

ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗНЫХ УРОВНЕЙ И НАРУШЕНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА В ОКРЕСТНОСТЯХ ОКОНЧАНИЯ СДВИГОВОГО РАЗРЫВА

Д.Н. Осокина

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

ВВЕДЕНИЕ

Обусловленные разломами поля напряжений и области разрушения систематически исследуются в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН методами физического и математического моделирования (методы фотоупругости, механики сплошной среды) [Гзовский, 1975; Осокина, Цветкова, 1979; Осокина, Фридман, 1987; Осокина, 1989, 2000, 2002, 2004]. В настоящем сборнике представлены статьи, отражающие результаты трех направлений этого цикла исследований, развиваемых в последнее время. Изучение обусловленных разрывами полей кулоновых напряжений τ_c и областей разрушения [Осокина, 2004; Osokina, Rebetsky, 2005] представляет работа [Осокина, 2008a].

Настоящая работа посвящена исследованию локального поля напряжений и нарушений 2-го порядка, обусловленных разрывами (на основе решения упругой задачи для плоскости и для

слоя с трещиной сдвига) и развивает их новый этап. В ней продолжено изучение поля напряжений и вторичных нарушений микроуровня у концов разрыва, начатое в [Осокина, 2007a, б], а затем рассматривается новый круг задач (намеченный в работах [Осокина и др., 2007; Osokina et al., 2007]) – исследование полей напряжений более высоких масштабных уровней и их влияния на развитие и характер нарушений 2-го порядка в окрестностях приконцевого участка разрыва. Третья работа [Осокина и др., 2008] частично пересекается со второй. В ней излагается комплексный подход к описанию тектонического разрыва как единого объекта [см. Осокина, Яковлев, Войтенко, 2007; Osokina, Yakovlev, Voitenko, 2007], включающего поверхность разрушения и вмещающего ее объем, в котором возникают локальные физические поля, вторичные разрывы и складки.

ЗАДАЧИ РАБОТЫ

При решении ряда задач геодинамики требуется знание закономерностей развития разрыва в напряженном массиве. Необходимо ответить на ряд вопросов, главные из которых:

1. Как пойдет развитие основного разрыва: путем его роста в своей же плоскости или путем образования разрывов 2-го порядка.

2. Какими будут особенности такого вторичного разрыва: его физическая природа (скол, отрыв, зоны их подготовки), его кинематика (надвиг, сдвиг и т.п.), ориентация его сместителя относительно главного разрыва (нормальная, диагональная и т.п.).

3. Как зависят эти особенности разрыва 2-го порядка: а) от места его зарождения; б) от характеристик внешнего поля напряжений (величин главных напряжений, их ориентации и т.д.).

Одной из основных целей данной работы был поиск ответа на эти вопросы.

Изначально данные об областях разрушения вблизи конца основного разрыва позволяли ожидать, что развитие сколового нарушения 2-го порядка определяется напряжениями локального поля макроуровня и происходит по линии минимума градиента кулоновых напряжений τ_c этого

поля в области разрушения. В работах [Осокина, Цветкова, 1979; Осокина, 2004; 2008; Osokina, Rebetsky, 2005; и др.] показано, что положение таких участков зависит от ориентации основного разрыва – от угла α между его простиранием (осью x) и осью сжатия исходного поля σ_2^{01} . При $\alpha < 45^\circ$ осевые линии областей наиболее высоких τ_c лежат в секторах «сжатия» 2D поля (см. ниже), а при $\alpha > 45^\circ$ – в секторах «растяжения» (рис. 1, в, г). Можно было ожидать, что также зависит от угла α и локализация вторичных разрывов – сдвигов, которые при наиболее распространенных в природных массивах углах α ($30-35^\circ$) должны в этом случае развиваться в секторах сжатия. Но оказалось, что такое предположение не подтверждается результатами моделирования и геологическими данными – и в моделях и в геомассивах сдвиги 2-го порядка, как правило, образуются в секторах растяжения (см. ниже и рис. б).

Этот факт заставляет предположить, что линия развития (траектория) разрыва 2-го порядка (и его кинематический тип) определяются прежде всего локальным полем напряжений, но не

макроуровня, а другого масштабного уровня. Тем полем, в котором этот разрыв 2-го порядка зародился и начал развитие, – полем напряжений микроуровня на одном из участков малой зоны у конца разрыва.

Данное предположение требовало проверки. В связи с важностью вопроса одной из задач настоящей работы стало изучение поля напряжений микроуровня и отвечающих ему вторичных нарушений в малой зоне у конца разрыва – самой опасной части его окрестностей. Важная роль этой зоны, установленная в физике разрушения и в технике, должна проявляться и в геодинамике. Эта зона максимума разрушающих напряжений может влиять на развитие процессов разрушения, деформирования и ряда других, от подготовки землетрясения [Соболев, Пономарев, 2003] до рудообразования [Николя, 1992].

НАПРЯЖЕНИЯ 2D ПОЛЯ МИКРОУРОВНЯ В МАЛОЙ ЗОНЕ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

Зависимость напряжений 2D поля от полярного угла θ . Для расчета 2D напряжений используем решение задачи теории упругости о напряженном состоянии плоскости, нарушенной трещиной сдвига, в условиях преобладающего сжатия [Осокина, Фридман, 1987], (являющейся частным случаем задачи о трехзвенной трещине с отрывами у концов [Костров, Фридман, 1975]). Постановка задачи показана на рис. 1, А. Решение этой задачи получено методами ТФКП (теории функций комплексного переменного), в которой напряжения суть функции комплексной переменной $z = x + iy$. Для решения упругой задачи конец трещины – особая точка, вблизи нее напряжения неограниченно растут. Для определения напряжений микроуровня – напряжений в малой зоне при $r \ll L$ (для их асимптотического выражения) – вводится полярная система координат (r, θ) с полюсом в вершине трещины $z = L/2$ (L – длина трещины). При этом координаты точки x , y равны:

$$x = 0.5 * L + r * \cos \theta, \quad y = r \sin \theta. \quad (1)$$

Подставляем выражение (1) в функции, определяющие напряжения 2D поля трещины [Осокина, Фридман, 1987], и оставляя в них лишь резко растущие (сингулярные) слагаемые с множителем $1/\sqrt{r}$ [Поль, 1975; Николаевский, 1996], получаем зависимости этих напряжений от угла θ [Осокина, 2007, а, б]:

$$\sigma_1^1 = (K_{II} / \sqrt{2\pi r}) \cdot (2 \sin \theta / 2 + \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}); \quad (2)$$

Вместе с тем очевидно, что поля напряжений других (более высоких) уровней также должны влиять на развитие разрыва 2-го порядка. Поэтому вторая главная задача работы – исследование локальных полей напряжений более высоких (относительно микроуровня) масштабных уровней у конца трещины (разрыва) и обусловленных этими полями вторичных нарушений, а также изучение зависимостей характеристик последних от параметров исходного поля напряжений.

Исследуемые в данной работе поля напряжений 4-х масштабных уровней будем именовать полями микро-, мезо-, субмакро- и макроуровня. Параметры масштаба m этих полей ($m = h/L$) равны 0.001, 0.01, 0.1, 1.25, где h – полуширина «окна расчета», $L = 2l$ – длина разрыва. (см. рис. 3, 4). Поле макроуровня отвечает представлению локального поля в нормальном масштабе.

$$\sigma_2^1 = (K_{II} / \sqrt{2\pi r}) \cdot (2 \sin \theta / 2 - \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}); \quad (3)$$

$$\tau_{\max}^1 = (K_{II} / \sqrt{2\pi r}) \cdot \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}; \quad (4)$$

$$\tau_C^1 = (K_{II} / \sqrt{2\pi r}) \cdot (\sqrt{1 + k_f^2} \cdot \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} + 2k_f \sin \theta / 2). \quad (5)$$

Здесь K_{II} – коэффициент интенсивности напряжений для трещины сдвига (моды II). При используемой постановке задачи

$$K_{II} = 0,25 \cdot \sqrt{2} \cdot |T| \sqrt{2\pi L}, \quad (6)$$

где

$$T = \tau \sin 2\alpha - k_k (p - \tau \cos 2\alpha), \quad (7)$$

α – угол между начальной трещиной и осью сжатия исходного поля σ_2^{01} [Осокина, Фридман, 1987].

