

РУБРИКА: РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Реконструкция напряженного состояния по данным о раскрытости естественных трещин в породах околоскважинной зоны

Н. В. Дубиня (ИФЗ РАН), Э. Р. Зиганшин (К(П)ФУ), Е. В. Новикова (ИФЗ РАН), С. И. Гильфанов (К(П)ФУ), И. А. Воронов (ИФЗ РАН), К. Н. Завальников (ИФЗ РАН)

В работе представлены результаты использования информации о флюидопроницаемости и геометрических параметрах трещин пород околоскважинной зоны для реконструкции параметров их напряженного состояния. Показано, что направления действия и значения горизонтальных пластовых напряжений могут быть успешно восстановлены с использованием концепции критически напряженных трещин. Рассмотрен вопрос использования информации об оценке раскрытости проводящих трещин для повышения достоверности результатов реконструкции. В качестве объекта исследования выбрана скважина, разрабатывающая одно из нефтяных месторождений Республики Татарстан.

Ключевые слова: критически напряженные трещины, реконструкция пластовых напряжений.

Reconstruction of in-situ stress state from data on widths of natural fractures in well surrounding rock masses

N. V. Dubinya (IPE RAS), E. R. Ziganshin (K(P)FU), E. V. Novikova (IPE RAS), S. I. Gilfanov (K(P)FU), I. A. Voronov (IPE RAS), K. N. Zavalnikov (IPE RAS)

The paper presents the results of using information on fluid conductivity and the geometric parameters of fractures in the well surrounding rock masses to reconstruct their stress state parameters. It is demonstrated that the directions and magnitudes of horizontal in-situ stresses can be successfully reconstructed using the concept of critically stressed fractures. The use of information on the aperture of conductive fractures to improve the reliability of reconstruction results is discussed. A single well developing a hydrocarbon field in the Republic of Tatarstan was chosen as the study object.

Keywords: critically stressed fractures, in-situ stress inversion.

Введение

Реконструкция напряженного состояния массивов горных пород по разномасштабным геофизическим данным — лабораторным исследованиям керна, геофизическим исследованиям скважин, сейсмическим исследованиям — является важным этапом подготовки геомеханической модели месторождений нефти и газа, необходимой для успешного решения таких задач, как расчет устойчивости ствола скважины, прогноз геометрии трещины гидроразрыва пласта, определение условий и темпов пескопроявления в ходе разработки, оценка изменения фильтрационно-емкостных свойств пород в ходе разработки, предотвращение проседания земной поверхности и другие [1]. Существуют различные способы использования геофизической информации для оценки пластовых напряжений, среди которых наиболее распространены оценка напряжений на основании анализа вывалообразования и образования трещин растяжения в результате бурения скважин [2, 3]. Однако в условиях эффективного бурения, не допускающего образования вывалов и трещин растяжения, требуется привлечение дополнительных подходов.

Одним из таких подходов является реконструкция напряженного состояния по данным о флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин в породах околоскважинного пространства [4–7]. В его основе лежит концепция критически напряженных трещин, согласно которой соотношение между нормальным и касательным напряжениями, действующими на плоскости трещины, определяет ее флюидопроводимость в текущем состоянии [8]. В рамках этого метода ставится и решается обратная задача выбора такого набора параметров, определяющих напряженное состояние пород околоскважинной зоны, при которых наблюдается наилучшее соответствие между критически напряженными трещинами (то есть трещинами, на которых отношение касательного напряжения к нормальному превышает коэффициент сухого трения) и флюидопроводящими трещинами. Флюидопроводимость трещин определяется на основании анализа расширенного комплекса геофизических исследований скважин.

В работе [6] рассматривались различные постановки обратной задачи. Были рассмотрены различные формулировки целевой функции — функции, математически определяющей степень соответствия критически напряженных и флюидопроводящих трещин. Был сделан вывод о том, что наилучшие результаты по восстановлению параметров напряженного состояния могут быть получены, если данные геофизических исследований скважин позволяют ответить не только на вопрос, является ли конкретная трещина флюидопроводящей, но и на количественном уровне сравнить флюидопроводимости различных трещин между собой.

Было отмечено, что получение такой информации представляет определенные сложности.

В рамках данного исследования предпринята попытка использовать информацию о раскрытости естественных трещин в породах околоскважинной зоны, полученную в ходе интерпретации результатов электрического микросканирования. Проводится сравнение результатов реконструкции напряжений на основании бинарного критерия флюидопроводимости и анализа раскрытости.

