

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Коношонкин Дмитрий Владимирович

**Разработка технологии определения потенциально  
продуктивного трещинного коллектора в отложениях  
доюрского комплекса Томской области на основе  
одномерного геомеханического моделирования**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.9. Геофизика

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

**Научный руководитель:**

**Рукавишников Валерий Сергеевич**

PhD, доцент отделения нефтегазового дела  
Инженерной школы природных ресурсов  
Томского политехнического университета

**Официальные оппоненты:**

**Хасанов Марс Магнавиевич**

доктор технических наук, профессор, Публичное  
акционерное общество «Газпром нефть»,  
директор по науке (г. Санкт-Петербург)

**Зуев Лев Борисович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки «Институт физики прочности и  
материаловедения СО РАН», заведующий  
лабораторией (г. Томск)

Защита состоится «19» сентября 2024 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.27 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корпус 20, ауд. 504.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «    » июля 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.27,  
кандидат геолого-минералогических наук



Осипова Елизавета Николаевна

### **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы исследования.** Изучением доюрских образований в Западной Сибири начали заниматься более 50 лет назад с открытием в начале 70-х годов залежей нефти в глубоко погруженных палеозойских отложениях на Малоичской и Верх-Тарской площадях. В свою очередь, в пределах Томской области до фундамента пройдено порядка 800 скважин.

Поиск залежей нефти и газа в доюрском комплексе (ДЮК) подразумевает поиск основных компонентов углеводородной системы: нефтематеринской породы, коллектора, ловушки и крыши. Изучение открытых месторождений нефти и газа в доюрском комплексе Томской области показывает, что фильтрационные характеристики коллектора полностью или частично контролируются естественными открытыми трещинами и, соответственно, для поиска потенциального коллектора необходимо иметь технологию выделения и прогноза открытых трещин.

Выделение открытых трещин, являющихся каналами для течения флюида, является важной задачей как для поиска и оценки запасов, так и для планирования и анализа разработки месторождений нефти и газа. На текущий момент существуют различные способы прогноза трещин. В большинстве случаев используется комплексирование данных сейсмоки с данными по керну и ГИС. Предлагаемые решения требуют наличия ранее выделенных трещин по скважинам, что является отдельной задачей, требующей решения, т.к. не все трещины, выделенные по данным ГИС и по данным керна, являются проницаемыми.

Вместе с тем, в настоящее время активно развивается и широко применяется в различных областях науки и техники геомеханическое моделирование. Поэтому в данной работе проведена оценка возможностей геомеханического моделирования для решения задачи выделения естественных трещин при изучении доюрского комплекса Томской области.

Одномерные геомеханические модели очень требовательны к объему и качеству исходных данных, например, при калибровке модели для уточнения прочности на одноосное сжатие и для уточнения горизонтальных напряжений, необходимы данные микросканеров, которые записываются не во всех скважинах и в ограниченном интервале. Поэтому, помимо методики использования геомеханической модели для прогноза открытых трещин, в данной работе была решена задача построения одномерной геомеханической модели, используя более доступные данные кавернометрии и профилометрии. Данная задача также является актуальной, поскольку ее решение позволяет строить и использовать геомеханические модели по скважинам с ограниченным набором исходных данных, что характерно не только для скважин, вскрывших доюрский комплекс Томской области, но также для скважин с аналогичным набором данных в других регионах.

**Степень разработанности темы.** Текущее представление о строении и нефтеносности доюрского комплекса горных пород составлено благодаря работам таких ученых как: В. В. Коротун, Е. Г. Журавлев, Г. А. Лапинская, Е. Е. Даненберг, Г. И. Тищенко, Е. Л. Курбала, З. Я. Сердюк, М. А. Алексеева, Г. Н. Перозио, И. В. Бабанская, Б. С. Погорелов, Н. Н. Ростовцев, В. А. Дедеев, А. А. Трофимук, В. С. Сурков, О. Г. Жеро, А. А. Степанов, А. Э. Конторович, В. И. Краснов, В. Н. Дубатолов, В. А. Конторович, К. А. Клещев, В. С. Шеин, Г. Д. Исаев, А. В. Ежова, К. С. Иванов и другие.

Благодаря проведенным работам установлено, что большинство залежей углеводородов доюрского комплекса (ДЮК) Томской области приурочено к эрозионно-тектоническим выступам доюрского основания. Залежи углеводородов массивные, литологически, тектонически и стратиграфически экранированы и характеризуются сложным типом коллектора: поровый, кавернозный, трещинный, а также комбинированный. Несмотря на достаточно большое время изучения доюрского комплекса, среди специалистов нет однозначного мнения о геологическом и тектоническом строении доюрских залежей, возрасте нефти, времени формирования залежей, а также отсутствует общепринятая технология поиска залежей нефти и газа.

В данной работе предлагается расширить представление о доюрском комплексе и его нефтегазосности на основе геомеханического моделирования. Разработкой подходов построения одномерных геомеханических моделей занимались такие ученые, как Ричард Пламб, Стивен Эдвардс, Гэри Пидкок, Дональд Ли, Брайан Стейси, Марк Зобак. В целом геомеханическое моделирование является достаточно новым направлением и имеет ряд ограничений. Например, в настоящий момент калибровка геомеханических моделей чаще всего производится вручную и требует данных микросканеров, что существенно ограничивает набор скважин для построения и калибровки модели, а также приводит к большим затратам времени.

Таким образом, в рамках изучения доюрского комплекса Томской области возникает актуальная проблема привлечения более распространенных данных кавернометрии скважин для построения геомеханических моделей и поиска на их основе трещинного коллектора.

**Целью диссертационной работы** является разработка технологии определения потенциально продуктивного трещинного коллектора в отложениях доюрского комплекса Томской области на основе одномерного геомеханического моделирования для решения задач поиска, оценки и разработки залежей нефти и газа.

**Основные задачи исследования:**

А) описание существующих подходов к построению одномерных геомеханических моделей и оценка их применимости для доюрского комплекса Томской области;

Б) разработка подхода автоматической калибровки одномерных геомеханических моделей на основе геометрической аппроксимации вывалов в скважине, позволяющего строить адекватные геомеханические модели для изучения доюрского комплекса Томской области;

В) разработка подхода выделения открытых естественных трещин в скважинах на основе одномерного геомеханического моделирования;

Г) проверка работоспособности и применимости разработанного подхода выделения трещин для месторождений нефти и газа доюрского комплекса Томской области.

**Объектом исследования** является доюрский комплекс Томской области.

**Предметом исследования** является технология выделения проницаемых трещин на основе геомеханического моделирования, включающая алгоритм и формулы аппроксимации вывалов и калибровки одномерных геомеханических моделей.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы геометрической аппроксимации, анализ лабораторных исследований, а также аналитические методы расчета напряженного-деформируемого состояния трещин вблизи стенки скважины. Для разработки программного продукта использовался программный язык Python. Проверка подхода осуществлялась путем сопоставления испытаний скважин с прогнозом открытых трещин по модели.

**Научная новизна работы:**

А) предложен подход геометрической аппроксимации вывалов стенки скважин;

Б) предложен алгоритм автоматической калибровки одномерной геомеханической модели на данные кавернометрии и давления закрытия трещины;

В) предложен программный продукт для проведения автоматической калибровки одномерных геомеханических моделей;

Г) оптимизированный подход построения одномерных геомеханических моделей использован для анализа трещиноватости для доюрского комплекса Томской области.

**Теоретическая значимость** результатов диссертационного исследования заключается в том, что сформулированные математические модели и алгоритмы позволяют расширить подходы геомеханического моделирования и изучения доюрского комплекса Томской области.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в том, что разработанный подход построения геомеханических моделей позволяет выделять проницаемые трещины для поиска и оценки залежей в доюрском комплексе Томской области, а также проектировать плотность бурового раствора для строительства скважин.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Аппроксимация вывалов в скважине с помощью эллиптической или треугольной формы позволяет связать глубину вывала и угол вывала в скважине и проводить калибровку геомеханической модели на данные кавернометрии.

2. Построенная трехмерная статическая геомеханическая модель для Северо-Останинского месторождения подтверждает возможность использования геометрической аппроксимации вывалов для проведения автокалибровки геомеханических моделей на данные кавернометрии в условиях доюрского комплекса Томской области. Сходимость прогнозных интервалов вывалов с фактическими данными по кавернометрии составляет 86% и подтверждает возможность использования предлагаемого подхода.