Угол α_2 (наклона оси сжатия локального поля σ_2^1 к оси x) при $r \ll L$ зависит от угла θ , но не зависит от ориентации трещины, т.е. от угла α . В [Осокина, Фридман, 1987] приведена зависимость α_2 от θ , задаваемая выражением вида

$$\alpha_2 = 90 - \beta_2, \quad \beta_2 = 0,5 \arctg F(\theta, \theta/2, 3\theta/2), \quad (8)$$

и показано, что углам θ , равным: 90, 45, 0, -45, -90°, отвечают величины α_2 , составляющие: 90, 65, 45, 25, 0°. Эти цифры согласуются с данными о наклоне (к оси x) траекторий осей напряжений σ_2^1 у конца трещины, полученными путем расчета [Осокина, Фридман, 1987; Осокина, 2000, 2002] и моделирования [Осокина, Цветкова, 1979 и др.].

Рис. 1. Локальное поле напряжений 2D и 3D около сдвигового разрыва, нарушающего слой и нормального к нему, для варианта задачи I ($\sigma_z = const$). Случай левой подвижки [Осокина, 2000, 2002, 2004 и др.]. Плоскость рисунка совпадает с плоскостью слоя xu (план). Карты характеристик поля разрыва построены в координатах $x/l, y/l, 2l$ – длина разрыва. **А, Б** – постановка задачи: **А** – двумерной, **Б** – трехмерной при $\sigma_3 = const$. **В, Г** – карты изолиний главных напряжений 2D поля σ_1^1 (**В**) и σ_2^1 (**Г**), разделенные на сектора «растяжения» (без штриховки) и сектора «сжатия» (со штриховкой), параметры задачи; $\sigma_1^{01} = 0, \sigma_2^{01} = -2, \alpha = 30^\circ, k_k = 0.1$; **Д-К** – карты характеристик 3D поля напряжений. **Д, Е** (параметры задачи $\sigma_1^{01} = 0, \sigma_2^{01} = -2, \sigma_z = 0, \alpha = 30^\circ, k_k = 0.1$): **Д** – траектории главных напряжений (пунктир – σ_1 , штрихи – σ_2 , сплошные линии – σ_3); **Е** – изолинии всестороннего давления P ($P = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$), понижение P – теплые цвета, повышение P – холодные цвета; **Ж, З** – изолинии напряжений τ_{max} и зависимость геометрии областей повышения τ_{max} от ориентации разрыва (угла α): **Ж** – $\alpha = 31.7^\circ$, **З** – $\alpha = 55^\circ$. Параметры задачи: $\sigma_1^{01}, \sigma_2^{01}, \sigma_z = -1, -3, -2, \mu_\sigma = 0, k_k = 0.3-0.4, k_f = 0.5, \tau_f = 0.14$. **И, К** – изолинии кулоновых напряжений τ_c и области разрушения ($\tau_c > \tau_f$), зависимость их геометрии от ориентации разрыва (угла α): **И** – $\alpha = 20^\circ$, **К** – $\alpha = 50^\circ$. Параметры задачи: $\sigma_1^{01}, \sigma_2^{01}, \sigma_z = -1, -3, -2, \mu_\sigma = 0, k_k = 0.4, k_f = 0.5, \tau_f = 0.14$

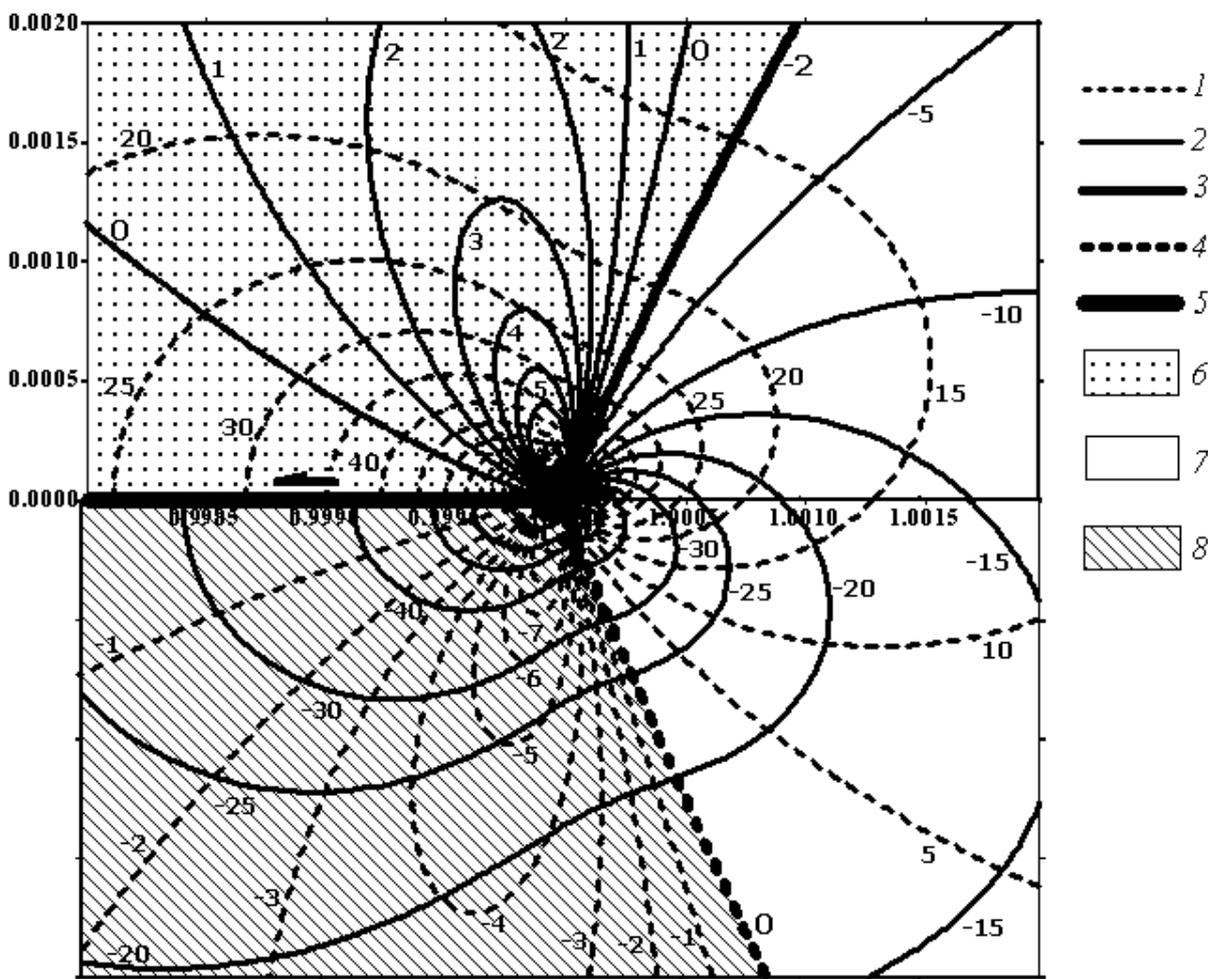


Рис. 2. Изолинии главных напряжений σ_1^1, σ_2^1 локального 2D поля напряжений микроуровня ($m = 0.001$) на плоскости xu для окрестностей вершины трещины (разрыва) и разделение этой зоны на «приконцевые» участки: «растяжения» (УРс) – $\sigma_1^1 \geq \sigma_1^{01}, \sigma_2^1 \geq \sigma_2^{01}$; сдвига (УСд) – $\sigma_1^1 \geq \sigma_1^{01}, \sigma_2^1 \leq \sigma_2^{01}$; и сжатия (УСж) – $\sigma_1^1 \leq \sigma_1^{01}, \sigma_2^1 \leq \sigma_2^{01}$. Параметры задачи: $\sigma_1^{01} = 0, \sigma_2^{01} = -2, \alpha = 35^\circ, k_k = 0.2$, исходное поле – одноосное сжатие. Остальные условия – как на рис. 1.

