

# Тектонофизические данные о природных напряжениях в области гидроразрыва газоносного пласта

Ю.Л. Ребецкий

д.ф.-м.н., зав. лабораторией<sup>1</sup>  
reb@ifz.ru

Е.М. Чесноков

д.ф.-м.н., профессор<sup>2</sup>  
emchesnok@uh.edu

С.С. Абасеев

к.ф.-м.н., зав. лабораторией<sup>3</sup>  
s\_abaseev@yahoo.com

А.А. Вихорева

к.ф.-м.н., с.н.с.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской академии наук (ИФЗ РАН),  
Москва, Россия

<sup>2</sup>The University of Houston, Houston, USA

<sup>3</sup>Институт Сейсмологии и Физики  
Атмосферы Академии Наук Туркменистана,  
Ашхабад, Туркменистан

**Представлены результаты анализа поля микросейсм гидроразрыва пласта, выполненного для газового месторождения «Barnet» в северо-восточной части штата Техас. Выполнена инверсия цифровых записей микросейсм и получены данные не только о координатах, инициирующих микроземлетрясения, но и об их фокальных механизмах. Эти данные являлись базовыми для выполнения тектонофизической реконструкции напряжений, существовавших в глубине массива в момент гидроразрыва. Результаты реконструкции напряжений позволили получить данные**

При разработке подземных выработок горные инженеры часто сталкиваются с проблемой существования тектонического напряженного состояния. В горном деле стандартные оценки поведения массива пород в окрестности выработки предполагают тип напряженного состояния, обусловленный только действием массовых сил. Поэтому наличие в массиве дополнительных тектонических напряжений приводит к появлению нештатных ситуаций как в процессе проходки выработки, так и при ее эксплуатации.

Проблема тектонических напряжений, их величина и механизм генерации является ключевой задачей тектонофизики, физики очага землетрясений и геодинамики. В последние годы крупные достижения при изучении природных напряжений сейсмоактивных областей получены на основе метода катакластического анализа (МКА) разрывных смещений, в качестве которых рассматриваются сколовые трещины или механизмы очагов землетрясений [1–3]. Таким образом, данный метод применим как для оценки параметров современного напряженного состояния по данным о механизмах очагов землетрясений, так и для анализа палеонапряжений, когда для их реконструкции используются данные о зеркалах скольжения, полученные в геологических обнажениях [4].

В основе всех тектонофизических методов реконструкции природных напряжений лежат данные о совокупности разрывных смещений, распределенной в объеме геологической среды. Это обстоятельство говорит о том, что результатом применения этих методов являются параметры тензора некоторых средних напряжений. При этом усреднение напряженного состояния осуществляется в два этапа. Первичное усреднение происходит из-за того, что в качестве исходных данных используется приближение реальных неплоских трещин плоской поверхностью, а неравномерное смещение бортов трещины вдоль этой поверхности заменяется на среднее смещение. Чем больше размер трещины, тем больше линейный масштаб усреднения напряжений данной трещины. Таким образом, каждую трещину (очаг землетрясения) следует рассматривать как определенный интеграл напряженного состояния. Второй этап усреднения напряжений возникает из-за того, что в расчетах напряжений используется совокупность разрывных смещений, распределенных в некотором объеме геологической среды. Чем больше площадь, на которой реализованы анализируемые в МКА разрывные смещения, тем больше линейный масштаб усреднения напряжений. Очевидно, что существует взаимосвязь между двумя рассмотренными здесь масштабами усреднения.

В настоящий момент основными объектами исследований в рамках МКА являлись сейсмоактивные области, для которых имелись

данные о механизмах очагов землетрясений. При этом масштаб усреднения напряжений зависел от магнитудного диапазона используемых землетрясений. В тех случаях, когда использовались данные глобальных каталогов механизмов очагов землетрясений (Global CMT Project) [5], речь шла о магнитудном диапазоне  $4.0 < M_w < 6.5$ . Для него усреднение напряжений осуществлялось в латеральном масштабе 30–70 км и в пределах глубины всего сейсмоактивного слоя коры (20–50 км). В случаях использования региональных каталогов: JMA для Японии, Э. Хаукссона для Калифорнии (США), для которых диапазон магнитуд землетрясений в каталогах механизмов очагов составлял соответственно  $2.5 < M_w < 5.5$  и  $1.5 < M_w < 4.5$ , речь шла о масштабе усреднения напряжений в 10–20 км и 3–8 км [1, 5].

Приведенный ряд разных масштабов усреднения реконструированных напряжений показывает перспективность данного метода и для изучения напряжений в масштабах отдельных месторождений в первые километры, если для них существуют каталоги механизмов очагов микроземлетрясений с магнитудами  $M_w < 0$ .

## Исходные данные о макротрещинах — микроземлетрясениях

**Каталог микроземлетрясений.** При разработке газового месторождения «Barnet» в северо-восточной части штата Техас компанией Девон возникла необходимость осуществления гидроразрыва пласта с целью повышения эффективности добычи газа. Было решено осуществлять гидроразрыв на скважине «Dollie Thorell A4» в условиях наблюдения за характером глубинного разрушения. С этой целью в одну из рядом расположенных скважин был опущен измерительный комплекс в виде штанги-трубы, состоящей из 12 цифровых широкополосных трехкомпонентных сейсмических станций. Штанга-труба была опущена на наблюдательную скважину на глубину около 2135 м. Наблюдательная скважина отстояла от нагнетательной скважины, создававшей гидроразрыв, на расстояние около 488 м. Гидроразрыв массива осуществлялся на глубине 2135–2288 м. Следует отметить, что существенным осложняющим фактором интерпретации сейсмических записей являлась высокая степень неоднородности геологической среды района месторождения. Здесь имело место чередование глинистых слоев: известняка, аргелитов и алевролитов (шеллы), с мощностями отдельных слоев от первых метров до десятков метров.

