результат позволил авторам [Barton et al., 1995] сделать вывод о наличии связи между проводимостью трещины и ее напряженно-деформированным состоянием – в подавляющем большинстве случаев проводящей является та и только та трещина, которая находится в критическом напряженном состоянии (точка, лежащая на диаграмме Мора выше линии сухого трения). В дальнейшем такие трещины будут называться критически напряженными.

Согласно приводимым в [Barton et al., 1995] утверждениям, имеет смысл рассматривать коэффициенты пропорциональности μ из интервала значений (0.6;1.0), который определен на основании большого числа измерений прочностных свойств различных пород [Byerlee, 1978].

В работе [Barton et al., 1995] были также представлены результаты, схожие с показанными на рисунке 2.3, полученные для трех скважин: скважины с участка Кахон Пасс (Cajon Pass), Калифорния; исследовательской скважины кальдерры Лонг-Велли (Long Valley Exploratory Well), Калифорния; скважины с тестового участка в штате Невада.

Эти результаты позднее были объединены [Townend, Zoback, 2000] на единой диаграмме Мора без нормировки на вертикальное напряжение (Рисунок

2.4). Видно, что практически для всех трещин (всего рассмотрено около 1500 трещин) выполняется выдвинутая ранее гипотеза: если трещина флюидопроводящая, соответствующая ей точка оказывается на плоскости Мора выше критерия сухого трения и наоборот. При этом такая тенденция остается справедливой для разных глубин и пород: на участке Кахон Пасс преобладали трещиноватые гранитные породы, на участке Лонг-Велли – трещиноватые породы метаморфического происхождения, на участке Невада – туфовые породы.

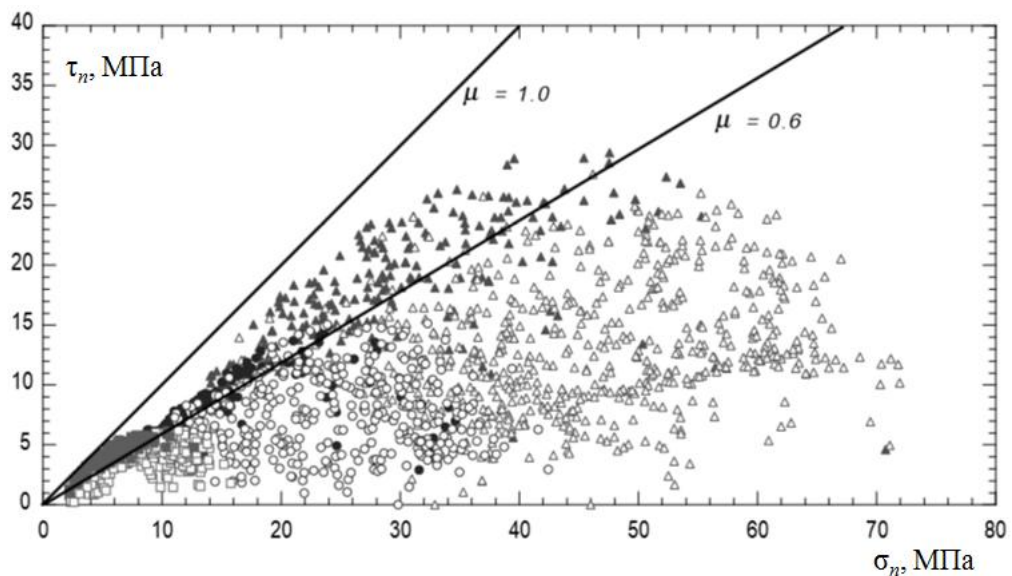


Рисунок 2.4 Нормальное и касательное напряжения, действующие на трещинах, обнаруженных по данным скважин Кахон Пасс (треугольники), Лонг-Велли (круги), Невада (квадраты). Закрашенные символы соответствуют флюидопроводящим трещинам, незакрашенные – не флюидопроводящим. По [Townend, Zoback, 2000] с изменениями.

Полученные результаты подтверждают гипотезу о существовании связи между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами, однако ее авторы [Barton et al., 1995] также описывают пределы ее применимости: такая связь ожидается только в хрупких породах с низкой матричной проницаемостью. При этом нельзя напрямую говорить о том, что если трещина находится в критическом напряженном состоянии, то она будет флюидопроводима: помимо напряженного состояния на проводимость оказывают влияние и геологические факторы [Fisher, Knipe 1998; Fisher et al. 2003].

Примеры подтверждения этой гипотезы могут быть найдены в работах исследования напряженного состояния по скважинным данным в различных регионах. В частности, состоятельность гипотезы была подтверждена при интерпретации температурных каротажей скважин в регионе Дикси-Велли (Dixie Valley), Невада [Hickman et al. 1997], где при построении диаграммы Мора были получены результаты, аналогичные представленным на рисунке 2.3.

Другой пример, подтверждающий гипотезу, был представлен в работе [Rogers, 2002], в которой была рассмотрена анизотропия проницаемости пород, обнаруженная при исследовании региона проекта Селлафилд (Sellafield Project). Было показано, что направление максимальной проницаемости горных пород точно совпадает с направлением, предсказываемым в рамках гипотезы связи флюидопроводящих и критически напряженных трещин.

Важно отметить, что речь идет именно о трещинах сдвига (характеризующихся ненулевым касательным напряжением τ_n , действующим на их плоскости). При этом трещины раскрытия не рассматриваются, хотя часто могут обладать существенно большим влиянием на проницаемость горной породы. Таким образом, проницаемость горной породы может быть обусловлена далеко не критически напряженными трещинами, а трещинами растяжения, что может быть справедливо в некоторых случаях [Ligtenberg, 2005]. Важность одновременного учета трещин раскрытия, сонаправленных с направлением действия максимального горизонтального напряжения, и сдвиговых трещин, направленных под определенным углом к этому направлению показана в работе [Laubach et al., 2004].

Тем не менее, существуют примеры регионов, в которых указанная гипотеза не подтверждается. В частности, детальные исследования региона проекта Селлафилд [Sathar et al., 2012] показали, что количественно гипотеза связи между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами не подтверждается – ни одна из наблюдаемых трещин не находится в критическом напряженном состоянии, хотя некоторые из них являются флюидопроводящими.

Авторы объясняют это несоответствие историей развития напряженного состояния – хотя в текущем поле напряжений флюидопроводящие трещины не являются критически напряженными, они могли быть критически напряженными раньше. В свою очередь, такой эффект требует существенного изменения напряженного состояния за небольшой геологический интервал времени, что накладывает дополнительное условие на справедливость гипотезы связи между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами – отсутствие быстрого (в геологических масштабах) изменения напряженного состояния региона.

Другим недостатком гипотезы является использование упрощенного критерия сухого трения (2.4). Результаты численного моделирования [Bisdorn et al., 2016] показывают, что использование более сложной модели деформирования [Bandis et al., 1983] позволяет учитывать не только ориентацию трещины, но и ее раскрытие. При этом изменение проницаемости среды за счет такого изменения модели проявляется тем сильнее, чем выше проницаемость породы.

Таким образом, не следует напрямую использовать гипотезу о том, что критически напряженная трещина будет флюидопроводящей, для создания модели проницаемости породы и дальнейшего гидродинамического моделирования.

С другой стороны, обзор исследований, представленный в разделе, позволяет говорить о существовании обратной связи – если трещина сдвига является флюидопроводящей, то можно ожидать, что она находится в критическом напряженном состоянии. Этот результат будет далее использоваться для решения обратной задачи реконструкции профилей напряжений по данным о флюидопроводящих трещинах.

2.2 Формулировка обратной задачи и алгоритм ее решения

Положение о связи между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами может быть использовано для того, чтобы

сформулировать обратную задачу реконструкции профилей напряжений по данным о флюидопроводимости трещин пород околоскважинного пространства [Дубиня, Ежов, 2015а; Дубиня, Ежов, 2016а; Дубиня, Ежов, 2016b; Ежов, Дубиня, 2016].

Для решения обратной задачи восстановления профилей горизонтальных напряжений предлагается использовать результаты из [Barton et al., 1995]. Прямую задачу можно сформулировать таким образом – при известном напряженном состоянии среды на глубине, на которой по микроимиджу выделена трещина и рассчитана ее ориентация в пространстве главных осей тензора напряжений, необходимо проверить, будет ли эта трещина проводима. В терминах, используемых в [Barton et al., 1995], критерий сухого трения записывается как

$$\tau_n/S_V = \mu \cdot \sigma_n/S_V, \quad (2.5)$$

где μ – коэффициент трения содержащей трещину породы, равный тангенсу угла внутреннего трения.

Подставляя выражения (2.2) и (2.3) в (2.5) и изменяя последнее на неравенство, соответствующее условию принадлежности трещины к классу проводящих, можно получить следующий результат – трещина заданной ориентации, находящаяся в известном напряженно-деформированном состоянии, будет проницаемой при выполнении неравенства, которое представляет решение прямой задачи, сформулированной выше:

$$\frac{\sqrt{\left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right)^2 + l^2(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3) - \left(\sigma_n - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}\right)^2}}{\sigma_2 + l^2(\sigma_1 - \sigma_2) + n^2(\sigma_3 - \sigma_2)} > \mu. \quad (2.6)$$

Обратная задача может быть поставлена следующим образом: если известно, к какому классу (проницаемых или непроницаемых) относится трещина известной ориентации (ориентация и проводимость могут быть установлены при анализе микроимиджей – [Silva et al., 2003]), необходимо определить главные

значения тензора напряжений на той же глубине, обеспечивающие критическое напряженное состояние этой трещины.

Из решения прямой задачи следует, что неравенство (2.6) может быть использовано для наложения некоторых ограничений на главные напряжения, если показать, что условие (2.6) является не только необходимым, но и достаточным для того, чтобы трещина известной ориентации в заданном поле напряжений была проводимой.

Регистрируемое возрастание фильтрационно-емкостных свойств трещин, находящихся в критическом напряженном состоянии, можно объяснить явлением дилатансии. Согласно предлагаемому механизму, если касательные напряжения на плоскости трещины преодолевают некоторый порог, происходит небольшое относительное проскальзывание берегов трещины друг относительно друга (сдвиговая деформация), обеспечивающее увеличение объема элемента среды, содержащего трещину. При этом увеличение объема будет происходить практически полностью за счет роста раскрытия трещины. Таким образом, для каждого значения нормального напряжения, действующего на трещине, существует критическое значение касательного напряжения, при превышении которого произойдет скачкообразное увеличение проницаемости.

Математически предлагаемое объяснение может быть выражено как

$$\tau_n = \tau_n(\sigma_n). \quad (2.7)$$

Воспользовавшись полиномиальным представлением функции (2.7), имеющим вид

$$\tau_n = A_0 + \sum_i A_i \sigma_n^i, \quad (2.8)$$

рассмотрим несцементированную трещину, находящуюся в поле напряжений, в котором отсутствует нормальное напряжение. В таком случае при приложении к трещине сколь угодно малого касательного напряжения сразу произойдет относительное движение стенок. На этом основании A_0 в выражении (2.8)

приравняем нулю и увидим, что использовавшийся критерий сухого трения (2.5) является линеаризацией полинома (2.8).

В результате может быть получено обоснование обратного утверждения – если трещина находится в критическом напряженном состоянии, то происходит скачкообразное возрастание ее раскрытости и, в некоторой степени, проводимости. В принятых терминах это означает достаточность критерия (2.6) для того, чтобы по трещине в заданном напряженном состоянии произошло увеличение раскрытости за счет дилатансии. Связь увеличения раскрытости с проницаемостью может быть обоснована результатами полевых наблюдений. Фактически предположение о наличии такой связи используется уже на этапе деления трещин на проводящие и непроводящие только на основании их проявления на обоих микроимджах.

Таким образом, показано, что если трещина является проводящей (в рамках используемой терминологии), то главные значения тензора напряжений в ее окрестности должны быть такими, чтобы выполнялось неравенство (2.6). Этот результат может быть использован для решения сформулированной выше обратной задачи. Сначала следует провести расчет параметров всех трещин, определенных по микроимджам. Затем с помощью неравенства (2.6) необходимо наложить ограничения на главные напряжения на соответствующих глубинах. В результате параметры, определяющие профили напряжений (горизонтальные деформации или отношения горизонтальных напряжений к вертикальному, в зависимости от используемого подхода), будут определены такими, что для всех проводящих трещин неравенство (2.6) с рассчитанными горизонтальными напряжениями будет выполняться, а для всех непроводящих – нет.

Графическое представление описанного подхода может быть реализовано с помощью диаграммы Мора, построенной в нормированных координатах $(\sigma_n/S_V, \tau_n/S_V)$ с использованием следующих данных: ориентация трещин, значения и ориентация главных напряжений на соответствующих глубинах. По выражениям (2.1) – (2.3) рассчитываются значения нормального и касательного

напряжений, действующих на каждой трещине, и соответствующая точка наносится на плоскость Мора. Ориентация трещин определяется по микроимиджу, согласно описанному выше подходу; ориентация главных осей тензора напряжений также может быть определена по микроимиджу [Zoback, 2007]. Значения главных напряжений могут быть определены на любой глубине в рамках используемой модели построения профилей, если известны горизонтальные деформации ε_h и ε_H или отношения σ_h/σ_v и σ_H/σ_v . Таким образом, диаграмма Мора может быть построена для любой пары управляющих параметров (ε_h и ε_H или σ_h/σ_v и σ_H/σ_v); в дальнейшем такие построения могут быть использованы для выбора названных параметров.

Общий алгоритм построения включает четыре этапа:

1. Определение ориентации главных осей тензора напряжений по микроимиджам в соответствии со стандартным подходом [Zoback, 2007]. На микроимиджах можно увидеть вертикальные затемненные линии, соответствующие вертикальным трещинам растяжения, образовавшимся при бурении. Положение таких линий (их смещение относительно направления на север) дает возможность определить азимут трещин растяжения. При этом анализ зоны концентрации напряжений вокруг скважины позволяет говорить о том, что азимут максимального горизонтального напряжения совпадает с азимутом трещин растяжения. Таким образом, определяется ориентация главных горизонтальных осей тензора напряжений, что, в совокупности с предположением о субвертикальности одной из главных осей, полностью определяет ориентацию главных осей эллипсоида напряжений.

2. Определение направляющих косинусов для каждой трещины по выражениям (2.1).

3. Фиксирование пары управляющих параметров – ε_h и ε_H или σ_h/σ_v и σ_H/σ_v , – определяющей вид эллипсоида напряжений, действующих на глубинах, соответствующих выделенным трещинам, и определение значений главных напряжений на этих глубинах.

4. Определение по выражениям (2.2) и (2.3) напряжений, действующих на трещинах, и нанесение соответствующих точек на плоскость Мора.

Чрезвычайно удобным оказывается использование интегрального параметра, характеризующего весь интервал глубин, в котором были выделены трещины. Такой параметр будет находиться в тесной связи с параметрами, управляющими профилями горизонтальных напряжений, так как тоже имеет интегральную природу. Будет использоваться доля проводящих трещин N – отношение числа трещин, являющихся проводящими (критически напряженными) при текущих значениях управляющих горизонтальными напряжениями параметров, к общему количеству трещин, выделенных по микроимиджам. Проверка принадлежности каждой трещины к классу критически напряженных определяется по неравенству (2.6). Технически задача сводится к подбору таких значений управляющих параметров, при которых доля проводящих трещин N максимально приблизится к аналогичной величине – “истинной” доле проводящих трещин N^* , определенной по микроимиджам. Использование единственного параметра, характеризующего проводимость трещин, позволяет существенно упростить анализ. Доля проводящих трещин может быть рассмотрена как функция двух независимых переменных – горизонтальных деформаций и отношений горизонтальных напряжений к вертикальному.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет существенно снизить неопределенность, возникающую при определении значений параметров, управляющих профилями горизонтальных напряжений, благодаря введению дополнительной связи и уменьшению степеней свободы системы на единицу.

Упомянутое ранее ограничение на параметры, управляющие профилями напряжений, полученное по результатам прямых точечных измерений минимального горизонтального напряжения на дискретных глубинах, может быть записано в виде (общий вид выражений (1.24) и (1.26)):

$$\sigma_h(\varepsilon_h, \varepsilon_H, z_i) = \sigma_h^*(z_i) \quad \text{или} \quad \sigma_h(\sigma_h/\sigma_V, \sigma_H/\sigma_V, z_i) = \sigma_h^*(z_i), \quad (2.9)$$

где $\sigma_h^*(z_i)$ – измеренное значение минимального горизонтального напряжения на глубине проведения исследований методами ГРП или *LOT*; z_i – глубины измерения σ_h^* . К этому условию добавляется аналогичное условие для доли проводящих трещин:

$$N(\varepsilon_h, \varepsilon_H) = N^* \quad \text{или} \quad N(\sigma_h/\sigma_v, \sigma_H/\sigma_v) = N^*. \quad (2.10)$$

Выражения (2.9) и (2.10) представляют собой независимые нелинейные уравнения с двумя неизвестными – отношениями горизонтальных напряжений к вертикальному или горизонтальными деформациями. Таким образом, эти уравнения позволяют определить возможные значения параметров, управляющих профилями горизонтальных напряжений. Надо отметить, что рассматриваемая система уравнений не обязательно должна иметь единственное решение; в общем случае можно говорить о счетности множества решений этой системы [Гантмахер, 1967]. Кроме того, возможность применения разработанного подхода не зависит от выбора модели экстраполяции профиля напряжений [Dubinya, Ezhov, 2016].

На практике рассматриваемая обратная задача, как правило, не имеет единственного решения не только из-за возможных ошибок в восстановлении профилей механических свойств, возникающих в процессе интерпретации результатов ГИС и лабораторных исследований, но и из-за ошибок в определении величин, входящих в правые части уравнений (2.9) и (2.10). Из-за этого значения управляющих параметров обязательно содержат некоторую погрешность. Оценка дополнительной ошибки, вносимой при расчете доли проводящих трещин, рассматривается ниже, наряду с апробацией предлагаемого подхода.

Важно отметить независимость уравнений (2.9) и (2.10), естественным образом следующую из независимости проводимых измерений. Это позволяет наложить на параметры, управляющие профилями горизонтальных напряжений, дополнительную связь, позволяющую обойти проблему класса эквивалентных решений задачи реконструкции напряжений, о которой говорилось в разделе (1.4).

2.3 Апробация подхода на синтетических данных

Предлагаемый подход был применен для оценки профилей горизонтальных напряжений на синтетических данных, заданных в виде профилей упругих свойств среды, рассчитанных вдоль траектории вертикальной скважины (Рисунок 2.5), и распределения трещин по глубинам, азимутам и углам падения (Рисунок 2.6).

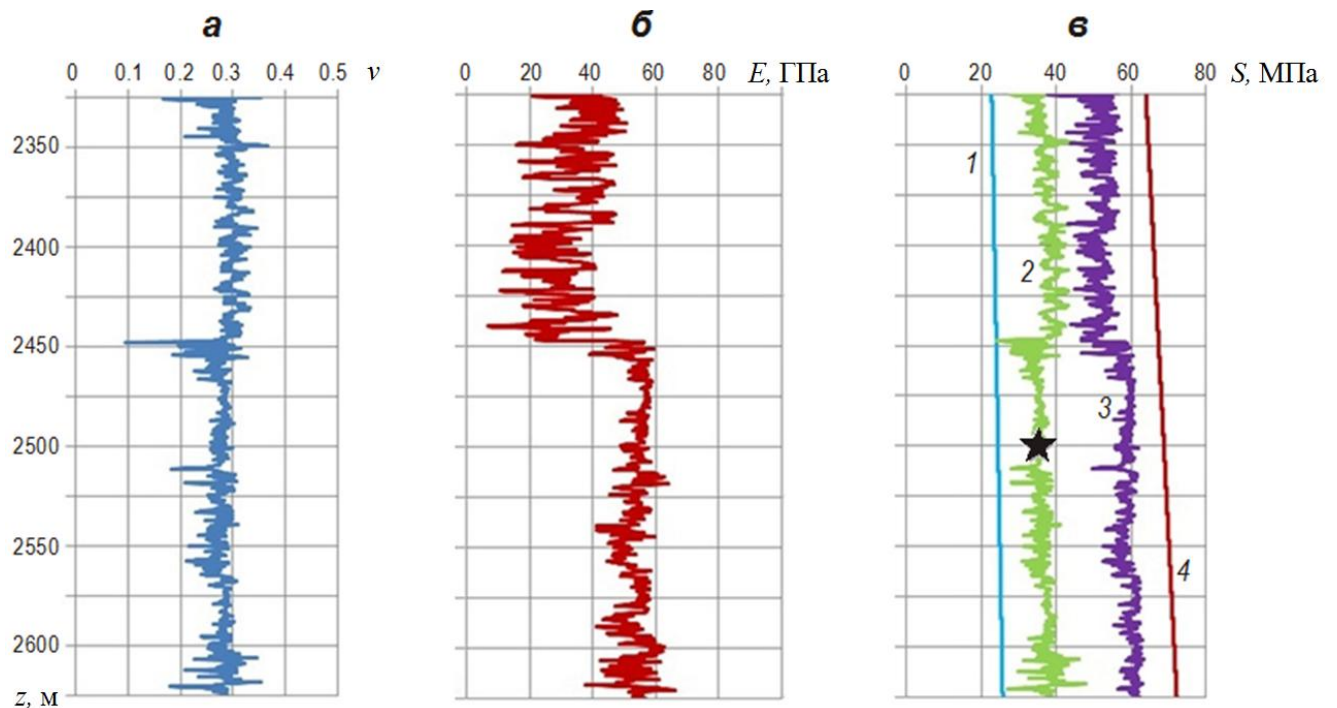


Рисунок 2.5 Используемые входные параметры модели. Профили коэффициента Пуассона (а), модуля Юнга, ГПа (б) и напряжений, МПа (в). На (в): 1 – профили порового давления, 2 – минимального горизонтального напряжения, 3 – максимального горизонтального напряжения, 4 – вертикального напряжения; звездочка – полученное прямым измерением значение минимального горизонтального напряжения.

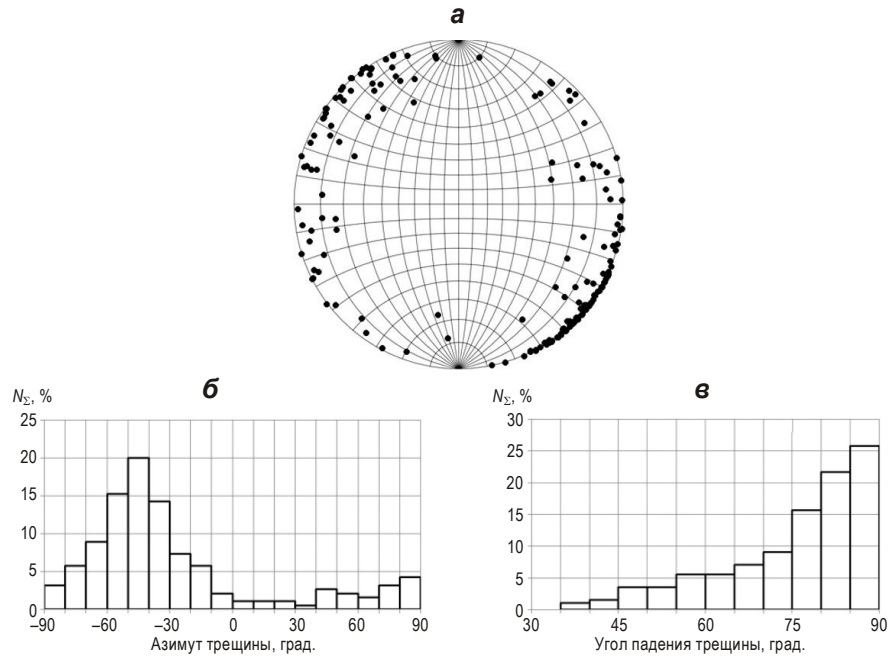


Рисунок 2.6 Распределения трещин на стереограмме (а), по азимуту (б) и по углу падения (в). Четверть трещин отнесена к классу флюидопроводящих.