1, 2 – изолинии напряжений σ_1^1 (1) и σ_2^1 (2); 3 – изолиния $\sigma_2^1 = \sigma_2^{01}$, граница участков УРс и УСд; 4 – изолиния $\sigma_1^1 = \sigma_1^{01}$, граница участков УСд и УСж; 5 – трещина (разрыв); 6 – 8 – приконцевые участки (пересечения секторов): 6 – «растяжения» (УРс); 7 – «сдвига» (УСд); 8 – «сжатия» (УСж)

Разделение малой зоны по 2D напряжениям на участки, определяемые как пересечения секторов «растяжения» и «сжатия» для обоих главных напряжений 2D поля σ_1^1 и σ_2^1 (участки «растяжения - растяжения», «растяжения сжатия» («сдвигания»), «сжатия – сжатия». Рассмотрим это разделение [Осокина, 2007, а, б]. На рис. 2 приведены изолинии главных напряжений σ_1^1 и σ_2^1 2D поля микроуровня ($m=0,001$) у правого конца трещины для варианта исходного (регионального) 2D поля напряжений, отвечающего одноосному сжатию ($\sigma_1^{01}=0$, $\sigma_2^{01}=-2$) и для ориентировки трещины, при которой $\alpha=35^\circ$. По соотношению напряжений локального поля σ_1^1 , σ_2^1 с напряжениями исходного поля σ_1^{01} , σ_2^{01} эта зона разделяется на три участка [Осокина, 2007, а, б]. *Первый участок* – область усиления растяжения (или ослабления сжатия) для обоих главных напряжений ($\sigma_1^1 \geq \sigma_1^{01}$, $\sigma_2^1 \geq \sigma_2^{01}$): пересечение секторов «условного растяжения» для σ_1^1 и для σ_2^1 . *Второй участок* – область ослабления сжатия для σ_1^1 и усиления сжатия для σ_2^1 ($\sigma_1^1 \geq \sigma_1^{01}$, $\sigma_2^1 \leq \sigma_2^{01}$): пересечение сектора условного растяжения для

σ_1^1 и сектора сжатия для σ_2^1 .

Третий участок – область усиления сжатия для обоих главных напряжений ($\sigma_1^1 \leq \sigma_1^{01}$, $\sigma_2^1 \leq \sigma_2^{01}$): пересечение секторов сжатия для σ_1^1 и σ_2^1 . Так как можно сказать что: *первый участок* отвечает «растяжению–растяжению» или «двойному растяжению», то ниже для краткости он будет называться участком «растяжения» (УРс). При таком же подходе *второй участок*, отвечающий «растяжению–сжатию», будет ниже называться участком «сдвигания» (УСд), а *третий участок*, отвечающий «двойному сжатию», будет называться участком «сжатия» (УСж). Участки УРс и УСд разделяет изолиния $\sigma_2^1 = \sigma_2^{01}$, а участки УСд и УСж – изолиния $\sigma_1^1 = \sigma_1^{01}$. Карта изолиний σ_1^1 и σ_2^1 (рис. 2) характеризует ряд свойств поля 2D напряжений микроуровня у вершины трещины, общих для одноосного сжатия и ряда близких к нему типов исходного поля. Ниже показано, что геометрия этой карты сильно зависит от масштабного уровня поля напряжений, характеризуемого параметром m . При росте m от 0.001 до 1.25 (для исходного поля одноосного сжатия) угол между верхней и нижней границами участка сдвигания УСд падает от $\sim 160^\circ$ до $\sim 30^\circ$.

ПОЛЕ ЛОКАЛЬНЫХ 3D НАПРЯЖЕНИЙ МИКРОУРОВНЯ И НАРУШЕНИЯ 2-ГО ПОРЯДКА В РАЗНЫХ ЧАСТЯХ МАЛОЙ ЗОНЫ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

Поле напряжений 3D и нарушения 2-го порядка на примере исходного поля одноосного сжатия. Рассмотрим переход к полю 3D [Осокина, 2007, а, б]. Для этого наложим на 2D поле, (расчитанное для исходного поля одноосного сжатия, см. рис. 2), сжатие по оси z (напряжение σ_z), и сравним напряжения σ_1^1 , σ_2^1 , σ_z по алгебраической величине (см. [Осокина, 2000, 2002]). Для упрощения примем, что σ_z ограничено значениями от σ_1^{01} ($\sigma_1^{01} \leq 0$) до σ_2^{01} , и что величины σ_1^{01} и σ_2^{01} отличаются не более чем на полпорядка. Участкам УРс, УСд, УСж поля 2D, выделенным на рис. 2, отвечает разный характер: 3D поля (рис. 3), поведения среды и ожидаемых вторичных нарушений (рис. 4). Отметим, что прогноз нарушений 2-го порядка проводится для сред с двумя типами прочности: для кулоновской среды и для среды Треска – Сен-Венана, прочность которых определяется напряжениями: τ_c – для первой, τ_{\max} – для второй.

1. *Участок «растяжения» 2D поля (УРс)* задается условиями $\sigma_1^1 \geq \sigma_1^{01}$, $\sigma_2^1 \geq \sigma_2^{01}$. Он

ограничен разрывом и изолинией $\sigma_2^1 = \sigma_2^{01}$, на рис. 2–4 он занимает левую половину и часть правой половины верхней полуплоскости. Для его центральной части (где поле напряжений 2D – двуосное растяжение) поле 3D является сбросовым, $\sigma_z = \sigma_3$. А на его периферии (где поле 2D – растяжение-сжатие, $\sigma_1^1 > 0$, $\sigma_2^1 < 0$) поле 3D – сдвиговое, $\sigma_z = \sigma_2$ (рис. 3). УРс – часть области хрупкого разрушения III [Осокина, 2004, 2008; Osokina, Rebetsky, 2005], на диаграмме Мора [Николаевский, 1996; Ребецкий, 2007] он отвечает окрестностям начала предельной кривой – ее пересечения с осью σ_n . Здесь прогнозируются вторичные нарушения 2-х типов: отрывы (раздвижки) и наклонные сколы (сбросы). Поскольку, согласно [Осокина, Фридман, 1979], оси σ_1 и σ_2 3D поля (оси σ_1^1 и σ_2^1 2D поля), отвечающие опасному направлению $\theta^* = 180^\circ$ (см. ниже), параллельны разрыву и нормали к нему, то простирание обеих вторичных структур ожидается нормальным к разрыву (см. ниже) (рис. 4). Угол падения сброса должен составлять: для

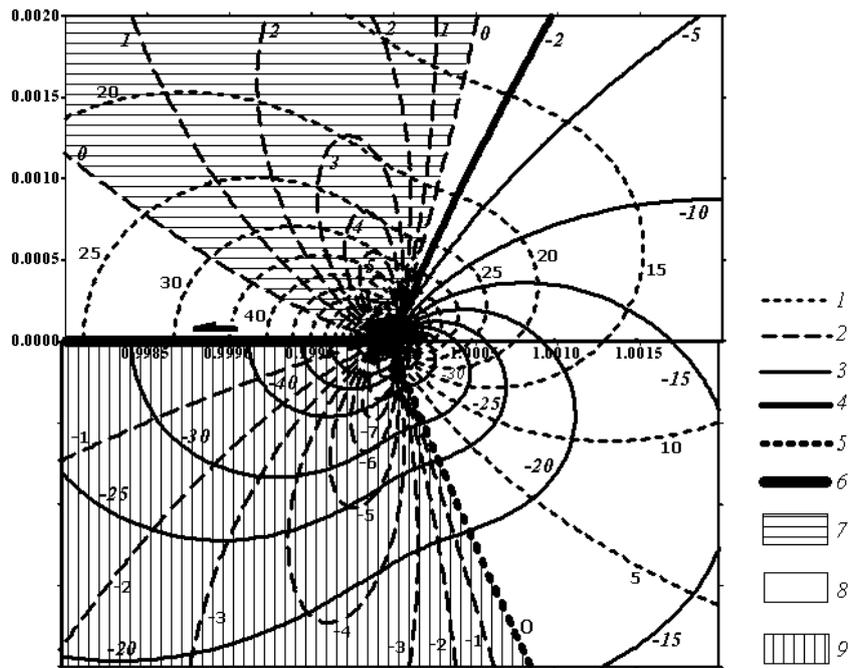


Рис. 3. Изолинии главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 локального 3D поля напряжений микроуровня ($m = 0.001$) и области с различными типами этого поля на плоскости xu в окрестностях вершины трещины (разрыва). Поле напряжений на большей части участка УРс – сбросовое ($\sigma_z = \sigma_3$), на участке УСж и на краях участка УРс – сдвиговое ($\sigma_z = \sigma_2$), на участке УСж – надвиговое ($\sigma_z = \sigma_1$). 3D поле получено наложением напряжения σ_z на 2D поле (см. рис. 2). Параметры задачи: $\sigma_1^{01} = 0$, $\sigma_2^{01} = -2$, $\sigma_z = 0$, $\alpha = 35^\circ$, $k_k = 0.2$; исходное поле – одноосное сжатие.