3. Разработанный подход на основе одномерного геомеханического моделирования позволяет выделять проницаемые трещины в доюрском комплексе Нюрольского структурно-фациального района Томской области путем определения напряженности трещин (критических трещин). Сопоставление информации об интервалах поглощения бурового раствора с данными по геомеханической модели является индикатором трещинного коллектора. Использование процесса автокалибровки позволяет сократить время построения одной модели в среднем в 25 раз.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных в ходе настоящей диссертационной работы результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов механики сплошной среды, справедливостью аналитических решений задачи концентрации напряжений возле цилиндрической выработки в горных породах, а также практическим применением разработанных подходов. Диссертация имеет прикладной характер, полученные научные результаты использованы в рамках проекта «Разработка технологии поиска потенциально продуктивных объектов в отложениях доюрского комплекса Томской области» (проект «Палеозой») договор № ВСТ-17/10124/450/Р (13.12-59/2018) от 01.03.2018 г. с ООО «Газпромнефть – Восток», а также в рамках проекта «1D геомеханическое моделирование нефтегазоконденсатного месторождения Хвалыньское. Оценка устойчивости ствола скважин. Анализ пескопроявлений. Экспертиза результатов 3D геомеханического моделирования. Подготовка и защита заключительного отчета» договор № 19/02 от 01.09.2023 с АО «Геологика».

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в деятельность ПАО «Газпромнефть», а также в рамках учебного процесса ТПУ в курсе лекций по модулю «Геомеханика» магистерских программ «Оценка и управление резервуаром / Нефтегазовый инжиниринг» и «Технология строительства нефтяных и газовых скважин».

**Апробации работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на научных конференциях: EAGE в 2020 году в Санкт-Петербурге, на конференции Progress' 19 в 2019 году в г. Сочи, на 81 конференции EAGE Conference and Exhibition в 2019 году в г. Лондон, на

конференции EAGE в 2018 году в Санкт-Петербурге, на Международном симпозиуме имени академика М. А. Усова в 2017 году в г. Томск, а также на семинарах по результатам работ при разработке технологии поиска потенциально продуктивных объектов в отложениях доюрского комплекса Томской области.

**Публикации по теме диссертации.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 13 работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 2 публикации в научных журналах, индексируемом Web of Science и Scopus, 7 публикаций в материалах международных и всероссийских научных конференций, получен один патент на изобретение, зарегистрирована одна программа ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты получены автором лично. Автором поставлена проблематика исследования, получены формулы геометрической аппроксимации вывалов и формулы для калибровки напряжений и прочности на одноосное сжатие горных пород, разработан подход калибровки одномерной модели с использованием геометрической аппроксимации вывалов, разработана программа проведения автокалибровки, а также построены одномерные и трехмерные геомеханические модели по фактическим данным для месторождений нефти и газа Томской области и проведена проверка работоспособности подхода выделения трещин.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов основной части, заключения, списка литературы и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 207 страниц, включая 100 рисунков и 27 таблиц. Список литературы содержит 123 наименования.

#### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, изложены цель и задачи, сформулированы защищаемые положения, показана научная новизна и практическая значимость выполненной работы.

**В первой главе** рассмотрен стандартный подход построения одномерных геомеханических моделей, описаны этапы построения моделей и определяемые параметры. Показаны теоретические основы расчета стабильности бурения скважины и компоненты окна совмещенных градиентов давлений. В главе показано, что отсутствие данных микросканеров делает процесс построения модели очень затруднительным или невозможным. Данная диссертационная работа направлена на поиск решения проблемы путем компенсации отсутствия данных микросканера данными каверномера и/или профилемера.

**Во второй главе** рассматривается способ связи угла вывала с глубиной вывала в скважине для задачи калибровки одномерных геомеханических моделей.

В случае строительства скважины информация об обрушении ствола скважины получается по косвенным и, в некоторых случаях, дорогостоящим измерениям. Для калибровки геомеханической модели необходимо оценить угол

вывала, что может быть сделано с помощью акустического/электрического микросканера, позволяющего получить развертку стенки ствола скважины. Запись микросканеров проводится достаточно редко и в ограниченном интервале. С другой стороны, в большинстве скважин производится измерение диаметра ствола скважины с помощью каверномера или профилемера. Эти исследования позволяют определить глубину вывала стенки скважины, но не угол вывала. Соответственно, возникает необходимость в оценке связи между глубиной и углом (шириной) вывала.

Механика образования вывала была детально исследована в экспериментах на керне и опубликована многими учеными. Для всех горных пород, кроме высокопористого слабосцементированного кварцевого песчаника характерна треугольная форма вывалов. Процесс образования вывалов в целом происходит в четыре этапа (Рисунок 1):

- 1) сначала образуются дилатантные (с увеличением объема) межзерновые трещины отрыва за стенкой скважины, параллельные максимальному горизонтальному напряжению ( $\sigma_{Hmax}$ );
- 2) затем трещины поворачиваются к стенке скважины;
- 3) после этого горная порода расслаивается на пластинки, которые, начиная с центра, вываливаются внутрь скважины;
- 4) процесс продолжается до тех пор, пока вывал не примет форму треугольника.

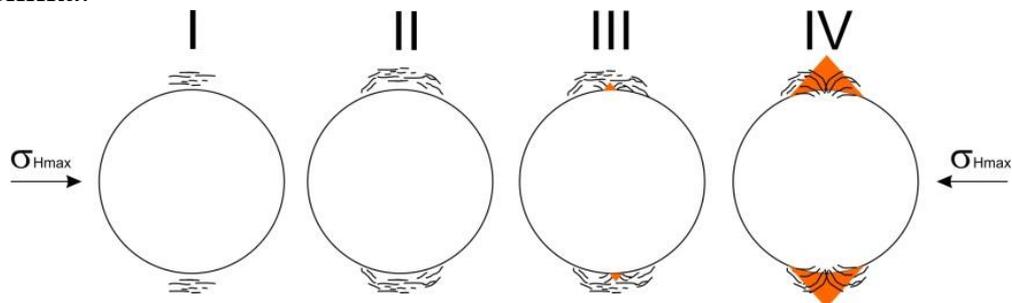


Рисунок 1 – Процесс образования вывала в скважине по данным лабораторных исследований керна

На основе фотографий вывалов можно измерить геометрические параметры вывалов: глубину и ширину вывала, а также угол треугольной аппроксимации вывала. Ниже показан пример вывалов для 2 образцов гранита различной зернистости (Рисунок 2). Образованные вывалы хорошо аппроксимируются треугольной формой, при этом угол треугольной аппроксимации изменяется от  $70^\circ$  до  $90^\circ$ .

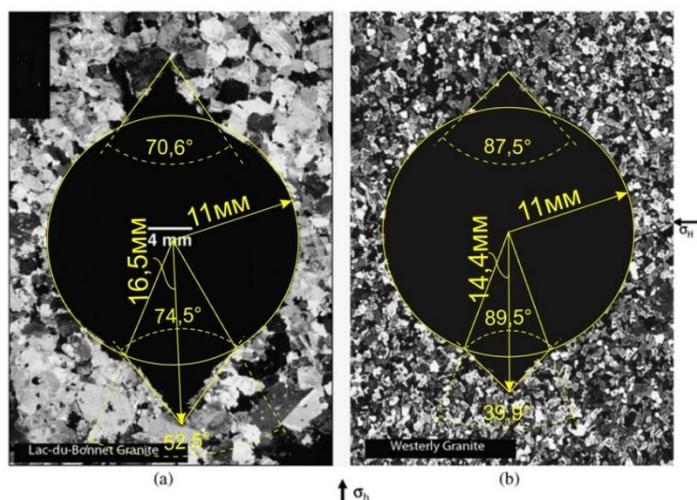


Рисунок 2 – Вывалы в образце гранита: угол вывала,  $w_{bo}$ : (a) –  $52.5^\circ$ , (b) –  $39.9^\circ$ ; глубина вывала,  $2a$ : (a) –  $16.5\text{мм}$ , (b) –  $14.4\text{мм}$ ; радиус отверстия (скважины),  $R$ : (a) –  $11\text{мм}$ , (b) –  $11\text{мм}$ ; угол треугольной аппроксимации вывала,  $\gamma$ : (a) –  $74.5^\circ$ ,  $70.6^\circ$ , (b) –  $89.5^\circ$ ,  $87.5^\circ$

Аналогичные измерения можно провести для других образцов различной литологии. Для всех образцов наблюдается ограниченность в параметрах треугольного вывала. Угол треугольной аппроксимации вывала изменяется в достаточно узких пределах (от  $70,6^\circ$  до  $90,6^\circ$ ), а среднее значение угла треугольной аппроксимации вывалов равно порядка  $80^\circ$ , что в среднем на  $30^\circ$  меньше угла вывалов. Среднее соотношение глубины вывала к радиусу отверстия (скважины) составляет 1.4.

Для проверки работоспособности треугольной аппроксимации на график опубликованных фактических измерений показаний каверномера и ширины вывала были нанесены расчетные линии соотношений в зависимости от различных углов треугольной аппроксимации (Рисунок 3). Для расчета параметров вывалов треугольной геометрической формой выведены следующие уравнения связи:

$$a = R \frac{\sin\left(\frac{w_{bo} + \gamma}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}; \quad w_{bo} = 2 \operatorname{asin}\left[\frac{a}{R} \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right] - \gamma, \quad (1)$$

где  $a$  – глубина вывала (половина измеренного диаметра скважины каверномером), м;  $w_{bo}$  – угол вывала, градусы;  $\gamma$  – угол треугольной аппроксимации вывала, градусы;  $R$  – радиус скважины, м.