Была использована основанная на каротажных кривых (выражения (1.21)) модель восстановления напряжений. В ее рамках строились профили полных горизонтальных напряжений, соответствующих априорно заданным “истинным” определяющим параметрам – минимальной ($\varepsilon_h^{\text{ист.}} = 0.0 \cdot 10^{-4}$) и максимальной ($\varepsilon_H^{\text{ист.}} = 5.0 \cdot 10^{-4}$) горизонтальным деформациям (Рисунок 2.5(в)).

Предлагаемый подход к восстановлению напряжений может быть признан успешно апробированным, если использование данных по прямым измерениям минимального горизонтального напряжения на фиксированной глубине и данных о проницаемости трещин позволит определить значения горизонтальных деформаций с некоторыми погрешностями такими, что истинные значения будут лежать в определенных интервалах:

$$\varepsilon_h^{\text{ист.}} \in \left[\varepsilon_h^{\text{опр.}} - \Delta\varepsilon_h^{\text{опр.}}; \varepsilon_h^{\text{опр.}} + \Delta\varepsilon_h^{\text{опр.}} \right], \quad \varepsilon_H^{\text{ист.}} \in \left[\varepsilon_H^{\text{опр.}} - \Delta\varepsilon_H^{\text{опр.}}; \varepsilon_H^{\text{опр.}} + \Delta\varepsilon_H^{\text{опр.}} \right], \quad (2.11)$$

где $\varepsilon_h^{\text{опр.}}$, $\varepsilon_H^{\text{опр.}}$ – оцененные из анализа трещиноватости значения горизонтальных деформаций, $\Delta\varepsilon_h^{\text{опр.}}$ и $\Delta\varepsilon_H^{\text{опр.}}$ – погрешности, допускаемые при решении обратной задачи реконструкции профилей напряжений.

Были выполнены все описанные выше этапы предлагаемого метода:

1. Для всех возможных пар значений ε_h и ε_H по выражениям (1.21) рассчитаны главные напряжения, действующие на глубинах, на которых были определены трещины. Пары значений выбирались так, чтобы ни на одной трещине не выполнялось условие $\tau_n > C + \mu\sigma_n$, где C – считающийся известным коэффициент сцепления среды. Выполнение такого условия означало бы, что по трещине в текущем напряженном состоянии происходит скольжение.

2. По рассчитанным главным напряжениям для каждой пары значений ε_h и ε_H в соответствии с выражениями (2.1) – (2.3) рассчитаны значения нормальных и касательных напряжений, действующих на каждой из выделенных трещин. Полученные результаты наносились на диаграмму Мора для установления, какие из трещин будут являться критически напряженными в каждом случае.

3. Для всех пар значений ε_h и ε_H рассчитана доля критически напряженных трещин $N(\varepsilon_h, \varepsilon_H)$ при выбранных деформациях (Рисунок 2.7). Для визуализации использовались кривые, вдоль которых сохранялось значение ε_h (Рисунок 2.7, сплошные линии 1–4). По оси абсцисс отложено не само значение максимальной деформации, а разница $\varepsilon_H - \varepsilon_h$.

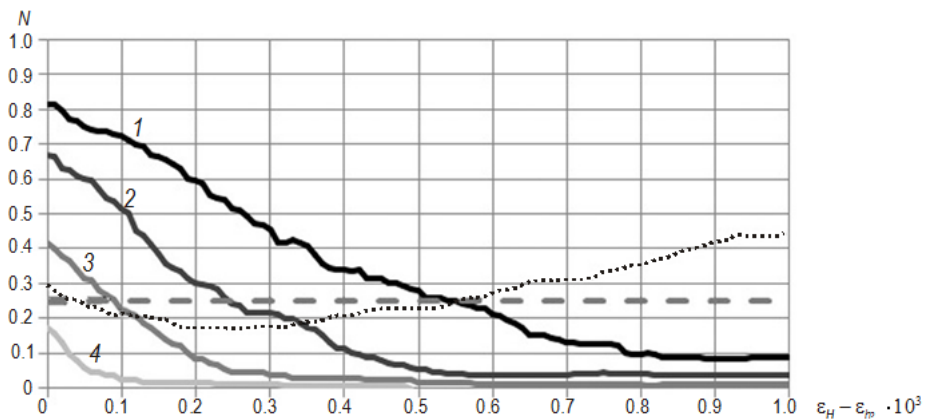


Рисунок 2.7 Доля проводящих трещин как функция деформаций. 1–4 – кривые, вдоль которых сохраняются значения ε_h , равные 0 (1), $0.5 \cdot 10^{-4}$ (2), $1.0 \cdot 10^{-4}$ (3), $1.5 \cdot 10^{-4}$ (4). Штриховая и пунктирные линии – см. пояснения в тексте.

4. Из множества пар значений ε_h и ε_H выделены те, для которых сохраняется величина $\varepsilon_h + \varepsilon_H \nu(z_0)$, где $\nu(z_0)$ – значение коэффициента Пуассона на глубине прямого измерения минимального горизонтального напряжения z_0 , а сама величина $\varepsilon_h + \varepsilon_H \nu(z_0)$ определяется подстановкой измеренного значения

минимального горизонтального напряжения в выражение (1.25), записанное для глубины z_0 . Была построена линия $N(\varepsilon_h, \varepsilon_H)$, вдоль которой сохраняется значение $\varepsilon_h + \varepsilon_H \nu(z_0)$ (Рисунок 2.7, пунктирная линия).

5. Согласно описанному подходу, который устанавливает соответствие между критически напряженными трещинами и трещинами, идентифицируемыми по микроимджам как проводящие, на тот же график наносится горизонтальная линия, отвечающая условию $N(\varepsilon_h, \varepsilon_H) = N^*$, где доля проводящих трещин определена по микроимджам. В конкретном случае эта величина составляла 0.25 (Рисунок 2.7, горизонтальная штриховая линия).

6. В конечном итоге истинные значения горизонтальных деформаций ε_h и ε_H должны быть получены из координат точки пересечения трех линий: одной из линий $\varepsilon_h = \text{const}$, линии, построенной по прямым измерениям минимального напряжения $\varepsilon_h + \varepsilon_H \nu(z_0) = \text{const}$ и прямой, соответствующей измеренной доли проводящих трещин $N(\varepsilon_h, \varepsilon_H) = N^*$.

Важно отметить, что такая точка будет существовать, так как линии $\varepsilon_h = \text{const}$ полностью покрывают рассматриваемое пространство. Минимальная горизонтальная деформация определяется тем, какая именно линия $\varepsilon_h = \text{const}$ пересекает две другие рассматриваемые кривые; максимальная горизонтальная деформация ε_H определяется по абсциссе точки пересечения.

Из рисунка 2.7 видно, что в рассматриваемом случае могут быть выделены две точки пересечения кривых: $\varepsilon_h = 0.0 \cdot 10^{-4}$, $\varepsilon_H = 5.5 \cdot 10^{-4}$ (находится в правой части) и $\varepsilon_h = 1.2 \cdot 10^{-4}$, $\varepsilon_H = 1.7 \cdot 10^{-4}$ (в левой части). В этом проявляется нелинейность системы уравнений (2.9) – (2.10) – несмотря на то, что предлагаемый подход делает эту систему разрешимой, он не обеспечивает единственности решения. Тем не менее, множество этих решений счетно, так что привлечение результатов дополнительных исследований, как, например, информации о вывалах, может позволить выбрать из полученных решений верное.

Важно отметить, что функция $N(\varepsilon_h, \varepsilon_H)$ является достаточно полой при $\varepsilon_h + \varepsilon_H v(z_0) = \text{const}$ (Рисунок 2.7), что приводит к нелинейному характеру влияния ошибки в определении доли проницаемых трещин на погрешность результата. Так как эта ошибка неизбежна (интерпретация микроимиджей выполняется вручную, некоторые результаты имеют субъективный характер), необходимо корректно провести анализ погрешности. Если горизонтальные деформации определены с погрешностями, то и горизонтальные напряжения определяются неточно.

Можно установить верхнюю $\overline{\sigma_{h,H}} = \sigma_{h,H}(\varepsilon_h^{\text{опр.}} + \Delta\varepsilon_h^{\text{опр.}}, \varepsilon_H^{\text{опр.}} + \Delta\varepsilon_H^{\text{опр.}})$ и нижнюю $\underline{\sigma_{h,H}} = \sigma_{h,H}(\varepsilon_h^{\text{опр.}} - \Delta\varepsilon_h^{\text{опр.}}, \varepsilon_H^{\text{опр.}} - \Delta\varepsilon_H^{\text{опр.}})$ границы определенных значений горизонтальных напряжений. Такой их выбор объясняется линейным характером возрастания функций напряжений от деформаций в выражениях (1.21). Таким образом, успешным применением подхода можно считать выполнение того, что истинные значения напряжений будут лежать внутри интервала $[\underline{\sigma_{h,H}}; \overline{\sigma_{h,H}}]$ для всего рассматриваемого диапазона глубин. В то же время использование введенных границ дает возможность численно оценить эффективность подхода – предлагается взять в качестве параметра ширину коридора допустимых значений напряжений, определяемую как

$$\Delta\sigma_{h,H} = \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} (\overline{\sigma_{h,H}}(\zeta) - \underline{\sigma_{h,H}}(\zeta)) d\zeta, \quad (2.12)$$

где z_1 и z_2 – глубины, соответствующие началу и концу интервала, на котором восстанавливаются профили горизонтальных напряжений, ζ – переменная, по которой выполняется интегрирование. Таким образом, $\Delta\sigma_{h,H}$ представляет собой условную среднюю величину неопределенности в расчете соответствующего напряжения (нижний индекс h соответствует минимальному горизонтальному напряжению, индекс H – максимальному).

Для рассматриваемого случая относительная погрешность определения доли проводящих трещин принята равной 10 %; были получены горизонтальные деформации и их погрешности $\Delta\varepsilon_h^{\text{опр.}}$ и $\Delta\varepsilon_H^{\text{опр.}}$. Ширина коридора минимальных горизонтальных напряжений $\Delta\sigma_h$ составила 0.5 МПа, что пренебрежимо мало, и можно считать, что минимальные горизонтальные напряжения определены точно; ширина коридора максимальных горизонтальных напряжений – $\Delta\sigma_H = 6.0$ МПа. Интересно сравнить эту погрешность с погрешностью оценки максимального горизонтального напряжения по вывалам (Рисунок 1.8 построен для той же синтетической модели механических свойств): погрешность $\Delta\sigma_H = 6.0$ МПа соответствует пятиградусной ошибке в определении ширины вывала.

На рисунке 2.8 показаны восстановленные границы эффективных максимальных горизонтальных напряжений $\underline{\sigma}_H$ и $\overline{\sigma}_H$ как функции глубины. Можно видеть, что истинный профиль максимальных горизонтальных напряжений (фиолетовый профиль) находится в полученном коридоре, что говорит о принципиальной возможности применения рассматриваемого подхода для уточнения профиля максимальных горизонтальных напряжений.

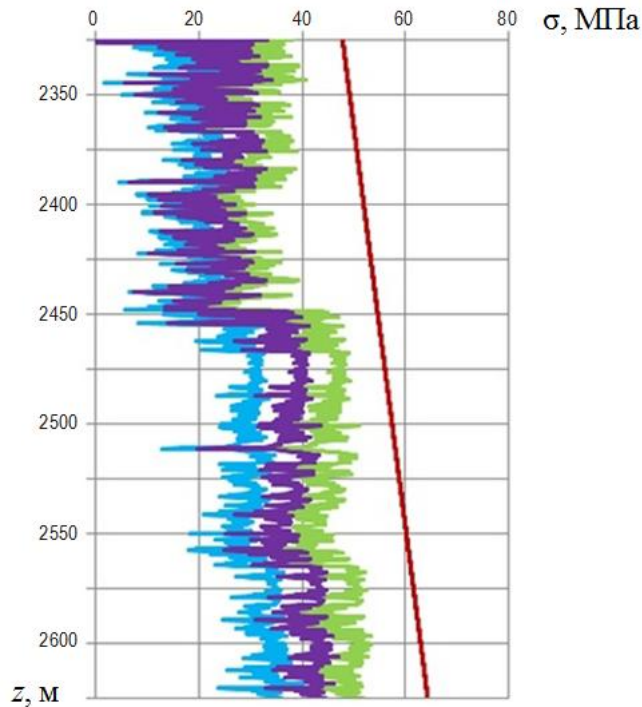


Рисунок 2.8 Восстановленные границы максимальных горизонтальных напряжений $\underline{\sigma}_H$ и $\overline{\sigma}_H$ как функции глубины. Представлены “истинный” профиль максимальных горизонтальных напряжений (фиолетовый) и оценки их нижней (голубой) и верхней (зеленый) границ по рассматриваемому подходу. Прямая линия – профиль вертикальных напряжений.

Эффективность подхода может быть продемонстрирована на результатах анализа погрешности. Зависимость ширины коридора максимальных горизонтальных напряжений $\Delta\sigma_H$ от погрешности, с которой определена доля проводящих трещин по микроимиджам, показана на рисунке 2.9. По оси абсцисс отложена относительная погрешность в определении доли проводящих трещин (абсолютная погрешность, отнесенная к измеренной доле проводящих трещин). Построены две кривых – для случаев, когда проводящими являются 25 % (серая кривая) и 35 % (черная) всех трещин. Видно, что в целом поведение кривых схоже, хотя присутствуют различия, связанные с нелинейным поведением кривых, представленных выше на рисунке 2.7.

Необходимо отметить асимптотическое поведение кривых: при стремлении относительной погрешности к единице, что фактически соответствует случаю до применения предлагаемого подхода, ширина коридора допустимых значений максимальных горизонтальных напряжений составляет порядка 35 МПа. Таким

образом, использование предлагаемого подхода позволило снизить неопределенность в восстановлении профиля максимальных напряжений почти в шесть раз.

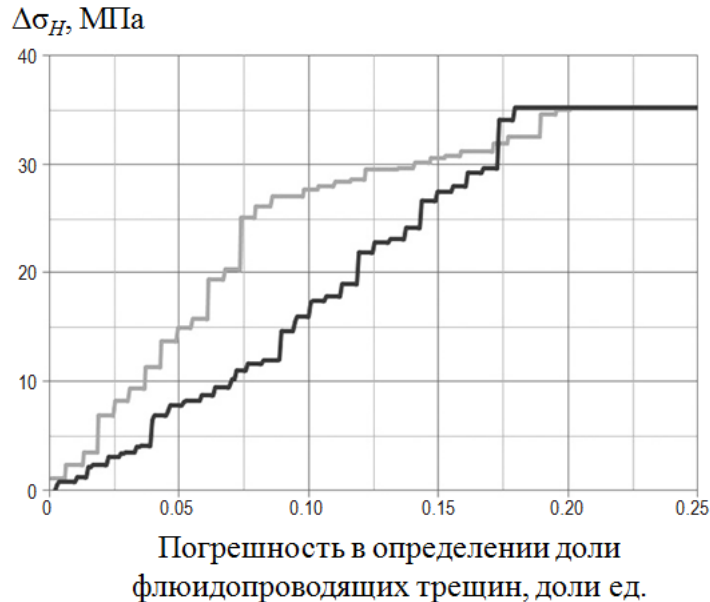


Рисунок 2.9 Анализ эффективности предлагаемого подхода. Ширина коридора допустимых значений максимальных напряжений как функция погрешности интерпретации микроимиджей при “истинной” доле проводящих трещин 0.25 (серая кривая) и 0.35 (черная).

Результаты, представленные на рисунке 2.9, позволяют оценить влияние на полученный результат зашумленности синтетических данных. С увеличением погрешности в определении доли проводящих трещин ширина коридора значений максимальных напряжений тоже увеличивается. При этом увеличение ширины коридора происходит достаточно плавно, претерпевая небольшой скачок в тот момент, когда два решения системы (2.9) – (2.10) становятся неразличимы, т.е. погрешности $\Delta\varepsilon_H^{\text{опр.}}$ становятся сравнимы с разницей между значениями $\varepsilon_H^{\text{опр.}}$, выбранными в разных областях (Рисунок 2.7). Тем не менее, увеличение погрешности не приводит к тому, что “истинный” профиль напряжений оказывается вне интервала $\left[\underline{\sigma}_{h,H}; \overline{\sigma}_{h,H} \right]$, что позволяет говорить об устойчивости решения с дальнейшим зашумлением синтетических данных.

Применение рассматриваемого подхода к синтетическим данным продемонстрировало возможность практически точного восстановления профиля

минимальных горизонтальных напряжений. Максимальные горизонтальные напряжения не были восстановлены с такой высокой точностью, но неопределенность их восстановления была снижена практически в шесть раз.

2.4 Выводы к главе 2

Предложенный подход к использованию данных, полученных в результате интерпретации микроимиджей, позволяет существенно снизить неопределенность, возникающую при решении обратной задачи восстановления профилей горизонтальных напряжений по скважинным данным. В главе 1 было показано, что для корректного решения этой задачи недостаточно только прямых измерений минимального горизонтального напряжения, что приводит к необходимости наложения дополнительных связей на параметры, определяющие горизонтальные напряжения. Установление связи между напряженным состоянием трещин и их проводящей способностью позволило ввести параметр интегрального характера – долю проводящих трещин. В совокупности с точечными прямыми измерениями минимального горизонтального напряжения этот параметр позволяет математически свести множество решений обратной задачи к некоторому их конечному набору.

В основе подхода лежит гипотеза о существовании связи между флюидопроводящими и критически напряженными трещинами, подробно рассмотренная в разделе 2.1. У этой гипотезы и, соответственно, у разработанного подхода существует определенная область применимости: хрупкие трещиноватые породы с низкой матричной проницаемостью.

Выполненный анализ неопределенности показал, что решения могут быть найдены с некоторой точностью, в значительной степени зависящей как от погрешности при интерпретации микроимиджей, так и от напряженного состояния среды.

Предлагаемый подход следует использовать в совокупности с другими методами реконструкции профилей горизонтальных напряжений, в первую

очередь, с основанными на анализе проявлений при бурении. Естественной представляется проверка одного метода другим, что необходимо делать на результатах реальных скважинных исследований, а не на синтетических данных.

Интерес вызывает возможность снижения неопределенности в восстановлении профилей горизонтальных напряжений при недостаточности данных – при отсутствии как тех или иных каротажных данных, так и прямых измерений параметров напряженного состояния.

Важно отметить универсальность предлагаемого подхода. Накладываемая связь не зависит от того, по какой именно модели происходит восстановление профилей горизонтальных напряжений – это может быть как модель линейного возрастания горизонтальных напряжений с глубиной, так и модель, рассматривающая горизонтальные деформации. Подход применим и в первом случае, и во втором; причем в первом случае при определенных условиях достижимо аналитическое решение, которое рассмотрено в разделе 3.1.

Таким образом, была сформулирована обратная задача реконструкции профилей напряжений по анализу трещиноватости пород околоскважинной зоны. Был предложен теоретически обоснованный и верифицированный на синтетических данных подход к решению этой обратной задачи.

Глава 3. Реконструкция профилей горизонтальных напряжений в отсутствие прямых измерений параметров напряженного состояния

Разработанный подход по реконструкции профилей горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости может быть использован как самостоятельно, так и в совокупности с прочими подходами по оценке параметров напряженного состояния.

Интересным оказывается проверить возможности этого подхода, если он применяется без привлечения дополнительных методов оценки напряжений, и сравнить результаты реконструкции профилей напряжений. В первую очередь, важно проверить, позволяет ли разработанный подход оценивать значения горизонтальных напряжений в случае отсутствия прямых измерений – миниГРП или тестов на утечки. Если оказывается, что хоть какая-то оценка горизонтальных напряжений возможна, она легко может быть дополнена информацией о минимальном горизонтальном напряжении, при этом существенно снизится неоднозначность оцениваемых параметров.

Для применения созданного подхода на практике был использован инструмент, известный как полигон напряжений [Zoback et al., 1986], подробно описанный в разделе 3.1. В этом же разделе показано, каким образом анализ трещиноватости может быть использован для оценки возможных значений горизонтальных напряжений в специфическом случае, позволяющем получить аналитическое решение для доли критически напряженных трещин как функции параметров, управляющих значениями горизонтальных напряжений. В последующих разделах описаны результаты применения разработанного подхода для конкретных задач.

3.1 Полигон напряжений и аналитическое решение

Такой инструмент, как полигон напряжений был представлен в работе [Zoback et al., 1986]. В ходе его построения рассматривается координатная плоскость (σ_h, σ_H) , на которой оси соответствуют значениям минимального σ_h и

максимального σ_H горизонтальных напряжений, действующих на некоторой фиксированной глубине при текущих значениях управляющих параметров. На такой плоскости строятся линии, ограничивающие область допустимых значений напряжений исходя из условий неразрушения среды (1.4). Рассматриваются различные соотношения между горизонтальными и вертикальным напряжениями – различные тектонические режимы: сброс (вертикальное напряжение σ_V максимально), сдвиг ($\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$) и надвиг (σ_V минимально). В связи с тем, что вертикальное напряжение на фиксированной глубине остается постоянным, имеет смысл рассматривать условие (1.4) для наложения ограничения на значения горизонтальных напряжений. Учитывая, что вертикальное напряжение может быть как максимальным, так и минимальным, имеет смысл переписать условие (1.4) и в качестве условия для σ_3 . В таком случае критерии неразрушения будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\leq \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \\ \sigma_3 &\geq \sigma_1 \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - 2C \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Тогда в случае сброса второе выражение будет накладывать условие на нижнюю границу возможных значений σ_h , в случае надвига – первое выражение определит верхнюю границу возможных значений σ_H . В сдвиговом режиме выражения (3.1) определяют границу соотношения между горизонтальными напряжениями. Математически эти условия выглядят следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_h \geq \sigma_V \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - 2C \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad \sigma_h \leq \sigma_H \leq \sigma_V, \quad \text{сброс,} \\ \sigma_H \leq \sigma_h \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad \sigma_h \leq \sigma_V \leq \sigma_H, \quad \text{сдвиг,} \\ \sigma_H \leq \sigma_V \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad \sigma_V \leq \sigma_h \leq \sigma_H, \quad \text{надвиг.} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Выражения (3.2) в сочетании с условием $\sigma_H \geq \sigma_h$ (по определению) позволяют ограничить четырехугольную область на плоскости (σ_h, σ_H) (Рисунок 3.1). Условие, накладываемое на управляющие параметры, принимает следующий вид: значения управляющих параметров должны быть такими, чтобы значения горизонтальных напряжений, определенные на любой глубине, не выходили за пределы выделенной области.

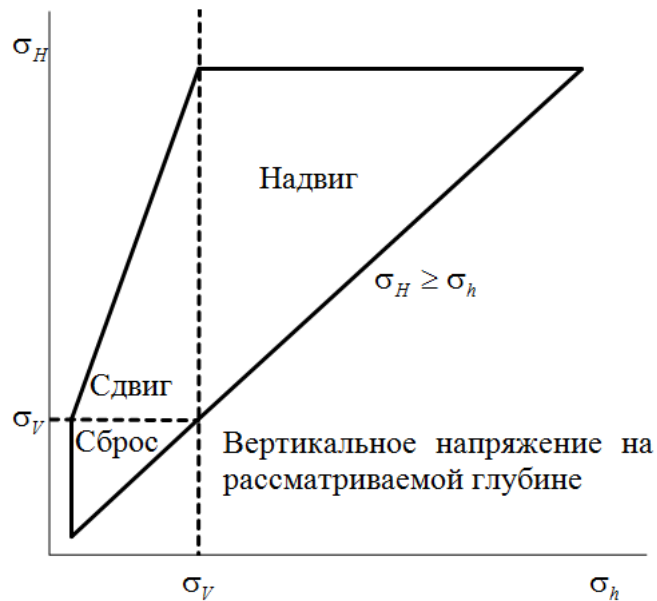


Рисунок 3.1 Характерный вид полигона напряжений.

Существующие подходы к реконструкции профилей напряжений могут быть применены для сужения области допустимых значений горизонтальных напряжений, дополняя выражения (3.2) новыми условиями на σ_h и σ_H . Для того, чтобы проиллюстрировать результативность разработанного подхода к оценке горизонтальных напряжений из анализа трещиноватости, можно рассмотреть специфический случай, допускающий аналитическое решение.