Метод

Электрическое микросканирование в скважине выполнялось прибором «КАРСАР МС-130» (производства ООО «Карсар») с целью определения ориентировки и проводимости трещин по данным высокоразрешающего изображения стенки скважины. Принцип метода основан на измерении локального сопротивления пород через систему прижимных микродатчиков (электродов), расположенных на подпружиненных башмаках, обеспечивающих плотный контакт со стенкой скважины. Каждый электрод регистрирует величину тока при заданном напряжении, что позволяет вычислить локальное значение удельного электрического сопротивления (УЭС). Совокупность измерений формирует двумерную развертку стенки скважины. Данные были обработаны с использованием программного обеспечения «Оптимус», разработанного компанией ООО «Карсар». Для исключения искажений, связанных с неравномерным движением прибора, применялась коррекция по данным z-акселерометра с учетом фактической скорости перемещения в стволе скважины. Азимутальные данные приводились к направлению истинного севера путем ввода магнитной поправки с использованием параметров геомагнитного поля на дату исследований. Учитывался эксцентриситет прибора относительно оси скважины, выполнялась коррекция сигналов отдельных электродов при их неполном прижатии или загрязнении, после чего производилась эквализация сопротивлений по электродам, сцепление и ориентация башмаков в единую плоскость. Для повышения контрастности применялись логарифмическое масштабирование и гистограммное выравнивание в скользящем окне по глубине. В интерпретации использовались статический и динамический имиджи. Статический имидж отражал крупномасштабные изменения электрических свойств разреза, тогда как динамический, формируемый в пределах скользящего окна (обычно 1 м), позволял детально выявлять локальные проводящие и непроводящие элементы. Изменения удельного электрического сопротивления отображались цветовой шкалой: высокоомные участки фиксировались светлыми оттенками, низкоомные — темными. Дополнительно применялись фильтрация и алгоритмы восстановления изображения для компенсации

систематических пропусков и повышения читаемости структурных элементов. Результаты представлялись в виде векторов падения и анализировались статистически с использованием стереографических проекций. Классификация трещин проводилась по их электрической проводимости и характеру проявления на имидже. Проводящие трещины интерпретировались как непрерывные темные синусоиды, пересекающие напластование; они соответствуют либо открытым трещинам, заполненным буровым раствором, либо трещинам, содержащим проводящий минерализованный материал. Залеченные трещины проявлялись как светлые (высокоомные) синусоиды и интерпретировались как заполненные непроводящими минералами (кальцит, кварц и др.), что указывает на их низкую проницаемость. Контроль качества навигационных данных осуществлялся по показаниям акселерометра и магнитометра; после коррекции систематические отклонения снижались до допустимых значений, что обеспечивало достоверность расчета элементов залегания. Качество данных сопротивления оценивалось как удовлетворительное; возможные ухудшения изображения связывались с размывами стенки и неполным прижатием башмаков. Таким образом, методика электрического микросканирования обеспечивала количественное определение ориентировки трещин (азимут и угол падения) и их электрической проводимости, что позволило выполнить структурный анализ разреза, оценить характер и интенсивность трещиноватости, а также использовать полученные данные для интерпретации напряженного состояния массива и прогноза фильтрационно-емкостных свойств пород.

Метод реконструкции пластовых напряжений по данным о естественной трещиноватости основан на концепции критически напряженных трещин, согласно которой естественные трещины сдвига в породах околоскважинной зоны являются флюидопроводящими в том случае, когда выполняется критерий сухого трения [8]:

$$\tau_n \geq \mu \sigma_n, \quad (1)$$

где σ_n — нормальное напряжение, действующее на плоскости трещины, τ_n — касательное напряжение, действующее на ее плоскости, μ — коэффициент трения среды. Нормальное и касательное напряжения на трещине определяются, если известна ее пространственная ориентация и напряженное состояние:

$$\sigma_n = \sigma_{ij} n_j, \quad (2)$$

$$\tau_n = \sqrt{\sigma_{ij}n_i\sigma_{ik}n_k - (\sigma_{ij}n_jn_i)^2}. \quad (3)$$

Здесь σ_{ij} — компоненты тензора эффективных напряжений, n_1, n_2, n_3 — направляющие косинусы, которые могут быть выражены через азимут α и угол падения δ :

$$n_1 = \cos \delta, \quad n_2 = \sin \alpha \sin \delta, \quad n_3 = -\cos \alpha \sin \delta \quad (4)$$

в системе координат, первая ось которой направлена вертикально вниз, вторая направлена на север, третья — на восток.