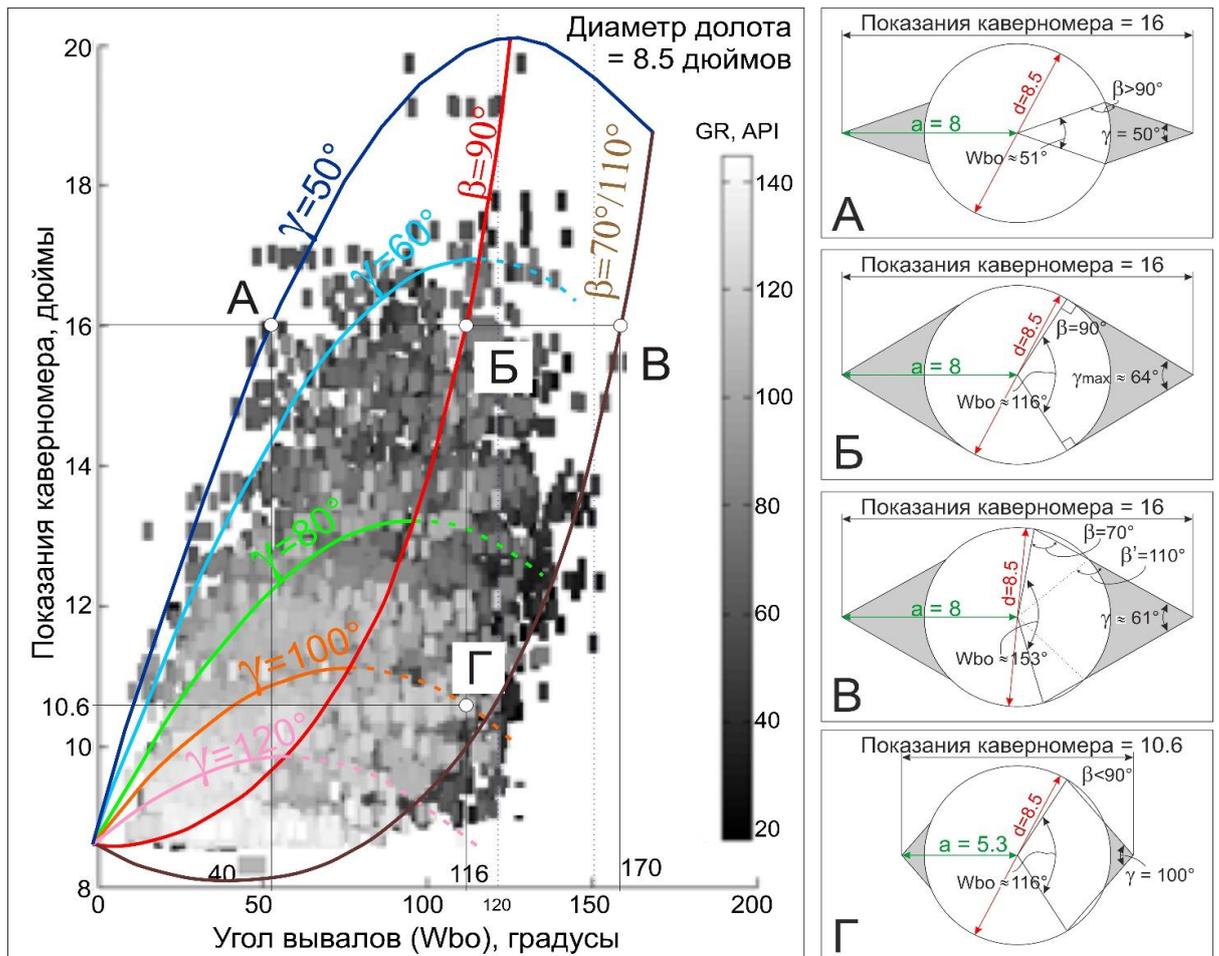


Рисунок 3 – Наложение расчетных линий треугольной аппроксимации вывалов на график фактических измерений глубины и ширины вывала (слева) и схема геометрических соотношений для точек А, Б, В, Г (справа)

Для треугольной аппроксимации были сделаны следующие выводы:

- 1) максимально возможные углы вывала,  $W_{bo}$ , при  $\beta = 90^\circ$  не охватывают все возможные точки, что говорит о том, что треугольная форма вывалов не всегда удовлетворяет геометрии вывалов в скважине. Например, варианты В и Г не могут быть описаны треугольной формой вывала (Рисунок 3). Соответственно треугольная аппроксимация может занижить возможное значение угла вывала в скважине;
- 2) среднее значение  $\gamma = 80^\circ$  по данным изучения керна проходит через середину облака точек, однако в скважинах наблюдаются вывалы с большим и меньшим углом треугольной аппроксимации;
- 3) минимальный угол треугольной аппроксимации ( $\gamma$ ) составляет  $50^\circ$ ;
- 4) для корректного использования треугольной аппроксимации необходимо убедиться в треугольной форме вывалов (по данным акустического сканера) и оценить угол аппроксимации  $\gamma$ .

Если фактическая геометрия вывалов, измеренная по данным акустических микросканеров, отличается от треугольной (Рисунок 4), можно рассмотреть аппроксимацию с помощью эллиптической геометрии.

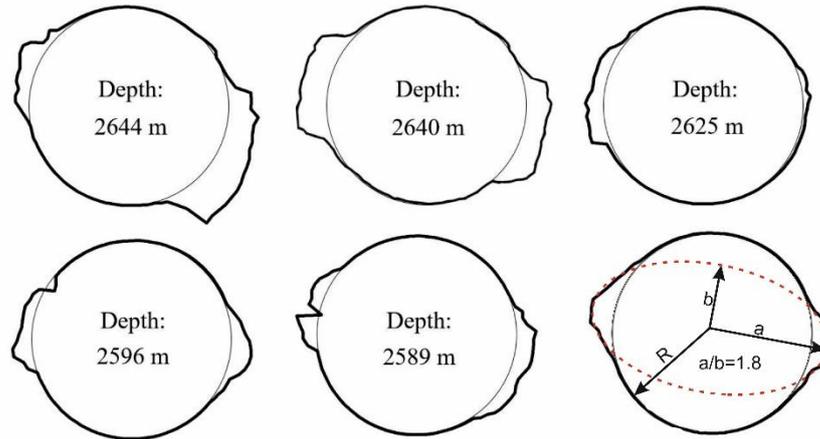


Рисунок 4 – Пример форм вывалов по данным UBI (акустический микросканер) и наложение эллиптической аппроксимации с соотношением осей 1.8 для правого нижнего вывала

Для расчета параметров вывалов при эллиптической аппроксимации выведены следующие уравнения связи:

$$a = \sqrt{\frac{R^2 \left( (a/b)^2 \cdot \tan^2 \left( \frac{w_{bo}}{2} \right) + 1 \right)}{\tan^2 \left( \frac{w_{bo}}{2} \right) + 1}}; \quad w_{bo} = 2a \tan \sqrt{\frac{a^2 - R^2}{R^2 (a/b)^2 - a^2}}, \quad (2)$$

где  $a$  – длина большой полуоси эллипса, равная половине измеренного диаметра скважины каверномером, м;  $b$  – длина малой полуоси эллипса, м.

При наложении линий эллиптической аппроксимации на график, можно сделать следующие выводы (Рисунок 5):

1) эллиптическая аппроксимация, в отличие от треугольной, описывает все облако точек вывалов, что говорит о ее большей применимости для скважинных условий;

2) в случае отсутствия акустического микросканера рекомендуется использовать соотношение  $a/b$  равное 2.1 как среднее соотношение и оценить неопределенность с использованием соотношений 4,6 и 1,06.

Сделанные в данной главе выводы подтверждают защищаемое положение №1: «аппроксимация вывалов в скважине с помощью эллиптической или треугольной формы позволяет связать глубину вывала и угол вывала в скважине и проводить калибровку геомеханической модели на данные кавернометрии».