Будет рассмотрена задача определения профилей горизонтальных напряжений для вертикальной скважины с использованием данных о трещиноватости. В качестве параметров, управляющих профилями горизонтальных напряжений, будет использоваться отношение горизонтальных напряжений к вертикальному σ_h/σ_V и σ_H/σ_V в предположении, что профиль вертикального напряжения уже рассчитан и является линейным.

Предполагается, что для получения данных об ориентации трещин и их флюидопроводимости используются акустический и электрический микроимиджеры, позволяющие выделить все трещины в рассматриваемом интервале. Далее накладываются дополнительные ограничения на ориентацию этих трещин: плотность покрытия трещинами области, которая ограничена на диаграммах Мора тремя окружностями, постоянна; окружности построены на главных напряжениях – точках с координатами $(\sigma_1/S_V, 0)$, $(\sigma_2/S_V, 0)$, $(\sigma_3/S_V, 0)$ (Рисунок 3.2). Выполняется нормировка на полное вертикальное напряжение S_V .

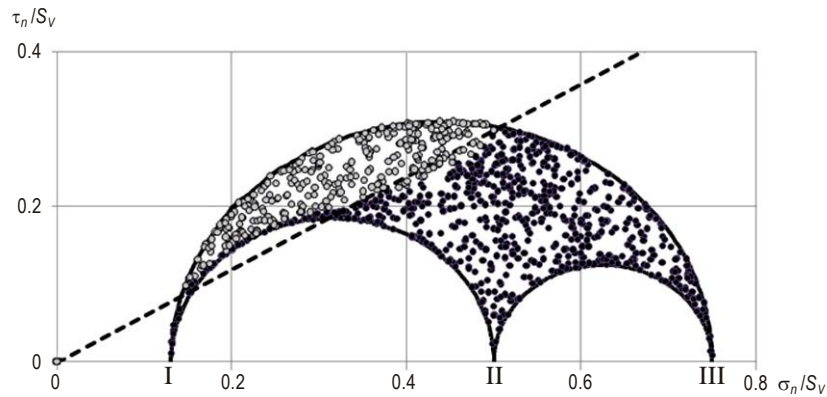


Рисунок 3.2 Трещины на диаграмме Мора в случае постоянного отношения горизонтальных напряжений к вертикальному. Серые точки соответствуют рассчитанным нормальным и касательным напряжениям на критически напряженных трещинах, черные – на не критически напряженных. Штриховая линия – критерий сухого трения. На горизонтальной оси отмечены точки, в которых нормальное напряжение равно одному из главных: I – σ_3/S_V , II – σ_2/S_V , III – σ_1/S_V .

Иными словами, для всякой точки A , имеющей координаты $(\sigma_n^A/S_V, \tau_n^A/S_V)$ и лежащей внутри такой области, отношение площади любой окрестности $O(A)$ этой точки $S_{O(A)}$ к площади всей области S_Σ можно считать равным отношению количества трещин с соответствующими напряжениями, принадлежащими данной окрестности $N_{O(A)}$, к общему количеству трещин:

$$S_{O(A)}/S_\Sigma = N_{O(A)}/N_\Sigma. \quad (3.3)$$

В таком случае измеряемый параметр N (доля критически напряженных трещин) может быть выражен через площади кругов Мора:

$$N = S_{\text{пр.}}/S_{\Sigma}, \quad (3.4)$$

где $S_{\text{пр.}}$ – площадь области, ограниченной кругами Мора и находящейся выше критерия сухого трения.

Полная площадь области определяется из очевидного выражения:

$$S_{\Sigma} = \left((\sigma_1 - \sigma_3)^2 - (\sigma_1 - \sigma_2)^2 - (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right) \cdot \pi/8. \quad (3.5)$$

Площадь области проводящих трещин может быть найдена как

$$S_{\text{пр.}} = S_{13} - S_{12} - S_{23}. \quad (3.6)$$

Здесь S_{ij} – площадь сегмента круга Мора, построенного на главных напряжениях σ_i и σ_j (хорда сегмента – критерий сухого трения $\tau_n/S_V = \mu \cdot \sigma_n/S_V$); $i, j = 1, 2, 3$; $i > j$. Площадь этого сегмента может быть получена в виде явной функции из выражения:

$$S_{ij} = \int_{\sigma_{n_1}^{ij}}^{\sigma_{n_2}^{ij}} \left[\sqrt{\sigma_n^2 - \sigma_n(\sigma_i + \sigma_j) + \sigma_i\sigma_j} - \mu\sigma_n \right] d\sigma_n, \quad (3.7)$$

в котором $\sigma_{n_1}^{ij}$ и $\sigma_{n_2}^{ij}$ – абсциссы точек пересечения соответствующего круга Мора с критерием сухого трения, характеризуемым коэффициентом наклона μ .

Если $(\sigma_i + \sigma_j)^2 - 4(1 + \mu^2)\sigma_i\sigma_j \geq 0$, то

$$S_{ij} = (\sigma_i - \sigma_j)^2 \left(\arccos B_{ij} - \arccos A_{ij} + B_{ij}\sqrt{1 - A_{ij}^2} - A_{ij}\sqrt{1 - B_{ij}^2} \right) / 8, \quad (3.8)$$

$$A_{ij} = \frac{-\mu^2(\sigma_i + \sigma_j) + \sqrt{(\sigma_i + \sigma_j)^2 - 4(1 + \mu^2)\sigma_i\sigma_j}}{(1 + \mu^2)(\sigma_i - \sigma_j)},$$

$$B_{ij} = \frac{-\mu^2(\sigma_i + \sigma_j) - \sqrt{(\sigma_i + \sigma_j)^2 - 4(1 + \mu^2)\sigma_i\sigma_j}}{(1 + \mu^2)(\sigma_i - \sigma_j)}.$$

Если $(\sigma_i + \sigma_j)^2 - 4(1 + \mu^2)\sigma_i\sigma_j < 0$, то можно считать, что $S_{ij} = 0$.

Геометрически этот случай может быть выполнен для меньших кругов Мора, когда хорда, отвечающая критерию сухого трения, не пересекает их.

Выражения (3.4) – (3.8) позволяют рассчитать долю проводящих трещин при разных соотношениях между главными напряжениями. На рисунке 3.3 представлены зависимости доли критически напряженных трещин от параметра σ_H/σ_V . В общем случае имеет смысл рассматривать функцию двух переменных $N(\sigma_h/\sigma_v, \sigma_H/\sigma_V)$, но, как правило, на первый из этих аргументов накладывается дополнительное ограничение. Поэтому бывает удобно строить семейства кривых, вдоль которых поддерживается постоянным параметр σ_h/σ_v (Рисунок 3.3).

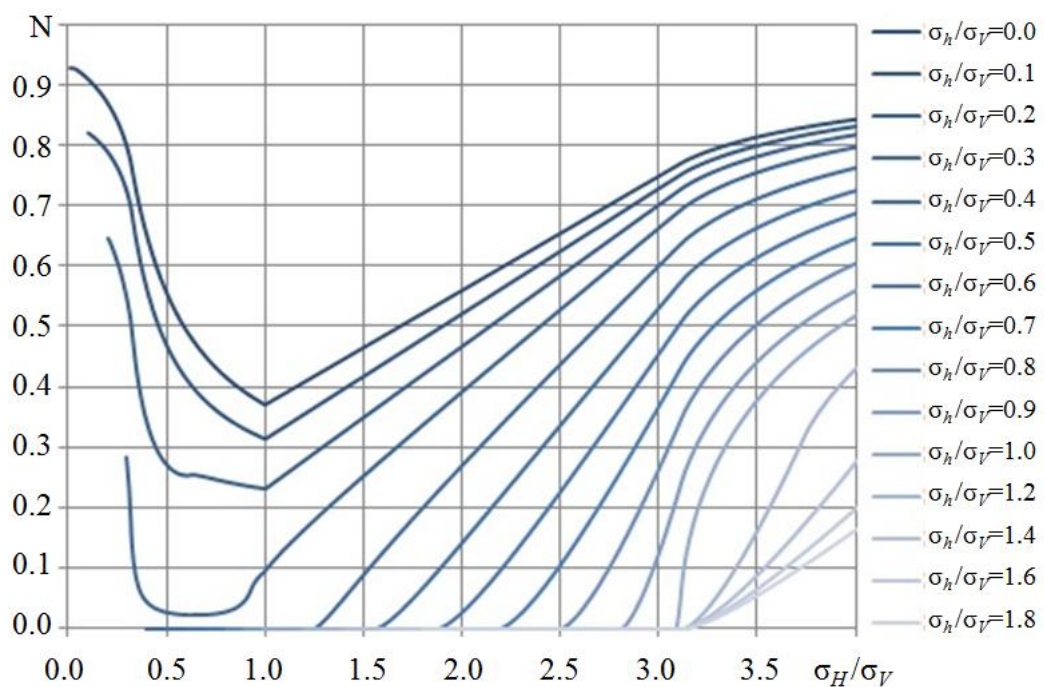


Рисунок 3.3 Доля проводящих трещин как функция параметров, определяющих профили горизонтальных напряжений.

Для построения рисунка 3.3 использовано значение тангенса угла внутреннего трения $\mu = 0.6$, соответствующее типичной величине этого параметра [Zoback, 2007]. Можно отметить характерное поведение кривых $N(\sigma_h/\sigma_v, \sigma_H/\sigma_V)$: резкое уменьшение по мере увеличения σ_H/σ_V в сбросовом режиме и дальнейший рост доли критически напряженных трещин по мере перехода в сдвиг и надвиг.

Пределы изменения управляющих параметров определяются исходя из условий неразрушения среды под действием тектонических сил. Управляющие параметры, при которых строятся кривые, представленные на рисунке 3.3, должны принимать такие значения, чтобы расчетные главные напряжения удовлетворяли ограничениям (3.1).

При рассмотрении результатов, представленных на рисунке 3.3 можно сделать ряд важных выводов. В первую очередь, видно, что если доля проводящих трещин N известна, график можно дополнить горизонтальной прямой линией $N = \text{const}$, причем множество точек пересечения этой линии с построенным семейством кривых будет определять все возможные пары параметров, определяющих горизонтальные напряжения, допускающие заданное значение доли проводящих трещин. При этом область допустимых значений управляющих параметров оказывается существенно уже, чем область, получаемая путем наложения на напряжения условий (3.2).

Проиллюстрировать это с помощью полигона напряжений можно следующим образом: происходит разрешение системы относительно одного из управляющих параметров при наложении дополнительного условия $N = \text{const}$. В таком случае может быть получено множество значений σ_h/σ_v и σ_H/σ_v , удовлетворяющих этому условию. Представляется естественным построить соответствующее множество точек в плоскости (σ_h, σ_H) и сравнить с полигоном напряжений. Надо отметить, что имеет смысл рассматривать только те значения σ_h/σ_v и σ_H/σ_v , при которых неравенства (3.2) не нарушаются на любой глубине. В таком случае полученное множество точек (σ_h, σ_H) , удовлетворяющих условию $N = \text{const}$ будет лежать внутри фигуры, ограниченной условиями (3.2). Множество таких точек может быть задано в виде неявной функции $F(\sigma_h, \sigma_H; N = \text{const})$. Далее, если рассмотреть несколько различных значений $N = \text{const}$, на плоскости (σ_h, σ_H) можно построить семейство кривых, вдоль которых эта величина сохраняется. На рисунке 3.4 приведено такое построение для фиксированной глубины, на которой вертикальное напряжение составляет 35 МПа, угол

внутреннего трения $\pi/6$ (соответствующий коэффициент μ близок к 0.6), коэффициент сцепления 15 Мпа [Дубиня, Ежов, 2017а].

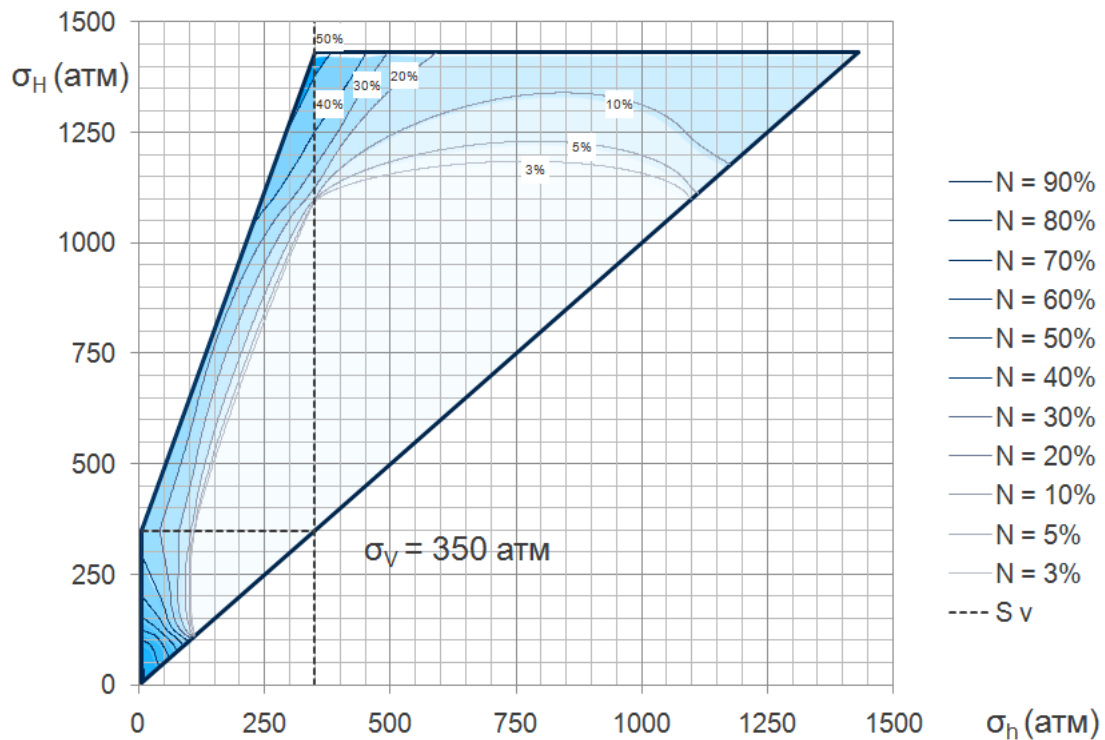


Рисунок 3.4 Линии постоянной доли критически напряженных трещин на полигоне напряжений.

На рисунке 3.4 явно проявляется нелинейный характер построенных кривых. Заливкой показаны различные области, на которых доля критически напряженных трещин ограничена сверху и снизу представителями рассмотренного семейства кривых. Видно, что большая часть полигона напряжений соответствует состоянию, в котором значительная часть трещин (более 97%) не находится в критическом напряженном состоянии. Эта область показана на рисунке 3.4 наиболее бледным оттенком. С другой стороны, область, в которой доля критически напряженных трещин N превосходит 50%, сравнительно мала: эти значения достигаются только при минимальных значениях σ_h в области сбросового режима, а также при максимальных значениях σ_H на границе сдвигового и надвигового тектонических режимов. Особенно сильно наблюдаемая нелинейность наблюдается при малых значениях σ_h в области сброса. Соответствующая область показана в увеличенном масштабе на рисунке 3.5

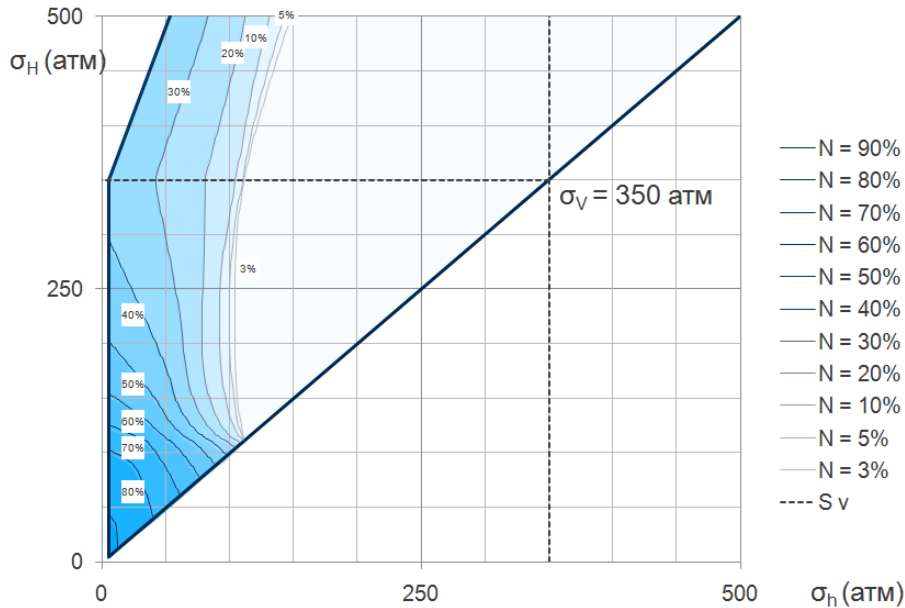


Рисунок 3.5 Линии постоянной доли критически напряженных трещин в области сброса.

Из анализа рисунка 3.5 видно, что доля проводящих трещин, стремящаяся к единице, соответствует минимальным значениям горизонтальных напряжений, что согласуется с поведением кривых, представленных на рисунке 3.3.

Построенные семейства кривых (Рисунки 3.4 – 3.5) могут быть использованы для оценки управляющих параметров следующим образом: если на основании совместной интерпретации данных акустического и электрического микросканеров доля проводящих трещин может быть определена с некоторой погрешностью, то есть определены такие значения N_1 и N_2 , что $N \in [N_1; N_2]$, то соответствующие кривые $F(\sigma_h, \sigma_H; N = N_1)$ и $F(\sigma_h, \sigma_H; N = N_2)$ могут быть построены на плоскости (σ_h, σ_H) . Тогда в роли оценки значений горизонтальных напряжений выступят области, ограниченные двумя построенными кривыми и неравенствами (3.2). Таким же образом может быть учтена ошибка, допущенная при интерпретации микросканеров: если известна погрешность ΔN , с которой рассчитана доля критически напряженных трещин $N_{\text{изм}}$, горизонтальные напряжения будут лежать в области, ограниченной кривыми $F(\sigma_h, \sigma_H; N = N_{\text{изм}} - \Delta N)$ и $F(\sigma_h, \sigma_H; N = N_{\text{изм}} + \Delta N)$. На рисунке 3.6 показаны соответствующие кривые для $N_{\text{изм}} = 0.20$ и $\Delta N = 0.05, 0.10, 0.15$.

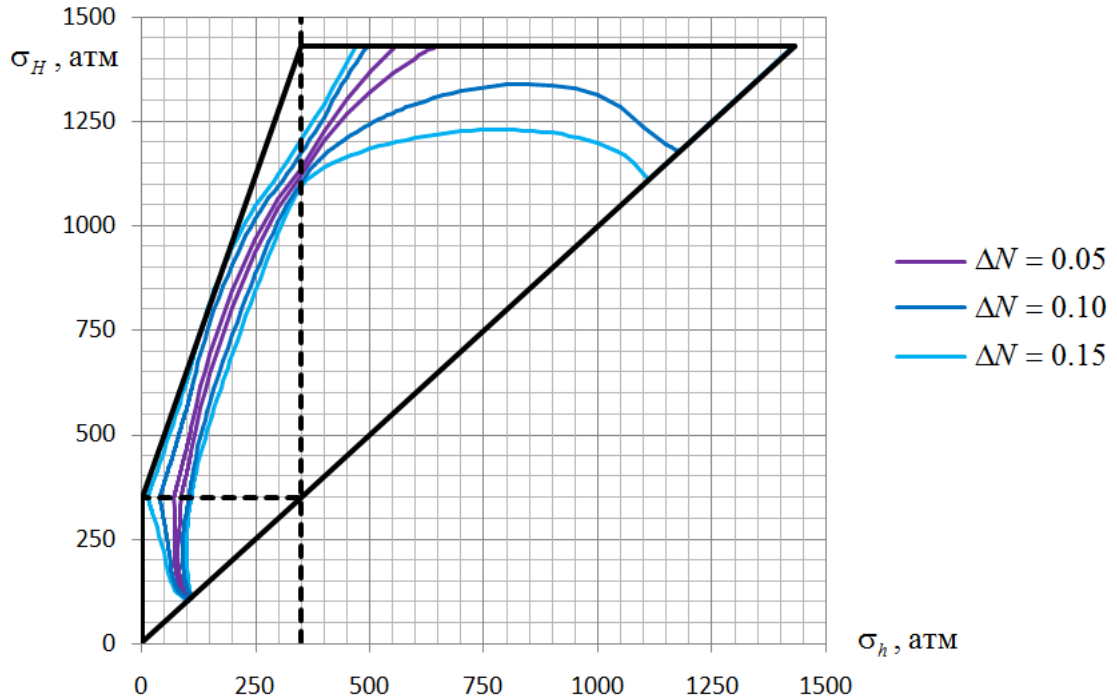


Рисунок 3.6 Линии постоянной доли критически напряженных трещин в окрестностях $N = 0.2$.

Эти результаты позволяют оценить диапазон допустимых значений параметров, характеризующих профили горизонтальных напряжений, по данным об ориентации критически напряженных трещин без привлечения дополнительных исследований – прямых измерений минимального горизонтального напряжения или анализа вывалов.

Если в скважине на какой-то глубине проведено прямое измерение значения минимального горизонтального напряжения σ_h^* , используется следующий подход. В первую очередь, проводится анализ числа критически напряженных трещин – в результате чего рассчитываются значения $N_{\text{изм}}$ и ΔN . Затем для глубины проведения измерения строятся семейства кривых $F(\sigma_h, \sigma_H; N = N_{\text{изм}} - \Delta N)$ и $F(\sigma_h, \sigma_H; N = N_{\text{изм}} + \Delta N)$ аналогично тому, как показано на рисунке 3.6. После этого на ту же плоскость (σ_h, σ_H) наносится вертикальная линия $\sigma_h = \sigma_h^*$, что дает возможность естественным образом получить область допустимых значений σ_H , ограничения для которой могут быть получены из двух функций: $F(\sigma_h = \sigma_h^*, \sigma_H; N = N_{\text{изм}} - \Delta N)$ и $F(\sigma_h = \sigma_h^*, \sigma_H; N = N_{\text{изм}} + \Delta N)$. В результате накладываются ограничения на управляющие параметры значения – ε_h и ε_H , или

σ_h/σ_v и σ_H/σ_v , – и профили горизонтальных напряжений могут быть восстановлены с повышенной точностью.

Таким образом, применяемый подход позволяет снизить неопределенность в восстановлении профилей горизонтальных напряжений, если он использован в совокупности с другими методами оценки напряжений. Если же другие методы по тем или иным причинам неприменимы, он позволяет дать предварительную оценку значений управляющих параметров, значительно сужая область допустимых значений по сравнению с оценкой по критерию разрушения (условия (3.2)).

3.2 Оценка напряжений вдоль скважин месторождения России

Описанный подход был использован для оценки параметров, характеризующих напряженное состояние, по данным, полученным со скважин одного из месторождений Ненецкого Автономного Округа. Исследуемый объект характеризовался следующими особенностями:

1. На скважинах месторождения не проводились прямые измерения величины минимального горизонтального напряжения, отсутствовали данные мини-ГРП и тестов на утечки.
2. На скважинах месторождения были проведены многочисленные геофизические исследования, на керновом материале были проведены лабораторные исследования, проведен комплекс работ по моделированию механических свойств пород околоскважинного пространства. Полученные результаты позволили построить одномерные модели механических свойств (профили упругих и прочностных свойств пород околоскважинного пространства вдоль траекторий скважин) [Dubinya et al., 2017].
3. На скважинах был проведен расширенный комплекс геофизических исследований, по результатам которых определены ориентации трещин в породах околоскважинного пространства и их проводящие свойства.