Процедура определения гипоцентров необходимо включала в себя этап выделения записей гидроразрывных микроземлетрясений (информативные участки) на сводных сейсмограммах непрерывных цифровых записей трехкомпонентных станций.

**об ориентации осей главных напряжений, о характере геодинамического режима и об относительном уровне эффективного давления массива в области гидроразрыва. На основе поля напряжений выявлены участки резкой смены типов геодинамического режима, которые могут отвечать крупным глубинным разрывным нарушениям и области повышенной прочности массива.**

#### Материалы и методы

Данные о микросейсмях в результате гидроразрыва. Тектонофизический метод реконструкции природных напряжений по данным о разрывных смещениях.

#### Ключевые слова

напряжения, фокальные механизмы, микроземлетрясения, гидроразрыв

Особенностью рассматриваемой задачи являлось определение гипоцентров для вертикальной скважины наблюдения. Задача решалась на основе опыта сейсмологических исследований гипоцентров землетрясений на малых сейсмических сетях станций (предельный случай одна станция). Указанная конфигурация «источник–приемники», в предположении о пренебрежимо слабой горизонтальной неоднородности трансверсально-изотропной среды, допускает пошаговое понижение размерности в пространстве поиска с цилиндрической системой координат, а именно, на первом шаге (i) позволяет определить положение источника в проекции на плоскость «эпицентральное расстояние–глубина», а на втором, заключительном шаге (ii), — получить оценку азимута на эпицентр (i). Положение сейсмического источника в подпространстве «эпицентральное расстояние–глубина», а также соответствующее время в очаге (время начала текущего разрывообразования), определяем по эффекту максимальной фокусировки специальных импульсных представлений, мигрируемых от сейсмостанций к пробным решениям в узлах двухмерной сетки, заданной в пределах сканируемого участка (ii). Вступления Р-волн по сейсмопрофилю, однозначно определяемые по найденной на предыдущем шаге проекции источника на плоскость «эпицентральное расстояние–глубина», служат основой для получения оценки азимута ( $\varphi$ ) на эпицентр по положению абсолютного максимума на графике суммы гистограмм распределения «мгновенных» поляризаций Р-волны во временных окнах соответствующих первых вступлений по всему измерительному комплексу. В результате выполнения (i), (ii), получаем гипоцентр ( $R$ ,  $h$ ,  $\varphi$ ) и время в очаге ( $t_0$ ) текущего гидроразрывного микроземлетрясения.

В результате обработки сейсмических записей процесса гидроразрыва удалось выделить более 1600 событий, энергетический диапазон которых в классах составил:  $-5 < K < 0.8$ . При масштабировании событий по энергии использовались сейсмическая запись взрыва, выполненного в продуктивном слое (a single perfo-shot). Этому диапазону микроземлетрясений отвечали трещины от первых десятков сантиметров до десятков метров, а область, охваченная трещинообразованием, имела геометрические размеры порядка  $900 \times 200 \times 100$  м. Наиболее представительным по числу событий является диапазон классов от -4 до -2. График зависимости числа событий от магнитуды близок к линейному при  $K > -2$ . Диапазон глубин повышенного трещинообразования отвечал 2227–2257 м, где произошло более 70% событий. Трещинообразование резко прерывалось при уменьшении глубины и более плавно снижалось с увеличением глубины.

**О кинематическом типе макротрещин.** При обработке сейсмических записей в процессе создания каталога механизмов очагов микроземлетрясений была использована модель очага в виде двойного диполя. В каталоге, полученном с такой модели разрывообразования, сбросам отвечало 6,2% событий, сдвигам по простиранию — 28,3% событий, взбросам — 10,8% событий. Еще 12,1% и 5,4% событий отвечало сочетанию сдвига со сбросами и взбросами соответственно. 37,2% событий отвечало взрзу (субвертикальная ориентации трещины) или пологим надвигам. Распределение микро-землетрясений с разными типами механизмов очагов представлены на рис. 1. В верхнем левом углу сверху вниз показаны диаграммы распределения числа событий (вертикальная ось) в интервалах: времени, магнитуд, глубин (горизонтальная ось). Шкала времени в секундах, шкала глубин в футах. В правом нижнем углу показана шкала размеров механизмов очагов землетрясений в магнитудах и распределение числа событий (вертикальная ось) по кинематическим типам разрывов (горизонтальная ось), представленное в процентах для шести энергетических диапазонов  $K$ : 1 – 0, 0 – -1, -1 – -2, -2 – -3, -3 – -4, -4 – -5, которым отвечали ломаные линии со значениями середин этих диапазонов 0.5, -0.5, -1.5, -2.5, -3.5, -4.5 соответственно: 1 – сбросы, 2 – сбросы со сдвигом, 3 – сдвиги по простиранию; 4 – взбросы со сдвигами, 5 – взбросы, 6 – взрезы. Здесь также показано в процентах число событий каждого из указанных выше шести кинематических типов разрывов отдельно для каждого из шести диапазонов магнитуд. Как видно, все ломаные линии имеют максимум для сдвигов по простиранию и взбросов. Характер изменения этих линий можно определить достаточно похожим. Наибольшие отклонения (пересечение средних значений) от подобия наблюдаются для больших (0,5, -0,5) и малых (-4,5) магнитудных диапазонов.