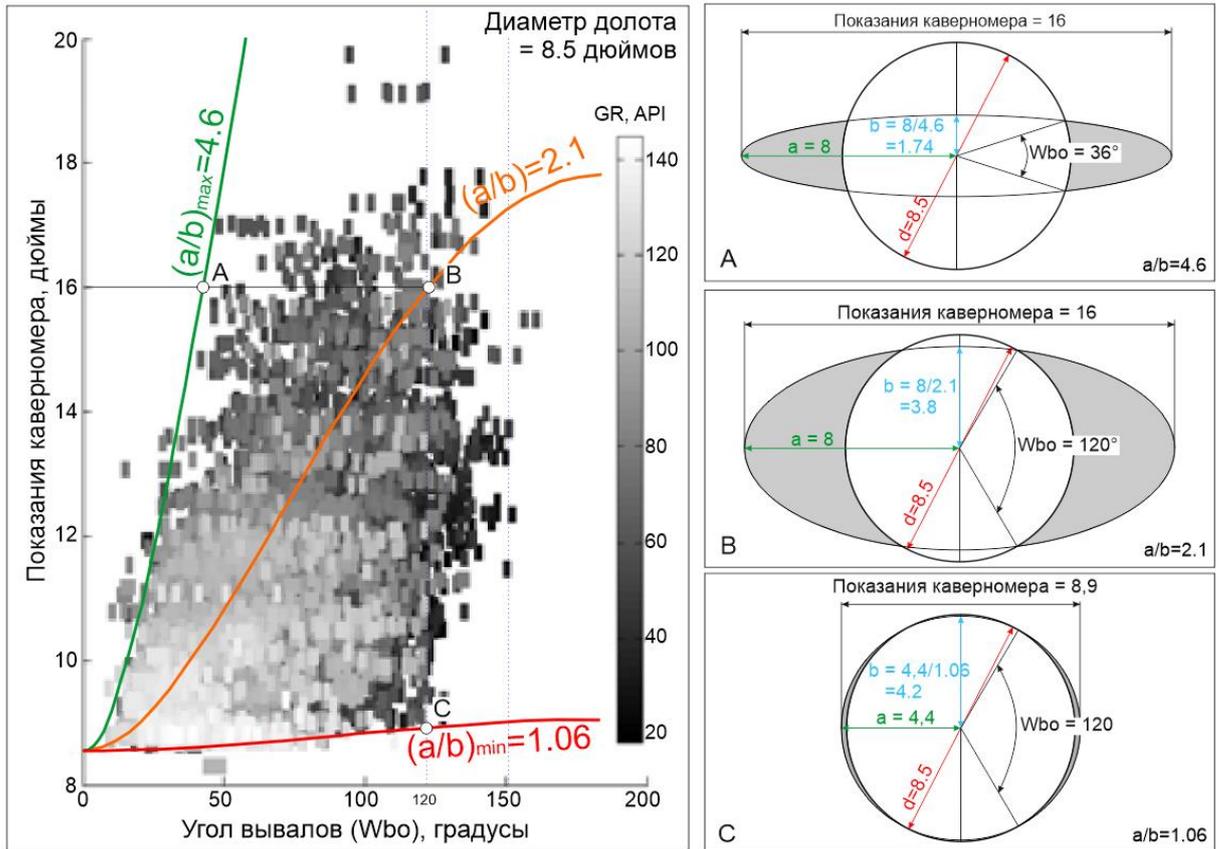


Рисунок 5 – Наложение расчетных линий эллиптической аппроксимации вывалов на график фактических измерений глубины и ширины вывала (слева) и схема геометрических соотношений для точек А, В, С (справа)

**В третьей главе** описывается подход для проведения автоматической калибровки одномерной геомеханической модели и приведен программный код для его реализации на языке Python, в конце главы приведены результаты проверки разработанного подхода на примере Северо-Останинского месторождения Томской области.

Процесс проведения автокалибровки показан на схеме (Рисунок 6). Автокалибровка проводится в 2 этапа: сначала определяется оптимальное соотношение напряжений (Ratio) и определяются относительные деформации, а затем рассчитывается (калибруется) прочность на одноосное сжатие.

Оптимальное соотношение напряжений (Ratio) определяется, зная давление закрытия трещины по мини-ГРП ( $P_c$ ) и свойства горных пород в интервале ГРП. Для этого используются формулы для расчета относительных деформаций при различных соотношениях напряжений (Ratio):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{hmin} &= \frac{P_c - S_{poison} - \nu_{st} a \varepsilon_{Hmax}}{a}; \\ \varepsilon_{Hmax} &= \frac{P_c (Ratio - \nu_{st}) - S_{poison} (1 - \nu_{st})}{E}; \\ a &= \frac{E_{st}}{1 - \nu_{st}^2}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$S_{poison} = \frac{\nu_{st}}{1 - \nu_{st}} S_v - \frac{\nu_{st}}{1 - \nu_{st}} \alpha P_p + \alpha P_p,$$

где  $S_{hmin}$  – минимальное горизонтальное напряжение, МПа;  $S_{Hmax}$  – максимальное горизонтальное напряжение, МПа;  $S_{poison}$  – горизонтальное напряжение в горных породах, вызванное весом вышележащих горных пород и эффектом Пуассона, МПа;  $P_c$  – давление закрытия трещины ГРП, МПа;  $\varepsilon_{hmin}$  – относительная деформация в направлении  $S_{hmin}$ ;  $\varepsilon_{Hmax}$  – относительная деформация в направлении  $S_{Hmax}$ ;  $P_p$  – поровое давление, МПа;  $E_{st}$  – статический модуль Юнга, МПа;  $\nu_{st}$  – статический коэффициент Пуассона;  $\alpha$  – константа Био.

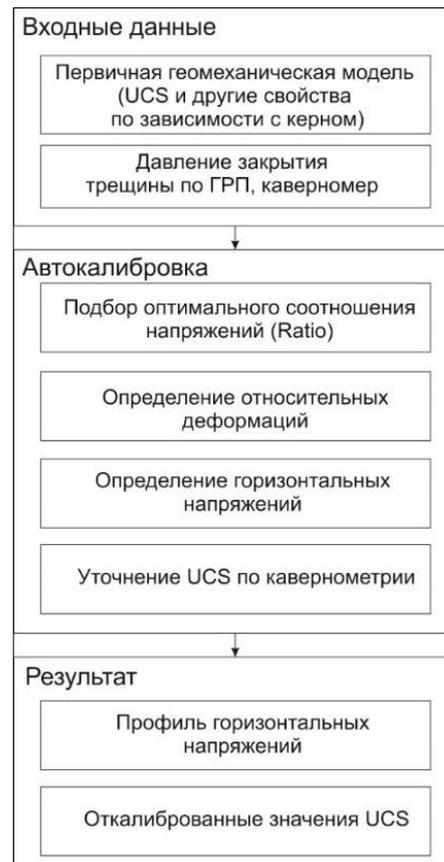


Рисунок 6 – Схема проведения автокалибровки в разработанном программном продукте

Из всех возможных значений Ratio выбирается то соотношение, которое дает лучшее соответствие показаниям профилемера/каверномера при сравнении с расчетным графиком совмещенных давлений (Рисунок 7). По результатам анализа скважин для Томской области выявлено, что в пределах Томской области можно принять базовое соотношение напряжений:  $Ratio = 1.06$ . В случае отсутствия данных мини-ГРП в пределах Томской области также можно принять базовые значения относительных деформаций:  $Strain_{max} = 225.9 \cdot 10^{-6}$ ;  $Strain_{min} = 66.9 \cdot 10^{-6}$ ;  $Ratio = 1.06$ .

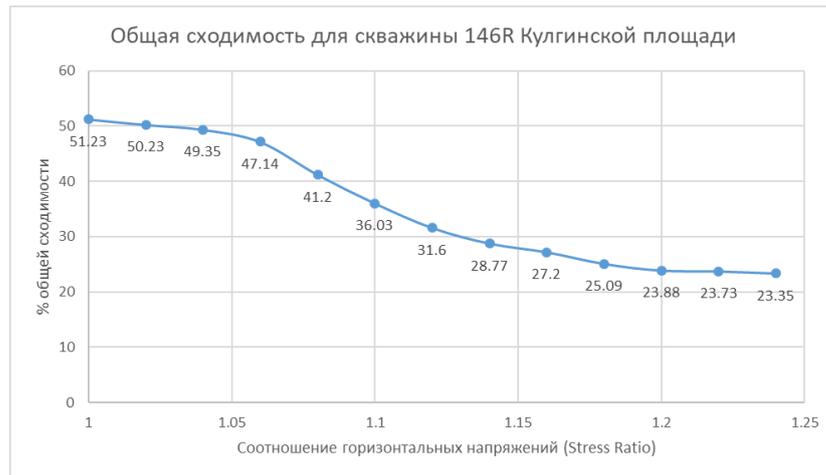


Рисунок 7 – Пример зависимости сходимости (Ratio) от соотношения напряжений для скважины 146R Кулгинской площади. В данном случае лучшая сходимость 51,23% наблюдается для Ratio=1

После определения оптимального Ratio и калибровки горизонтальных напряжений, производится калибровка прочности на одноосное сжатие, для этого:

- 1) по скважинам с наличием данных микросканеров и кавернометрии определяется характерная форма вывалов (треугольная или эллиптическая). Для треугольной аппроксимации оценивается угол  $\gamma$ , для эллиптической аппроксимации оценивается соотношение  $a/b$ ;
- 2) в случае если данные микросканеров отсутствуют, используется эллиптическая аппроксимация со средним значением  $a/b = 2.1$  и граничными значениями при  $a/b = 1.06$  и  $a/b = 4.6$ ;
- 3) по показаниям кавернометрии/профилеметрии определяется глубина вывала;
- 4) по формулам геометрической аппроксимации определяется угол вывала,  $W_{bo}$ ;
- 5) рассчитывается распределение эффективных главных напряжений вокруг стенки скважины в зависимости от угла  $\theta$ ;
- 6) определяется угол  $\theta_{max}$ , под которым действует максимальное значение максимального главного напряжения на стенке скважины;
- 7) определяется угол последней точки вывала,  $\theta_{wbo}$ , для этого к углу  $\theta_{max}$  прибавляется значение  $W_{bo}/2$ ;
- 8) определяются значения эффективных главных напряжений, действующих в точке под углом  $\theta_{wbo}$ ;
- 9) эффективные главные напряжения подставляются в критерий прочности и рассчитывается значение прочности на одноосное сжатие, UCS;
- 10) в интервале, где отсутствуют вывалы в случае превышения плотности бурового раствора над градиентом обрушения значение прочности не изменяется, а в случае превышения градиента обрушения над плотностью бурового раствора рассчитывается минимальное значение прочности на

одноосное сжатие при подстановке в критерий прочности главных напряжений, действующих под углом  $\theta_{\max}$ ;

11) в интервале, где определены каверны, в случае превышения градиента обрушения с углом вывала  $150^\circ$  над плотностью бурового раствора, прочность на одноосное сжатие не изменяется, а в случае превышения плотности бурового раствора над градиентом обрушения с углом вывала  $150^\circ$ , определяется максимальное значение прочности на одноосное сжатие при подстановке в критерий прочности главных напряжений, действующих под углом  $\theta_{\max} + 75^\circ$ .

Для проверки подхода, для Северо-Останинского месторождения была построена трехмерная геомеханическая модель с использованием принципов геостатистики, при этом при построении 3D модели одна скважина (X5) не учитывалась и использовалась как «проверочная» (Рисунок 8).

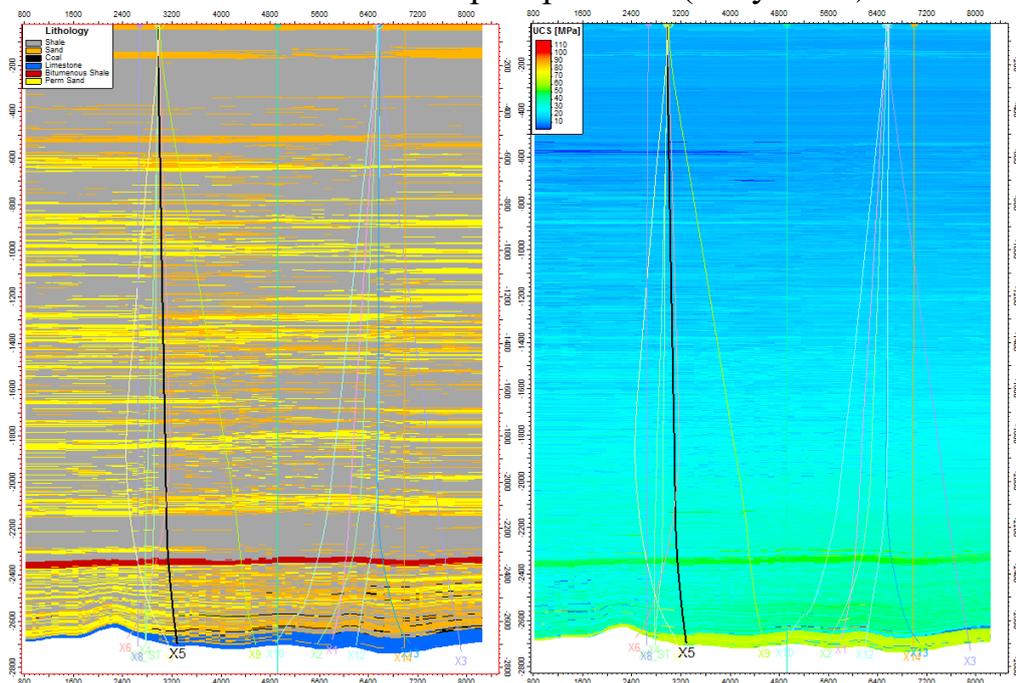


Рисунок 8 – Разрез для 3D геомеханической модели, построенной без учета скважины X5

После того как были распределены все геомеханические параметры, значения из ячеек были присвоены для скважины X5 и для нее был проведен расчет стабильности. После расчета стабильности было произведено сравнение расчетных углов вывала с фактическими показаниями каверномера (Рисунок 9). Соответствие прогноза вывалов по модели фактической записи кавернометрии в 86% интервала позволяет утверждать, что представленная методика может быть применена для построения одномерных геомеханических моделей в целях изучения доюрского комплекса Томской области.

Сделанные в данной главе выводы подтверждают защищаемое положение №2 «построенная трехмерная статическая геомеханическая модель для Северо-Останинского месторождения подтверждает возможность использования геометрической аппроксимации вывалов для проведения автокалибровки

геомеханических моделей на данные кавернометрии в условиях доюрского комплекса Томской области. Сходимость прогнозных интервалов вывалов с фактическими данными по кавернометрии составляет 86% и подтверждает возможность использования предлагаемого подхода».

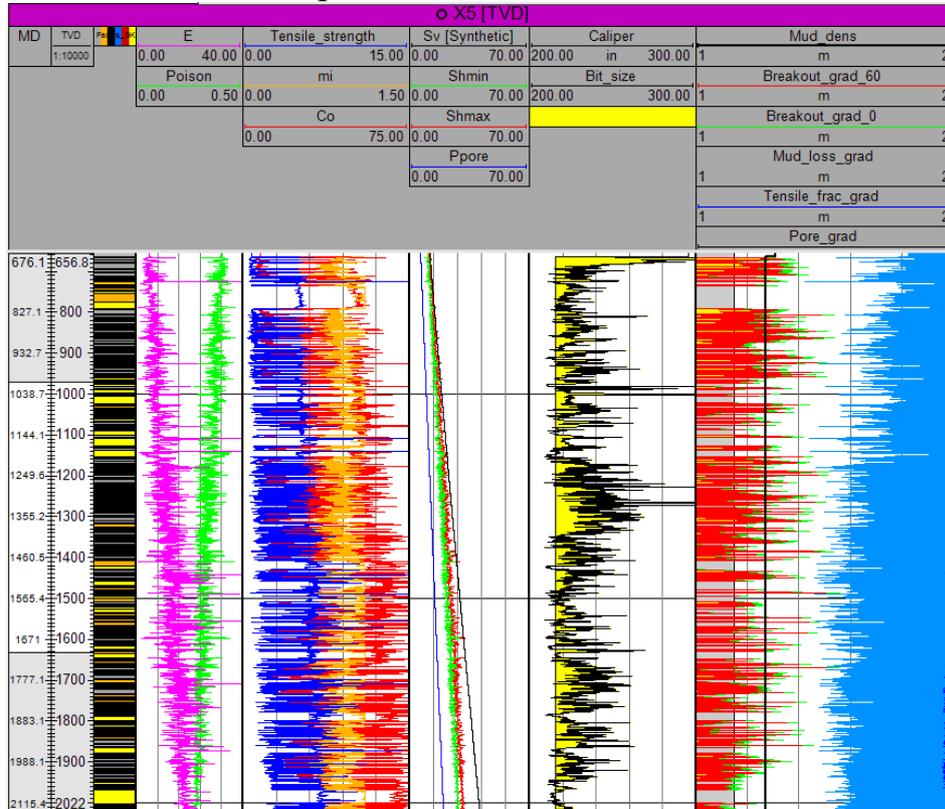


Рисунок 9 – Сравнение расчетного угла вывалов и фактического поведения каверномера для скважины X5 не участвующей в 3D геомеханическом моделировании

**В четвертой главе** описан подход выделения открытых трещин на основе одномерных геомеханических моделей и проведена валидация разработанного подхода путем его использования для месторождений Томской области и сравнения результатов прогноза открытых трещин с данными по испытаниям скважин. Рассматриваемый подход включает определение напряженности трещин (критических трещин) и/или сопоставление информации о поглощениях с прогнозом поглощений по геомеханическому моделированию.

**Выделение критических трещин.** Схема построения моделей и выделения критических трещин показана ниже (Рисунок 10).

Численно вероятность проницаемости трещин можно оценить с помощью коэффициента критичности ( $Crit$ ) по формуле:

$$Crit = \frac{100\% \cdot \tau}{S_0 + \mu_i \sigma_n}, \quad (4)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение в плоскости трещины, МПа;  $S_0$  – сцепление (когезия) трещин целевого пласта, МПа;  $\sigma_n$  – эффективное нормальное

напряжение в плоскости трещины, МПа;  $\mu_i = tg\varphi$  – тангенс угла внутреннего трения горных пород в целевом пласте.