Эти особенности указывают на целесообразность использования предлагаемого подхода к анализу трещиноватости для оценки возможных значений величин горизонтальных напряжений, действующих в окрестностях этих скважин. Тщательный анализ микроимиджеров также показал возможность использования информации о вывалах для верификации восстановленных профилей напряжений. Было решено действовать следующим образом: в первую очередь был проведен анализ трещиноватости по предлагаемому подходу, были определены возможные значения управляющих параметров (была выбрана модель, основанная на каротажных кривых, в качестве управляющих параметров использованы горизонтальные деформации ε_h и ε_H , профили горизонтальных напряжений рассчитывались по соотношениям (1.21)). В соответствии с полученными величинами деформаций были реконструированы профили горизонтальных напряжений. На основании этих профилей и данных о бурении были рассчитаны концентрации напряжений вокруг ствола скважины, возникшие при бурении. Фактически могут быть получены два вида результатов: модельные вывалы, полученные по восстановленным профилям, и реальные вывалы, наблюдаемые на микроимиджах. Сопоставление интервалов этих вывалов между собой дает возможность говорить о работоспособности подхода. Соответствие реальных и модельных вывалов свидетельствует о применимости подхода к реконструкции профилей напряжений на основании анализа трещиноватости и отсутствии ошибок в построении одномерных моделей механических свойств.

На рисунке 3.7 построена стереограмма, характеризующая ориентации трещин на одной из скважин (скважина А): каждой трещине поставлена в соответствие точка, координаты которой определяются пространственной ориентацией нормали к плоскости трещины – азимутальным углом и углом наклона. Также на стереограмму нанесено направление действия максимального горизонтального напряжения – для данной скважины это направление было определено на основании анализа вывалов (согласно [Zoback, 2007]) и составило 130° (направление NW–SE). На стереограмме указано

выполненное разделение трещин на классы: синим цветом показаны трещины, выделенные как проводящие, красным – как непроводящие. Выделение классов выполнено на основе интерпретации данных микроимиджеров согласно подходу [Silva et al., 2003]. Из стереограммы видно, что проводящие трещины локализованы в области азимутов, нормальных к направлению действия максимальных горизонтальных напряжений. Кроме того, угол, который нормали трещин составляют с вертикалью, сравнительно мал. Оба этих наблюдения свидетельствуют в пользу того, что в окрестности скважины преобладает сбросовый режим. Как видно из рисунков 3.4 и 3.5, в области сброса минимально множество возможных значений горизонтальных напряжений, соответствующих некоторому интервалу доли критически напряженных трещин. В связи с этим именно эта скважина была выбрана опорной – для нее были рассчитаны профили горизонтальных напряжений и модельные вывалы. Сравнение модельных вывалов с реальными для этой скважины позволяет говорить о применимости используемого подхода для оценки горизонтальных напряжений на скважинах данного месторождения.

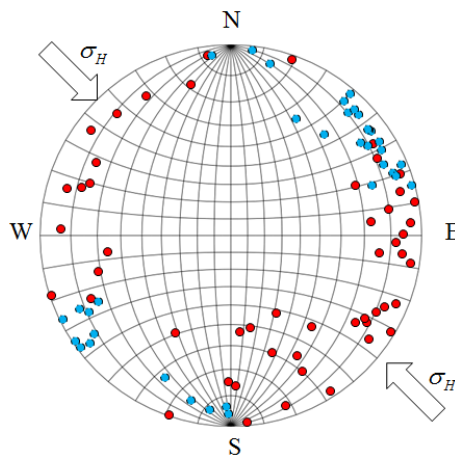


Рисунок 3.7 Стереограмма трещин для скважины в сбросовом тектоническом режиме.

Проведенный анализ интерпретации данных микроимиджера дал возможность определить диапазон возможных долей проводящих трещин: $N = N_{\text{изм}} \pm \Delta N = 0.46 \pm 0.03$. Относительная погрешность достаточно велика ввиду того, что на скважине обнаружено немного трещин – всего 87. Тем не менее,

режим сброса на скважине позволяет применить разработанный подход с высокой эффективностью.

На рисунках 3.8 и 3.9 представлены гистограммы распределения трещин по углам (азимут на рисунке 3.8 и угол наклона на рисунке 3.9). Сохранена цветовая гамма: проводящим трещинам ставится в соответствие синий цвет, непроводящим – красный.

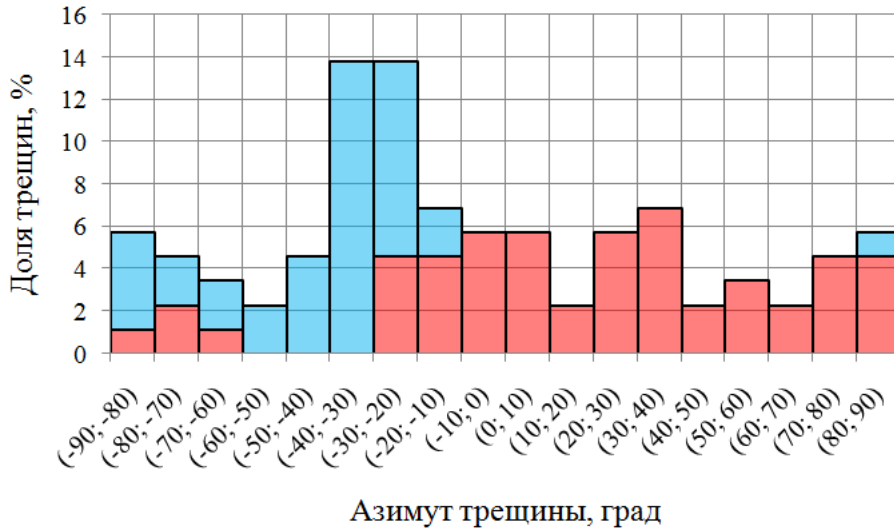


Рисунок 3.8 Распределение трещин по азимутам. Синим цветом выделены проводящие трещины, красным – непроводящие.

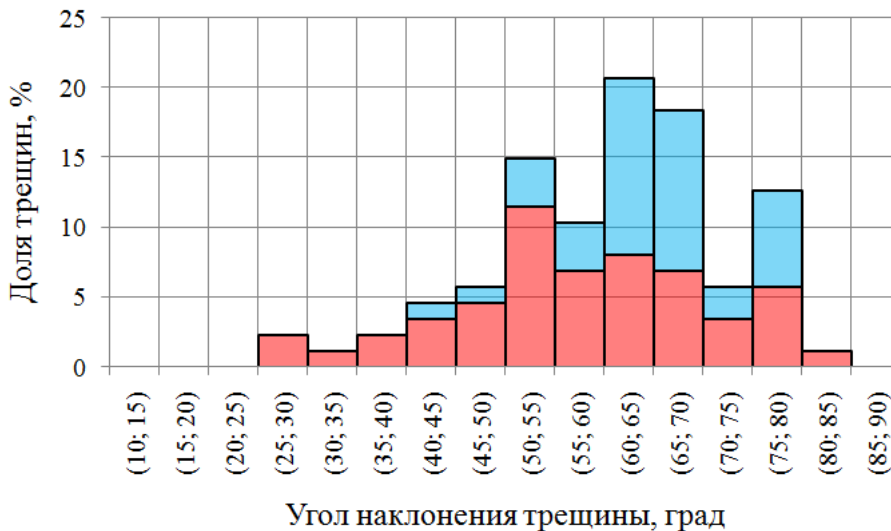


Рисунок 3.9 Распределение трещин по углам наклона. Синим цветом выделены проводящие трещины, красным – непроводящие.

Анализ построенных распределений свидетельствует о преобладании сбросового режима, что согласуется с гипотезой соответствия между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами (раздел 2.1). Ярко

выраженный максимум флюидопроводящих трещин под углом 90° к направлению действия максимального горизонтального напряжения (как видно из рисунка 3.7) характерен именно для преобладания вертикального напряжения над горизонтальными [Zoback, 2007].

Для восстановления профилей горизонтальных напряжений было проведено множество расчетов: величины σ_H и σ_h были рассчитаны по соотношениям (1.21) для всех пар горизонтальных деформаций ε_H и ε_h , для которых ни на какой глубине не нарушаются неравенства (3.1). Для каждой пары значений ε_H и ε_h была рассчитана доля критически напряженных трещин N [Dubinya, Ezhov, 2017]. Результаты представлены синими кривыми на рисунке 3.10 – линиями постоянных значений параметра ε_h .

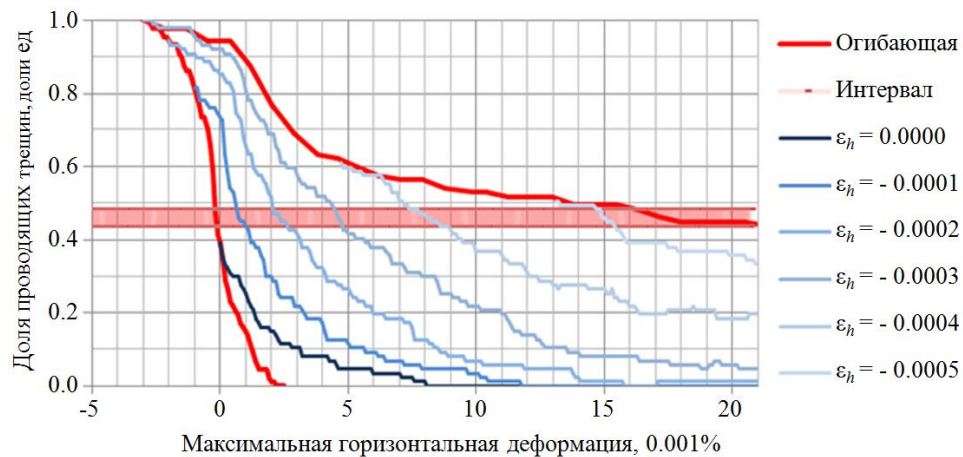


Рисунок 3.10 Доля проводящих трещин как функция управляющих параметров.

На рисунке 3.10 также построена огибающая – множество точек, полученных для тех пар параметров ε_H и ε_h , при которых первое неравенство (3.2) обращается в равенство хотя бы на одной глубине. Эта кривая выделена красным цветом.

Интервал $N = N_{\text{изм}} \pm \Delta N = 0.46 \pm 0.03$ также выделен на рисунке 3.10 (горизонтальная красная полоса). Множество деформаций ε_H и ε_h , при которых рассчитанная величина доли проводящих трещин N будет лежать внутри этого интервала, и будет соответствовать оценке величин горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости. Для представления полученных

результатов удобно снова воспользоваться полигоном напряжений, построенным для полных напряжений S_h и S_H (Рисунок 3.11).

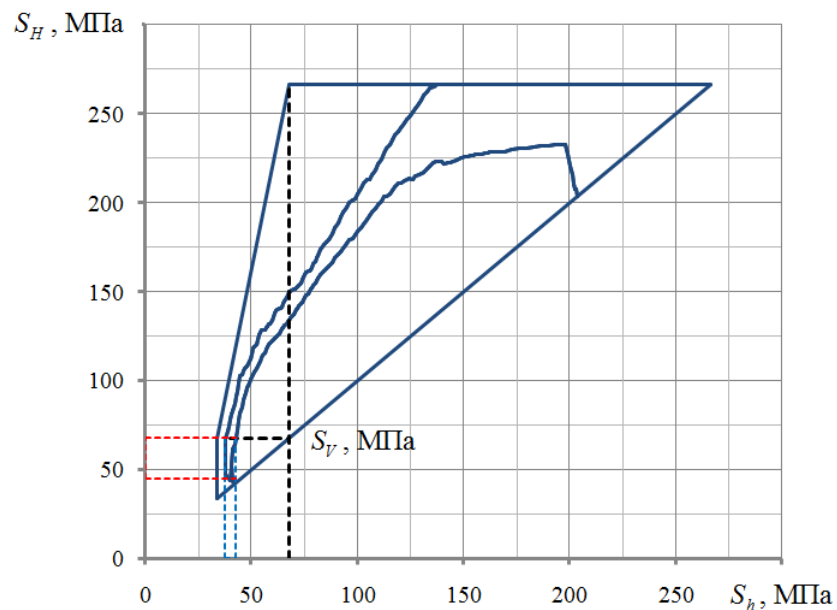


Рисунок 3.11 Полигон напряжений для рассматриваемой скважины.

На рисунке 3.11 показаны возможные значения горизонтальных напряжений на глубине, на которой присутствуют вывалы. На основании предположения о сбросовом режиме и необходимости выполнения условия $N \in [N_{\text{изм}} - \Delta N; N_{\text{изм}} + \Delta N]$ определены границы возможных значений горизонтальных напряжений на этой глубине. На рисунке 3.11 они указаны пунктирными линиями: синие линии фиксируют границы S_h на этой глубине, красные – границы S_H . Результирующие значения горизонтальных напряжений на рассматриваемой глубине: $S_h \in [37.5; 42.5]$ МПа, $S_H \in [42.5; 67.7]$ МПа.

Были построены границы возможных значений горизонтальных напряжений для всех возможных пар деформаций, обеспечивающих полученные интервалы горизонтальных напряжений на заданной глубине. Профили допустимых горизонтальных напряжений на исследуемом интервале глубин представлены на рисунке 3.12. Фиолетовая линия на этом рисунке соответствует вертикальному напряжению, красная – коридору допустимых значений максимального горизонтального напряжения, синяя – минимального.

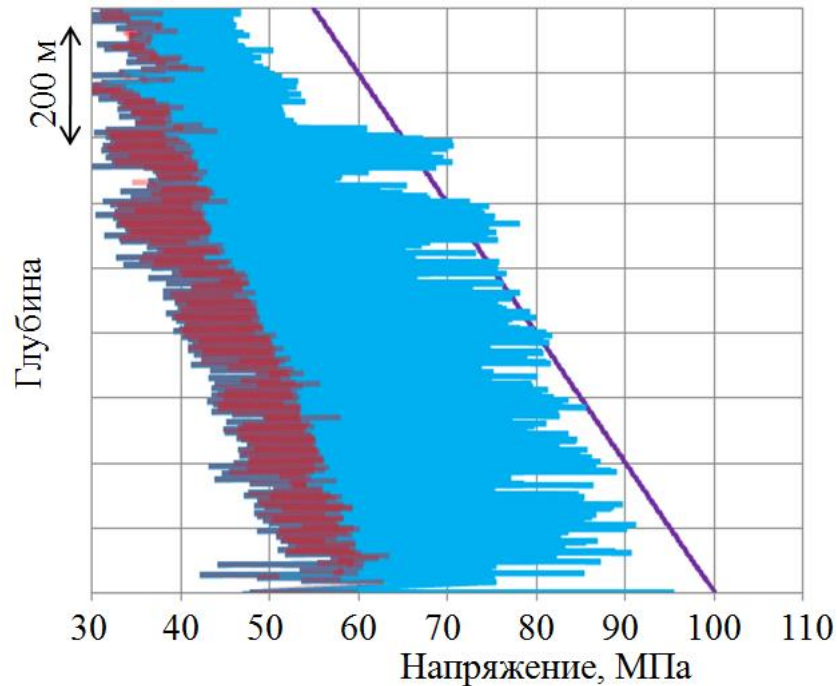


Рисунок 3.12 Профили напряжений для рассматриваемой скважины.

Учет построенных профилей прочностных свойств в совокупности с реконструированными профилями напряжений (Рисунок 3.12) позволил смоделировать интервалы глубин, на которых при бурении произошло бы разрушение среды – были получены модельные вывалы. Такое моделирование было проведено для трех случаев: нижней границы интервала: $S_h^1 = 37.5$ МПа, $S_H^1 = 42.5$ МПа; верхней границы интервала: $S_h^2 = 42.5$ МПа, $S_H^2 = 67.7$ МПа; усредненных значений: $S_h^3 = 40$ МПа, $S_H^3 = 55$ МПа. Далее области, в которых произошли бы моделируемые вывалы, были сопоставлены с реально наблюдаемыми по интерпретации данных расширенного комплекса геофизических исследований.

Результаты сравнения представлены на рисунке 3.13, где красной линией показана оценочная протяженность вывалов, выраженная в градусах (ширина диапазона значений угла ϑ , при которых напряжения $\sigma_r(r, \vartheta)$ и $\sigma_\vartheta(r, \vartheta)$, рассчитанные по выражениям (1.15), обеспечивают превышение критерия разрушения (1.16)). Зеленым, фиолетовым и синим цветом показаны, соответственно модельные вывалы при значениях управляющих параметров,

обеспечивающих на заданной глубине горизонтальные напряжения $S_{H,h}^1$, $S_{H,h}^2$ и $S_{H,h}^3$ соответственно. Оценка $S_{H,h}^1$ приводит к нулевой ширине вывалов на всем интервале, то есть, к их фактическому отсутствию, оценка $S_{H,h}^2$ соответствует несовпадению интервалов модельных и фактических вывалов. В свою очередь оценка $S_{H,h}^3$ показывает качественное соответствие глубин фактических и модельных вывалов по всему рассматриваемому интервалу, а также количественное совпадение в нижней его части. Полученные результаты позволили говорить об успешном применении анализа трещиноватости для реконструкции профилей горизонтальных напряжений.

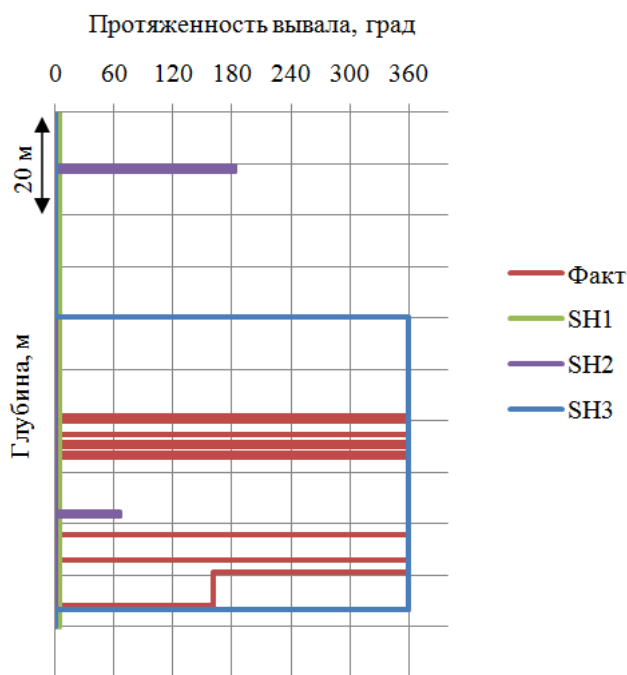


Рисунок 3.13 Сопоставление модельных и фактических вывалов. SH1 — модельные вывалы при напряжениях S_h^1 , S_H^1 ; SH2 — модельные вывалы при напряжениях S_h^1 , S_H^2 ; SH3 — модельные вывалы при напряжениях S_h^3 , S_H^3 .

Интересно отметить, что количество трещин, наблюдаемых на микроимидже, не напрямую соотносится с погрешностью реконструированных напряжений. Для другой скважины месторождения было обнаружено более 200 трещин, распределения которых на стереограмме и гистограммы по углам представлены на рисунках 3.14, 3.15 и 3.16. На стереограмме, помимо трещин, разделенных по критерию флюидопроводимости, представлены линии,

соответствующие ожидаемой ориентации плоскостей, на которых может произойти разрушение среды в случае реализации сдвигового режима (согласно [Zoback, 2007]). Видно, что большинство проводящих трещин находится близко к линиям, вдоль которого может произойти разрушение. Это вновь подтверждает наличие связи между проводящими и критически напряженными трещинами и свидетельствует о преобладании сдвигового режима.

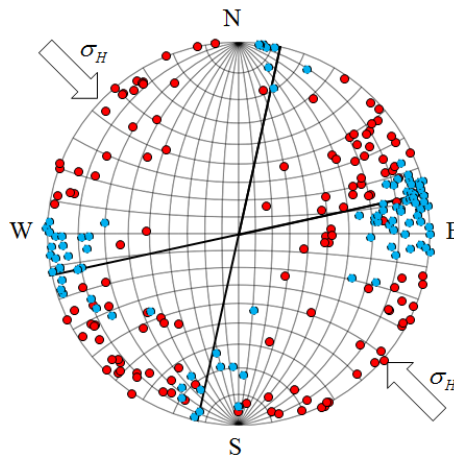


Рисунок 3.14 Стереограмма трещин, обнаруженных при анализе микроимиджера.

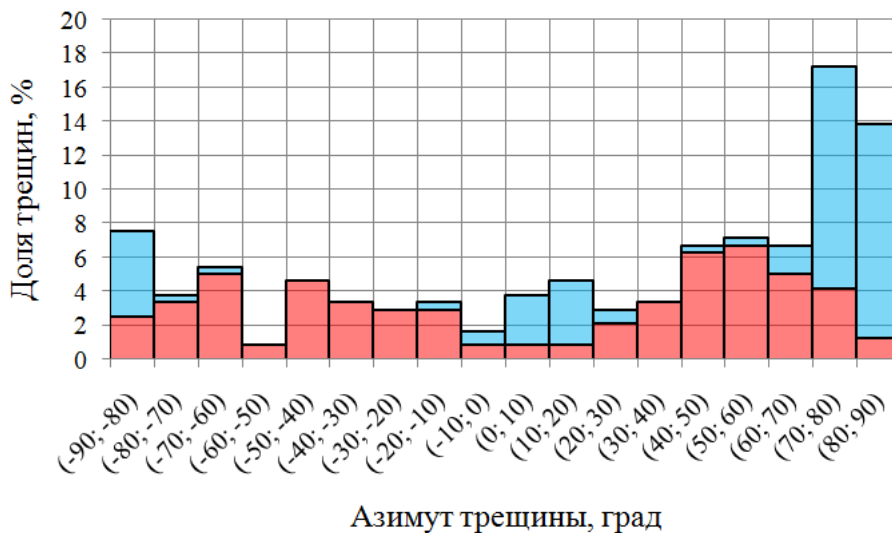


Рисунок 3.15 Распределение трещин по азимутам.

Из распределения трещин по азимутам видно, что практически все проводящие трещины локализованы в двух областях. При этом непроводящие трещины распределены существенно более равномерно. Этот результат является характерным признаком сдвигового режима — максимумы концентрации ориентаций проводящих трещин приходятся именно на площадки начала разрушения в вертикальной плоскости [Zoback, 2007].

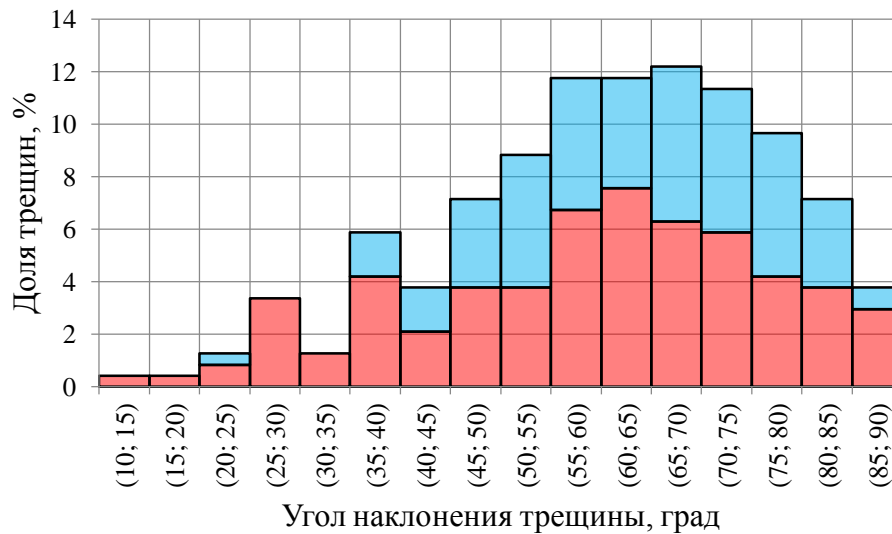


Рисунок 3.16 Распределение трещин по углам наклона.

Анализ распределения трещин по углам наклона показывает, что наиболее предпочтительным для отнесения трещины к классу проводящих является диапазон углов наклона $40 - 85^\circ$. Такие большие углы наклона также являются индикаторами сдвигового режима.

На данной скважине оценка доли проводящих трещин составила: $N = N_{\text{изм}} \pm \Delta N = 0.41 \pm 0.02$. Видно, что погрешность ниже, чем в предыдущем случае, однако это не ведет к улучшению качества реконструируемых профилей: соответствующий полигон напряжений представлен на рисунке 3.17.