1 - 3 – изолинии главных напряжений σ_1 (1), σ_2 (2), σ_3 (3); 4 – граница участков «растяжения» (УРс) и «сдвига» (УСд), 5 – граница участков «сдвига» (УСд) и «сжатия» (УСж); 6 – трещина (разрыв); 7 - 9 – типы поля напряжений: 7 – сбросовое, 8 – сдвиговое, 9 – надвиговое.

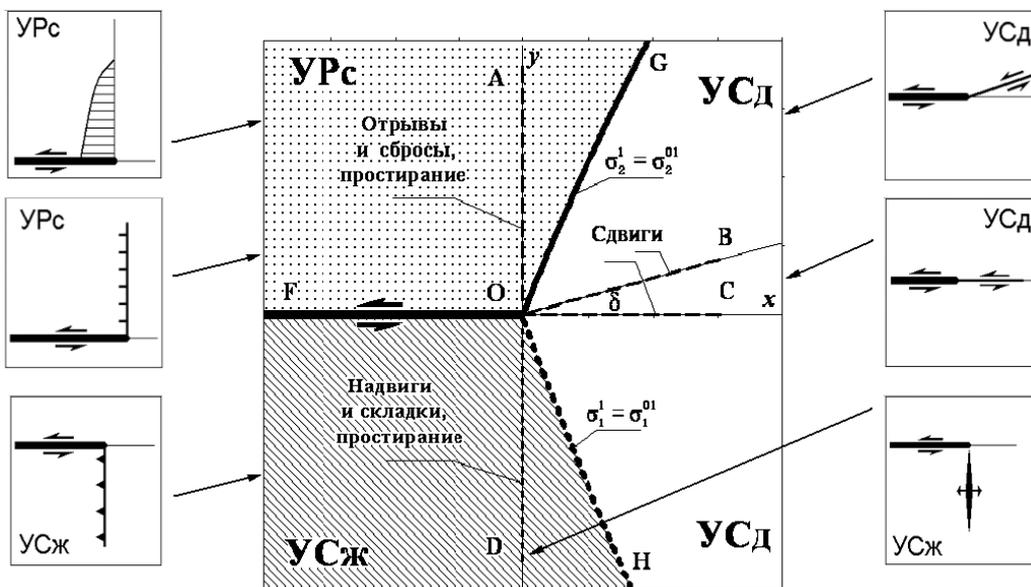


Рис. 4. Схема прогноза крупных оперяющих нарушений 2-го порядка на начальном этапе их развития в малой зоне у правого конца разрыва (трещины) при $r/L = 10^{-3}$. Схема демонстрирует зависимость кинематического типа нарушения и ориентации его плоскости от участка его зарождения (УРс, УСд, УСж) и напряжений микроуровня на этом участке (см. рис. 2, 3) при $m = 10^{-3}$. Точка О – конец разрыва; ОА-ОД – простираение нарушений 2-го порядка (ОА – отрывы и сбросы, ОВ, ОС – сдвиги, ОД – надвиги и складки); ОG и ОН – границы участков УРс и УСд, УСд и УСж; ОF – разрыв. На врезках – нарушения, отвечающие линиям ОА-ОД. Параметры задачи: $\sigma_1^{01} = \sigma_z = 0$, $\sigma_2^{01} = -2$, $\alpha = \alpha_f = 35^\circ$, $k_k = 0.2$, $k_f = 0.36$ (α_f – угол скальвания, k_f – коэффициент внутреннего трения), исходное поле – одноосное сжатие. План, координаты $x/l, y/l$, $2l$ – длина разрыва с левым смещением [Осокина, 2007, а, б.].

кулоновской среды – $90^\circ - \alpha_f$ (где α_f – угол скальвания среды), а для среды Треска – Сен-Венана – 45° .

2. Участок «сдвига» 2D поля (УСд) задается условиями $\sigma_1^1 \geq \sigma_1^{01}, \sigma_2^1 \leq \sigma_2^{01}$. Он ограничен изолиниями $\sigma_2^1 = \sigma_2^{01}$ и $\sigma_1^1 = \sigma_1^{01}$, на рис. 2–4 он расположен в правой части верхней и нижней полуплоскости. Поле 2D здесь – поле растяжения-сжатия ($\sigma_1^1 > 0, \sigma_2^1 < 0$), поле 3D – сдвиговое, $\sigma_z = \sigma_2$. На оси x (при $\theta = 0$) напряжения σ_2^1 и σ_1^1 составляют с ней углы 45° и -45° [Осокина, Фридман, 1979]. УСд – часть области хрупкого разрушения III, на диаграмме Мора он отвечает окрестностям предельной кривой вблизи ее пересечения с осью τ_n . Здесь прогнозируются вторичные сколы, нормальные к плоскости xu , – сдвиги. Для кулоновской среды ожидаются вторичные сдвиги под небольшим углом к исходной трещине или разрыву (рис. 4), т.к. величины τ_c , при типичных для геомассивов значениях k_f от 0.36 до 0.6 [Поль, 1975; Николаевский, 1996; Ребецкий, 2003, 2007], максимальны для направлений θ^* от 13° до 19° (см. ниже), для которых угол $\delta = \alpha^* - \alpha_f$ (вторичного сдвига с осью x) равен от 16° до 26° [Осокина, 2007, а, б]. Здесь α^* – угол α_2 (см. выше) для опасного направления.

Для среды с прочностью Треска – Сен-Венана здесь ожидаются вторичные сдвиги, продолжающие основной разрыв – угол $\delta = 0$ (рис. 4).

3. Участок «сжатия» 2D поля (УСж) задается условиями $\sigma_1^1 \leq \sigma_1^{01}, \sigma_2^1 \leq \sigma_2^{01}$. Он ограничен разрывом и изолинией $\sigma_1^1 = \sigma_1^{01}$, на рис. 2–4 он занимает в нижней полуплоскости левую половину и часть правой. Поле напряжений 2D здесь – двуосное сжатие, поле 3D – надвиговое, $\sigma_z = \sigma_1$. При напряжениях $\tau_c \geq \tau_0$ (τ_0 – предел текучести) начинается развитие пластических деформаций и возможно «вязкое» разрушение. Эта часть участка УСж отвечает пластическому поведению среды (IV типа) [Осокина, 2004, 2008; Osokina, Rebetsky, 2005]. На диаграмме Мора эта область отвечает субгоризонтальной части предельной кривой. На участке УСж прогнозируются вторичные наклонные сколы – надвиги, а при напряжениях $\tau_c \geq \tau_0$ и при выполнении ряда условий (наличие слоистости и др.) – вторичные складки. Так как согласно [Осокина, Фридман, 1979] оси σ_2^1 и σ_1^1 2D поля

(оси σ_3 и σ_2 3D поля) для опасного направления ($\theta^* = -180^\circ$) параллельны разрыву и нормали к нему (см. ниже), то простирание и надвига, и складки ожидается здесь нормальным к разрыву (рис. 4, рис. 6, а, б).

Важно отметить, что каждый из участков УРс, УСд, УСж имеет свой максимум напряжений микроуровня со своим типом 3D поля. Таким образом показано, что конец трещины (разрыва) может совмещать три различные особые точки – три очага разрушения.

Ориентация нарушений 2-го порядка и опасные направления в малой зоне у вершины трещины по данным о напряжениях микроуровня $\delta = \alpha^* - \alpha_f$. При прогнозе ориентации нарушений 2-го порядка, образование которых под действием 3D поля микроуровня ожидается у конца трещины, следует определить «опасное направление», характеризуемое полярным углом θ^* [Осокина, Фридман, 1979; Осокина, 2007, а, б]. Имеется в виду направление, при движении по которому к вершине трещины раньше всего достигается критическая величина разрушающего напряжения и начинается разрушение.

Для определения угла θ^* приравняем нулю производную функции $F(\theta)$, определяющей разрушающее напряжение 3D поля. Напомним, что напряжения 3D поля обозначаются как τ_c , τ_{\max} , а напряжения 2D поля – как τ_c^1, τ_{\max}^1 . Для кулоновской среды функция $F(\theta)$ имеет вид $\tau_c = f_1(\theta)$ а для среды с прочностью по Треска – Сен-Венану – $\tau_{\max} = f_2(\theta)$.