Рисунок 10 – Общая схема методики выделения проницаемых трещин

Для расчета касательных и нормальных напряжений в плоскости трещин используется трансформация тензора напряжений по данным 1D геомеханической модели, используя следующую последовательность вычислений (или соответствующее программное обеспечение):

- 1) напряжения переводятся в географическую систему координат:

$$\overline{\overline{S}}_G = R_{PG}^T \overline{\overline{S}}_P R_{PG}, \quad (5)$$

где  $R_{PG}$  – базовая матрица для трансформации тензора напряжений;  $\overline{\overline{S}}_P$  – тензор главных нормальных напряжений;

- 2) напряжения проецируются на плоскость трещины:

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \overline{\overline{S}}_G \bar{n}_n; \\ \bar{n}_n &= \begin{bmatrix} -\sin(\text{strike}) \sin(\text{dip}) \\ \cos(\text{strike}) \sin(\text{dip}) \\ -\cos(\text{dip}) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\text{strike}$  – азимут простирания трещины,  $\text{dip}$  – угол падения трещины;

- 3) рассчитывается эффективное нормальное напряжение в плоскости трещины:

$$\sigma_n = \bar{t} \bar{n}_n - P_p, \quad (7)$$

где  $P_p$  – поровое давление, Па;

- 4) рассчитывается касательное напряжение в плоскости трещины:

$$\begin{aligned} \tau &= \sqrt{(\bar{t} \bar{n}_d)^2 + (\bar{t} \bar{n}_s)^2}; \\ \bar{n}_d &= \begin{bmatrix} -\sin(\text{strike}) \cos(\text{dip}) \\ \cos(\text{strike}) \cos(\text{dip}) \\ \sin(\text{dip}) \end{bmatrix}; \quad \bar{n}_s = \begin{bmatrix} \cos(\text{strike}) \\ \sin(\text{strike}) \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для проведения такого анализа предварительно необходимо выделить трещины, которые действительно наблюдаются в разрезе скважины. Для этого необходимо сравнить данные микросканеров с данными по керну. Те трещины, которые наблюдаются как по керну, так и по микросканерам, используются для дальнейшего анализа.

Для валидации подхода выделения критических трещин была построена 101 геомеханическая модель по 13 месторождениям Томской области.

Калибровка моделей была проведена 2 способами:

- 1) стандартный ручной подход для 16 скважин. Затраты времени 14 дней, т.е. ~7 часов на 1 скважину;
- 2) автокалибровка для оставшихся 85 скважин. Затраты времени 3 дня (~17 минут на 1 скважину).

Изменение прочности на одноосное сжатие и сходимости с данными кавернометрии для одной скважины показано ниже (Рисунок 11). После калибровки был проведен расчет критических трещин (Рисунок 12). В красном прямоугольнике показаны треки с исходными трещинами, выделенными по данным микросканеров, а в зеленом прямоугольнике показаны треки с критическими трещинами. После выделения критических трещин интервалы, их содержащие, были сравнены с проницаемыми интервалами по промыслово-геофизическим исследованиям (дебитометрия, шумометрия), было показано, что в 73% процентов случаев наблюдается соответствие, т.е. для отложений доюрского комплекса Томской области критические трещины с высокой вероятностью являются проницаемыми.

**Сопоставление информации о поглощениях с прогнозом поглощений по геомеханическому моделированию.** Поглощение бурового раствора может быть вызвано утечками раствора во вновь образованные трещины (авто-ГРП) или в ранее существующие естественные трещины. В условиях отсутствия данных по микросканерам без геомеханического моделирования практически невозможно определить причину поглощений. Поэтому был предложен подход сравнения градиентов поглощений по откалиброванной геомеханической модели с интервалами поглощений бурового раствора по данным из отчетов супервайзера и/или станции ГТИ. В случае отсутствия прогноза поглощения по данным моделирования и наличию поглощения по факту – в зоне поглощений предполагается наличие естественных проницаемых трещин (Рисунок 13, кейс 3).

В условиях доюрского комплекса Томской области данный подход подтверждается. Также следует отметить, что, в отличие от других подходов, в данном случае для диагностики интервалов естественной трещиноватости не требуются специальные исследования ГИС (микросканеры), что существенно повышает возможность использования данного метода.

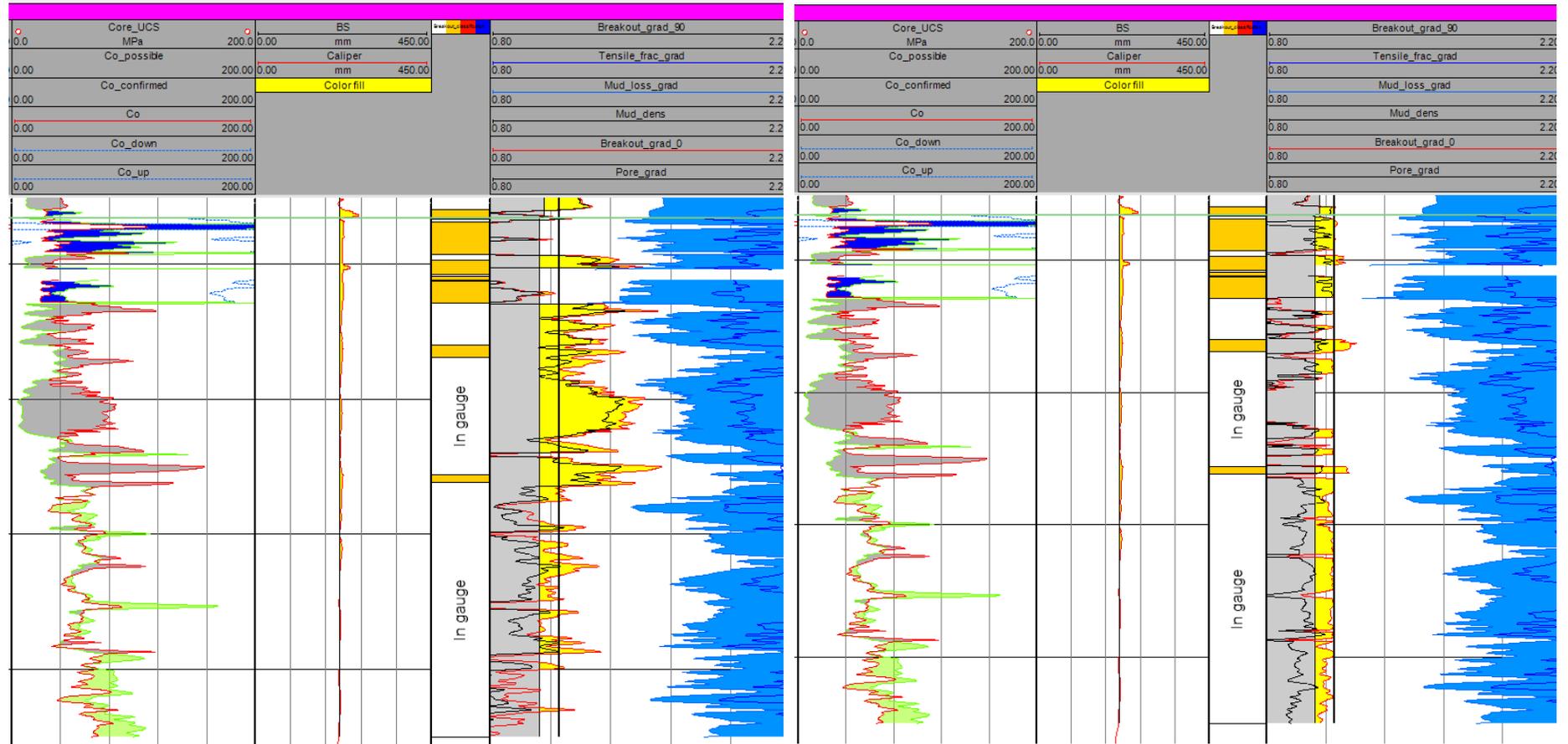


Рисунок 11 – Результаты расчета 1D геомеханической модели по скважине Нижне-Лугинецкая 210R до калибровки UCS (слева) и после калибровки UCS (справа)