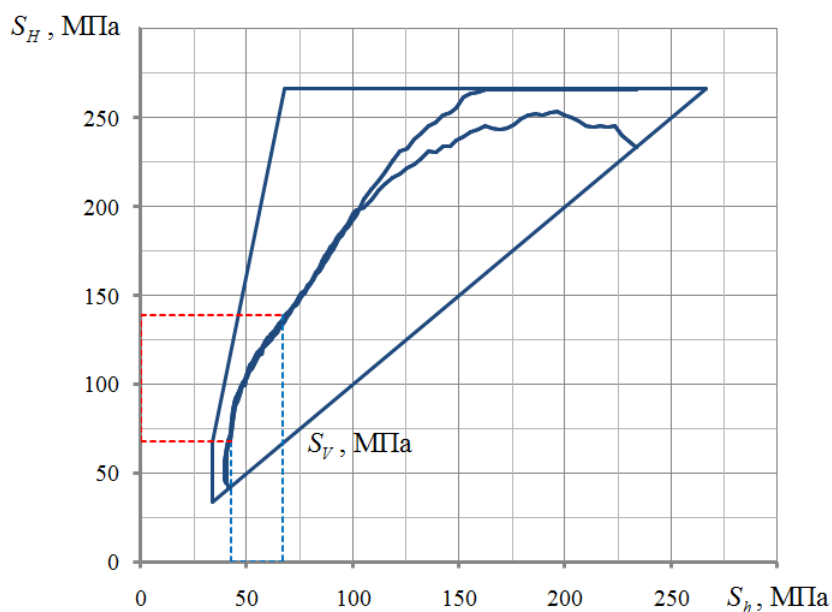


Рисунок 3.17 Полигон напряжений для скважины в сдвиговом режиме.

Условие $N \in [N_{\text{изм}} - \Delta N; N_{\text{изм}} + \Delta N]$ определяет границы возможных значений горизонтальных напряжений на этой глубине. На рисунке 3.17 они указаны пунктирными линиями: синие линии фиксируют границы S_h на этой глубине, красные – границы S_H . Результирующие значения горизонтальных напряжений на рассматриваемой глубине: $S_h \in [42.5; 67.7]$ МПа, $S_H \in [67.7; 138.7]$ МПа. Такой большой разброс обусловлен сдвиговым режимом. При этом из рисунка 3.17 видно, что ширина коридора допустимых значений сравнительно невелика, что вызвано большим количеством входных данных. Практически такой результат означает, что если привлечение дополнительных входных данных позволит фиксировать один из управляющих параметров, второй может быть определен с высокой точностью. Также стоит отметить, что использование данных о трещиноватости и в этом случае позволило существенно снизить неопределенность, возникающую при решении обратной задачи: если бы такой анализ не был проведен, то даже в рамках предположения о сдвиговом режиме максимальные горизонтальные напряжения были бы определены как: $S_H \in [67.7; 266.3]$ МПа (верхняя горизонтальная граница полигона напряжений). Было оценено, что применение предлагаемого подхода позволило сузить диапазон допустимых значений максимальных горизонтальных напряжений почти в 3 раза.

Аналогичные расчеты были выполнены и для других скважин на месторождении. В среднем диапазон значений минимальных горизонтальных напряжений, оцененных по предлагаемому подходу, составил 14.4 МПа. Для максимальных горизонтальных напряжений эта величина составила 37.7 МПа. Представляется, что полученные точности в определении значений горизонтальных напряжений только по скважинным данным без привлечения прямых измерений демонстрируют высокую эффективность предлагаемого подхода. В дальнейшем реконструированные профили напряжений, наряду с моделью механических свойств, могут быть использованы для проведения трех- и четырехмерного геомеханического моделирования.

3.3 Доопределение профилей напряжений по данным миниГРП

Разработанный подход к использованию полигона напряжений может быть использован также и в случае наличия данных по прямым измерениям минимального горизонтального напряжения по результатам проведения миниГРП. Эти данные позволили сузить диапазон возможных значений горизонтальных напряжений, что описано ниже на примере построения геомеханических моделей скважин одного из месторождений Сербии [Ezhov et al., 2017]. Далее представлен объем исследований, выполненных для определения профилей горизонтальных напряжений для одной скважины месторождения.

Был рассмотрен интервал мощностью ~ 100 м. На нем было обнаружено 76 естественных трещин, 23 из которых (30%) были отнесены к классу находящихся в критическом напряженном состоянии на основании анализа расширенного комплекса ГИС и проведенного моделирования упругих свойств.

Для этого интервала (полное вертикальное напряжение 46-49 МПа, поровое давление 20-21 МПа) было обнаружено, что высокая прочность пород (UCS более 100 МПа для пород, вмещающих большинство трещин) значительно расширяет диапазон возможных значений горизонтальных напряжений: эффективное максимальное горизонтальное напряжение может превышать вертикальное более чем в восемь раз (расчет по выражениям (3.1)), а минимальное должно быть положительным (полное минимальное горизонтальное напряжение должно быть выше порового давления).

Для построения полигона напряжений была сделана поправка на возможную погрешность, допущенную при обработке: вместо конкретного значения 30% доли критически напряженных трещин рассматривался интервал возможных значений этого параметра от 25 до 35%.

В результате появляется возможность определить все возможные пары значений параметров, управляющих профилями горизонтальных напряжений, обеспечивающие такое напряженное состояние, при котором от 25 до 35% трещин оказываются находящимися в критическом напряженном состоянии.

Полигон напряжений, построенный аналогично представленным на рисунках 3.11 и 3.17, дан на рисунке 3.18. Единственным отличием от построений, описанных в предыдущем разделе, является использование нормированного полигона напряжений – вместо координатной плоскости (σ_h, σ_H) используется редуцированная плоскость ($\sigma_h/\sigma_V, \sigma_H/\sigma_V$), что вызвано достаточно однородными по глубине прочностными свойствами пород околоскважинного пространства.

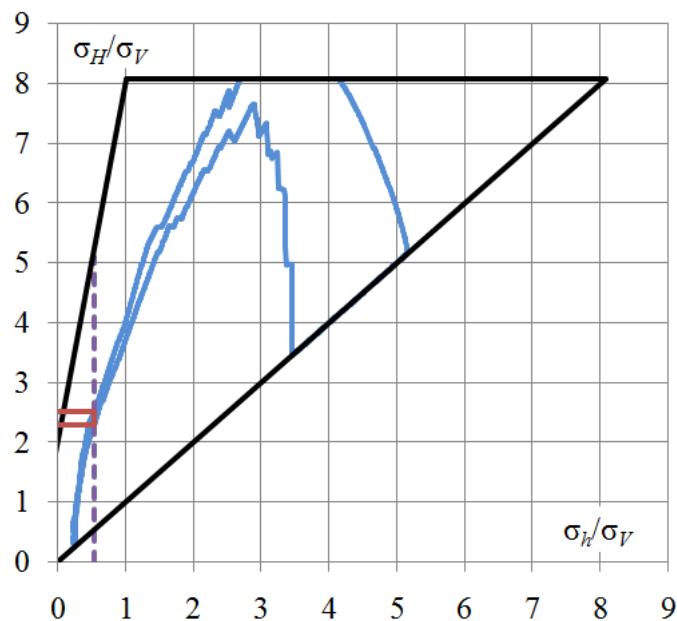


Рисунок 3.18 Редуцированный полигон напряжений для скважины месторождения Сербии.

Синей линией показаны возможные значения горизонтальных напряжений, определенные из анализа трещиноватости. Видно, что в районе сбросового и сдвигового режимов (с сохранением неравенства $\sigma_h < \sigma_V$) область возможных напряжений достаточно узкая. Это позволило определить профили горизонтальных напряжений с высокой точностью после того, как результаты оценки горизонтальных напряжений были дополнены прямыми измерениями по миниГРП. Вертикальная пунктирная линия показывает среднее отношение минимального горизонтального напряжения, определенного по миниГРП, к вертикальному. Это отношение составило 0.53.

В результате минимальное горизонтальное напряжение может считаться определенным точно, а границы максимального горизонтального напряжения

могут быть определены по пересечению области возможных значений из анализа трещиноватости с прямой, соответствующей условию $\sigma_h/\sigma_v = 0.53$ (на рассматриваемой глубине). Эти границы изображены на рисунке 3.18 горизонтальными красными линиями. В результате, на этой глубине получено условие, накладываемое на максимальное горизонтальное напряжение: $2.29 \leq \sigma_H/\sigma_v \leq 2.51$. Видно, что погрешность в определении максимального горизонтального напряжения сравнительно мала: после анализа всего интервала, ширина коридора максимальных горизонтальных напряжений, определенная согласно выражению (2.12), составила всего 5.8 МПа, что свидетельствует о высокой эффективности разработанного подхода в этом случае.

Окончательные результаты реконструкции профилей горизонтальных напряжений представлены на рисунке 3.19.

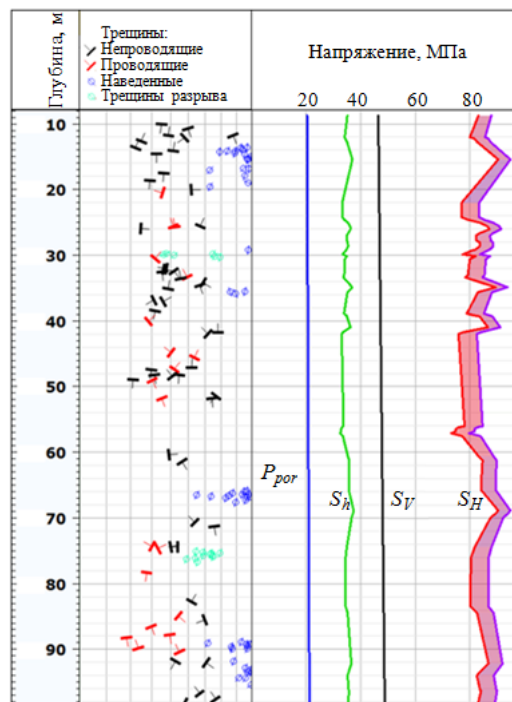


Рисунок 3.19 Сводный планшет исследованной скважины.

На рисунке 3.19 слева направо приведены: характерная глубина, классификация трещин и их углы падения (красным выделены критически напряженные трещины), профиль порового давления, полное минимальное горизонтальное напряжение, вертикальное напряжение и границы возможных значений максимального горизонтального напряжения.

Результаты реконструкции свидетельствуют о преобладании на скважине сдвигового режима. Это согласуется с прочими исследованиями региона, что говорит о качественной верификации использованного подхода. Количественного сравнения восстановленных из анализа трещиноватости профилей горизонтальных напряжений выполнено не было, поскольку анализ вывалов на этих данных не производился, и анализ трещиноватости стал единственным источником информации о максимальном горизонтальном напряжении.

Впоследствии реконструированные профили напряжений будут использованы для решения задач устойчивости ствола скважин на данном месторождении.

3.4 Выводы к главе 3

Представленный подход к использованию полигона напряжений для анализа возможных значений горизонтальных напряжений позволил существенно упростить решаемую задачу. На примере случая, допускающего аналитическое решение, в разделе 3.1 было показано, каким образом полигон напряжений может быть использован для быстрой оценки напряжений, если известна доля проводящих трещин и подтверждается их связь с критически напряженными трещинами.

Полигон напряжений представляет собой в значительной степени универсальный инструмент: он может быть использован вне зависимости от того, какая модель экстраполяции напряжений выбрана для реконструкции.

Были рассмотрены два случая применения разработанного подхода к анализу трещиноватости в условиях отсутствия тех или иных дополнительных измерений параметров напряженного состояния: в разделе 3.2 рассмотрен случай отсутствия прямых измерений минимального горизонтального напряжения, а в разделе 3.3 – случай отсутствия оценок напряжений по вывалам.

Результаты реконструкции напряжений из анализа трещиноватости не противоречат независимым оценкам по наблюдаемым вывалам, что было

продемонстрировано в разделе 3.2. Этот результат подтверждает применимость предлагаемого подхода для решения практических задач геомеханики месторождений углеводородов.

Разработанный подход в некоторой степени является самодостаточным: применение только этого подхода позволило восстановить профили горизонтальных напряжений только по скважинным исследованиям с относительно высокой точностью: коридор возможных значений минимального горизонтального напряжения составил 14.4 МПа, максимального – 37.7 МПа. Были обнаружены некоторые особенности эффективности разработанного подхода – он дает низкую неопределенность в случае преобладания сбросового режима, среднюю при сдвиге и высокую при надвиге.

При этом, как показано в разделе 3.3, дополнение этого подхода другими методами оценки напряжений, в частности, прямыми измерениями минимального горизонтального напряжения по данным миниГРП, позволяет существенно снизить неопределенность в реконструируемых профилях напряжений: коридор допустимых значений максимального горизонтального напряжений может составлять лишь несколько МПа.

Тем не менее, разработанный подход обладает рядом недостатков, которые будут рассмотрены в разделе 4.1, и пока рано говорить о том, что он может быть применен для повсеместного решения задач геомеханики месторождений углеводородов без дополнительной модификации. Дальнейшему усовершенствованию подхода и посвящена заключительная глава работы.

Глава 4. Восстановление напряжений по стандартному набору геофизических исследований скважин

В главе освещена модификация созданного подхода к реконструкции профилей горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости, позволившая существенно расширить область его применимости. В частности, разработанная модификация позволила применить подход для изучения современного напряженного состояния региона желоба Нанкай, южное побережье острова Хонсю, Япония, характеризующегося активной тектоникой. Было обнаружено, что трещиноватость пород, вмещающих скважины, пробуренные в регионе, оказалась единственным источником скважинных данных, позволяющим сделать выводы о напряженном состоянии определенных областей региона. Эти заключения согласованы с некоторыми гипотезами касательно особенностей распределения напряжений в окрестностях желоба.

4.1 Недостатки разработанного подхода

Несмотря на то, что созданный подход к реконструкции профилей горизонтальных напряжений на основании скважинных исследований трещиноватости был верифицирован как на синтетических (раздел 2.3), так и на реальных данных (разделы 3.2 и 3.3), он обладает рядом недостатков, которые следует подробно рассмотреть.

В первую очередь необходимо отметить группу недостатков, вытекающих из использования гипотезы связи флюидопроводящих и критически напряженных трещин (раздел 2.1). Выше уже было отмечено, что существуют работы [Sathar et al., 2012], в которых приведены результаты, противоречащие этой гипотезе, и приведено объяснение этого факта, основанное на сложной истории изменения напряжений. В связи с этим можно сделать вывод о том, что напряженное состояние региона не должно сильно изменяться, чтобы результаты, полученные с использованием этой гипотезы, были достоверными. Наряду с ограничениями, указанными в [Zoback, 2007], где говорится, что гипотеза связи

флюидопроводящих и критически напряженных трещин справедлива только для хрупких пород с преобладающей трещинной проницаемостью, это значительно сужает область применимости разработанного подхода. Кроме того, вызывает вопросы терминология флюидопроводящих трещин: трещина может быть проводящей для одного флюида и непроводящей для другого. Прямое использование гипотезы о связи флюидопроводящих и критически напряженных трещин для выполнения гидродинамического моделирования на практике, так как трещины могут обладать различными проводящими свойствами при течении сквозь них воды, нефти или бурового раствора.

С другой стороны, в стандартном подходе в качестве входных данных используются данные расширенного комплекса ГИС – результаты интерпретации электрического и акустического скважинных микросканеров. Анализ этих данных позволяет разделить трещины в породах околоскважинной зоны на два класса – проводящих и непроводящих трещин, – что в дальнейшем используется для построения соответствия между этими классами и классами трещин, находящихся и не находящихся в критическом напряженном состоянии. Необходимость использования указанных исследований существенно снижает практическую ценность подхода, вследствие того, что эти исследования являются весьма дорогостоящими и далеко не всегда проводятся на одной и той же скважине, притом, что успешное применение подхода требует совместного анализа этих данных. Такой недостаток подхода ведет к необходимости модифицировать использующийся алгоритм и привлекать дополнительные данные.

Наконец, выше везде использовалась величина погрешности в распределении трещин на классы по признаку флюидопроводимости. При этом разделение на классы выполняется по подходу [Silva et al., 2003] в некоторой степени субъективно, в ходе непосредственного анализа микроимиджей. Математическое выражение погрешности, вносимой при таком рассмотрении, остается под вопросом.

Указанным недостаткам разработанного подхода было уделено отдельное внимание. Был сделан вывод о том, что необходимо модифицировать подход так, чтобы разделение трещин на классы по тому или иному признаку, связанному с критическим напряженным состоянием, выполнялось на основании более стандартного набора скважинных данных. При этом погрешность в определении класса трещины должна математически выражаться в явном виде, а связь выбранного признака с критическим напряженным состоянием должна оставаться справедливой и при рассмотрении тектонически активных регионов. Такая модификация по-прежнему нуждается в верификации, в связи с чем, было принято решение опробовать модифицированный подход для реконструкции профилей горизонтальных напряжений на исследовательских скважинах, бурение которых изначально было направлено на изучение напряженного состояния региона. Сравнение результатов реконструированных профилей напряжений с имеющимися геомеханическими моделями, построенными для этих скважин, позволит говорить о верификации модифицированного подхода.

4.2 Модификация подхода к анализу трещиноватости

С учетом указанных недостатков подход был в некоторой степени переработан: был проведен переход от описания трещин с помощью классификации на проводящие и непроводящие к использованию параметра связности. Более корректным оказывается говорить именно о связности трещин даже в стандартном подходе: анализ исследований позволяет определить на каком масштабе неоднородность, обнаруженная в ходе совместного анализа данных микросканеров, продолжается вглубь околоскважинной зоны. Учет такого рода масштабности наблюдаемых неоднородностей, позволяет перейти к параметру связности, используемому при построении моделей в рамках теории эффективных сред [Баюк, 2013].

В рамках теории эффективных сред параметр связности f характеризует пустотное пространство породы. Этот параметр вводится как эмпирический

параметр, который выражает степень связности включений, наблюдающихся в микронеоднородной, насыщенной флюидом среде. Параметр связности f изменяется в пределах от нуля до единицы. Равенство $f = 1$ соответствует структуре, в которой все пустотное пространство связано. При $f = 0$ все пустоты в породе становятся изолированными. В работе [Баюк, 2013] рассматривается связь параметра f с коэффициентом Био α .

В модификации разработанного подхода к анализу трещиноватости предлагается связывать с критически напряженными трещинами породы с повышенным коэффициентом связности f . Действительно, в рамках механизма, предложенного в разделе 2.2, было показано, что если трещина переходит в критическое напряженное состояние, то происходит скачкообразное возрастание ее раскрытости. С другой стороны, если рассмотреть среду, содержащую трещины, с позиций теории эффективных сред, относительные сдвиги боков трещин при их переходе в критическое напряженное состояние приводят к возможному образованию связанных трещин. Таким образом, можно качественно говорить о том, что среда, содержащая критически напряженные трещины, будет характеризоваться более высоким значением параметра связности f , чем эквивалентная среда, содержащая трещины, которые еще не достигли критического состояния.

Возможность использования такого подхода для описания пород околоскважинной зоны, содержащих трещины, выделяемые на микроимджах, может быть продемонстрирована с помощью рисунка 4.1. На рисунке представлены результаты расчета эффективного упругого модуля породы, содержащей трещины, заполненные метаном [Баюк, 2013]. Была рассмотрена одна и та же порода с различной объемной концентрацией трещин и с различными параметрами связности f . Было обнаружено, что вне зависимости от объемной концентрации трещин, эффективный упругий модуль породы тем больше, чем меньше параметр связности трещин. Этот результат, в совокупности с изложенным выше рассуждением о критически напряженных трещинах,

позволяет сделать следующий вывод: среда, содержащая критически напряженные трещины, будет характеризоваться меньшим значением эффективного упругого модуля и наоборот.

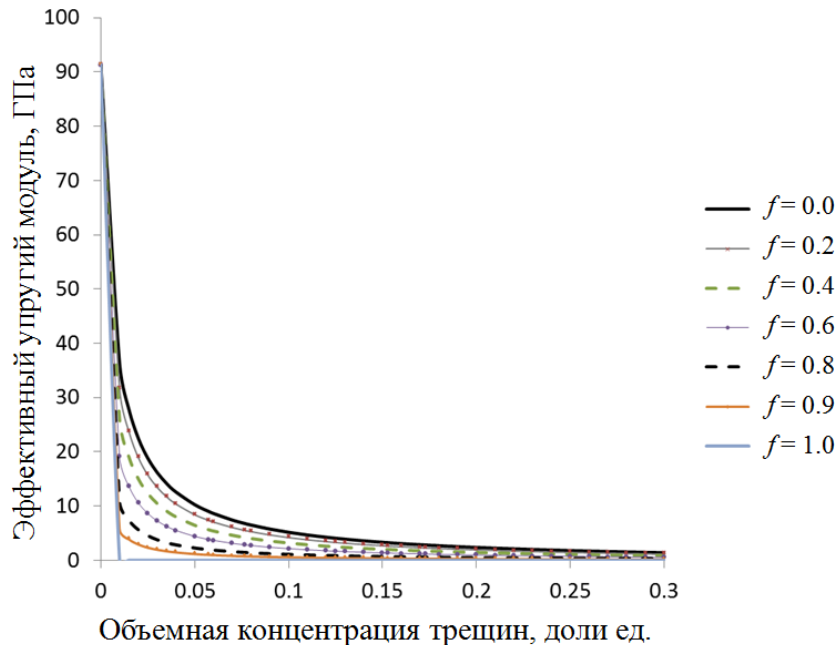


Рисунок 4.1 Расчетный эффективный упругий модуль породы как функция от объемной концентрации трещин, содержащихся в ней, и параметра связности f . По [Баяк, 2013] с изменениями.

Помимо теоретических исследований связи упругих модулей с особенностями пустотного пространства был выполнен ряд экспериментальных исследований [Дубиня и др., 2018; Dubinya, Fokin 2018a, b, c]. Выполнялись многостадийные псевдотрехосные испытания [Kim, Ko, 1979]. Образцы помещались в сервогидравлическую установку, к боковой поверхности образца прикладывалось радиальное сжатие σ_r (выполнялось условие $\sigma_r = \sigma_2 = \sigma_3$). К торцам прикладывалось осевое напряжение. Проводились многостадийные испытания: до заранее определенного значения синхронно увеличивались радиальное и осевое напряжения. Далее образец выдерживался до стабилизации деформаций. Затем с поддержанием постоянной скорости осевого деформирования образца увеличивалось осевое напряжение до значения, соответствующего критерию остановки. В качестве критерия остановки использовалось условие достижения углом наклона кривой осевое напряжение - объемная деформация 90° [Tran et al., 2010]. Далее выполнялась разгрузка образца – осевое напряжение уменьшалось до

величины, равной значению радиального напряжения. Затем цикл повторялся для других значений радиального напряжения. На последнем цикле образец доводился до предела прочности и разрушался.

В результате проведения описанного эксперимента определялись значения главных напряжений и главных деформаций образца в каждый момент времени. Зависимости этих параметров друг от друга позволили определить упругие свойства образца горной породы и оценить параметры критерия прочности.

Исследовалась связь между объемным модулем упругости и долей критически напряженных трещин. Объемный модуль упругости рассчитывался по кривой напряжение-деформация, доля критически напряженных трещин могла быть оценена по формулам, аналогичным (3.4) – (3.8). Важно отметить, что в случае псевдотрехосного напряженного состояния выражения (3.5) – (3.8) существенно упрощаются: в них можно положить $\sigma_2 = \sigma_3$, после чего, в результате выполнения ряда математических операций доля критически напряженных трещин может быть определена как:

$$N = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\pi},$$

$$\theta_{1,2} = \frac{1}{2} \arccos \left[-\frac{\mu^2}{\mu^2 + 1} \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \pm \sqrt{\frac{1}{\mu^2 + 1} \left(1 - \frac{\mu^2}{\mu^2 + 1} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right)^2 \right)} \right]. \quad (4.1)$$

Было обнаружено, что для исследованных образцов наблюдается явная зависимость объемного модуля упругости от доли критически напряженных трещин в образце при текущем напряженном состоянии. Более того, доля критически напряженных трещин обладала свойством автомодельности: кривые, показывающие связь между объемным модулем упругости и долей критически напряженных трещин для различных значений радиального напряжения, накладывались друг на друга (Рисунок 4.2). На рисунке изображены описанные кривые для различных циклов нагружения гранитных (серия зеленых кривых) и карбонатных (серия синих кривых) образцов.