В работе [9] тензор напряжений было предложено параметризовать через пять независимых параметров: отношение максимального главного напряжения к минимальному N_σ , коэффициент Лоде — Надаи φ_σ и три угла Эйлера $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. Компоненты тензора напряжений σ_{ij} выражаются через них следующим образом:

$$\sigma_{ij} = \sigma_k n_{ki} n_{kj}, \quad (5)$$

где σ_k ($k = 1, 2, 3$) — главные напряжения; тензор коэффициентов n_{ki} определяется как:

$$\begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_3 - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 & & \\ \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_1 \sin \theta_3 & & \\ & \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \\ -\sin \theta_1 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \\ \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_1 \sin \theta_3 & -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & \\ \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Значения главных напряжений определяются через безразмерные параметры как:

$$\sigma_1 = N_\sigma \sigma_3, \quad \sigma_2 = \sigma_3(1 + \varphi_\sigma(N - 1)), \quad (7)$$

где σ_1 — максимальное главное напряжение, σ_2 — промежуточное главное напряжение, σ_3 — минимальное главное напряжение. Сжимающие напряжения считаются положительными.

В работе [6] была сформулирована задача оптимизации — поиска таких значений параметров напряженного состояния $N_\sigma, \varphi_\sigma, \theta_1, \theta_2, \theta_3$, а также

коэффициента трения μ , при которых наблюдается наилучшее соответствие критически напряженных трещин флюидопроводящим, — с использованием специальных индикаторов, вводящихся следующим образом.

Для каждой j -й трещины известной пространственной ориентации с известными значениями нормального и касательного напряжений вводятся так называемые «индексы критичности»:

$$m_j(\sigma) = \frac{|\tau_n|}{\sigma_n}, \quad k_j(\sigma) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tau_n \geq \mu\sigma_n \\ 0, & \text{если } \tau_n < \mu\sigma_n. \end{cases} \quad (8)$$

Дополнительно по данным геофизических исследований определяется степень флюидопроводимости каждой j -й трещины:

$$p_j = y(z_j)/y_{mean}(z_j), \quad t_j = \begin{cases} 1, & \text{если } |y(z_j) - y_{mean}(z_j)| > y_{noise} \\ 0, & \text{если } |y(z_j) - y_{mean}(z_j)| \leq y_{noise}. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь $y(z)$ — профиль геофизического индикатора флюидопроводимости (например, температуры) трещины y вдоль траектории скважины как функция от координаты вдоль скважины z (глубины, если скважина вертикальная); z_j — координата j -й трещины; $y_{mean}(z_j)$ — значение индикатора y в окрестности j -й трещины, осредненное в определенном скользящем окне; y_{noise} — характерная для индикатора y величина шума. В рамках данного исследования для определения компонент вектора P рассматривается раскрытость трещин, определенная на основании детального анализа результатов электрического микросканирования.

Данные индикаторы используются для решения задачи поиска оптимального соответствия между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами. Для этого вводятся N -мерные векторы (N — общее количество трещин):

$$\begin{aligned} T &= \begin{pmatrix} t_1 - t_a \\ \dots \\ t_N - t_a \end{pmatrix}, & P &= \begin{pmatrix} p_1 - p_a \\ \dots \\ p_N - p_a \end{pmatrix}, \\ M(\sigma) &= \begin{pmatrix} m_1(\sigma) - m_a(\sigma) \\ \dots \\ m_N(\sigma) - m_a(\sigma) \end{pmatrix}, & K(\sigma) &= \begin{pmatrix} k_1(\sigma) - k_a(\sigma) \\ \dots \\ k_N(\sigma) - k_a(\sigma) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

где t_a , p_a , m_a и k_a — осредненные индексы для всего множества трещин; σ — совокупность параметров, определяющих напряженное состояние и коэффициент трения.