Решение полученного уравнения определяет углы θ^* , задающие опасные направления.

1. На участке сдвига (УСд), где поле сдвиговое ($\sigma_z = \sigma_3$), прогнозируется образование вторичных сдвигов. Оно задается условиями: $\tau_c \leq \tau_f$ – для кулоновской среды и $\tau_{\max}^1 \leq \tau_0$ – для среды Треска – Сен-Венана. Для тех же двух сред полярный угол опасного направления θ^* определяется из уравнений: $d\tau_c/d\theta = 0$ (для первой среды) и $d\tau_{\max}^1/d\theta = 0$ (для второй). Для сдвигового поля $\tau_c = \tau_c^1$, $\tau_{\max} = \tau_{\max}^1$. Значения τ_{\max}^1 и τ_c^1 находим из выражений (4) и (5). Получаем, что для кулоновской среды угол θ^* зависит от коэффициента внутреннего трения k_f . Из этого следует, что типичным для горных пород значениям $k_f = 0.36-0.6$ (см. выше) отве-

чают углы $\theta^* = 13-20^\circ$. По этим значениям θ^* , используя результаты [Осокина, Фридман, 1987] и выражение (8), находим угол α^* (угол α_2 для опасного направления), вычитаем из него угол скалывания α_f и получаем углы $\delta = \alpha^* - \alpha_f$ (между простиранием вторичного сдвига и начальной трещиной или осью x) от 16 до 25° (рис. 4, рис. 7, а).

Для сред с разрушающим напряжением τ_{\max} из (4) находим $\theta^* = 0^\circ$, из (8) следует $\alpha^* = 45^\circ$. В этом случае $\alpha_f = 45^\circ$, так как скол происходит в плоскости действия τ_{\max} . Получаем, что $\delta = \alpha^* - \alpha_f = 0$, т.е. плоскости вторичного сдвига и исходной трещины совпадают (рис. 4, рис. 7, а).

Отметим, что для кулоновской среды на участке сдвига весьма близки два направления (опасное и простирание вторичного сдвига), их углы с осью x (θ^* и $\delta = \alpha^* - \alpha_f$) отличаются не более чем на $3-5^\circ$. Эти направления составляют с простиранием основного разрыва небольшие острые углы – в интервале $13-25^\circ$. Таким образом на участке УСд, с учетом неоднородности реального геомассива, для кулоновской среды можно прогнозировать вторичные сдвиги под углом к основному разрыву от $13-16^\circ$ (при $k_f = 0.36$) до $19-26^\circ$ (при $k_f = 0.6$), а для среды Треска – Сен-Венана – развитие вторичных сдвигов, продолжающих основной разрыв ($\delta = 0^\circ$).

2. На участке «растяжения» (УРс), где поле – сбросовое, прогнозируются вторичные отрывы и сбросы. Образование отрывов задается условием $\sigma_1^1 \leq \sigma_p$, где σ_1^1 определяется выражением (2), а σ_p – прочность среды на отрыв. Образование сбросов задается условием $\tau_c \leq \tau_f$, где τ_c – кулоново напряжение 3D поля, а τ_f – прочность при чистом сдвиге. Для участка УРс значение τ_c , определяемое через величины σ_1^1 и σ_z , пропорционально величине σ_1^1 и может быть записано как:

$$\tau_c = 0.5\sigma_1^1(k_f + \sqrt{1+k_f^2}). \quad (9)$$

Из (9) следует, что зависимость величин σ_1^1 и τ_c от угла θ^* одинакова. Приравнявая нулю производную $\partial\sigma_1^1/\partial\theta$, находим, что опасному направлению для σ_1^1 и для τ_c отвечает $\theta^* = 180^\circ$. В этом случае угол α^* составляет 90° (см. выше) [Осокина, Фридман, 1987]. Исходя из этого получаем (для обеих рассматриваемых

сред), что простирание вторичных отрыва и сброса, которое должно совпадать с осью σ_2 3D поля (осью σ_2^1 2D поля), будет нормальным к разрыву, $\delta = \alpha^* = +90^\circ$ (рис. 4, рис. 7, а). Угол падения сброса для кулоновской среды должен составлять $90^\circ - \alpha_f$, а для среды Треска – Сен-Венана – 45° .

3. На участке сжатия (УСж), действуя так же, как для участка УРс, получаем для обеих сред: $\theta^* = -180^\circ$, $\alpha^* = 0^\circ$. Поэтому простирание надвига (или складки), совпадающее с направлением оси σ_2 3D поля (оси σ_1^1 2D поля), задается углом $\delta = -90^\circ$ к основному разрыву. Угол падения сместителя надвига ожидается: для кулоновской среды равным углом скалывания α_f , а для среды Треска – Сен-Венана равным 45° .

Зависимость поля напряжений микроуровня у вершины трещины от величин главных напряжений исходного поля. Расчеты показывают, что рост σ_z при постоянных значениях σ_1^{01} , σ_2^{01} приводит к росту площади сбросового и сдвигового полей и уменьшению площади надвигового поля (рис. 5, а-в), тогда как рост величин σ_1^{01} и σ_2^{01} (рост давления σ_m^{01}) при постоянном σ_z ведет к уменьшению площади сбросового и сдвигового полей и к росту площади надвигового поля (рис. 5, г-е). В обоих случаях, если площадь (длина) участка надвигового поля (в первом случае) или сбросового поля (во втором) становится заметно меньше площади (стороны квадрата) окна расчета, то развитие надвига (в первом случае, рис. 5, в) или сброса (во втором случае, рис. 5, д) блокируется, поскольку этот разрыв попадает в область с другим типом поля (надвиг в сдвиговое поле, сброс – в такое же поле). В первом случае условия благоприятны для зарождения вторичного раздвига (или сброса) и сдвигов, тогда как во втором случае – для зарождения надвига (или складки) и сдвигов. Из этого следует, что могут существовать четыре варианта (вида) исходного поля микроуровня. Для первого варианта возможно образование и развитие зародышей нарушений во всех трех участках малой зоны, т. е. нарушений всех типов, примеры – одноосное сжатие (рис. 2-4, рис. 5, г, рис. 7, б, в), разновидности двuosного сжатия (рис. 5, а, б). Для второго варианта возможно зарождение нарушений в двух участках зоны, пример – трехосное сжатие при большом значении σ_z (рис. 5, в), для третьего – в одном из участков, пример – двuosное сжатие при

большом значении σ_m (рис. 5, е). Для четвертого варианта (малое τ_{\max} , высокое давление)

невозможно зарождение нарушений во всех участках зоны.

О ПРИНЦИПАХ ВЫДЕЛЕНИЯ УЧАСТКОВ РАСТЯЖЕНИЯ И СЖАТИЯ В ОКРЕСТНОСТЯХ РАЗРЫВА

Этот вопрос заслуживает рассмотрения, поскольку разные авторы использовали разные определения секторов (областей, участков) растяжения и сжатия. Так в [Буртман и др., 1963] авторы выделяли около крупного сдвига пары участков двух типов – с деформациями растяжения и с деформациями сжатия, одной из границ между ними принимали линию простирания основного сдвига. С. Стоянов [1977] разделял поле начального сдвига на пары секторов растяжения и сжатия, определяя их как участки понижения и повышения среднего напряжения $\bar{\sigma}_m$. В этом случае (см. рис. 7 в [Осокина, 2002]) границы секторов задаются линией простирания исходного разрыва-сдвига и нормалью к ней. В работах [Осокина, Фридман, 1987; Осокина, 2000, 2002] границы секторов «растяжения» и сжатия определяются по картам изолиний главных напряжений 2D поля разрыва. Было показано, что для каждого из напряжений σ_1^1 , σ_2^1 карта изолиний состоит из пары секторов условного растяжения (ослабления сжатия) и пары секторов сжатия (его усиления). Границей между разными секторами для напряжений σ_1^1 служат изолинии $\sigma_1^1 = \sigma_1^{01}$ и проекция разрыва (на плоскость xy),

для напряжений σ_2^1 – изолинии $\sigma_2^1 = \sigma_2^{01}$ и проекция разрыва. В обоих случаях эти изолинии криволинейны и идут диагонально к разрыву – см. рис. 1, в, г, (а также см. [Осокина, Фридман, 1987] – рис. 4, 5; [Осокина, 2000] – рис. 2, а, б; [Осокина и др., 2008] – рис. 2, в, г).