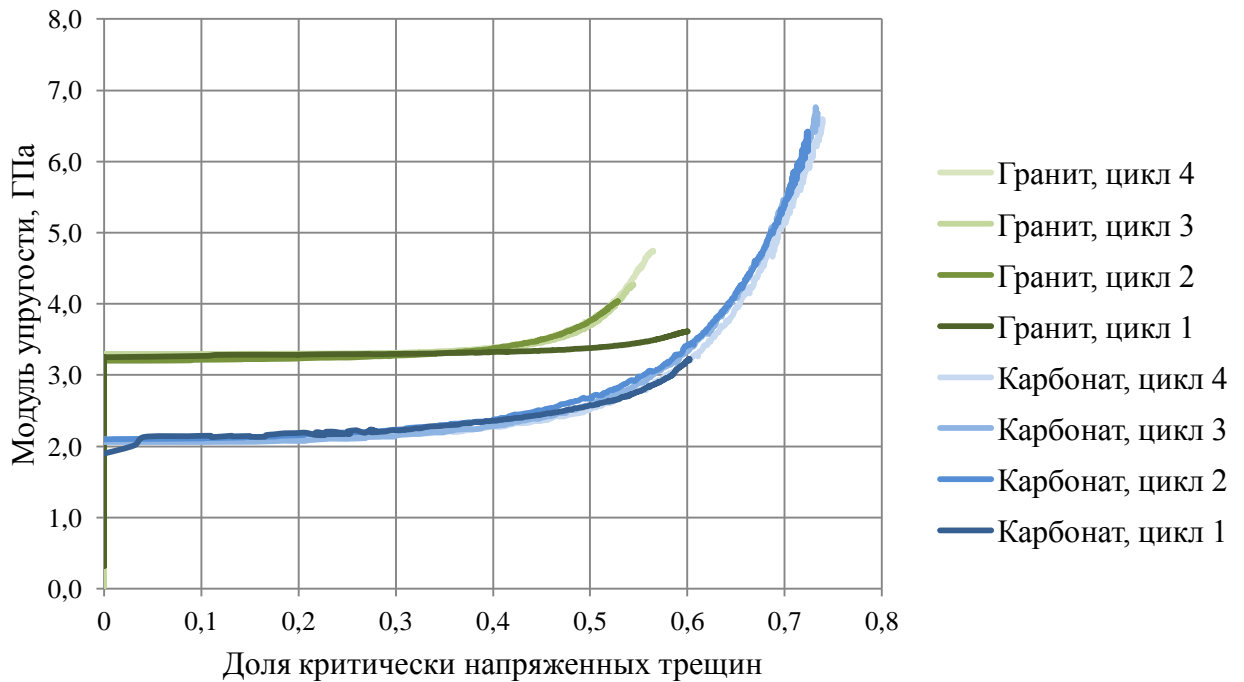


Рисунок 4.2 Связь объемного модуля упругости и доли критически напряженных трещин.

Всего было проанализировано две коллекции: коллекция из 8 гранитных образцов и коллекция из 14 карбонатных образцов. Наблюдалась общая тенденция наложения кривых, соответствующих различным циклам нагружения, друг на друга. При этом первый цикл нагружения не всегда совпадал с последующими: на некоторых образцах наблюдалось отклонение кривой, соответствующей первому циклу, от остальных аналогично показанному на рисунке 4.2 поведению гранитного образца на первом цикле нагружения. Более подробное исследование наблюдаемого свойства автомодельности является одним из основных направлений дальнейшего исследования.

Можно сформулировать следующее общее правило: если на глубине, на которой на основании расширенного комплекса ГИС в породе обнаружена естественная трещина, значение динамического упругого модуля достигает локального минимума, то, в отсутствие других объяснений этого минимума, он связывается с тем, что в породе присутствует естественная трещина, характеризующаяся высоким значением параметра связности. В ранее использовавшихся терминах такая трещина была бы отнесена к классу

проводящих. В свою очередь, если на кривой динамического упругого модуля на глубине трещины наблюдается локальный максимум, который нельзя объяснить другими особенностями (скачком сопротивления, изменением в содержании глины и пр.), трещина характеризуется низкой связностью и относится к классу непроводящих. Таким образом, указанное правило позволяет качественно классифицировать трещины аналогично разделению на проводящие и непроводящие. Естественным образом учитывается погрешность, вносимая при такой интерпретации: выраженность экстремума значения упругого модуля, а также возможность его объяснения другими причинами, кроме наличия трещины, влияют на вероятность, с которой трещина относится к тому или иному классу:

$$p_k = \left| \frac{E(z_k) \Delta z}{\int_{z_k - \Delta z/2}^{z_k + \Delta z/2} E(z) dz} - 1 \right|. \quad (4.1)$$

Здесь p_k – это вероятность того, что трещина, обнаруженная на микроимидже на глубине z_k , является: 1) не критически напряженной, если на этой глубине модуль Юнга E имеет локальный максимум; 2) критически напряженной, если модуль Юнга имеет локальный минимум. Δz в таком случае играет роль репрезентативного интервала глубин в окрестности глубины z_k . Таким образом, первое слагаемое является отношением модуля Юнга среды на глубине трещины к среднему модулю Юнга в окрестности трещины и играет роль выраженности локального экстремума.

Таким образом, каждая трещина, выделенная на микроимидже, может быть с определенной вероятностью отнесена к одному из классов по признаку критического напряженного состояния. При этом надо отметить, что отсутствует необходимость совместно использовать два микроимиджа, как это было описано в предыдущих исследованиях: достаточно только одного микроимиджа, по которому для каждой трещины, наблюдаемой на нем, определены глубина и ориентация. Совместно с ним анализируется стандартный акустический каротаж,

из которого рассчитывается профиль модуля Юнга $E(z)$, подставляемый в выражение (4.1).

Такой подход позволяет модифицировать введенный ранее интегральный параметр – долю критически напряженных трещин N , – определив вместо единственной величины ее вероятностное распределение. Действительно, если на некотором интервале глубин выделено L трещин, для каждой из которых, согласно выражению (4.1), определена вероятность принадлежности к классу критически напряженных или не критически напряженных, то вероятность того, что на интервале ровно N трещин будет находиться в критическом напряженном состоянии, может быть рассчитана следующим образом:

$$\forall N = 1, L: P_j = \prod_{\text{крит.}} p_i \cdot \prod_{\text{не крит.}} (1 - p_i); P\{N\} = \sum_{j=1}^{\text{комб.}} P_j. \quad (4.2)$$

Здесь $P\{N\}$ – вероятность того, что из L трещин ровно N являются критически напряженными, рассчитываемая как сумма вероятностей P_j , определенных для каждой возможной комбинации критически напряженных и не критически напряженных трещин. Вероятность P_j соответствует той, с которой реализуется та или иная комбинация. Таким образом, величина $P\{N\}$ позволяет описывать долю проводящих трещин N с помощью функции плотности вероятности, при этом, если обнаруживается, что полученная функция $P\{N\}$ соответствует тому или иному известному распределению, можно использовать для анализа математические величины, характеризующие это распределение.

Применение такого подхода проиллюстрировано с помощью профиля динамического упругого модуля, представленного на рисунке 4.3. На рисунке показан интервал глубин со значением упругого модуля E для рассмотренной скважины. Точками на кривой отмечены значения упругого модуля на глубинах, на которых выявлены трещины. На рассматриваемом интервале по результатам интерпретации данных расширенного комплекса ГИС выделены четыре трещины: на глубинах 2175.5 м, 2175.8 м, 2178.3 м и 2187.4 м. Анализ прочих каротажей

показал, что в этих точках нет значительных изменений измеренных свойств пород, так что наблюдаемые экстремумы можно связать с наличием связанных и несвязанных трещин. На рисунке 4.3 видно, что положение первой (2175.5 м) и четвертой (2187.4 м) трещин близко к локальным экстремумам значения упругого модуля E , при этом первая трещина соответствует положению максимума, а четвертая – положению минимума. Вторая трещина (2175.8 м) находится близко к локальному минимуму E , но его выраженность осложнена соседствующим выбросом значения E , связанного с ошибкой измерения. Наконец, положение третьей трещины (2178.3 м) не приурочено ни к одному локальному экстремуму E , так что трещина может быть с равной вероятностью отнесена как к классу проводящих, так и к классу непроводящих. Таким образом, интерпретация результатов исследований на указанном интервале дала следующие результаты: первая трещина (2175.5 м) с вероятностью около 70% является не критически напряженной, вторая трещина (2175.8 м) с вероятностью, близкой к 60% является критически напряженной, третья трещина (2178.3 м) с вероятностью 50% может быть отнесена как к классу критически напряженных, так и к классу не критически напряженных, а четвертая трещина (2187.4 м) с вероятностью порядка 75% является проводящей.

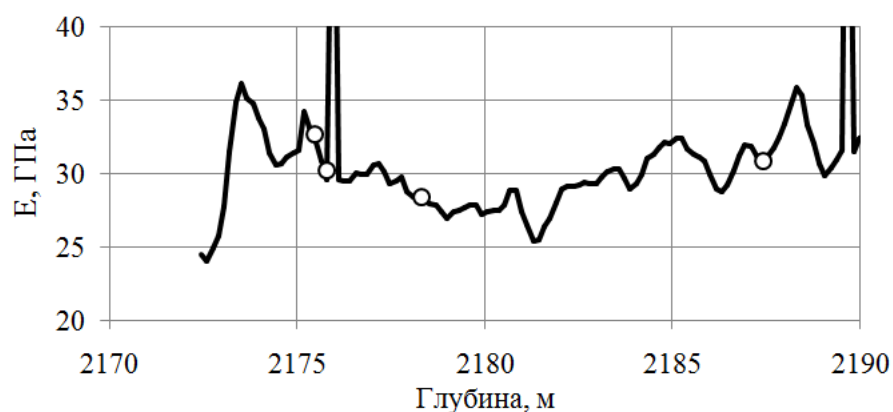


Рисунок 4.3 Профиль динамического упругого модуля.

Использование выражения (4.2) имеет смысл, если на рассматриваемом интервале достаточно большое количество трещин. Соответственно, следует рассматривать интервалы глубин большего размера, чем представленный на рисунке 4.3. С другой стороны, так как в дальнейшем разделение трещин на

классы по признаку критической напряженности будет использоваться для определения значений горизонтальных напряжений, имеет смысл рассматривать интервалы глубин, на которых параметры, управляющие значениями горизонтальных напряжений, изменяются незначительно. Таким образом, естественно использовать модель экстраполяции оценок параметров напряженного состояния, основанную на параметрах σ_H/σ_V и σ_H/σ_V [Zoback et al., 2003], однако рассматриваемый интервал глубин разбивается на несколько, внутри которых эти параметры остаются постоянными.

Интересно отметить следующий факт: при рассмотрении данных со скважин было обнаружено, что функция плотности вероятности, рассчитанная с помощью выражения (4.2), оказывается близкой к функции, характеризующей нормальное распределение. Пример такого совпадения для интервала, содержащего 20 трещин, показан на рисунке 4.4.

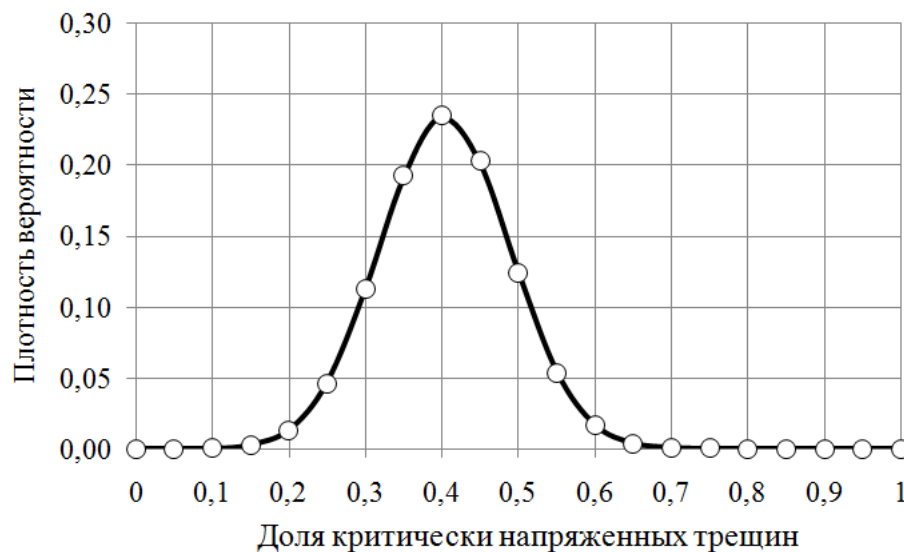


Рисунок 4.4 Полученное распределение доли проводящих трещин (точки) и приближение его нормальным распределением (сплошная линия).

Из построенного распределения (точки) было обнаружено, что оно с достаточно высокой точностью приближается нормальным распределением. Соответствующая гипотеза была проверена по критерию Колмогорова [Большев, Смирнов, 1983]. Было выявлено, что нормальное распределение действительно может быть использовано для описания доли проводящих трещин. В связи с этим, для рассмотренного интервала было рассчитано математическое ожидание доли

критически напряженных трещин $M[N] = 0.396$ и стандартное отклонение этой величины $\sigma[N] = 0.086$. Аналогичные результаты были получены и для других интервалов глубин, рассмотренных с помощью модифицированного подхода к анализу трещиноватости.

Созданная модификация подхода нивелирует его основные недостатки, описанные в разделе 4.1: математический аппарат позволяет количественно определять погрешность, вносимую при разделении трещин на классы по признаку критической напряженности; использование параметра связности пустот избавляет от необходимости анализа флюидопроводимости трещин и использования двух скважинных микроимиджеров и, в то же время, позволяет расширить пределы применимости подхода, продиктованные особенностями гипотезы связи флюидопроводящих и критически напряженных трещин.

Проверку применимости созданной модификации для восстановления профилей горизонтальных напряжений по стандартному набору ГИС с помощью анализа трещиноватости было решено провести не на месторождении углеводородов, а в регионе, в котором проводится исследовательское бурение. Такое решение было продиктовано тем, что в регионах исследовательского бурения данные скважинных исследований находятся в открытом доступе, а также присутствуют результаты независимых исследований напряженного состояния. Совпадение восстановленных профилей напряжений по скважинным исследованиям трещиноватости с такими результатами может позволить говорить о верификации разработанной модификации.

4.3 Исследование напряженного состояния региона желоба Нанкай

Модифицированный подход к реконструкции профилей горизонтальных напряжений на основании скважинного анализа трещиноватости был использован для изучения напряженного состояния желоба Нанкай, находящегося к югу от острова Хонсю, Япония. Регион исследования был выбран на основании нескольких факторов.

В первую очередь, регион в данный момент находится в активном тектоническом состоянии, а его близость к густонаселенным регионам Японии обуславливает значительный объем исследований тектоники. Следует отметить серию экспедиций IODP (Integrated Ocean Drilling Program) по бурению исследовательских скважин: на текущий момент в области пробурены 11 скважин, в которых проведен значительный комплекс геофизических исследований, позволивший дать оценки напряженного состояния региона [Wu et al., 2013]. Кроме того, в одной из скважин были проведены исследования миниГРП, позволившие существенно уточнить профиль минимального горизонтального напряжения [Wu et al., 2014].

На рисунке 4.5 приведена карта исследуемого региона с пробуренными скважинами. Красными точками отмечены пробуренные скважины, на которых было выполнено определение направления действия максимального горизонтального напряжения – красные отрезки. Звездочками отмечены сильные землетрясения с указанием годов. Желтыми стрелками показано направление движения плиты.

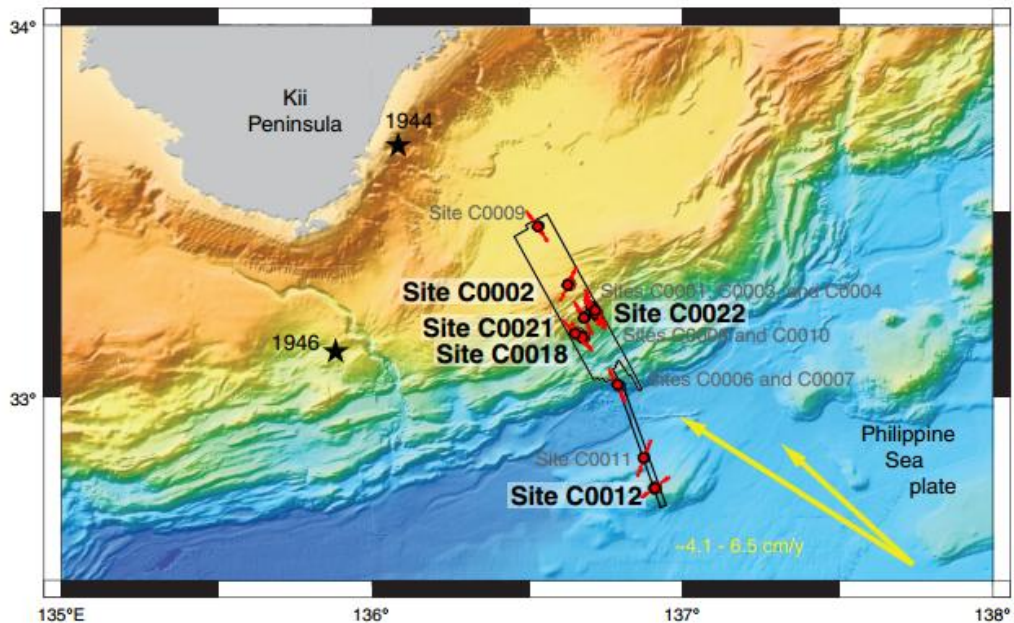


Рисунок 4.5 Карта исследуемого региона. По [Strasser et al., 2014] с изменениями.

Другим важным фактором является открытость данных геофизических исследований: в том или ином виде результаты интерпретации могут быть

найденны в соответствующем разделе ресурса <http://publications.iodp.org/>. В частности, для анализа использовались отчет [Tobin et al., 2015] и сопутствующие источники.

Анализ существующих данных показал применимость подхода к использованию данных о трещиноватости пород околоскважинного пространства для оценки значений главных напряжений, действующих в окрестностях 9 из пробуренных скважин. Было решено сконцентрировать внимание на скважине, обозначаемой C0002 – скважине, на которой были проведены исследования миниГРП. Были поставлены три основные задачи: в первую очередь необходимо оценить значения горизонтальных напряжений, действующих в окрестности скважины, на основании имеющихся данных о трещиноватости. Затем следует дополнить полученный анализ результатами геомеханической интерпретации проявлений при бурении [Wu et al., 2013]. Ожидалось, что результаты оценок не должны противоречить друг другу (множества оценочных значений горизонтальных напряжений должны иметь ненулевое пересечение). Далее необходимо провести сравнение оцененного значения минимального горизонтального напряжения с результатами прямого измерения по миниГРП [Tobin et al., 2015]. Соответствие между оцененными и напрямую измеренными значениями даст возможность говорить о применимости модифицированного подхода к реконструкции профилей горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости, а сравнение погрешностей в определении позволит оценить его эффективность.

Были построены профили механических свойств пород околоскважинного пространства, определенные с помощью проведенного комплекса геофизических и лабораторных исследований. Использовались следующие данные: литологический состав пород, определенный в процентном содержании, кривая электрических свойств, кривые гамма-каротажа и акустических свойств. Явным преимуществом использования именно этой скважины в качестве опорной было наличие профилей как продольных, так и поперечных скоростей упругих волн,

что, в совокупности с профилем плотности, позволило восстановить профили динамических упругих модулей. Объединение этих данных с результатами лабораторных исследований кернового материала позволило перейти к статическим модулям. Полученные результаты были проверены на соответствие с принятой для скважины одномерной моделью механических свойств [Wu et al., 2014].

Для проверки работоспособности разработанного подхода к реконструкции профилей горизонтальных напряжений по скважинным исследованиям трещиноватости был исследован верхний интервал скважины С0002. Проведенный на глубине 872 м ниже дна (2841 м ниже уровня моря) тест миниГРП позволил определить величину минимального горизонтального напряжения 32 МПа [Strasser et al., 2014].

В окрестностях этой глубины при анализе скважинных микроимиджей было обнаружено 20 трещин и определены их ориентации. После анализа профиля упругого модуля, в соответствии с выражениями (4.1) и (4.2) каждая трещина была отнесена к классу критически напряженных или не критически напряженных. Функция плотности вероятности для доли критически напряженных трещин на этом интервале показана на рисунке 4.4. Были найдены следующие параметры, характеризующие полученное распределение: математическое ожидание доли критически напряженных трещин $M[N] = 0.396$, стандартное отклонение этой величины $\sigma[N] = 0.086$. Далее, в полном соответствии с подходом, описанным в главе 3, для этой глубины был построен полигон напряжений, на котором была выделена область значений горизонтальных напряжений, допускающих, что количество критически напряженных трещин лежит в интервале $(M[N] - \sigma[N]; M[N] + \sigma[N])$. Эти построения показаны на рисунке 4.6 [Dubinya, 2017]: черная сплошная линия соответствует границам полигона напряжений, серая сплошная линия отображает область, выделенную после анализа трещиноватости; пунктирная линия показывает значение вертикального напряжения, действующего на этой глубине.

Видно, что полученная область значительно уже полигона, построенного из условия неразрушения среды, что говорит о том, что применяемый подход может быть использован для существенного уточнения оценки значений горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости. Тем не менее, в полной мере потенциал использования подхода раскрывается при его совместном использовании с другими методиками оценки значений горизонтальных напряжений, в первую очередь, с оценками, основанными на анализе проявлений при бурении.

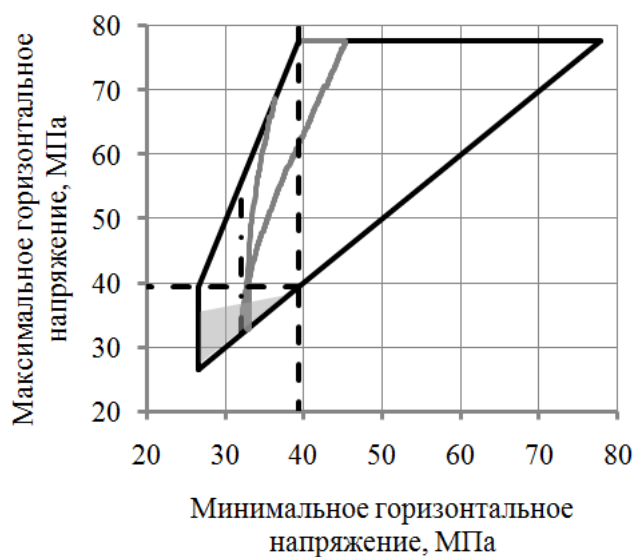


Рисунок 4.6 Полигон напряжений для скважины С0002 на глубине проведения миниГРП.

Для рассматриваемой скважины исследование вывалов было проведено в работе [Wu et al., 2014]. На основании анализа вывалов и трещин растяжения, образовавшихся при бурении скважины С0002, были рассчитаны значения горизонтальных напряжений, соответствующих этим проявлениям. На рисунке 4.5 область, полученная этими авторами, отмечена серым треугольником. Видно, что область пересечения областей с оценочными значениями горизонтальных напряжений, определенными из анализа проявлений при бурении и из анализа трещиноватости, очень мала, а объединение двух методов позволяет с очень высокой точностью определить значение минимального горизонтального напряжения на этой глубине и сравнительно точно определить возможные значения максимального горизонтального напряжения.

Точное значение σ_h , которое было определено по миниГРП, отображено на построенной диаграмме вертикальной штрих-пунктирной линией (Рисунок 4.6). Видно, что эта линия расположена близко к оценочному значению минимального горизонтального напряжения, полученному указанным выше образом.

Полученные результаты (совпадение оценок минимального горизонтального напряжения из анализа трещиноватости и по исследованию вывалов с прямым измерением минимального горизонтального напряжения по миниГРП) позволили говорить об успешном применении развиваемого подхода для опорной скважины. Эффективность применения может быть оценена с помощью результатов оценок, представленных в таблице 4.1. Проведено исследование, с какой точностью минимальное и максимальное горизонтальное напряжения могут быть оценены с помощью разных комплексов подходов: только анализа вывалов, совмещения анализа вывалов с анализом трещиноватости, совмещения анализа вывалов с миниГРП и совокупности всех трех методов исследования напряженного состояния.