Анализ распределения механизмов в пространстве области гидроразрыва показал определенно большее сосредоточение сбросов вблизи нагнетательной скважины (0–92 м). Несколько увеличено число взбросов на небольшом удалении (92–305 м) от нагнетательной скважины. Сдвиги по простиранию имеют провал в представительности на расстоянии 305–457 м от нагнетательной скважины. Тестирование каталога показало его

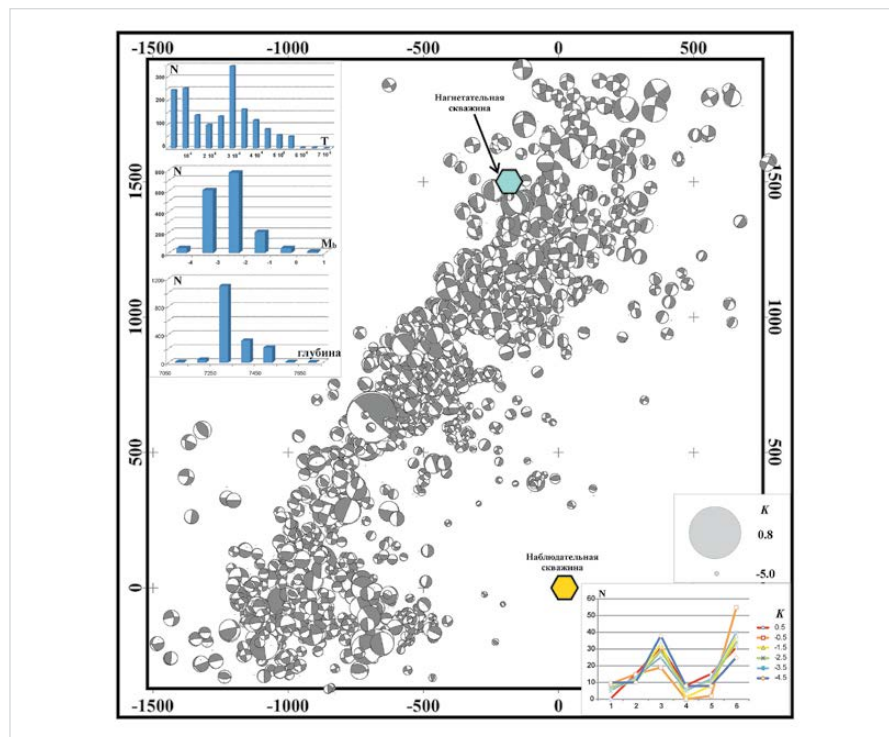


Рис. 1 — Механизмы очагов микроземлетрясений (двойной диполь), положение нагнетательной и наблюдательной скважин (пятиугольник)

Fig. 1 — The mechanism of micro-earthquakes focus (double-couple), location of injection well and monitoring well (pentagon)

неоднородность по вариабильности механизмов очагов микроземлетрясений в локальных участках исследуемой области и зависимость этой вариабильности от энергетического класса событий. Это свидетельствует о разной достоверности определений механизмов: для диапазона низких энергий достоверность механизмов оказалась ниже. Кроме того, данные о механизмах очагов сами являются интегрантами напряженного состояния и они несут информацию о средних напряжениях разных масштабов усреднения. Одновременный расчет напряжений при учете событий, сильно различающихся по энергии, дает плохой результат, т.к. такие события несут информацию о напряжениях разного иерархического уровня. Поэтому по результатам анализа каталога механизмов очагов микроземлетрясений для расчета напряжений были созданы три каталога с разным диапазоном энергий по  $K$ : 1) от -3.0 до -1.0; 2) -2.0 – 0.0; 2) от -1.5 до 0.8. В каждом из каталогов насчитывалось соответственно по 127, 255, 989 событий.

### Тектонофизическая реконструкция напряжений

Надо иметь в виду, что стандартно данные о напряженном состоянии в глубине месторождений получают на основе обследования

формы скважины и методом каротажа скважин (например, [6–8]). С одной стороны, эти методы позволяют оценить некоторые параметры тензора напряжений в масштабе размеров скважины в непосредственной близости от нее (десятки сантиметров). Но, с другой стороны, анализ характера изменений напряжений вдоль скважины по глубине позволяет расширить область прогноза напряженного состояния на первые десятки и даже сотни метров от скважины. При этом надо понимать, что подобный прогноз опирается, прежде всего, на определенную горизонтальную однородность геосреды, т.е. игнорируются глубинные разрывы.

Естественно, что подобные данные, полученные до гидроразрыва, дают информацию о локальном напряженном состоянии, существующем длительное время в окрестности скважины до ее заложения. Эти данные необходимы для прогноза характера разрывных нарушений, формирующихся в процессе гидроразрыва. Сами данные о гипоцентрах макротрещин, образующихся в процессе создания гидроразрыва и фиксируемые по результатам сейсмических наблюдений, обычно используют только для определения объема разрушений в глубинном пласте. Локализация очагов микроземлетрясений

позволяет выделить участки пониженной прочности в глубине горного массива — разломы, что важно для последующей эксплуатации месторождения.