Целевая функция, используемая в задаче оптимизации, вводилась различными способами в работе [6]. В рамках данного исследования представляют интерес: попарное сравнение индексов критичности $m_j(\sigma)$ и p_j (функция $R_4(\sigma)$ в терминологии [6], а также индексов $k_j(\sigma)$ и t_j (функция $R_2(\sigma)$):

$$R_4(\sigma) = \frac{(P, M(\sigma))}{|P| \cdot |M(\sigma)|} = \frac{\sum_{j=1}^N p_j \cdot m_j(\sigma)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N p_j^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^N m_j^2(\sigma)}}, \quad (11)$$

$$R_2(\sigma) = \frac{(T, K(\sigma))}{|T| \cdot |K(\sigma)|} = \frac{\sum_{j=1}^N t_j \cdot k_j(\sigma)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N t_j^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^N k_j^2(\sigma)}}. \quad (12)$$

Задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом: из допустимого интервала значений параметров напряженного состояния и коэффициента трения выполняется поиск такой комбинации, при которой достигается максимум функции соответствия (11) или (12):

$$R_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \varphi_\sigma, N_\sigma, \varphi_{fr}) \xrightarrow{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \varphi_\sigma, N_\sigma, \varphi_{fr}} \max, \quad (13)$$

где $i = 2$ в случае использования функции (12) и 4 в случае (11).

Область допустимых значений параметров напряженного состояния, по которой выполняется поиск максимума функции соответствия, была определена в работе [9] следующим образом:

$$N_\sigma \in \left[1; \frac{\sigma_V(1 + \sin \varphi_{fr}) + 2[(1 - \varphi_\sigma)n_{21}^2(\theta_1, \theta_2, \theta_3) + n_{31}^2(\theta_1, \theta_2, \theta_3)]C \cos \varphi_{fr}}{\sigma_V(1 - \sin \varphi_{fr}) - 2[n_{11}^2(\theta_1, \theta_2, \theta_3) + \varphi_\sigma n_{21}^2(\theta_1, \theta_2, \theta_3)]C \cos \varphi_{fr}} \right], \quad (14)$$

где σ_V — вертикальное напряжение, φ_{fr} — угол внутреннего трения ($\mu = \tan \varphi_{fr}$), C — когезия среды.

Решение задачи оптимизации (13) позволяет определить направления действия и относительные значения главных напряжений, а также коэффициент трения среды по данным о флюидопроводимости — или в данном случае открытости — естественных трещин сдвига в породах околоскважинной зоны.

Исходные данные

Объектом исследования является нефтяное месторождение, расположенное на территории России, в пределах Республики Татарстан. В тектоническом отношении изучаемая площадь приурочена к зоне сочленения западного склона Южно-Татарского свода и восточного борта Мелекесской впадины, что определяет сложное строение осадочного чехла и развитие карбонатных коллекторов различной степени трещиноватости и пористости. В качестве исходных данных использованы результаты электрического микросканирования стенок скважины. Исследованный интервал составляет около 100 м по разрезу — от 910 до 1010 м. В указанных глубинах вскрыты известняки верейских и башкирско-серпуховских отложений среднего карбона, характеризующиеся установленной нефтенасыщенностью. Литологическое описание разреза изображено на рисунке 1. Нефтеносность в пределах верейского горизонта связана с шестью карбонатными пластами. Покрышкой для верейских залежей служат глинистые известняки и доломиты, залегающие в кровельной части яруса, а также карбонатные породы каширского яруса. Средняя эффективная нефтенасыщенная толщина продуктивных пластов верейского горизонта составляет 6,2 м. Залежи в пределах башкирского яруса приурочены к карбонатным отложениям. Продуктивная толща выделяется в объеме башкирского яруса и кровельной части нефтенасыщенных известняков серпуховского яруса и представлена чередованием пористых и плотных прослоев известняков. Покрышкой для башкирской залежи служат плотные непроницаемые доломиты и известняки, залегающие в кровельной части яруса. Средняя эффективная нефтенасыщенная толщина в данном интервале составляет 12,3 м. Таким образом, исследуемый разрез представлен карбонатными коллекторами среднего карбона с различной степенью пористости и неоднородности, что делает его показательным объектом для анализа трещиноватости и структурных особенностей по данным электрического микросканирования.

Стратиграфия	Литология	Литологическое описание
Каширский горизонт		В отложениях каширского горизонта, сформировавшихся в условиях мелководного морского бассейна лагунного типа и аридизации климата, преобладают седиментационно-диагенетические доломиты. Известняки находятся в подчиненном положении, образуя маломощные прослойки, обогащенные органическими остатками.
Верейский горизонт		В нижней части разреза верейского горизонта преобладают карбонатные породы, в верхней – преимущественно терригенные. По характеру нефтенасыщенности все породы верейского горизонта можно подразделить на две группы: породы-коллекторы и породы-флюидоупоры. К первым относятся разуплотненные известняки, ко вторым – плотные разновидности известняков и аргиллиты. Известняки, не претерпевшие процессов выщелачивания, являются относительно плотными породами. В керне они характеризуются светло-, темно-серой окраской, нефтенасыщенность либо отсутствует, либо слабая, пятнистая.
Башкирский ярус		Породы башкирского яруса представлены мелководно-морским карбонатным комплексом, в котором переслаиваются различные типы известняков. Породы в основном плотные, светло-серой окраски, с массивной текстурой.