Таблица 4.1 Эффективность различных подходов при оценке горизонтальных напряжений

Использовавшиеся подходы	Оценка σ_h , МПа	Оценка σ_H , МПа
Анализ проявлений при бурении	31.2 ± 4.4	31.8 ± 5.0
Анализ проявлений при бурении + Анализ трещиноватости	32.5 ± 0.4	34.6 ± 2.1
Анализ проявлений при бурении + МиниГРП	32.2	34.6 ± 2.2
Совмещение трех подходов	32.2	35.0 ± 0.4

Эти результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Стандартное исследование напряженного состояния по наблюдаемым проявлениям при бурении позволяет со сравнительно высокой точностью

определить значения как минимального, так и максимального горизонтального напряжений;

2. Дополнение стандартного исследования анализом трещиноватости позволяет с высокой точностью определить значение минимального горизонтального напряжения, при этом значение максимального напряжения определяется с погрешностью, меньшей, чем в предыдущем случае;

3. Совмещение стандартного исследования с прямым измерением минимального горизонтального напряжения позволяет фиксировать значение σ_h , причем максимальное горизонтальное напряжение определяется с погрешностью, близкой к погрешности, полученной для σ_H в предыдущем случае. Важно отметить, что фиксированное значение σ_h лежит именно в том интервале, который был получен при помощи анализа трещиноватости;

4. Объединение трех методов позволяет с высокой точностью определить как минимальное, так и максимальное горизонтальные напряжения.

Таким образом, подход к реконструкции профилей горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости, выполненного с помощью стандартного комплекса ГИС с использованием выражений (4.1) и (4.2), был верифицирован после сравнения полученных оценок горизонтальных напряжений с оценками, выполненными с помощью стандартных подходов. Подход показал высокую эффективность, сравнимую с эффективностью анализа вывалов.

Интересно отметить, что разработанный подход к реконструкции профилей горизонтальных напряжений на данный момент оказывается единственным способом исследования напряженного состояния по скважинным данным на больших глубинах в этом регионе. Скважина C0002 пробуривалась в несколько этапов во время экспедиций IODP 338 [Strasser et al., 2014] и 348 [Tobin et al., 2015], на данный момент выполнено бурение на глубину более 5.5 км ниже уровня моря. На рисунке 4.7 показаны профили вертикального напряжения (черная линия) и порового давления (синяя линия). Зелеными точками отмечены

измерения минимального горизонтального напряжения с помощью миниГРП (отмечены номера экспедиций, в которых проводились эти тесты).

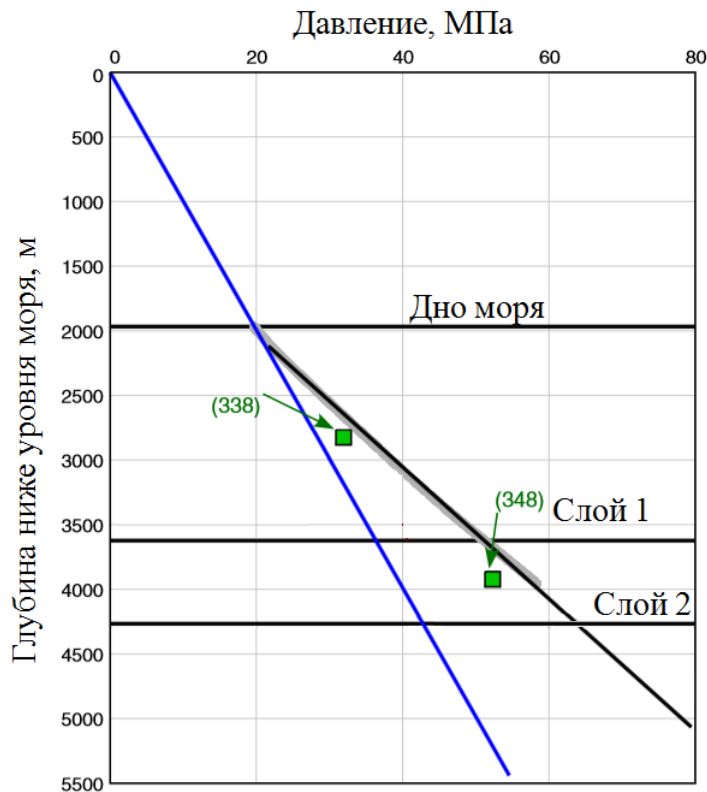


Рисунок 4.7 Профили напряжений вдоль скважины S0002. По [Tobin et al., 2015] с изменениями.

Сплошные горизонтальные линии соответствуют важным отметкам глубины: верхняя соответствует уровню дна моря, линия, отмеченная как «Слой 1», показывает глубину, с которой выполнялось бурение в ходе экспедиции 348. «Слой 2» характеризует важную глубину: в ходе анализа микроимиджей (Рисунок 4.8) с этой скважины было обнаружено, что ниже глубины слоя 2 не было обнаружено вывалов – было достигнуто безаварийное бурение.

Кроме того, самое глубокое определение минимального горизонтального напряжения с помощью миниГРП было выполнено на глубине около 4 км, эта точка лежит выше слоя 2. Таким образом, ниже слоя 2 стандартные подходы к реконструкции профилей горизонтальных напряжений оказываются неприменимы для изучения напряженного состояния нижележащих пород. С другой стороны, как видно из рисунка 4.8, на интервале безаварийного бурения было выделено достаточно большое количество (более 100) естественных трещин

в породах околоскважинного пространства. В совокупности с имеющимися профилями упругих модулей это позволяет применить разработанный подход для оценки горизонтальных напряжений по исследованиям трещиноватости.

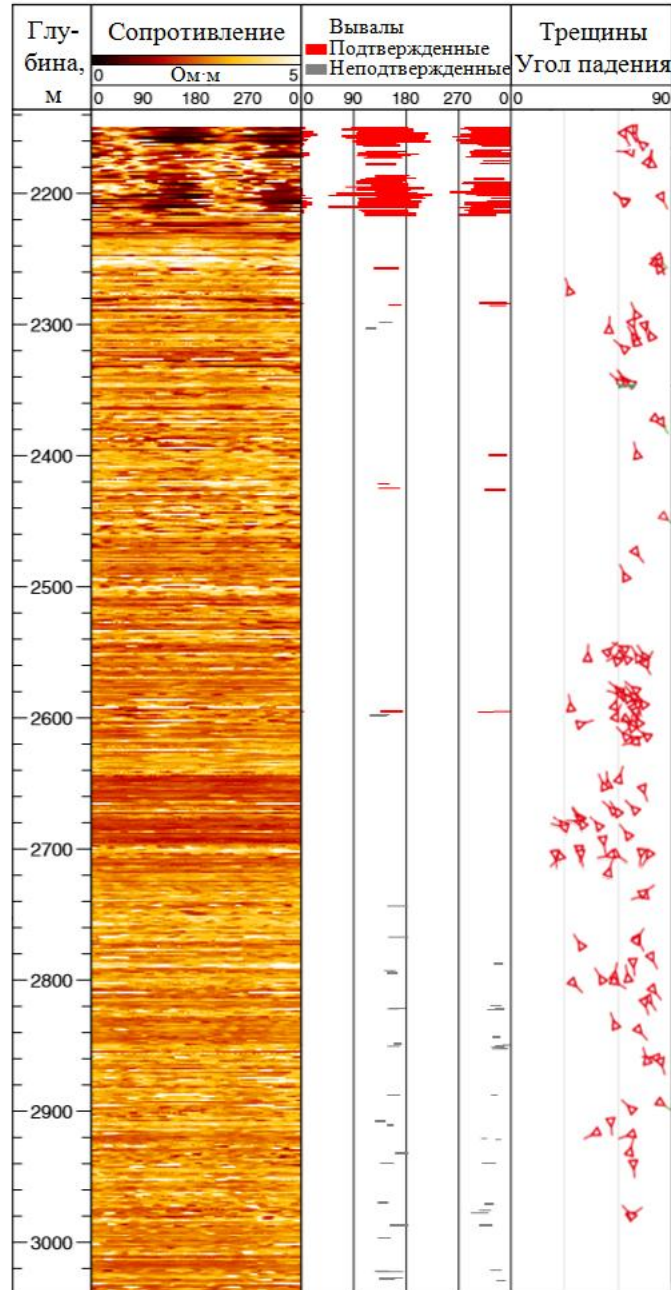


Рисунок 4.8 Электрический микроимидж и его интерпретация для скважины C0002. По вертикальной оси отложена глубина ниже дна моря. Цветом показана азимутальная развертка сопротивления пород околоскважинного пространства. Интерпретированный микроимидж – оценка ширины вывалов – дан в середине. Красным цветом отмечены вывалы, ширина которых определена достаточно точно, серым цветом – недостоверные оценки. На крайней правой части рисунка отмечены трещины, выделенные на микроимидже, для каждой трещины определен азимут и угол падения. По [Tobin et al., 2015] с изменениями.

Было выделено несколько интервалов, на которых количество трещин было достаточным для оценки доли критически напряженных трещин в соответствии с выражениями (4.1) и (4.2). Для каждого из этих интервалов были определены функции плотности вероятности для доли критически напряженных трещин, проверена гипотеза нормального распределения, рассчитано математическое ожидание и стандартное отклонение. Далее, аналогично рисунку 4.6, были построены полигоны напряжений для глубин, принадлежащих этим интервалам, и определена область возможных значений горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости. Выполненные оценки параметров напряженного состояния представлены на рисунках 4.9 – 4.14.

Первый рассмотренный интервал глубин – от 2175 до 2280 м – характеризуется следующими параметрами распределения: математическое ожидание доли критически напряженных трещин 39.4%, стандартное отклонение – 8.9%. Соответствующая область на полигоне напряжений для глубины 2200 м представлена на рисунке 4.9. Полигон построен для полных напряжений.

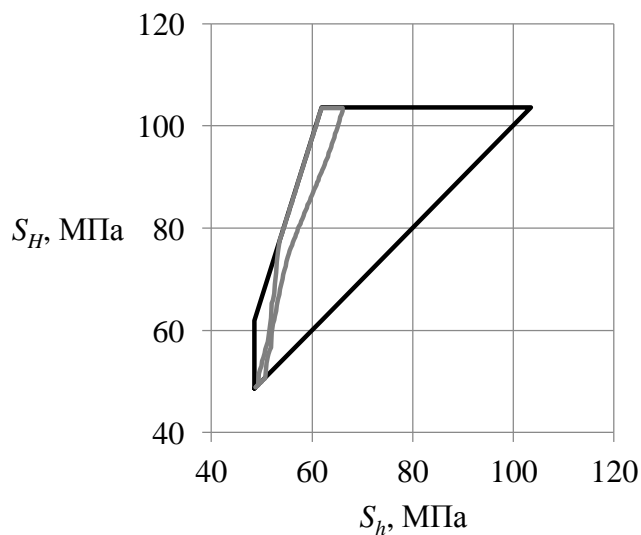


Рисунок 4.9 Полигон напряжений для глубины 2200 м.

Параметры распределения для второго рассмотренного интервала глубин – от 2310 до 2490 м: математическое ожидание доли критически напряженных трещин 44.2%, стандартное отклонение – 10.7%. Соответствующая область на полигоне напряжений для глубины 2370 м представлена на рисунке 4.10.

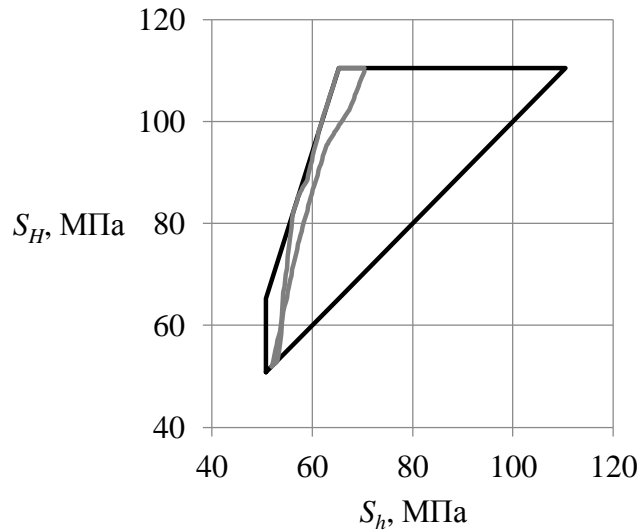


Рисунок 4.10 Полигон напряжений для глубины 2370 м.

Параметры распределения для третьего рассмотренного интервала глубин – от 2510 до 2570 м: математическое ожидание доли критически напряженных трещин 53.1%, стандартное отклонение – 11.7%. Соответствующая область на полигоне напряжений для глубины 2550 м представлена на рисунке 4.11. Можно отметить узкие границы оценочных горизонтальных напряжений: S_h может принимать значения от 52.6 до 56.2 МПа, оценка S_H – от 52.6 до 79.3 МПа.

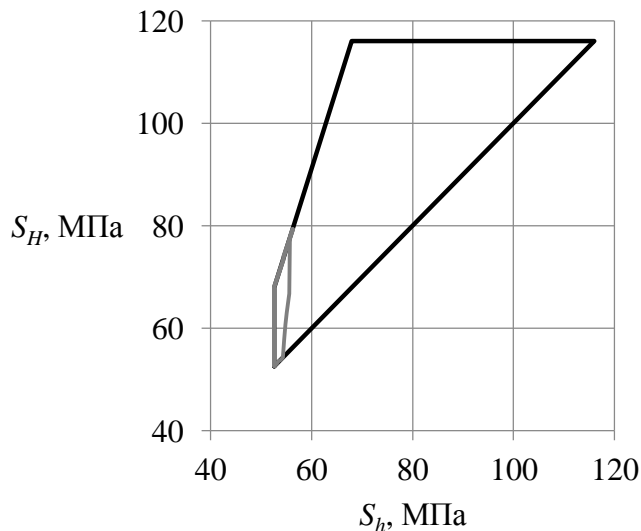


Рисунок 4.11 Полигон напряжений для глубины 2550 м.

Параметры распределения для четвертого рассмотренного интервала глубин – от 2590 до 2630 м: математическое ожидание доли критически напряженных трещин 57.4%, стандартное отклонение – 9.1%. Соответствующая область на

полигоне напряжений для глубины 2600 м представлена на рисунке 4.12. Сохраняются узкие границы оценочных горизонтальных напряжений: S_h может принимать значения от 53.3 до 59.0 МПа, оценка S_H – от 53.3 до 86.7 МПа.

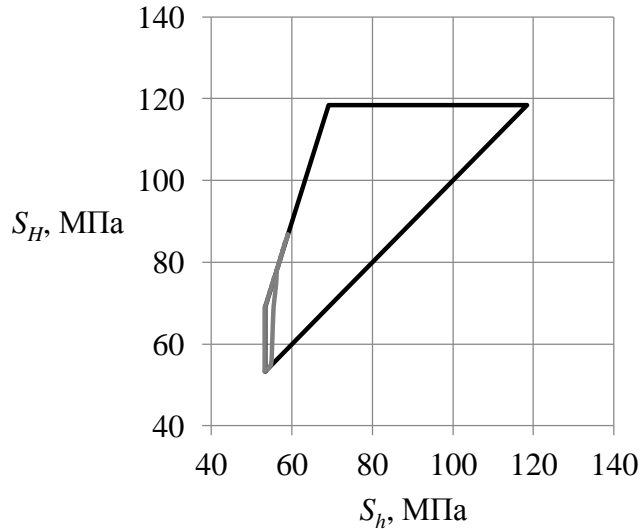


Рисунок 4.12 Полигон напряжений для глубины 2600 м.

Параметры распределения для пятого рассмотренного интервала глубин – от 2660 до 2700 м: математическое ожидание доли критически напряженных трещин 31.0%, стандартное отклонение – 12.1%. Соответствующая область на полигоне напряжений для глубины 2700 м представлена на рисунке 4.13.

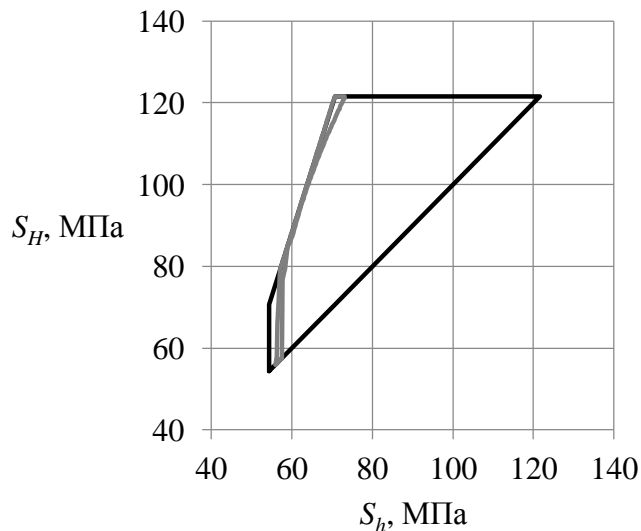


Рисунок 4.13 Полигон напряжений для глубины 2700 м.

Наконец, последний интервал – от 2780 до 2870 м – характеризовался следующими параметрами распределения: математическое ожидание доли

критически напряженных трещин 43.2%, стандартное отклонение – 10.1%. На рисунке 4.14 показана область на полигоне напряжений для глубины 2800 м.

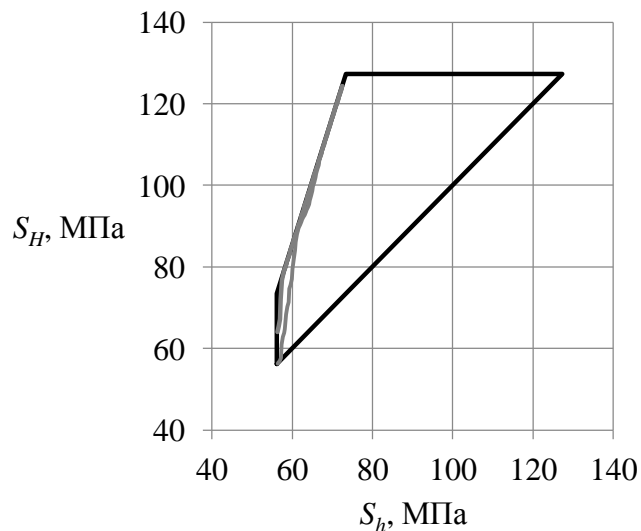


Рисунок 4.14 Полигон напряжений для глубины 2800 м.

Представленные результаты оценки значений горизонтальных напряжений демонстрируют эффективность разработанного подхода для оценки значений горизонтальных напряжений на основании скважинных исследований трещиноватости. Интересно отдельно рассмотреть тенденции изменения возможных значений горизонтальных напряжений с глубиной: на рисунках 4.11 и 4.12 видно, как сужается коридор максимального горизонтального напряжения (соответствующие глубины 2550 – 2600 м), что вызвано резким увеличением доли критически напряженных трещин, рассчитанной по выражениям (4.1) и (4.2).

Построенные полигоны напряжений позволяют оценить возможные профили горизонтальных напряжений. На рисунке 4.15 представлена оценка главных напряжений, сделанная в предположении, что минимальное горизонтальное напряжение линейно растет с глубиной и проходит через вышеупомянутые точки, соответствующие оценкам из данных миниГРП (зеленые точки на рисунке 4.7). Кроме того, предполагается, что максимальное горизонтальное напряжение также растет с глубиной линейно в рамках каждого рассмотренного интервала.

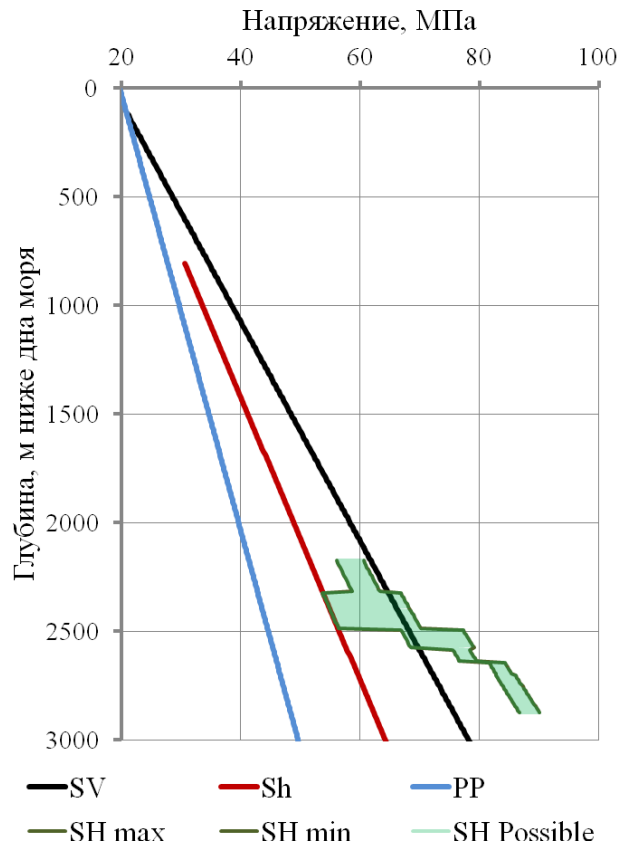


Рисунок 4.15 Возможные профили главных напряжений. Синяя линия – поровое давление, черная – вертикальное напряжение, красная – минимальное горизонтальное напряжение, зеленый интервал – возможные значения максимального горизонтального напряжения

Полученный результат может свидетельствовать в пользу гипотезы об особенностях напряженного состояния исследуемого региона. Как видно на рисунке 4.5, направление максимального горизонтального напряжения на скважине С0002 повернуто на 90° по сравнению с преобладающим направлением в регионе. Ряд авторов [Wu, Chan, 2017] высказывает предположение о том, что на некоторой глубине происходит переиндексация горизонтальных напряжений: максимальное и минимальное горизонтальное напряжения меняются местами. В пользу этой гипотезы говорят и результаты реконструкции траекторий главных напряжений в регионе [Galybin, Dubinya, 2017]. Полученные с помощью анализа трещиноватости оценки значений горизонтальных напряжений (Рисунки 4.11 и 4.12) могут позволить определить глубину, на которой происходит такая переиндексация: логично ожидать, что именно на глубинах 2550 – 2600 м, где

значения главных горизонтальных напряжений сближаются, они могут поменяться местами.

Таким образом, разработанный подход к реконструкции профилей горизонтальных напряжений по скважинным исследованиям трещиноватости был не только верифицирован в интервалах глубин, где существуют независимые оценки параметров напряженного состояния (Рисунок 4.6), но и позволил сделать заключения о значениях горизонтальных напряжений на глубинах, где такие оценки не могут быть выполнены ввиду достижения безаварийного бурения.

4.4 Выводы к главе 4

Разработанная модификация подхода к реконструкции профилей горизонтальных напряжений по скважинным исследованиям трещиноватости позволила существенно расширить область его применимости. Оказалось, что для получения оценок параметров напряженного состояния достаточно стандартного комплекса ГИС и одного микроимиджа. Кроме того, разработанная модификация решила некоторые проблемы подхода, вызванные использованием гипотезы связи критически напряженных и флюидопроводящих трещин (раздел 4.1).

Было обнаружено, что созданный подход может быть применен для оценки горизонтальных напряжений по открытым данным геофизических исследований, причем эти оценки совпадают с оценками, полученными с помощью стандартных методов.

Разработанный подход позволяет выполнять оценки горизонтальных напряжений в случаях, когда стандартные подходы неприменимы, и, следовательно, может стать важным источником информации о горизонтальных напряжений по скважинным данным. Эффективность разработанного подхода сравнима с эффективностью стандартных подходов (таблица 4.1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

В главе 1 представлен выполненный обзор современного состояния подходов к реконструкции профилей главных напряжений вдоль траекторий скважин по результатам геофизических исследований. В явном виде найден класс эквивалентности решений обратной задачи определения напряжений по возможным прямым измерениям в рамках существующих моделей. Этот результат указывает на актуальность работы и обосновывает защищаемое положение 1. Кроме того, актуальность работы подтверждается анализом практически значимых задач геомеханики месторождений углеводородов, также представленным в главе 1.