Получение данных о механизмах очагов микроземлетрясений, возникающих при гидроразрыве при обеспечении надежности этих определений, может существенно расширить возможности интерпретации глубинного состояния горного массива. Оценка параметров напряженного состояния массива, опирающаяся на эти данные, дает возможность идентифицировать плоскость макротрещины микроземлетрясения и более надежно выделять крупные разрывные структуры месторождения.

**Результаты реконструкции напряжений.** Выполненная реконструкция параметров напряженного состояния опиралась на алгоритмы двух первых этапов МКА, т.е. определялись параметры эллипсоида напряжений и нормированные значения эффективного давления и максимального касательного напряжения. Важно отметить, что для каталога наиболее высоких магнитуд (-1.5 – 0.8) из 127 событий 109 участвовало в расчете напряжений. Только 18 событий не удовлетворяли критериям МКА и не были включены ни в одну из однородных выборок механизмов очагов землетрясений. Такой же высокий процент эффективности наблюдался для каталога -2.0 – 0.0, где из 255 событий 246 участвовало в создании хотя бы одной однородной выборки. Совершенно иная ситуация наблюдалась для каталога с диапазоном магнитуд -3.0 – -1.0. Здесь из 989 событий только 550 событий было включено в однородные выборки землетрясений и участвовало в определении напряженного состояния. Таким образом, для магнитудного диапазона -3.0 – -1.0 (масштаб усреднения напряжений 5–10 м), среда выглядит достаточно сильно фрагментируемой. В масштабе усреднения 30–50 м (каталог -1.5 – 0.8) геосреда более связная.

На рис. 2 показана ориентация двух главных осей напряжений, построенных в направлении их погружения. На картах совмещены результаты реконструкции для каталогов механизмов очагов землетрясений трех энергетических диапазонов  $K$  слева направо: -1.5 – 0.8 (I); -2.0 – 0.0 (II); -3.0 – -1.0 (III). Вверху, рядом с нагнетательной скважиной, для каждого каталога показаны роза-диаграммы преимущественного простирания и угла погружения соответствующей оси главного напряжения. Как видно из этих рисунков, наиболее устойчивым по ориентации выглядит поле напряжений для каталогов -2.0 – 0.0 и -1.5 – 0.8. Существует также большое сходство результатов расчетов между этими двумя каталогами. Согласно роза-диаграммам, наиболее представительной является азимутальная ориентация  $10^\circ$  и  $225^\circ$  для напряжения максимального растяжения при погружении  $30\text{--}45^\circ$  и  $90^\circ$ ,  $250^\circ$  для напряжения максимального сжатия при погружении  $15\text{--}250^\circ$ . По данным этих каталогов, выделяется четыре зоны разных режимов, напряженного состояния: ближняя, расположенная в окрестности нагнетательной скважины (в радиусе около 914 м); две средние, граница между которыми расположена на расстоянии около 243–274 м от нагнетательной скважины; дальняя, начинающаяся