-  аргиллит
-  доломит
-  глинистый песчаник
-  известняк

Рисунок 1. Литологическое описание разреза на изучаемом объекте

По результатам анализа электрического микросканирования на рассматриваемом интервале глубин были выявлены 70 трещин, для которых были определены пространственные ориентации и флюидопроводимость. Для проводящих трещин на основании ширины контрастной зоны электрических свойств были определены значения раскрытости. На рисунке 2 показана стереограмма наблюдаемых трещин: фиолетовым цветом показаны полюса трещин, определенных как проводящие, голубым — полюса к закрытым трещинам.

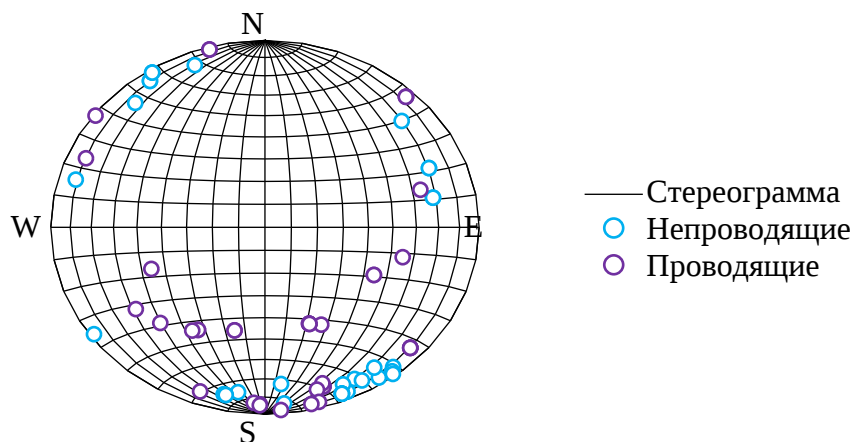


Рисунок 2. Исходные данные для реконструкции напряжений

Эта информация о естественной трещиноватости была использована для определения степени флюидопродвижимости каждой трещины по выражению (9) для последующего решения задачи оптимизации (13) при условии (14). Обратная задача была решена методом Монте-Карло.

Результаты

Указанная обратная задача отдельно решалась для функции соответствия R_2 , определенной выражением (12), и для функции R_4 , определенной выражением (11). Функция R_2 построена исключительно на информации о проводимости или непроводимости каждой трещины. При использовании функции R_4 подразумевается, что раскрытость трещины связана с соотношением между напряжениями, действующими на ее плоскости: чем выше отношение τ_n/σ_n , тем шире область контрастных значений сопротивления среды на микросканере.

На рисунках 3–4 продемонстрированы результаты решения обратной задачи. Моделирование методом Монте-Карло дало возможность определить не только оптимальную комбинацию параметров напряженного состояния, но и множество комбинаций, допускающих высокую степень соответствия, то есть такое соотношение между критически напряженными и флюидопродвижными трещинами, при котором функция соответствия выше наперед заданного порогового значения R_{crit} . Вопрос корректного определения этого порогового значения рассматривался в работе [10]: для повышения качества и достоверности решения обратной задачи этот параметр должен быть достаточно велик для того, чтобы параметры напряженного состояния, удовлетворяющие

условию превышения функцией соответствия порогового значения, могли описываться статистическими законами.

На рисунке 3 продемонстрированы направления действия главных напряжений на стереограммах: красными точками показаны направления действия максимального главного напряжения для наилучших реализаций; желтыми точками — направления действия промежуточного главного напряжения; зелеными — минимального главного напряжения. На рисунке 3а представлены результаты решения задачи с оптимизацией функции R_2 , основанной на бинарных индикаторах, на рисунке 3б — результаты решения задачи с целевой функцией R_4 . На каждом рисунке указано найденное пороговое значение функции соответствия.