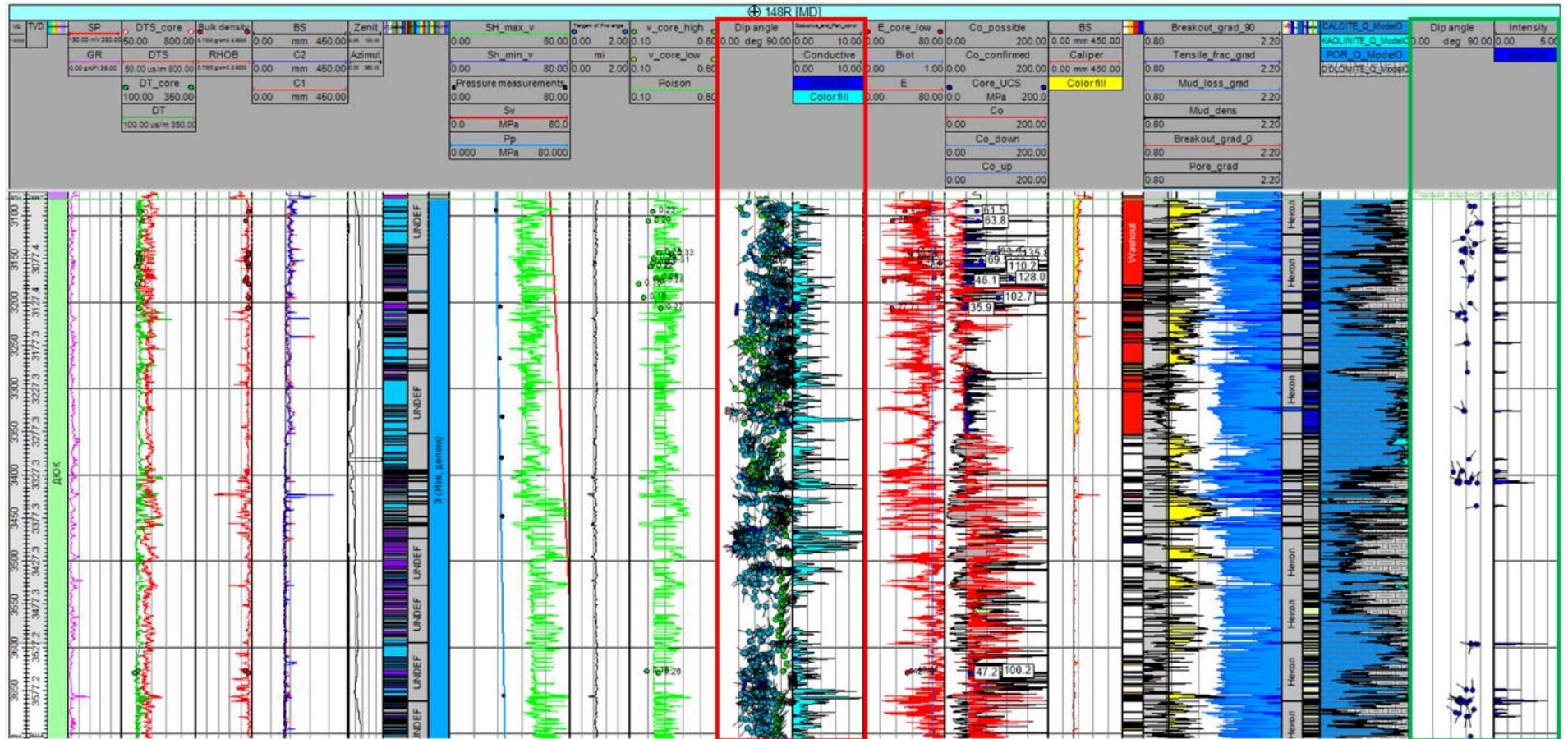


Рисунок 12 – Пример выделения критических трещин по скважине 148R Кулгинской площади:  
 в красном прямоугольнике показаны треки с исходной трещиноватостью, в зеленом прямоугольнике показаны  
 треки с критическими трещинами

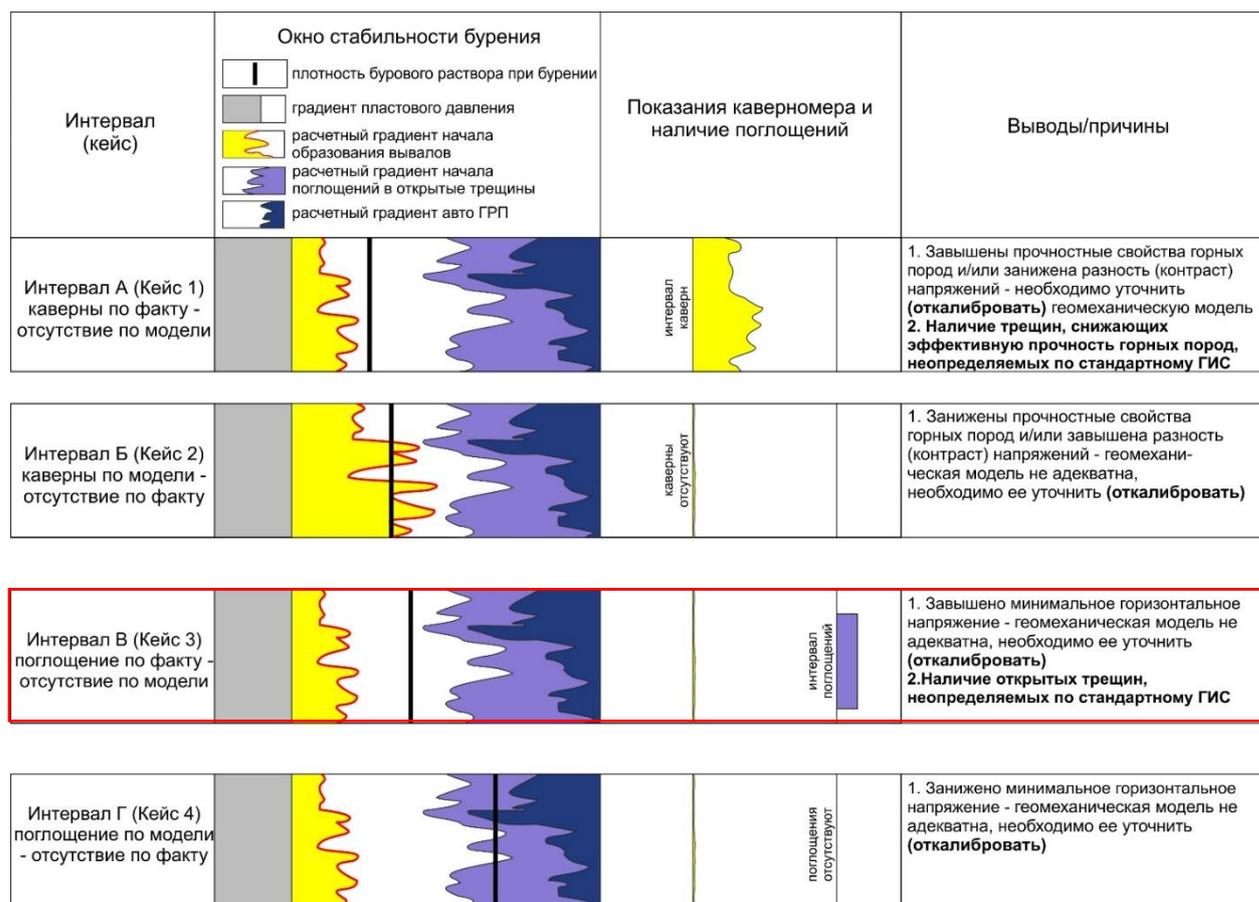


Рисунок 13 – Схематичные примеры сопоставления откалиброванной модели (графика совмещенных давлений) с показаниями кавернометрии и поглощений, интервал В (кейс 3) рассматривается как случай естественной трещиноватости

В результате проведенной работы помимо разработанных подходов выделения трещин в доюрском комплексе Томской области по данным геомеханического моделирования была предложена обобщенная концептуальная модель процессов в скважине при различных соотношениях плотности бурового раствора (Рисунок 14).

Сделанные в данной главе выводы подтверждают защищаемое положение №3 «разработанный подход на основе одномерного геомеханического моделирования позволяет выделять проницаемые трещины в доюрском комплексе Нюрольского структурно-фациального района Томской области путем определения напряженности трещин (критических трещин). Сопоставление информации об интервалах поглощения бурового раствора с данными по геомеханической модели является индикатором трещинного коллектора. Использование процесса автокалибровки позволяет сократить время построения одной модели в среднем в 25 раз».