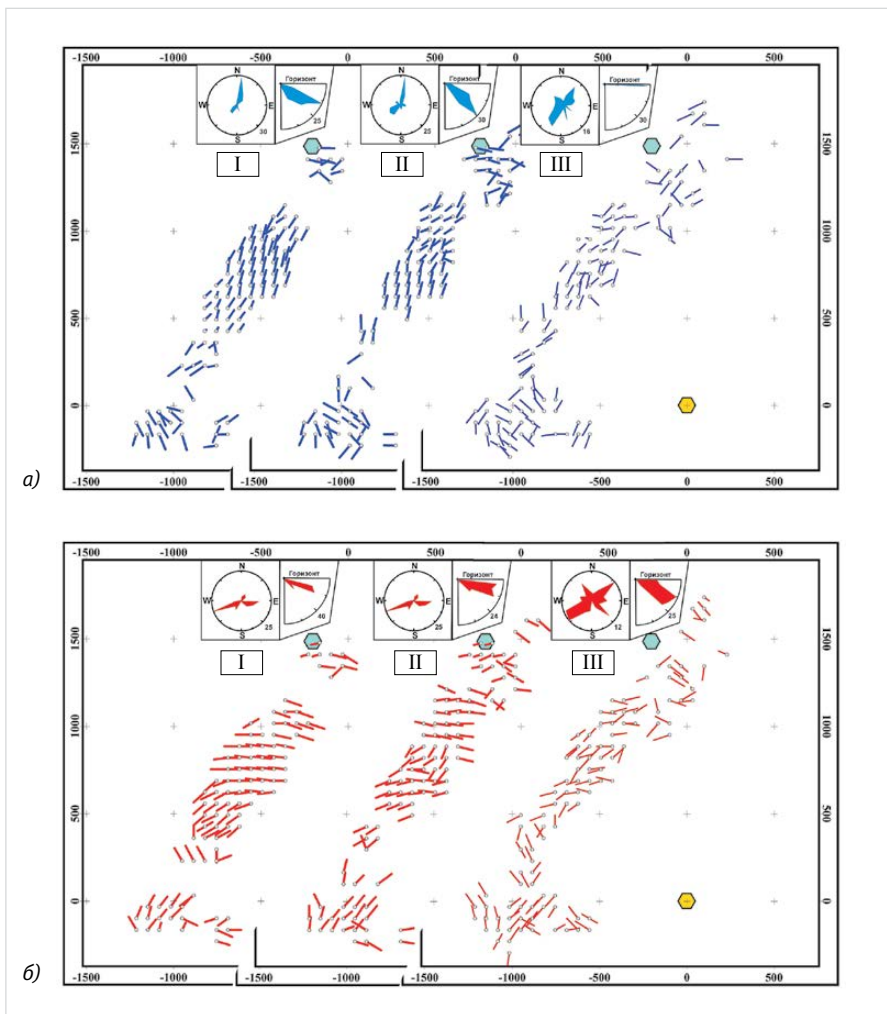


Рис. 2 — Ориентация проекций на горизонтальную плоскость осей главных напряжений, построенных в направлении погружения: а) алгебраически максимальные (девиаторное растяжение); б) алгебраически минимальные (максимальное сжатие)

Fig. 2 — Orientation of projections onto the horizontal plane of the plunge of principal stress axes: а) algebraically maximal (deviatoric extension); B) algebraically minimal (maximal compression)



на расстоянии около 426–457 м от нагнетательной скважины. Наиболее устойчивая ориентация осей главных напряжений (даже для диапазона малых магнитуд) наблюдается в двух средних зонах.

Ближняя и дальняя зоны отделяются от средних зон узкими областями, для которых практически отсутствуют данные о напряжениях. Если посмотреть на карту эпицентров микроземлетрясений (рис. 1), то можно увидеть, что здесь действительно наблюдается некоторое уменьшение числа событий, но при этом их вполне достаточно для получения данных о напряжениях. Отсутствие здесь результата расчетов для данных каталогов говорит о том, что в этих участках происходит не просто резкая смена ориентации осей главных напряжений. Этот вывод можно сделать из того факта, что достаточно резкие смены ориентации осей главных напряжений присутствуют и внутри двух смежных средних зон. При этом здесь не наблюдается пробела в результатах расчетов. Отсутствие результатов расчетов вдоль границ средних зон свидетельствует, что здесь не просто изменяется напряженное состояние вдоль узких зон — разломов, а имеет место объемная катастрофа в геологической среде, когда она настолько дезинтегрирована, что на определенных масштабах не удается подобрать параметры тензора напряжений, удовлетворяющие наблюдаемым разрывным смещениям.

Для каталога -3.0 – -1.0 результаты расчетов дали более вариативные ориентации главных осей. При этом можно найти большое число совпадений этих данных с данными каталогов более высоких магнитуд. Сравнение результатов этих каталогов по геодинамическому типу напряженного состояния (рис. 3, а) показывает, что вблизи нагнетательной скважины они все дают большое число определений горизонтального растяжения. Также уверенное представительство горизонтального растяжения показывают каталоги высоких магнитуд в дальней зоне. В средних зонах наблюдаются режимы горизонтального сжатия и горизонтального сдвига. При этом обстановки горизонтального сжатия и сдвига в этих каталогах меняются местами. Каталог низких магнитуд дает большой разброс в типах геодинамических режимов в ближней и дальней зонах, что свидетельствует о большей фрагментированности этих участков в сравнении с со средними зонами.

На рис. 3, б показано распределение в области гидроразрыва нормированной величины всестороннего эффективного давления, действующего в породах. Напомним, что эффективное давление представляет собой разницу между давлением в твердом скелете пород и давлением жидкости (флюида) в трещинно-поровом пространстве. Наиболее представительным является значение этой безразмерной величины 4–7. Максимальные значения достигают 10–16. Эффективное давление в пространстве между скважинами распределено неравномерно. Существуют зоны повышенных и пониженных его значений, сменяющие друг друга по мере удаления от нагнетательной скважины. Для всех каталогов наблюдается низкий уровень этого давления вблизи нагнетательной скважины. Это вполне ожидаемо, т.к. эффективное давление представляет собой разность

между тектоническим давлением и давлением флюида в трещинно-поровом пространстве горного массива. Далее в первой части средней зоны все каталоги показывают зону повышенного давления. Особенно это четко видно для каталога -2.0 – -0.0. Дальняя зона вместе с примыкающей к ней участком средней зоны имеет пониженный уровень эффективного давления.

Нормировка эффективного давления выполнялась на прочность сцепления пород (cohesion). Если предположить, что прочность сцепления равна 5 МПа, то в области высокой интенсивности эффективного давления будет наблюдаться значения 40–60 МПа. Вблизи нагнетательных скважин эффективное давление падает до 10 МПа.

На рис. 4 отражена схема, иллюстрирующая возможности выбора на диаграмме Мора нодальной плоскости в качестве реализованного разрыва ( $\sigma_i^*$ ,  $i = 1, 2, 3$  — эффективные главные напряжения, с учетом влияния флюида,  $\tau_j$  — прочность сцепления). Отрицательные значения нормальных напряжений  $\sigma_{пл}^*$ , действующие на плоскости трещины — разлома, откладываются направо (растяжение — положительно). Область внутри большого круга Мора, отсекаемая малыми кругами Мора, — возможные

напряженные состояния, в которых могут располагаться точки, отвечающие нормальному и касательному напряжениям на произвольно ориентированной плоскости. Верхняя линия, касающаяся большого круга Мора, — предел хрупкой прочности пород, нижняя пунктирная линия — минимальное сопротивление сухого трения, область, заключенная между этими линиями — полоса критического состояния, здесь располагаются точки с положительными значениями кулоновых напряжений. Желтый пятиугольник (точка С), — плоскости максимального кулонового напряжения, а желтый квадрат (точка А) — максимального касательного напряжения. Кружочки в полосе разрушения отвечают напряженным состояниям на реализованных разрывах (интенсивность красной заливки определяет интенсивность кулоновых напряжений). Треугольнички с зеленой заливкой отвечают напряженным состояниям на дополнительной нодальной плоскости для трех разрывов с наибольшими кулоновыми напряжениями (точки с ярко-красной заливкой).