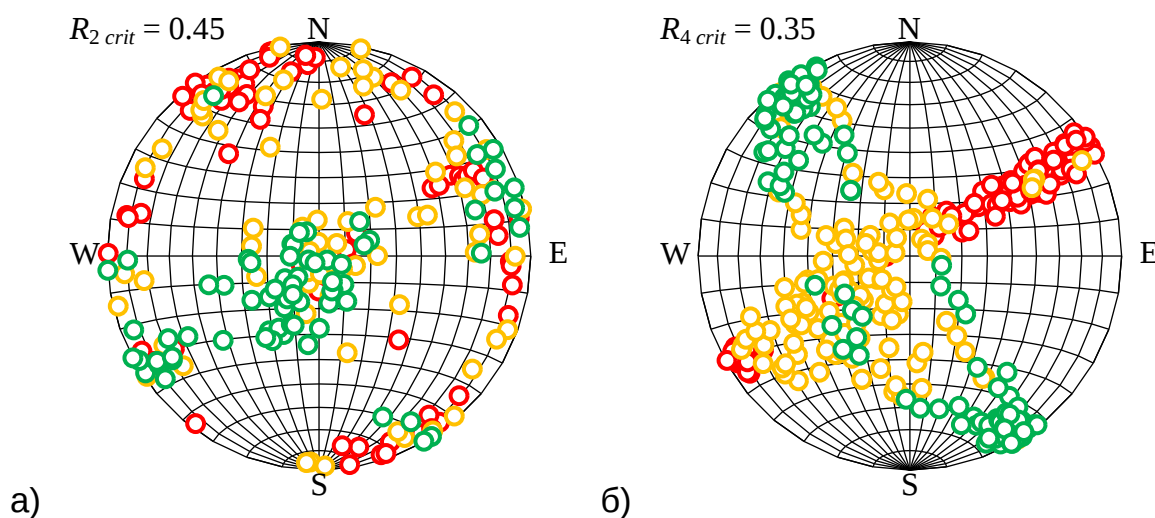


Рисунок 3. Результаты решения обратной задачи по определению направлений действия главных напряжений

Из рисунка 3 можно заметить, что реконструкция с использованием функции соответствия R_2 , основанной на бинарных индикаторах, является значительно менее устойчивой: практически не выделяется какое-либо преимущественное направление хотя бы одного из главных напряжений. С другой стороны, использование гладкой функции соответствия R_4 позволяет явно выделить преимущественный азимут максимального главного напряжения СВ — ЮЗ и ортогонального ему минимального главного напряжения. Если на рисунке 3а практически невозможно определить преобладающий режим напряжений, то на рисунке 3б явно виден преимущественный сдвиговый режим, что согласуется с другими работами, ранее проводившимися в регионе на данных других скважин [9].

Еще более наглядно преимущество функции соответствия R_4 над функцией R_2 заметно на рисунке 4, на котором представлены оценки значений максимального и минимального горизонтальных напряжений. Представлены частотные гистограммы по реализациям, допускающим значение функции соответствия, превышающее пороговое. Как и в случае рисунка 3, отдельно рассмотрены обе функции соответствия: результаты с использованием R_2 показаны на рисунках 4а (максимальное горизонтальное напряжение) и 4б (минимальное горизонтальное напряжение); соответственно на рисунках 4в и 4г показаны результаты реконструкции с использованием R_4 . Пунктирными линиями показаны теоретически построенные функции плотности распределения, относящиеся к семейству распределений Пирсона, полученные с использованием математического аппарата, предложенного в работе [10].