Помимо уточнения границ секторов растяжения и сжатия для каждого из напряжений σ_1^1 , σ_2^1 2D поля в настоящей работе делается следующий шаг – выполняется наложение карт изолиний напряжений σ_1^1 и изолиний σ_2^1 , что позволяет выделить границы участков пересечения двух секторов для обоих напряжений 2D поля – пересечения секторов растяжения (для σ_1^{01} и σ_2^{01}) с секторами сжатия (для σ_1^{01} и σ_2^{01}) – рис. 2–5. Таким образом, мы приходим к выделению в поле разрыва по обоим главным напряжениям 3-х пар участков разных типов: участков «двойного растяжения» – УРс, «двойного сжатия» – УСж, «растяжения – сжатия» («сдвигания») – УСд. Их выделение проводится на основе решения задачи теории упругости и связывает их определение с напряжениями исходного поля σ_1^{01} и σ_2^{01} (см. выше).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ О РАЗРЫВАХ 2-ГО ПОРЯДКА У КОНЦОВ ОСНОВНОГО РАЗРЫВА

Данные экспериментов. В лабораторных экспериментах, которые проводились в связи с задачами поиска предвестников разрушения (в работах по физике очага землетрясения) или в связи с задачами тектоники, изучались вторичные нарушения у концов созданной заранее трещины (или разрыва) при одноосном и двухосном сжатии модели или образца [Стоянов, 1977; Шамина, 1981; Petit, Varquins, 1988; Соболев, Пономарев, 2003; и др.], а также С.Д. Виноградов (1989); В.В. Ружич и др. Несмотря на большое разнообразие свойств материалов моделей, обнаружены общие закономерности развития в них вторичных нарушений, возникающих у концов начальной трещины. В хрупких моделях (стекло, оргстекло, алебастр, бетон, песчаник и т.п.) и в пластичных или вязко-пластичных моделях (парафин, влажная глина и др.) возникают вторичные на-

рушения нескольких типов. Считая модель горизонтальной, а начальный разрыв – сдвигом, эти типы нарушений можно определить как:

- 1) сдвиги, «косые» к разрыву, в областях растяжения, отвечающих УСд;
- 2) сдвиги и зоны их подготовки (развития микротрещин), продолжающие разрыв, в областях, отвечающих УСд;
- 3) отрывы (раздвиги), субнормальные (вначале) к разрыву, в областях растяжения, отвечающих УРс;
- 4) сбросы, субнормальные (вначале) к разрыву, в областях растяжения, отвечающих УРс;
- 5) надвиги, субнормальные (вначале) к разрыву, в областях сжатия, отвечающих УСж;
- 6) складки, субнормальные к разрыву, в областях сжатия, отвечающих УСж.

Здесь использовано понимание областей (секторов) растяжения и сжатия как участков по-

нижения давления σ_m^{01} (тыловых) и его повышения (лобовых) – как в работе [Стоянов, 1977]). Обычно в эксперименте одновременно образуются нарушения одного-двух типов. В хрупких моделях в первую очередь возникают отрывы, в пластичных – сколы [Шамина, 1981] (рис. 6, а, б) невозможно зарождение нарушений во всех участках зоны. Большой набор вторичных нарушений наблюдал С. Стоянов [1977 и др.] на моделях из влажной глины, строение и состав которых существенно варьировались. У концов начального сдвига (угол которого с осью сжатия составлял 35°), и при различных характеристиках моделей, возникали различные типы нарушений, в целом для всей совокупности моделей у концов разрыва были обнаружены все названные выше нарушения – отрывы, сбросы, надвиги, складки, сдвиги, косые к разрыву, и сдвиги, продолжающие разрыв (рис. 6, в).

Натурные геологические данные. Практически такие же результаты были получены в геологических исследованиях (рис. 6, г–и). По данным многих авторов вблизи окончания крупных сдвигов вторичные структуры растяжения (раздвиги, сбросы, сдвиги, флексуры, грабены, впадины и т.п.) располагаются в участках растяжения, тогда как вторичные структуры сжатия (надвиги, взбросы, складки, области динамометаморфизма, содвиги, стилолитовые трещины и т.п.) – в участках сжатия [Буртман и др., 1963; Суворов, 1963; Стоянов, 1977; Ramsay, Huber, 1983, 1987; Белоусов, 1985; Никола, 1992; Копп, 1995; McGrath, Davison, 1995; Семинский, 2003; и др.]. При этом наблюдалось простираание вторичных структур (кроме сдвигов) от субнормального к главному сдвигу до диагонального к нему, тогда как простираание вторичных сдвигов, как правило, было диагональным к основному разлому-сдвигу, иногда продолжавшим его (рис. 6, г–и). В.В. Белоусов [1985], рассматривая перераспределение деформаций около крупного сдвигового разлома, отмечал, что вблизи каждого из его концов должны образовываться две зоны вторичных разрывов: зона сбросов в области растяжения и зона надвигов в области сжатия (см. рис. 6, з). Простираание надвигов и сбросов

предполагалось нормальным к оси сдвига.

Вторичные структуры, обусловленные крупными разломами. Вторичные разрывы и складки, локальные физические поля (напряжений, деформаций, смещений), поднятия, депрессии и другие структуры 2-го порядка, обусловленные разломами и согласующиеся с расчётами для разрыва-трещины [Осокина, Войтенко, 2007; Осокина и др., 2008], наблюдали и описывали многие геологи: В.С. Буртман, А.В. Лукьянов и др. [1963]; С.А. Суворов [1963]; С. Стоянов [1977]; J.G. Ramsay, M.I. Huber [1983, 1987]; В.В. Белоусов [1985]; С.И. Шерман и др. [1991, 1992, 1994]; А. Никола [1992]; М.Л. Копп [1995]; А.Г. McGrath, I. Davison [1995], К.Ж. Семинский [2003]; а также Р.Л. Hancock (1985), Н.И. Мишин и др. (1992), В.Н. Войтенко, А.К. Худoley (2006), и др. Можно привести ряд примеров впечатляющего проявления подобных структур.

К ним можно отнести такие региональные структуры, как выделенные Ф.Л. Яковлевым центросимметричные поднятия и депрессии размерами в сотни километров около концевых частей Амурско-Ляодунского разлома длиной около 1200 км (см. [Осокина и др., 2008]), качественно согласующиеся с теоретическим расчетом (см. рис. 7 из [Осокина, 2002]) вертикальных движений около разрыва. Известные «динамопары» разломов, выделенные С.А. Суворовым [1963 и др.], можно считать вариантом образования крупного надвига 2-го порядка в секторе «сжатия» крупного разлома - сдвига, в обстановке, при которой надвиг с удалением от сдвига сохраняется, а не затухает.

Можно предполагать, что проявлением подобной мегарегиональной структуры (возможно – «двойной динамопары»), является правосдвиговый разлом Сан-Андреас. У его окончаний в секторах сжатия сформировались крупнейшие вторичные структуры: на северо-западе – Алеутский надвиг, на юго-востоке – подвиг Монагуа [Wallace, 1990]. Конечно, эта версия является предположением, требующим дальнейшего рассмотрения. Структуры системы разломов Сан-Андреас считаются частями зоны субдукции, что осложняет интерпретацию их образования.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ 2-ГО ПОРЯДКА У КОНЦА РАЗРЫВА В МОДЕЛЯХ И В ЗЕМНОЙ КОРЕ С НАРУШЕНИЯМИ, ПРОГНОЗИРУЕМЫМИ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ МИКРОУРОВНЯ

Выполненное в настоящей работе сопоставление данных о вторичных нарушениях,

наблюдаемых в моделях и в геомассивах, с нарушениями, прогнозируемыми на основе

- сбросовое поле
 - сдвиговое поле
 - надвиговое поле

Рис. 5. Изолинии главных напряжений и области с разными типами 3D поля напряжений микроуровня ($m = 0.001$) в малой зоне у вершины трещины в зависимости от величин главных напряжений исходного поля. А – В – при увеличении значений напряжений σ_z и постоянстве величин σ_1^{01} и σ_2^{01} ($\alpha = 35^\circ$, $k_k = 0.2$): А – $\sigma_1^{01} = -1$, $\sigma_2^{01} = -3$, $\sigma_z = 0$, $|\tau_{\max}^{01}| = 1$, Б – $\sigma_1^{01} = -1$, $\sigma_2^{01} = -3$, $\sigma_z = -3$, $|\tau_{\max}^{01}| = 1$, В – $\sigma_1^{01} = -1$, $\sigma_2^{01} = -3$, $\sigma_z = -6$, $|\tau_{\max}^{01}| = 1$; Г – Е – при одновременном росте напряжений σ_1^{01} , σ_2^{01} и постоянном значении σ_z ($\alpha = 35^\circ$, $k_k = 0.2$): Г – $\sigma_1^{01} = 0$, $\sigma_2^{01} = -2$, $\sigma_z = 0$, $|\tau_{\max}^{01}| = 1$, Д – $\sigma_1^{01} = -1$, $\sigma_2^{01} = -3$, $\sigma_z = 0$, $|\tau_{\max}^{01}| = 1$, Е – $\sigma_1^{01} = -4$, $\sigma_2^{01} = -6$, $\sigma_z = 0$, $|\tau_{\max}^{01}| = 1$