Представленные на рис. 3 результаты вместе с данными рис. 4 позволяют сделать вывод, что в средней части области гидроразрыва существует зона повышенного

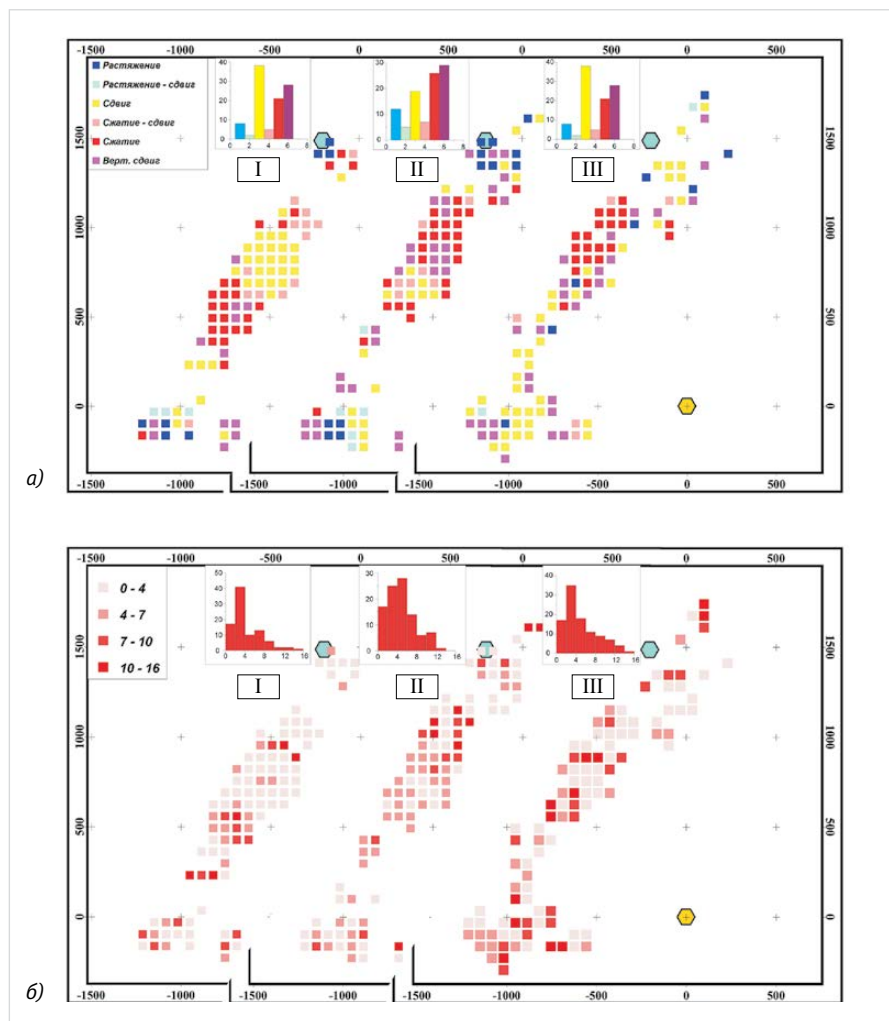


Рис. 3 — Распределение геодинамического типа напряженного состояния (а) и величины нормированного на прочность сцепления пород эффективного давления (б)  
 Fig. 3 — Distribution of the geodynamic type of the stressed state (а) and the value of the effective pressure normalized for the strength of the cohesion (б)

давления, создающая препятствие для перераспределения флюида в латеральном направлении.

**О прогнозе морфологии трещин гидроразрыва.** При гидроразрыве важно знать, как ориентированы плоскости множества мелких трещин, гипоцентры которых выделяются в виде микроземлетрясений. Тектонофизические методы способствуют решению этой проблемы. Такая возможность связана с тем фактом, что в горных породах за формирование сколового разрушения отвечает не только уровень касательных напряжений, но и интенсивность нормальных напряжений, определяющих уровень сил трения [9]. Следствием этого является стремление точек, характеризующих на диаграмме Мора напряженное состояние на плоскости разрыва, приблизиться к линии предела хрупкой прочности, к точке скалывания горных пород (желтый пятиугольник на рис. 4). В МКА выбор реализованной плоскости в очаге землетрясения происходит на основе гипотезы о максимуме кулоновых напряжений [3, 10].

Отметим, что в МКА на диаграмме Мора (параметрическая область касательных и нормальных напряжений на произвольно ориентированных плоскостях, в том числе, и плоскостях трещин) выполняется анализ напряжений, действующих на плоскости разрывов из однородной выборки [10, 11]. При этом используются результаты экспериментов по хрупкому разрушению образцов горных пород [9, 12, 13], показавшие, что катакластическое деформирование исходно трещиноватой геосреды на диаграмме Мора определяется полосой, заключенной между линией предела прочности и линией минимального сопротивления сухого трения (рис. 4).