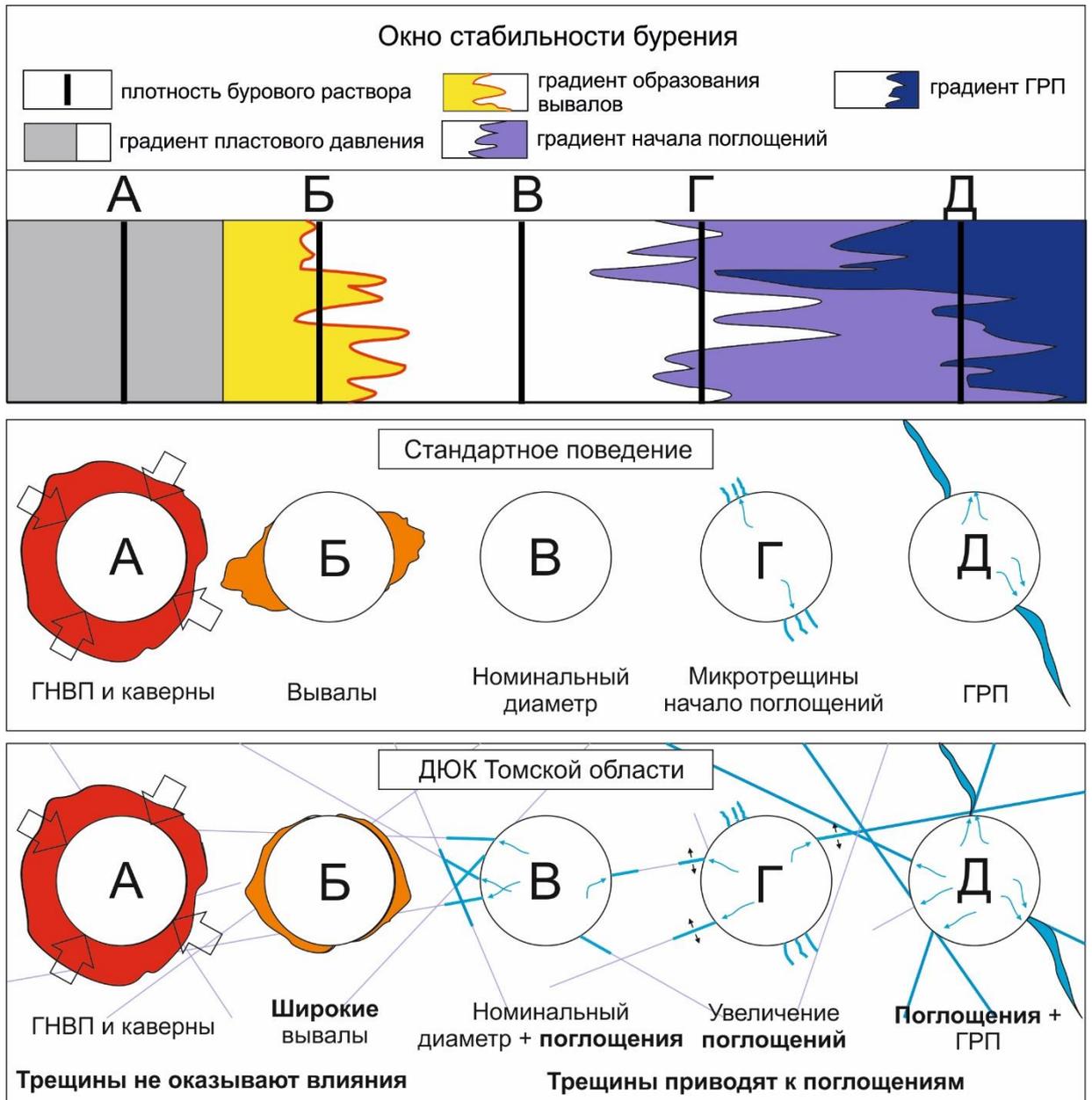


Рисунок 14 – Обобщенная концептуальная модель процессов в скважине при различных соотношениях плотности бурового раствора

### Основные выводы и рекомендации:

Выделение открытых трещин, являющихся каналами для течения флюида, является важной задачей как для поиска и оценки запасов, так и для планирования и анализа разработки месторождений нефти и газа. Существующие подходы построения одномерных геомеханических моделей требуют наличия геомеханических исследований по керну и записи микросканеров, а также значительного времени на проведение калибровки модели, что не позволяет эффективно строить геомеханические модели по существующим скважинам, вскрывшим доюрский комплекс Томской области. Представленная в данной работе методика на основе связи угла вывала

(показания микросканера) в скважине с глубиной вывала (показания каверномера) позволяет:

- 1) восполнить недостаток данных по геомеханическим исследованиям по керну и низкую прогнозную способность прочностных параметров путем уточнения прочности на одноосное сжатие по результатам калибровки модели;
- 2) устранить проблему отсутствия требуемого объема данных микросканеров для уточнения напряжений и геомеханических свойств горных пород;
- 3) снизить время на построение модели путем автоматизации процесса калибровки (использование разработанного программного продукта позволяет сократить срок построения одной модели в среднем с 1 суток до 15 минут);
- 4) выделять проницаемые трещины в доюрском комплексе Томской области путем определения напряженности трещин (критических трещин) и/или сопоставления информации о поглощениях с прогнозом поглощений по геомеханическому моделированию.

#### **Публикации по теме диссертации**

*Публикации в изданиях по списку ВАК:*

1. Determination of horizontal stress orientation in the areas of the Tomsk region / A. E. Antonov, A. S. Shadrin, **D. V. Konoshonkin** [et al.] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal.* – 2021. – Vol. 1, N 7. – P. 16–24. DOI 10.21440/0536-1028-2021-7-16-24
2. Определение геомеханических свойств юрских и доюрских отложений Томской области / А. С. Шадрин, **Д. В. Коношонкин**, А. Е. Антонов [и др.] // *Известия высших учебных заведений.* – 2022. – № 1. – С. 34–44. – DOI 10.21440/0536-1028-2022-1-34-44
3. Реконструкция истории тектонического развития Нюрольской впадины на основе Sandbox-экспериментов / К. А. Малхасян, **Д. В. Коношонкин**, А. С. Шадрин [и др.] // *Известия УГГУ.* – 2022. – № 2 (66). – С. 59–70. – DOI 10.21440/2307-2091-2022-2-59-70

*Публикации, входящие в базу данных Скопус:*

*Статьи:*

1. **Коношонкин Д. В.** Геометрическая аппроксимация вывалов в скважине для проведения калибровки геомеханической модели / Д. В. Коношонкин, В. С. Рукавишников // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2021. – № 12. – С. 58–72. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2021\_12\_0\_58
2. Калибровка одномерных геомеханических моделей с использованием геометрической аппроксимации вывалов / **Д. В. Коношонкин**, В. С. Рукавишников, А. С. Шадрин [и др.] // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2023. – Т. 334, № 7. – С. 102–110. – DOI 10.18799/24131830/2023/7/4071

*Тезисы конференций:*

1. Diakov K. Assessment of the relationship between fracturing and fault tectonics of paleozoic deposits / K. Diakov, **D. Konoshonkin** // Saint Petersburg 2020 – Geosciences: Converting Knowledge into Resources. – 2020. – Vol. 2020, N 1. – P. 1–5. – DOI 10.3997/2214-4609.202053088
2. Fluid filtration analysis of complex fractured system based on geomechanical parameters and diagenetic alterations / I. Uzhegova, A. Garcia, **D. Konoshonkin** [et al.] // 81st EAGE Conference and Exhibition 2019. – 2019. – Vol. 2019, N 1. – P. 1–5. – DOI 10.3997/2214-4609.201901034
3. Methodology of stepwise multi-scale stress inversion for predicting fault tectonics and fracturing: Case study for prejurassic complex of Tomsk region / **D. Konoshonkin**, I. Churochkin, N. Konoshonkina [et al.] // ProGRESS 2019: Exploration as a Business - Oil and Gas International Exploration Conference. – 2019. – Vol. 2019, N 1. – P. 1–5. – DOI 10.3997/2214-4609.201953041
4. Uzhegova I. A. Fault conductivity analysis based on geomechanical parameters of fractured reservoir / I. A. Uzhegova, **D. V. Konoshonkin** // Saint Petersburg 2018, Apr. 9-12, 2018, Saint Petersburg, Russia. – 2018. – Vol. 2018, N 1. – P. 1–5. – DOI 10.3997/2214-4609.201800205
5. Zubova E. Fracture density evaluation with the use of geomechanical analysis / E. Zubova, **D. Konoshonkin** // Saint Petersburg 2018, Apr. 9-12, 2018, Saint Petersburg, Russia. – 2018. – Vol. 2018, N 1. – P. 1–5. – DOI 10.3997/2214-4609.201800123
6. Tashkinov V. The rock strength properties determination of the jurassic formation sandstones by updating empirical relations for mechanical earth model construction / V. Tashkinov, **D. Konoshonkin** // Saint Petersburg 2018, Apr. 9-12, 2018, Saint Petersburg, Russia. – 2018. – Vol. 2018, N 1. – P. 1-6. – DOI 10.3997/2214-4609.201800162
7. Salimov M. The ratios of the main stresses in the Wellbore in carbonate rocks / M. Salimov, **D. Konoshonkin** // Saint Petersburg 2018, Apr. 9-12, 2018, Saint Petersburg, Russia. – 2018. – Vol. 2018, N 1. – P. 1–5. – DOI 10.3997/2214-4609.201800124

*Патенты и свидетельства:*

1. Патент N 2797376 Российская Федерация, МПК E21B 49/00 (2006.01). Способ определения трещинного коллектора и способ добычи углеводородов : N 202113878 : заявл. 24.12.2021 : опубл. 05.06.2023 / **Коношонкин Д. В.**, Петрова Д. С., Чурочкин И. И., Коровин М. О., Левочкин Е. Г., Рукавишников В. С., Грабовская Ф. Р., Верещагин П. С. – 33 с.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ N 2021680321. Программа для проведения автокалибровки одномерной геомеханической модели на данные мини-ГРП и кавернометрии : N 2021669549 : заявл. 01.12.2021 : опубл. 09.12.2021 / **Коношонкин Д. В.**, Грабовская, Ф. Р.