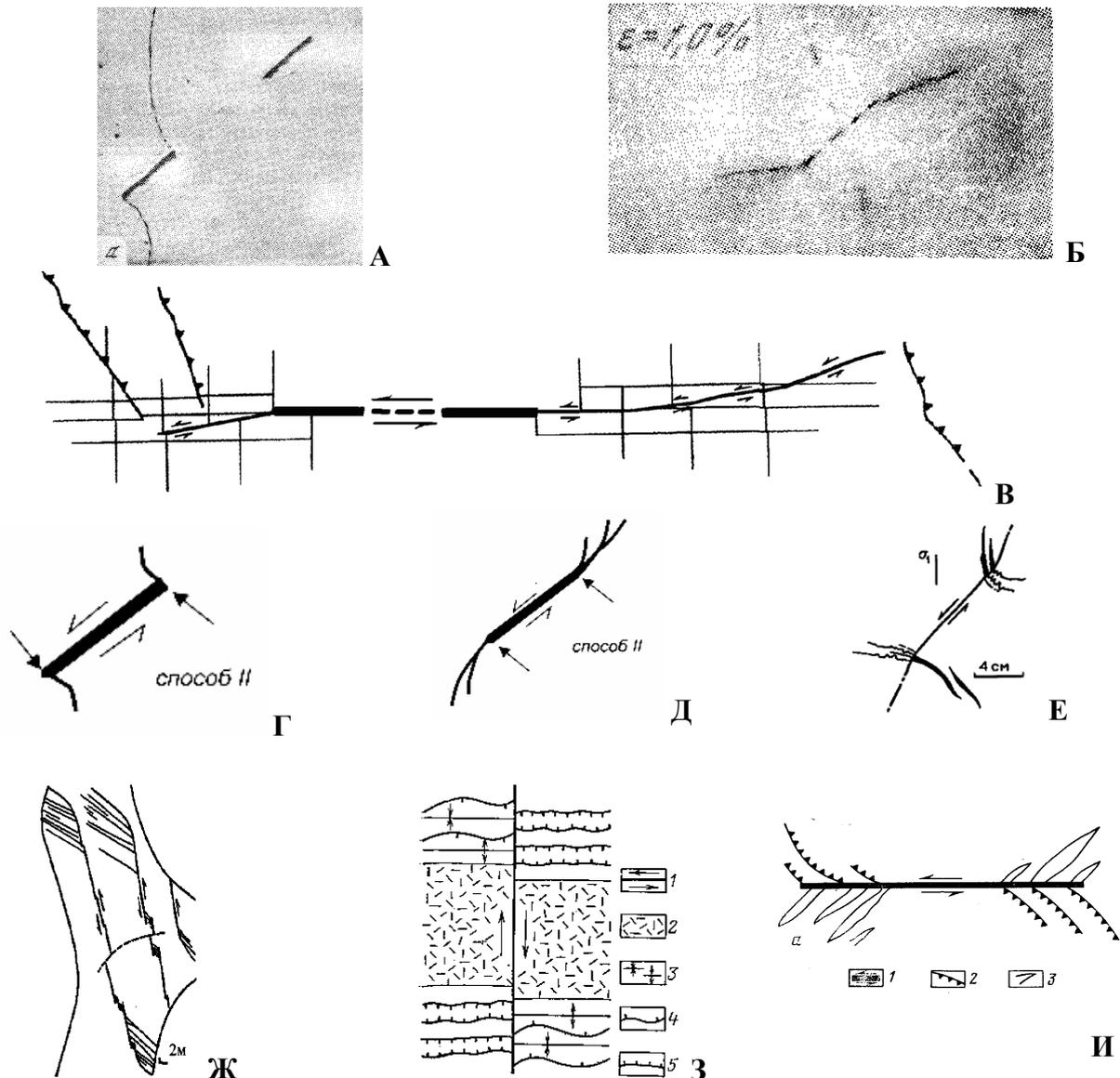


Рис. 6. Разрыв и вторичные (оперяющие) нарушения вблизи его концов по данным моделирования (А-В) и структурной геологии (Г-И). А, Б – трещина в модели и ее нарушения 2-го порядка: А – вторичные отрывы, модель из алебастра, вертикальное сжатие; Б – вторичные сдвиги, модель из парафина, горизонтальное сжатие [Шамина, 1981]; В – трещина в модели из влажной глины и ее вторичные нарушения – сдвиги и надвиги, одноосное сжатие, $\alpha = 35^\circ$, $\alpha_f = 35^\circ$ [Стоянов, 1977]. Г, Д – трещины 2-го порядка (оперяющие) у конца разрыва (сдвига): Г – трещины отрыва, образующие “кулисы” (разрез); Д – трещины скола у конца разрыва, образующие “конский хвост” (разрез и план) [McGrath, Davison, 1995]; Е – вторичные трещины у окончания небольшого сдвигового разлома в известняке: стилолитовые трещины в областях сжатия и трещины отрыва, заполненные кальцитом, в областях растяжения (зачернены) [Ramsay, Huber, 1987]; Ж – небольшая трещинная структура типа конского хвоста в граните [Ramsay, Huber, 1987]; З – деформации, приуроченные к областям затухания сдвига (вблизи окончаний сдвигового разрыва): 1 – основной сдвиг, 2 – зона без деформаций, 3 – складчатые деформации, 4 – надвиги, 5 – нормальные сбросы [Белюсов, 1985]; И – принципиальная схема расположения вторичных структур растяжения и сжатия у концов сдвигового разлома (план); 1 – разлом, 2 – структуры сжатия, 3 – структуры растяжения [Буртман и др., 1963].

расчета, обнаруживает соответствие между ними, имеющее две главные особенности. Первая особенность – совпадение совокупности вторичных нарушений разных типов в моделях и в геомассивах с совокупностью всех «расчетных» нарушений.

Причем для моделей совпадение это – точное. А для геомассивов кроме всех типов нарушений, аналогичных «расчетным», имеет место ряд других структур, отвечающих локальному полю напряжений основного разрыва – таких как стилолитовые трещины или сдвиги на участках УСж. Вторая особенность – совпадение основных характеристик отдельных нарушений при сравнении данных для моделей и геомассивов с расчетными данными, но при обязательном условии – чтобы сопоставлялись только нарушения, возникшие (или ожидаемые) на участках, одинаково расположенных относительно конца разрыва.

Обе эти особенности отчетливо проявляются и при описании вторичных нарушений в моделях и в геомассивах (см. выше), и на конкретных примерах (см. рис. 4, 6, 7).

Причиной наблюдаемого совпадения типов нарушений, прогнозируемых на основе расчета и наблюдаемых в моделях и геомассивах, можно считать *зарождение* последних в локальном поле напряжений микроуровня у конца основного нарушения. Это поле, рассчитанное для упругого слоя с трещиной, как мы видим, достаточно хорошо описывает такое же поле и в модели с дефектом – сколом, и в геомассиве с разрывом. Наличие отмеченного выше совпадения приводит к непростому выводу. Оно заставляет принять, что в основных чертах эти поля у конца разрыва в объектах различной природы достаточно близки. Близки – несмотря на несомненно существующие различия: в протяженности объектов, их реологии, физико-химических процессах при развитии деформаций и нарушений. Различий много, но приходится считать, что законы развития вторичных нарушений определяются в первую очередь не ими, а главными закономерностями: разделением приконцевой

области разрыва на участки с разными типами поля напряжений и связью изменений границ этих участков с расстоянием от конца разрыва, масштабным уровнем поля напряжений и типом регионального поля.