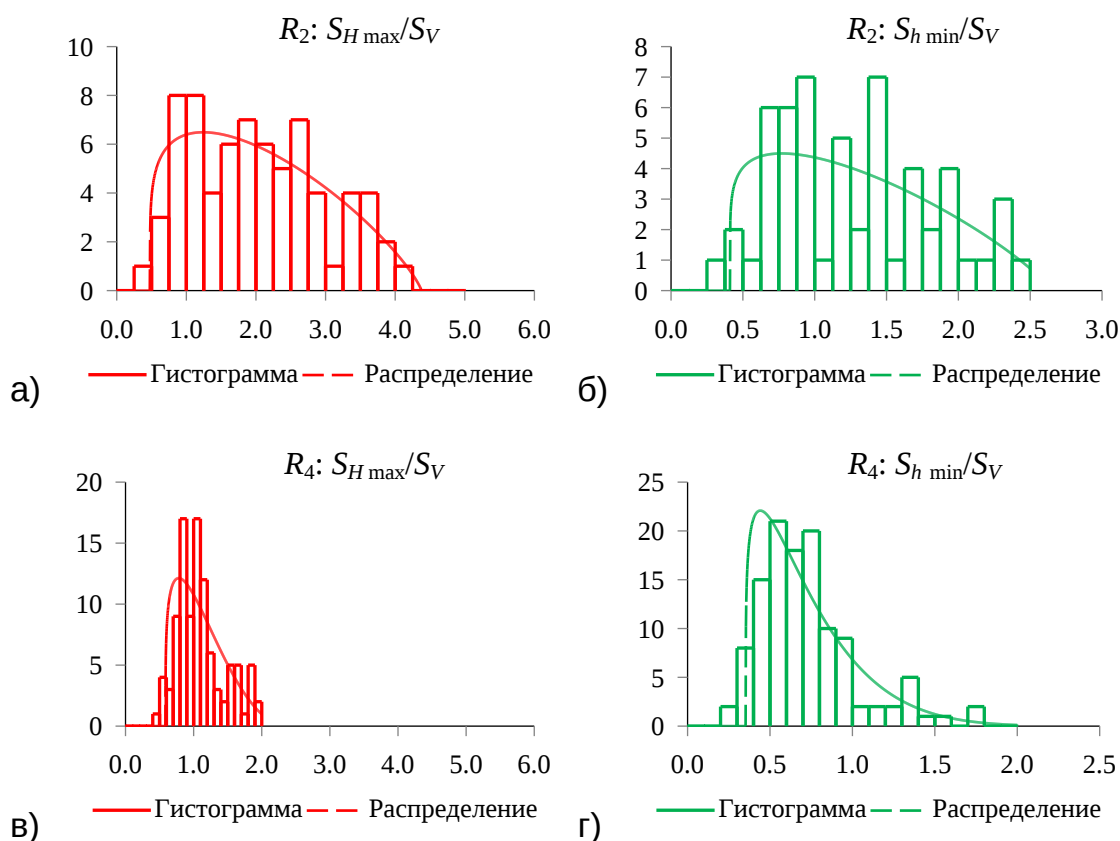


Рисунок 4. Результаты решения обратной задачи по определению величин горизонтальных напряжений

Можно заметить, что характерный разброс значений как максимального, так и минимального горизонтального напряжения, полученный в ходе второй реконструкции, в несколько раз ниже разброса, полученного в результате реконструкции по бинарному индикатору

флюидопроводимости. Результаты реконструкции с использованием R_2 практически не дают возможности говорить о преимущественном режиме напряжений, тогда как результаты, показанные на рисунках 4в и 4г, свидетельствуют о выраженном переходном режиме между сбросовым и сдвиговым.

Выводы

Использование информации о флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин в породах околоскважинной зоны для реконструкции пластовых напряжений и коэффициента трения позволяет существенно повысить достоверность результатов геомеханического моделирования в задачах повышения эффективности и безопасности освоения и разработки месторождений углеводородов.

В большинстве случаев геофизическая информация о естественной трещиноватости ограничивается (если присутствует) анализом проводимости или непроводимости отдельных трещин. Привлечение дополнительной информации, в частности раскрытости трещин, определяемой в ходе детального анализа результатов электрического микросканирования, позволяет дополнительно понизить неоднозначность определения пластовых напряжений. Как показывают полученные результаты, вовлечение информации о раскрытости позволяеткратно снизить дисперсию оценок как направлений, так и значений главных пластовых напряжений с последующим повышением качества результатов моделирования.