В главе 2 предложен и теоретически обоснован подход к использованию скважинных исследований трещиноватости для реконструкции профилей горизонтальных напряжений. Верификация этого подхода на синтетических данных, представленная в главе 2, 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 входных данных. Формализация подхода сделала возможным его быстрое и эффективное применение для решения практически значимых задач геомеханики месторождений. Использование полевых данных также позволило верифицировать созданный подход путем сравнения результатов его применения с независимыми исследованиями. Результаты применения подхода и их независимая верификация обосновывают защищаемое положение 3.

Представленная в главе 4 модификация подхода с привлечением результатов теории эффективных сред существенно расширяет пределы его

применимости. Исследования скважины региона желоба Нанкай позволили сравнить эффективность разработанного подхода с существующими методами реконструкции профилей напряжений, обосновывая защищаемое положение 4. Кроме того, исследования больших глубин показали возможность существования ситуации, при которой разработанный подход является единственным способом получения информации о напряженном состоянии пород по скважинным данным.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АвтоГРП – авто-гидроразрыв пласта
- ГИС – геофизические исследования скважин
- ГРП – гидравлический разрыв пласта
- МиниГРП – мини-гидроразрыв пласта
- FBR – давление разрыва пласта
- FCS – давление закрытия трещины
- FPP – давление распространения трещины
- ICDP – International Continental Scientific Drilling Program
- IODP – Integrated Ocean Drilling Program
- ISIP – мгновенное давление закрытия
- LOT – тест на утечки
- NanTroSEIZE – Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment
- z – глубина вдоль ствола скважины
- σ_{ij} – компоненты тензора эффективных напряжений
- σ_1 – максимальное эффективное главное напряжение
- σ_2 – среднее эффективное главное напряжение
- σ_3 – минимальное эффективное главное напряжение
- σ_V – эффективное вертикальное напряжение
- σ_H – максимальное эффективное горизонтальное напряжение
- σ_h – минимальное эффективное горизонтальное напряжение
- S_V – полное вертикальное напряжение
- S_H – максимальное полное горизонтальное напряжение
- S_h – минимальное полное горизонтальное напряжение
- P_{mud} – давление бурового раствора
- P_{por} – давление насыщающего среду флюида
- UCS – предел прочности на одноосное сжатие
- UTS – предел прочности на одноосное растяжение

C – коэффициент сцепления

α_{ij} – компоненты тензора коэффициентов Био-Виллиса

ε_{ij} – компоненты тензора деформаций

C_{ijklm} – компоненты тензора упругих модулей

φ – угол внутреннего трения

μ – тангенс угла внутреннего трения

θ – азимут действия максимального горизонтального напряжения

μ_c – коэффициент Лоде-Надаи

DTP – интервальное время пробега продольной волны

DTP_{norm} – трендовое интервальное время пробега продольной волны

R – радиус скважины

δ – угловая мера ширины вывала

E – модуль Юнга

ν – коэффициент Пуассона

ε_H – максимальная горизонтальная деформация

ε_h – минимальная горизонтальная деформация

σ_h^* – минимальное горизонтальное напряжение, определенное по миниГРП

z_i – глубины проведения миниГРП

Z – количество проведенных миниГРП

l – косинус угла между нормалью к трещине и первой главной осью тензора напряжений

m – косинус угла между нормалью к трещине и второй главной осью тензора напряжений

n – косинус угла между нормалью к трещине и третьей главной осью тензора напряжений

σ_n – нормальное напряжение, действующее на трещине

τ_n – касательное напряжение, действующее на трещине

N – расчетная доля критически напряженных трещин

N^* – истинная доля флюидопроводящих трещин

$\varepsilon_H^{\text{ист.}}$ – истинная максимальная горизонтальная деформация

$\varepsilon_h^{\text{ист.}}$ – истинная минимальная горизонтальная деформация

$\varepsilon_H^{\text{опр.}}$ – определенная максимальная горизонтальная деформация

$\varepsilon_h^{\text{опр.}}$ – определенная минимальная горизонтальная деформация

$\Delta\varepsilon_H^{\text{опр.}}$ – погрешность определенной максимальной горизонтальной деформации

$\Delta\varepsilon_h^{\text{опр.}}$ – погрешность определенной минимальной горизонтальной деформации

$\overline{\sigma}_H$ – верхняя граница максимального горизонтального напряжения

$\overline{\sigma}_h$ – верхняя граница минимального горизонтального напряжения

$\underline{\sigma}_H$ – нижняя граница максимального горизонтального напряжения

$\underline{\sigma}_h$ – нижняя граница минимального горизонтального напряжения

$\Delta\sigma_H$ – коридор значений максимального горизонтального напряжения

$\Delta\sigma_h$ – коридор значений минимального горизонтального напряжения

$N_{\text{изм}}$ – измеренная доля критически напряженных трещин

ΔN – погрешность в определении доли критически напряженных трещин

f – параметр связности включений

p_k – вероятность принадлежности трещины к классу критически напряженных или не критически напряженных

z_k – глубина обнаружения трещины

Δz – ширина репрезентативного интервала глубин

L – количество трещин, выделенных на некотором интервале глубин

$P\{N\}$ – вероятность того, что N трещин будут критически напряженными

$M[N]$ – математическое ожидание доли критически напряженных трещин

$\sigma[N]$ – стандартное отклонение доли критически напряженных трещин

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев И.С., Никитин А.Н., Латыпов И.Д., Хайдар А.М., Борисов Г.А. Прогноз геометрии трещины гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. 2009. Т. 11. С. 62–66.
2. Баяк И.О. Междисциплинарный подход к прогнозированию макроскопических и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородов. Москва: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, 2013. 168 с.
3. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. С. 80–82.
4. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. Москва: Наука, 1967. 576 с.
5. Гзовский М. В. Тектонические поля напряжений // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1954. № 3. С. 390–410.
6. Дубиня Н.В. Влияние массовых сил, возникающих в окрестности трещины ГРП, на локальное напряженно-деформированное состояние // Материалы конференции. 56-я научная конференция МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. 2013. Т. 2. С. 86–87.
7. Дубиня Н.В. Исследование особенностей развития трещины ГРП в неоднородной слоистой среде // Материалы конференции. XXI Губкинские чтения. 2016. Т. 5. С. 38–41.
8. Дубиня Н.В. Прогнозирование направления развития трещины при повторном гидравлическом разрыве пласта // Материалы конференции. 55-я научная конференция МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. 2012. Т. 2. С. 84–86.
9. Дубиня Н.В., Галыбин А.Н. О распределении напряжений в слоистом массиве горных пород // Физика Земли. 2018. №6. С. 1–11.
10. Дубиня Н.В., Ежов К.А. Возможность уточнения профилей горизонтальных напряжений вдоль траекторий скважин на основании анализа трещиноватости //

Тезисы докладов. Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: тезисы докладов и программа Конференции. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Москва. 2016. С. 30.

11. Дубиня Н.В., Ежов К.А. Методика определения максимального горизонтального напряжения из анализа трещиноватости // Материалы конференции. Четвертая молодежная тектонофизическая школа-семинар. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Москва. 2015а. С. 101–107.

12. Дубиня Н.В., Ежов К.А. Один метод определения локального поля напряжений из анализа трещиноватости // Материалы конференции. Триггерные эффекты в геосистемах: материалы третьего Всероссийского семинара-совещания. Москва: ГЕОС, 2015б. С. 98–106.

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

14. Дубиня Н.В., Ежов К.А. Уточнение профилей горизонтальных напряжений, действующих в окрестности скважин, по геометрическим характеристикам трещин в породах околоскважинного пространства // Геофизические исследования. 2017б. Т. 18. №2. С. 5–26.

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

16. 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.

17. Ежов К.А., Дубиня Н.В. Методика количественной оценки максимального горизонтального напряжения на основе анализа трещиноватости // XXI Губкинские чтения «Фундаментальный базис инновационных технологий поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа и приоритетные направления развития ресурсной базы ТЭК России» Тезисы докладов. РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. Т. 3. С. 39–44.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика т. VII. Теория упругости. Москва: Наука, 2003. 260 с.
19. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. Научное издание. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с.
20. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. Москва: Недра, 1986. 304 с.
21. Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы. // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. Москва: Наука, 2000. С. 326–350.
22. Тримонова М.А., Дубиня Н.В. Основные закономерности развития трещин автоГРП // Материалы конференции. Триггерные эффекты в геосистемах: материалы третьего Всероссийского семинара-совещания. Москва: ГЕОС, 2015. С. 106-113.
23. Тримонова М.А., Дубиня Н.В., Зенченко Е.В., Зенченко П.Е., Турунтаев С.Б. Математическое и физическое моделирование процесса распространения трещины автоГРП // Тезисы докладов. Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: тезисы докладов и программа Конференции. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Москва. 2016. С. 66.
24. Amadei B., Savage W.Z., Swolfs H.S. Gravitational stresses in anisotropic rock masses // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics. 1987. Vol. 24(1). P. 5–14.
25. Anderson E.M. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951. 206 p.

26. Bandis S.C., Lumsden A.C., Barton N.R. Fundamentals of rock joint deformation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1983. Vol. 20. No. 6. P. 249–268.
27. Barton N., Bandis S., Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1985. Vol. 22. No. 3. P. 121–140.
28. Barton C.A., Zoback M.D., Moos D. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rocks // Geology. 1995. Vol. 23. No. 8. P.683–686.
29. Bayuk I.O., Ammerman M., Chesnokov E.M. Upscaling of elastic properties of anisotropic sedimentary rocks // Geophysical Journal International. 2008. Vol. 172. No. 2. P. 842–860.
30. Berchenko I., Detournay E. Deviation of hydraulic fractures through poroelastic stress changes induced by injection and pumping // Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997. Vol. 34. No. 6. P. 1009–1019.
31. Biot M.A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media // Journal of Applied Physics. 1962. Vol. 33. No. 4. P. 1482–1498.
32. Bisdorn K., Bertotti G., Nick, H.M. A Different Perspective on Critically Stressed Fractures and Their Impact on Fluid Flow // AAPG Annual Convention and Exhibition. Search and Discovery Article No. 4187.
33. Bradley W.B. Failure of Inclined Boreholes // ASME Journal of Energy Resources Technology. 1979. Vol. 101. No. 4. P. 232–239.
34. Byerlee J.D. Friction of rock // Pure and applied Geophysics. 1978. Vol. 116. P. 615–626.
35. Chen M.Y., Dahan C.A., Ekstrom M.P., Lloyd P.M., Rossi D.J. Formation imaging with microelectrical scanning arrays // The Log Analyst. Vol. 28. No. 3. P. 294–306.
36. Chesnokov E.M., Ammerman M., Sinha S., Kukharenko Y.A. Tensor character of Biot parameter and related problems // Proc. 2nd Int. Workshop Rainbow in the Earth. Berkley, California, 2005.

37. Coussy O. Poromechanics. N.Y.: Wiley, 2004. 315 p.
38. Dubinya N. Horizontal stress profiles reconstruction based on elastic properties and natural fractures' characteristics. NanTroSEIZE case study // Japan Geosciences Union Meeting Proceedings. 2017. SIT24-P05.
39. 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 Proceedings. 2016. STT18-10.
40. Dubinya N.V., Ezhov K.A. Earth's crust using log data with unknown regional stress regime // Tyumen 2017: 5th Scientific Conference Proceedings. 2017. P. 64–68.
41. Dubinya N., Ezhov K. The evaluation of maximum horizontal in-situ stress using the wellbore imagers data // AGU Fall Meeting Abstracts. 2016.
42. 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. 2018a. P. 35–44.
43. Dubinya N., Fokin I. Establishing relationship between effective elastic moduli and stress state using critically stressed fractures concept // Japan Geosciences Union Meeting Proceedings. 2018b. SIT26-03.
44. Dubinya N., Fokin I. Nonlinear model for reversible deformation of rock containing critically stressed fractures // ARMA 18-106. 52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 17-20 June 2018, Seattle, Washington. 2018c. P. 1–9.
45. Dubinya N., Lukin S., Chebyshev I. Two-Way Coupled Geomechanical Analysis of Naturally Fractured Oil Reservoir's Behavior Using Finite Element Method // SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2015. SPE-176631-MS.
46. 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 // SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2017. SPE-187823-MS.

47. Dubinya N., Rusina O. Natural fractures and stress state analysis from Nankai Trough wells' logging data // Japan Geosciences Union Meeting Proceedings. 2018. SSS04-03.
48. Dundurs J. Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges Under Normal and Shear Loading // Journal of Applied Mechanics. 1969. Vol. 36. No. 3. P. 650–652.
49. Eaton B.A. The Effect of Overburden Stress on Geopressure Prediction from Well Logs // Journal of Petroleum Technology. 1972. Vol. 24. No. 8. P. 929–934.
50. Elbel J.L., Mack M.G. Refracturing: Observations and Theories. // SPE Production Operations Symposium. 1993. SPE-25464-MS.
51. Ezhov K.A., Dubinya N.V., Arsibekov A.A. Application of special well logging techniques for geomechanical model improvement in naturally fractured reservoirs // SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2017. SPE-187821-MS.
52. Fisher Q.J., Casey M., Harris S.D., Knipe R.J. Fluid-flow properties of faults in sandstone: The importance of temperature history // Geology. 2003. Vol. 31. No. 11. P. 965–968.
53. Fisher Q.J., Knipe, R.J. Fault sealing processes in siliciclastic sediments // Geological Society, London, Special Publications. 1998. Vol. 147. No. 1. P. 117–134.
54. Funato A., Chen, Q. Initial stress evaluation by boring core deformation method // 34th Symposium on Rock Mechanics Proceedings. 2005. P. 261–266.
55. Funato A., Ito T., Shono T. Laboratory verification of the Diametrical Core Deformation Analysis (DCDA) developed for in-situ stress measurements // 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. 2012.
56. Galybin A., Dubinya N. Elastic stress field reconstruction in the Nankai Trough area based on WSM and drilled data // Japan Geosciences Union Meeting Proceedings. 2017. SIT24-12.
57. Gaarenstroom L., Tromp R.A.J., Brandenburg A.M. Overpressures in the Central North Sea: implications for trap integrity and drilling safety // Geological Society, London, Petroleum Geology Conference Series. 1993. Vol. 4. No. 1. P. 1305–1313.
58. Hagoort J., Weatheril B.D., Settari A. Modeling the propagation of waterflood-

- induced hydraulic fractures // Society of Petroleum Engineers Journal. 1980. Vol. 20. No. 4. P. 293–303.
59. Haimson B.C. Measurement of in situ stress // Methods in Experimental Physics. 1987. Vol. 24(B). P. 377–408.
60. Haimson B., Fairhurst C. In situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing // 11th Symposium on Rock Mechanics Proceedings. 1969. P. 559–584.
61. Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfeß D., Müller B. The World Stress Map database release. Potsdam, Germany, Helmholtz Cent. Potsdam, GFZ Ger. Res. Cent. for Geosci., 2008.
62. Hickman S.H., Zoback M.D. The interpretation of hydraulic fracturing pressure-time data for in situ stress determination. Hydraulic Fracturing Measurements. Washington, D.C, National Academy Press., 1983. P. 44–54.
63. Hickman S.H., Barton C.A., Zoback M.D., Morin R., Sass J., Benoit R. In situ stress and fracture permeability along the Stillwater fault zone, Dixie Valley, Nevada // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Abstracts. 1997. Vol. 34. P. 3–4.
64. Hidayati D.T., Chen H.Y., Teufel L.W. Flow-Induced Stress Reorientation in a Multiple-Well Reservoir // SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference Proceedings. 2001. SPE-71091.
65. Hossain M.M., Rahman M.K., Rahman S.S. A Comprehensive Monograph for Hydraulic Fracture Initiation From Deviated Wellbores Under Arbitrary Stress Regimes // SPE Asia Pacific oil and gas conference and exhibition Proceedings. 1999. SPE-54360-MS.
66. Hou B., Chen M., Zhimeng L., Wang Y., Diao C. Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs // Petroleum Exploration and Development. 2014. Vol. 41. No. 6. P. 833–838.
67. Huang X., Sinha B.K., Toksöz M.N., Burns D.R. Formation stress estimation using standard acoustic logging // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 1999.

P. 53–56.

68. Hubbert M.K., Willis D.G. Mechanics of hydraulic fracturing // Petr Trans AIME (JPT). 1957. Vol. 210. P. 153–163.
69. Ito T., Funato A., Lin W., Doan M.L., Boutt D.F., Kano Y., Ito H., Saffer D., McNeill L.C., Byrne T., Moe K.T. Determination of stress state in deep subsea formation by combination of hydraulic fracturing in situ test and core analysis: A case study in the IODP Expedition 319 // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. Vol. 118. No. 3, P.1203–1215.
70. Ito T., Fujii R., Evans K. F., Hayashi K. Estimation of Stress Profile with Depth from Analysis of Temperature and Fracture Orientation Logs in a 3.6 km Deep Well at Soultz, France // SPE/ISRM Rock Mechanics Conference Proceedings. 2002. SPE-78185-MS.
71. Ito T., Nayuki T., Kato K., Funato A., Satoh T., Kitagawa Y., Kato H. Development of the Deep Rock Stress Tester // ISRM International Symposium on In-Situ Rock Stress Proceedings. 2016.
72. Ito T., Zoback M.D. Fracture permeability and in situ stress to 7 km depth in the KTB scientific drillhole // Geophysical Research Letters. 2000. Vol. 27. No. 7. P. 1045–1048.
73. Jaeger J.C., Cook N.G.W. Fundamentals of Rock mechanics, 2nd edn. New York: Chapman and Hall, 1979. 593 p.
74. Jihoon K., Moridis G.J. Numerical Studies on Coupled Flow and Geomechanics with the Multiple Porosity Model for Naturally Fractured Tight and Shale Gas Reservoirs // 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. 2012. Paper 12-296.
75. Kim, M. M., H. Y. Ko. Multistage triaxial testing of Rocks // Geotechnical Testing – 1979 – Vol. 2 – P. 98-105.
76. Kirsch E.G. Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre, Zeitschrift des Verlines Deutscher Ingenieure // Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. 1898. Vol. 42. P. 797–807.
77. Laubach S.E., Olson J.E., Gale J.F.W. Are open fractures necessarily aligned

with maximum horizontal stress? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. Vol. 222. P. 191-195.

78. Li P. Theoretical Study on Reorientation Mechanism of Hydraulic fractures // *Society of Petroleum Engineers paper 105724*. 2007.

79. Ligtenberg J.H. Detection of fluid migration pathways in seismic data: implications for fault seal analysis // *Basin Research*. 2005. Vol. 17. P. 141–153.

80. Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson, R. An overview of rock stress measurement methods // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003. Vol. 40. No. 7. P. 975–989.

81. Lukin S., Oshmarin R., Tugarova M., Dubinya N., Chebyshev I., 2015. Modeling of Effective Pressure Effect on Deformation Mechanisms of Fractured Reservoirs // *SPE Russian Petroleum Technology Conference Proceedings*. 2015. SPE-176604-MS.

82. Pistre V., Yan G.R., Sinha B., Prioul R., Vidal-Gilbert S. Determining stress regime and Q factor from sonic data // *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. 2009.

83. Prats M. Effect of burial history on the subsurface horizontal stresses of formations having different material properties // *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1981. Vol. 21. No. 6. P. 658-662.

84. Rogers S. Critical stress-related permeability in fractured rocks. Fracture and in situ stress characterization of hydrocarbon reservoirs // *Geological Society, London, Special Publications*. 2002. Vol. 209. P. 7–16.

85. Sathar S., Reeves H.J., Cuss R.J., Harrington J.F. The role of stress history on the flow of fluids through fractures // *Mineralogical Magazine*. 2012. Vol. 76. No. 8. P. 3165–3177.

86. Sayers C.M. The effect of anisotropy on the Young's moduli and Poisson's ratios of shales // *SEG Expanded*. 2010. Abstracts 29. P. 2606–2611.

87. Schutjens P.M.T.M. Hanssen T.H., Hettema M.H.H., Merour J., de Bree J.Ph., Coremans J.W.A., Helliessen G. Compaction-induced porosity/permeability reduction in sandstone reservoirs: Data and model for elasticitydominated deformation // *SPE*

Reservoir Evaluation & Engineering. 2004. Vol. 7. No. 3. P. 202–216.

88. Siebrits E., Elbel J.L., Hoover R.S., Diyashev I.R., Griffin L.G., Demetrius S.L., Wright C.A., Davidson B.M., Steinsberger N.P., Hill D.G. Refracture reorientation Enhances Gas Production in Barnett Shale Tight gas Wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition Proceedings. 2000. SPE-63030.
89. Silva I., Domingos F., Marinho P., Laronga R., Khan S. Advanced Borehole Image Applications in Turbidite Reservoirs Drilled With Oil Based Mud: A Case Study From Deep Offshore Angola // SPWLA 44th Annual Logging Symposium. 2003. SPWLA-2003-AA.
90. Sinha B.K. Inversion of borehole dispersions for formation stresses // Ultrasonics Symposium 1997 Proceedings. 1997. P. 781–786.
91. Sinha B.K., Wang J., Kisra S., Li J., Pistre V., Bratton T, Sanders M., Jun C. Estimation of formation stresses using borehole sonic data // 49th Annual Logging Symposium Proceedings. 2008.
92. Strasser M., Dugan B., Kanagawa K., Moore G.F., Toczko S., Maeda L., and the Expedition 338 Scientists, Proc. IODP, 338: Yokohama (Integrated Ocean Drilling Program).
93. Tobin, H., Hirose, T., Saffer, D., Toczko, S., Maeda, L., Kubo, Y., and the Expedition 348 Scientists, 2015. Proc. IODP, 348: College Station, TX (Integrated Ocean Drilling Program).
94. Townend J., Zoback M.D. How faulting keeps the crust strong // Geology. 2000. Vol. 28. No. 5. P. 399–402.
95. Tran, D.T., A. Pagoulatos and C.H. Sonderge. 2010. Quantify Uncertainty of Rock Failure Parameters From Laboratory Triaxial Testings Using Conventional And Multistage Approaches. In Proceedings of 44th U.S. Rock Mechanics Symp., June 27 - 30, 2010, Salt Lake City, Utah.
96. Trimonova M.A., Dubinya N.V. The Main Tendencies of Water-Induced Fracture Propagation // SPE Russian Petroleum Technology Conference Proceedings. 2015a. SPE-176631-MS.

97. Trimonova M.A., Dubinya N.V. The Method of Determination of Water-Induced Hydraulic Fracture's Geometry // IET Conference Publications. 2015b. Vol. 674. P. 142–147.
98. Ward C., Beique M. Pore and Fracture Pressure Information from PWD Data // AADE Drilling Technology Forum Proceedings. 2000. P. 9–12.
99. Wu H.-Y., Chan C.-Y., Kinoshita M., Saito S. Stress field observation and modeling from the NanTroSEIZE scientific drillings in the Nankai Trough System, SW Japan // Tectonophysics. 2013. V. 600. P. 99–107.
100. Wu H.-Y., Kinoshita M., Saito S., Lin W., Moe K.T. Borehole instability analysis for IODP expedition 338 of the NanTroSEIZE Project, Nankai Trough subduction zone // The 20th Formation Evaluation Symposium of Japan Proceedings. 2014. 3 p.
101. Wu H.-Y., Chan C.-H. Nankai Geomechanical Model: the stress tensor determination in the vicinity of subduction zone // Japan Geosciences Union Meeting Proceedings. 2017. SIT24-06.
102. Zemanek J., Glenn E.E., Norton L.J., Caldwell R.L. Formation evaluation by inspection with the borehole televiewer // Geophysics. 1970. Vol. 35. No. 2. P. 254–269.
103. Zoback M.D., Mastin L., Barton C. In-situ stress measurements in deep boreholes using hydraulic fracturing, wellbore breakouts, and stonely wave polarization // ISRM International Symposium Proceedings. 1986.
104. Zoback M.D., Barton C.A., Brudy M., Castillo D.A., Finkbeiner T., Grollimund B.R., Moos D.B., Peska P., Ward C.D., Wiprut D.J., 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. No. 7. P. 1049–1076.
105. Zoback, M.D. Reservoir Geomechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 505 p.
106. Zoback M.L. First- and second order patterns of tectonic stress: The World Stress Map Project // Journal of Geophysical Research. 1992. V. 97. P. 11703-11728.