На рис. 4 на диаграмме Мора показаны три точки ярко-красной заливки, которые ближе всего расположены к точке максимума кулоновых напряжений (желтый пятиугольник). Эти точки определяют значения нормальных и касательных напряжений на трех плоскостях, которые на некоторые не

очень большие углы отклонены от плоскости скалывания горных пород. Если допустить, что эти точки характеризуют сейсмические разрывы и их плоскости являются одной из двух нодальных плоскостей механизма очага землетрясения, то для них можно построить положение трех точек, определяющих напряжения на дополнительных нодальных плоскостях (нормаль к плоскости совпадает с вектором скольжения реализованного разрыва). Полученные точки показаны на рис. 4 в виде зеленых треугольников. Они окажутся ниже линии сухого трения, в области высокого уровня нормальных напряжений сжатия. Здесь даже готовые разрывы не могут испытывать смещения бортов из-за высокого уровня сил поверхностного трения.

Установлено, что в области гидроразрыва пласта на скважине Dollie Thorell A4 существуют как субвертикальные, так и субгоризонтальные трещины сдвига. Эти трещины следует рассматривать как первичные структуры разрушения, возникающие/активизирующиеся из-за снижения сил трения на их поверхностях. Как показывают эксперименты на образцах горных пород, в концах таких трещин формируются трещины отрыва. Эти вторичного генезиса отрывные трещины являются макроскопическими участками, которые будут насыщаться газом.

#### Итоги

Для скважины Dollie Thorell A4 газового месторождения «Варнет» установлено, что в области гидроразрыва имело место сочетание нескольких геодинамических типов напряженного состояния.

#### Выводы

Показано, что тектонофизические методы обработки данных о механизмах микроземлетрясений позволяют получать сведения о параметрах напряженного состояния пласта в момент гидроразрыва. Эта информация может быть использована для определения характера разрывной структуры, формирующейся в процессе гидроразрыва.

#### Список литературы

1. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
2. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саян // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 2. С. 271–291.
3. Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E. Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of the central Asia // Tectonophysics. 2012. Vol. 581. pp. 114–131.
4. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Лунина О.В., Дзюба И.А. Приложение метода катакластического анализа сколов к реконструкции палеонапряжений. Труды тектонического совещания, Академгородок, Новосибирск, 1-5 февраля 2004, Новосибирск. 2004. С. 103–106.
5. Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu., Zlobin T.K. The state of stress in the Earth's crust along the northwestern flank of the Pacific seismic focal zone before the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // Tectonophysics. 2016. Vol. 685. pp. 60–76.
6. Etchecopar A., Vasseur G., Daignieres M. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis // Journal of Structural Geology. 1981. Vol. 3. №3. pp. 51–65.
7. Lal M. Shale stability: Drilling fluid interaction and shale strength. SPE 54356 presented at the 1999 SPE Latin American and Caribbean petroleum engineering conference (Caracas, 21–23 April 1999). Caracas. 1999. 8 p.
8. Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations. SPE Drilling & Completion. SPE 56017. 2001. Vol. 16. №2. pp. 68–73.
9. Byerlee J. D. Friction of Rocks // Pure and applied geophysics. 1978. Vol. 116. №4. pp. 615–626.
10. Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений. Доклад РАН. 2003. Т. 3 №2. С. 237–241.
11. Ребецкий Ю.Л. Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. Киев. 2005. Т. 27. №1. С. 39–54.
12. Mogi K. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow // Bul. Earth. Res. In. Univ. Tokyo. 1966. Vol. 44. pp. 215–232.
13. Brace W.F. Laboratory studies of stick-slip and their application to earthquakes // Tectonophysics. 1972. Vol. 14. №3–4. pp. 189–200.

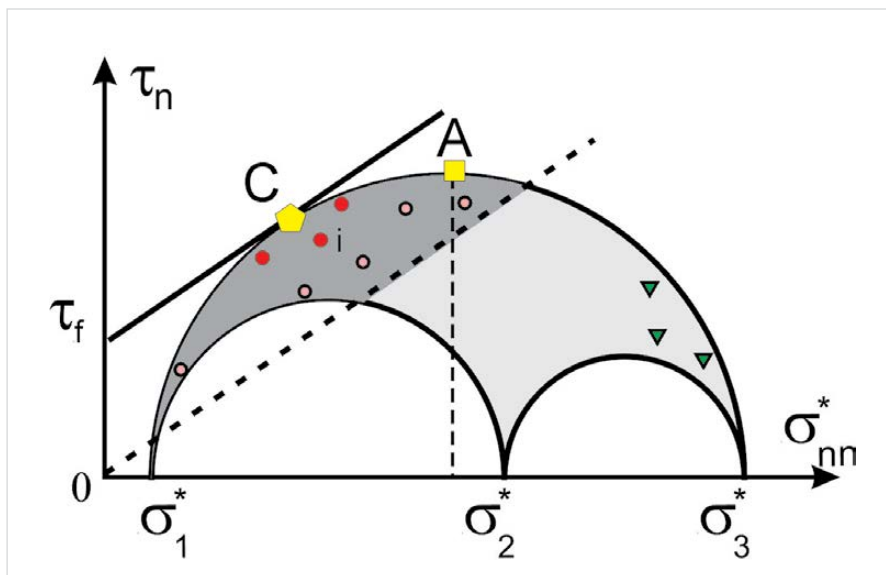


Рис. 4 — Схема, иллюстрирующая возможности выбора на диаграмме Мора нодальной плоскости в качестве реализованного разрыва  
Fig. 4 — Diagram illustrating the options of selecting on the Mohr diagram of the nodal plane as the realized fault