Список литературы

1. Zoback M. D. Reservoir Geomechanics / Zoback M. D. — Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
2. Ljunggren C. An overview of rock stress measurement methods / Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. — 2003. — Vol. 40. — № 7–8. — Pp. 975–989. — <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.003>.
3. Дубиня Н. В. Обзор скважинных методов изучения напряженного состояния верхних слоев земной коры / Дубиня Н. В. // Физика Земли. — 2019. — № 2. — С.137–155. — <https://doi.org/10.31857/S0002-333720192137-155>.
4. Ito T. Estimation of Stress Profile with Depth from Analysis of Temperature and Fracture Orientation Logs in a 3.6 km Deep Well at Soultz, France / Ito T., Fujii R., Evans K. F., Hayashi K. // SPE/ISRM Rock Mechanics 2002 (SPE/ISRM): Conference Proceedings. — <https://doi.org/10.2118/78185-MS>.
5. Дубиня Н. В. Уточнение профилей горизонтальных напряжений в окрестности скважин по геометрическим характеристикам трещин в породах околоскважинного пространства / Дубиня Н. В., Ежов К. А. // Геофизические исследования. — 2017. — Т. 18. — № 2. — С. 5–26. — <https://doi.org/10.21455/gr2017.2-1>.
6. Дубиня Н. В. О методе решения обратной задачи восстановления напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным о естественной трещиноватости / Дубиня Н. В., Тихоцкий С. А. // Физика Земли. — 2022. — № 4. — С. 113–134. — <https://doi.org/10.31857/S0002333722040020>.
7. Zhang S. Determination of the crustal friction and state of stress in deep boreholes using hydrologic indicators / Zhang S., Ma X., Zoback M. // Rock Mechanics Bulletin. — 2023. — Vol. 2. — № 1. — P. 100024. — <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2022.100024>.
8. Barton C. A. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rocks / Barton C. A., Zoback M. D., Moos D. // Geology. — 1995. — Vol. 23. — № 8. — Pp. 683–686. — [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0683:FFAPAF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0683:FFAPAF>2.3.CO;2).
9. Зиганшин Э. Р. Оценка современного напряженно-деформированного состояния массива карбонатных горных пород на нефтяном месторождении / Зиганшин Э. Р., Дубиня Н. В., Новикова Е. В., Воронов

И. А. // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — P. ES5006. — <https://doi.org/10.2205/2024es000955>.

10. Дубиня Н. В. Статистический анализ результатов реконструкции напряженного состояния по данным о проводимости естественных трещин / Дубиня Н. В., Зиганшин Э. Р., Новикова Е. В. // Процессы в геосредах. — 2024. — Т. 41. — № 3. — С. 2636–2648.

References

1. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics / Zoback M.D. — Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
2. Ljunggren C. An overview of rock stress measurement methods / Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. — 2003. — Vol. 40. — № 7–8. — Pp. 975–989. — <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.003>.
3. Dubinya N. V. An Overview of Wellbore Methods of Investigating Stress State of the Upper Layers of the Earth's Crust / Dubinya N. V. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2019. — Vol. 55. — № 2. — Pp. 311–326. — <https://doi.org/10.1134/S1069351319020034>.
4. Ito T. Estimation of Stress Profile with Depth from Analysis of Temperature and Fracture Orientation Logs in a 3.6 km Deep Well at Soultz, France / Ito T., Fujii R., Evans K. F., Hayashi K. // SPE/ISRM Rock Mechanics 2002 (SPE/ISRM): Conference Proceedings. — <https://doi.org/10.2118/78185-MS>.
5. Dubinya N. V. In-situ horizontal stress estimation based on the geometrical properties of fractures in well vicinity / Dubinya N. V., Ezhov K. A. // Geophysical Research. — 2017. — Vol. 18. — № 2. — Pp. 5–26. — <https://doi.org/10.21455/gr2017.2-1>.
6. Dubinya N. V. Method for the Inverse Problem Solution for Reconstruction of Stress Strain State of Rock Mass Based on Natural Fractures Data / Dubinya N. V., Tikhotskiy S. A. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2022. — Vol. 58. — № 4. — Pp. 544–561. — <https://doi.org/10.1134/S1069351322040024>.
7. Zhang S. Determination of the crustal friction and state of stress in deep boreholes using hydrologic indicators / Zhang S., Ma X., Zoback M. // Rock Mechanics Bulletin. — 2023. — Vol. 2. — № 1. — P. 100024. — <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2022.100024>.

8. Barton C. A. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rocks / Barton C. A., Zoback M. D., Moos D. // *Geology*. — 1995. — Vol. 23. — № 8. — Pp. 683–686. — [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0683:FFAPAF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0683:FFAPAF>2.3.CO;2).
9. Ziganshin E. R. Assessment of the In-situ Stress State of the Carbonate Rock Mass at an Oil Field / Ziganshin E. R., Dubinya N. V., Novikova E. V., Voronov I. A. // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2024. — Vol. 24. — P. ES5006. — <https://doi.org/10.2205/2024es000955>.
10. Dubinya N. V. Statisticheskii analiz rezul'tatov rekonstruktsii napryazhennogo sostoyaniya po dannym o provodimosti estestvennykh treshchin [Statistical analysis of stress state reconstruction results based on natural fractures conductivity data] / Dubinya N. V., Ziganshin E. R., Novikova E. V. // *Protsessy v geosredakh*. — 2024. — Vol. 41. — № 3. — P. 2636–2648. (in Russ.).