## Tectonophysical data on natural stress in the field of hydraulic fracturing of gas producing formation

### Authors:

**Yury L. Rebetsky** — Sc.D., head of laboratory<sup>1</sup>; reb@ifz.ru

**Evgeniy M. Chesnokov** — Sc.D., professor<sup>2</sup>; emchesno@Central.UH.EDU

**Sergey S. Abaseev** — Ph.D., head of laboratory<sup>3</sup>; s\_abaseev@yahoo.com

**Alexandra A. Vihoreva** — Ph.D., researcher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPE RAS, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>The University of Houston, Houston, Unites States of America

<sup>3</sup>The Institute of Seismology and Atmospheric Physics of the Academy of Sciences of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan

### Abstract

The results of the analysis of the field of microseismic fracturing of a formation made for the gas field "Barnet" in the northeastern part of Texas are presented.

The inversion of digital records of microseisms has been performed and data have been obtained not only about the coordinates of initiating micro-earthquakes, but also their focal mechanisms of cracks.

These data were the basis for carrying out tectonophysical reconstruction of the stresses that existed in the depth of the massif at the time of Hydrofracturing.

The results of stress reconstruction allowed obtaining data on the orientation of the axes of the principal stresses, the nature of the

geodynamic regime, and the relative level of the effective pressure of the massif in the fracturing region.

On the basis of the stress field, areas of a sharp change in the types of geodynamic regime that can respond to large deep discontinuous disturbances and areas of increased strength of the massif are identified.

### Materials and methods

Data on microseisms due to hydraulic fracturing. Tectonophysical method of natural stress reconstruction from data on discontinuous displacements.

### Results

For the Dollie Thorell A4 well of the Barnet gas field, it has been found that in the field of

hydraulic fracturing a combination of several geodynamic types of stress state occurred.

### Conclusions

It is shown that tectonophysical methods of data processing and mechanisms of micro-earthquakes allow obtaining information on the parameters of the stressed state of the formation at the time of hydraulic fracturing. This information can be used to determine the nature of the fracture structure that forms during the fracturing process.

### Keywords

stress, focal mechanisms, micro-earthquakes, hydraulic fracturing

### References

1. Rebetskiy Yu.L. *Tektonicheskoe napryazheniya i prochnost' gornyykh massivov* [Tectonic stress and strength of rock]. Moscow: *Akademkniga*, 2007, 406 p.
2. Rebetskiy Yu.L., Kuchay O.A., Marinin A.V. *Napryazhennoe sostoyanie i deformatsii zemnoy kory Altae-Sayan* [Stress state and deformation of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, Vol. 54, issue 2, pp. 271–291.
3. Rebetskiy Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E. Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of the central Asia // *Tectonophysics*, 2012, Vol. 581, pp. 114–131.
4. Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Lunina O.V., Dzyuba I.A. *Prilozhenie metoda kataklasticheskogo analiza skolov k rekonstruktsii paleonapryazheniy* [Application of the method of cataclastic analysis faults for paleostress reconstructions]. *Trudy tektonicheskogo soveshchaniya, Akadempododok*, 1–5 February, 2004, Novosibirsk, 2004, pp. 103–106.
5. Rebetskiy Yu.L., Polets A.Yu., Zlobin T.K. The state of stress in the Earth's crust along the northwestern flank of the Pacific seismic focal zone before the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // *Tectonophysics*, 2016, Vol. 685, pp. 60–76.
6. Etchecopar A., Vasseur G, Daignieres M. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis // *Journal of Structural Geology*, 1981, Vol. 3, issue 3, pp. 51–65.
7. Lal M. Shale stability: Drilling fluid interaction and shale strength. SPE 54356 presented at the 1999 SPE Latin American and Caribbean petroleum engineering conference (Caracas, 21–23 April 1999), Caracas, 1999, 8 p.
8. Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations. SPE Drilling & Completion, SPE 56017, 2001, Vol. 16, issue 2, pp. 68–73.
9. Byerlee J. D. Friction of Rocks // *Pure and applied geophysics*. 1978, Vol. 116, issue 4, pp. 615–626.
10. Rebetskiy Yu.L. *Razvitie metoda kataklasticheskogo analiza skolov dlya otsenki velichin tektonicheskikh napryazheniy* [Development of the Method of Cataclastic Analysis of Shear Fractures for Tectonic Stress Estimation]. *Proceedings of Earth Sciences*, 2003, Vol. 388, issue 1, pp. 72–76.
11. Rebetskiy Yu.L. *Otsenka odnositel'nykh velichin napryazheniy – vtoroy etap rekonstruktsii po dannym o razryvnykh smeshcheniy* [Estimation of stress magnitude. Second stage of stress reconstruction on the base of slip fault set]. *Geofizicheskiy zhurnal*, Kiev, 2005, Vol. 27, issue 1, pp. 39–54.
12. Mogi K. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow // *Bul. Earth. Res. In. Univ. Tokyo*, 1966, Vol. 44, pp. 215–232.
13. Brace W.F. Laboratory studies of stick-slip and their application to earthquakes // *Tectonophysics*, 1972, Vol. 14, issue 3–4, pp. 189–200.