Очень важно отметить, что таким образом названные выше количественные закономерности связаны не с неограниченно растущими напряжениями у самого конца трещины или разрыва, а с сугубо конечными величинами. Благодаря этому данные закономерности, полученные для упругой среды, остаются действительными для моделей и для геомассивов, которые ведут себя как упруго-пластичные среды. Данный подход позволяет объяснить генезис каждого из разных типов модельных и натуральных нарушений 2-го порядка. Из расчетов поля напряжений микроуровня у конца трещины следует, что на участках УРс, УСд, УСж прогнозируются три пары вторичных нарушений: отрывы и сбросы, два типа сдвигов, надвиги (взбросы) и складки. Каждую пару структур связывает общая область зарождения и общее поле напряжений. Рассматривая вторичные нарушения в моделях или в геомассивах с разрывом мы видим, что на участках, отвечающих УРс, возникают *отрывы* или *сбросы* (рис. 6, а, б), [Буртман и др., 1963; Стоянов, 1977; Шамина, 1981; Белоусов, 1985; Николая, 1992]. На участках УСд возникают *сдвиги* (рис. 6, в, г), [Буртман и др., 1963; Шамина, 1981; Стоянов, 1977]. На участках УСж возникают *надвиги* и *складки, стилолитовые трещины* (рис. 6, в, г, з, и), [Буртман и др., 1963; Стоянов, 1977; Белоусов, 1985; Николая, 1992].

Таким образом, приходится заключить, что в моделях и в геомассивах зарождение вторичных нарушений у конца разрыва происходит под действием напряжений микроуровня. И что в процессе развития такого «зародыша» растущее нарушение достаточно долго сохраняет его кинематику и наследует его ориентацию, что в значительной мере влияет на развитие крупного разрыва 2-го порядка.

РОСТ НАРУШЕНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА У КОНЦА РАЗРЫВА И ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗНЫХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭТОТ ПРОЦЕСС

Выше было показано, что «зародыши» разрывов 2-го порядка возникают в малой зоне у конца разрыва под действием напряжений микроуровня, которые определяют место появления, природу, кинематику и ориентацию этих «зародышей». Был выполнен расчет поля напряжений микроуровня и прогноз вторичных нарушений в

разных частях этой малой зоны (рис. 2–5). Следующими задачами данной работы стали:

- а) расчет локальных напряжений более высоких уровней и изучение их особенностей;
- б) поиск условия, определяющего возможность развития «зародыша» в крупный разрыв 2-го порядка;

в) прогноз развития разрывов 2-го порядка с известным участком возникновения (генезисом) и изучение их характеристик.

Для решения этих задач был проведен расчет полей напряжений мезо-, субмакро- и макроуровня (параметры масштаба m - 0.01, 0.1, 1.25) у окончаний трещины сдвига 1-го порядка.

Изучение этих полей позволило выполнить прогноз развития разрывов 2-го порядка в условиях преобладания внешнего сжатия. Эти вопросы рассматриваются как в данной работе, так и в статье [Осокина и др., 2008]. Поэтому здесь результаты изучения полей напряжений от мезо- до макроуровня изложены кратко, в основном как база для перехода к прогнозу нарушений 2-го порядка.

Следует отметить, что картина распределения у конца разрыва областей с полями напряжений разных типов существенно зависит от уровня поля. Так, при переходе от поля микроуровня ($m = 0.001$) к полю макроуровня ($m = 1.25$) и в случае исходного поля одноосного сжатия, область сбросового поля «сжимается» настолько, что визуально становится неразличимой, «исчезает». В результате в макромасштабе наблюдается замещение сбросового поля сдвиговым – рис. 7, в, е (см. также [Осокина и др., 2008], рис. 5, а-в).

А для случая внешнего поля трехосного сжатия ($\sigma_1^0 = -1$, $\sigma_2^0 = -3$, $\sigma_3^0 = -3$) с ростом масштаба m изменяется надвиговое поле – оно сжимается, а затем «исчезает», заменяясь сдвиговым (рис. 5, г-е).

Анализ полей напряжений разных уровней показывает, что возможность превращения микро-разрыва в крупный разрыв 2-го порядка определяется соотношением типов полей напряжений всех изучаемых уровней на участке развития разрыва 2-го порядка. Так, если эти типы полей одинаковы (то есть при разрастании микро-разрыва он на разных участках развития остается в поле одного и того же, «своего» типа, – в котором он возник), а напряжения у его конца выше прочности, то он может достичь крупных размеров – стать макро-разрывом.

В случае несовпадения типа полей любой пары соседних уровней (например, полей микро- и мезоуровня) оказывается, что после выхода «зародыша» разрыва 2-го порядка на границу этих полей его рост блокируется, и разрыв не формируется. Поля разных уровней были рассчитаны для ряда вариантов внешнего поля напряжений, обычных для земной коры (одноосное сжатие, варианты двуосного и трехосного сжатия с малым средним напряжением σ_m^0). Схемы характеристик полей напряжений разных уров-

ней для двух вариантов исходного поля приведены на рис. 7, в, е, и (см. также рис. 5 статьи [Осокина и др., 2008] в настоящем сборнике).

На основе анализа схем распределения областей с полями напряжений различного типа, построенных для напряжений разных уровней, был выполнен прогноз развития вторичных нарушений. Для тех же двух вариантов исходного поля были построены схемы вторичных структур (ожидаемых у конца разрыва) в микро- и субмакромасштабах, отдельно для сколов, отдельно для отрывов и складок (рис. 7).

На рис. 7, а приведена схема всех типов сколовых нарушений 2-го порядка, обусловленных полем микроуровня. В малой зоне у конца сдвига 1-го порядка ожидаются: сдвиги двух типов, надвиг и сброс. Эта схема отвечает обоим вариантам исходного поля: и одноосному сжатию ($\sigma_1^0 = 0$, $\sigma_2^0 = -2$, $\sigma_z = 0$), и трехосному сжатию ($\sigma_1^0 = -1$, $\sigma_2^0 = -3$, $\sigma_z = -3$). На рис. 7, б приведена схема несколовых вторичных структур – отрыва и складки для поля микроуровня и тех же двух случаев исходного поля.

При переходе к полям более высоких (субмакро- и макро-) уровней, в случае одноосного сжатия возможность развиваться имеют: надвиг (или складка), сдвиги и отрыв, а сброс оказывается заблокированным – при выходе на границу сдвигового поля (рис. 7, д, е). Для исходного поля трехосного сжатия (одноосного девиаторного растяжения) при переходе к полям субмакро- и макроуровней блокируются надвиги и складки, но могут развиваться сбросы (или отрывы) и сдвиги (рис. 7, ж, з).

На рис. 7, г, д, ж, з, показаны наборы вторичных структур, ожидаемых согласно расчету у конца разрыва в субмакро- и макромасштабе для обоих случаев исходного поля. Каждое из этих нарушений может достичь существенных размеров и стать крупной структурой, т.к. поле напряжений указанных выше уровней поддерживает их развитие. Несколько выпадает из этой совокупности нарушений случай отрыва на рис. 7, з, длина которого показана очень ограниченной. В этом случае длина области, в которой напряжения σ_1^1 – растягивающие, составляет около одной трети от полуширины окна расчета h , а область, где σ_1^1 больше прочности на отрыв, – еще заметно меньше, так что отрыв, если и разовьется, будет весьма небольшим, что и показывает рис. 7, з.

Следует отметить еще один аспект полученных результатов, который может иметь практическое значение. Было показано, что характер распределения у конца основного разрыва областей с полями напряжений разного типа (как для напря-

жений различных уровней, так и в пределах одного уровня) определяется параметрами тензора напряжений внешнего (регионального) поля. Таким параметром в первую очередь является вид этого тензора, характеризуемый коэффициентом Лодена μ_σ или отношением величин главных напряжений $\sigma_1^0 : \sigma_2^0 : \sigma_3^0$ (рис. 5, рис. 7, в, е, и). Таким образом, можно заключить, что парагенезы вторичных нарушений у окончания сдвигового

разрыва (трещины, разлома) должны отражать характер и параметры регионального поля напряжений, действующего в природном массиве во время их образования. Можно подойти к этим результатам и под другим углом зрения, как к прямой задаче практики – зная региональное поле напряжений и ориентацию разрыва, можно прогнозировать те вторичные нарушения, развитие которых может ожидать в конкретном случае.

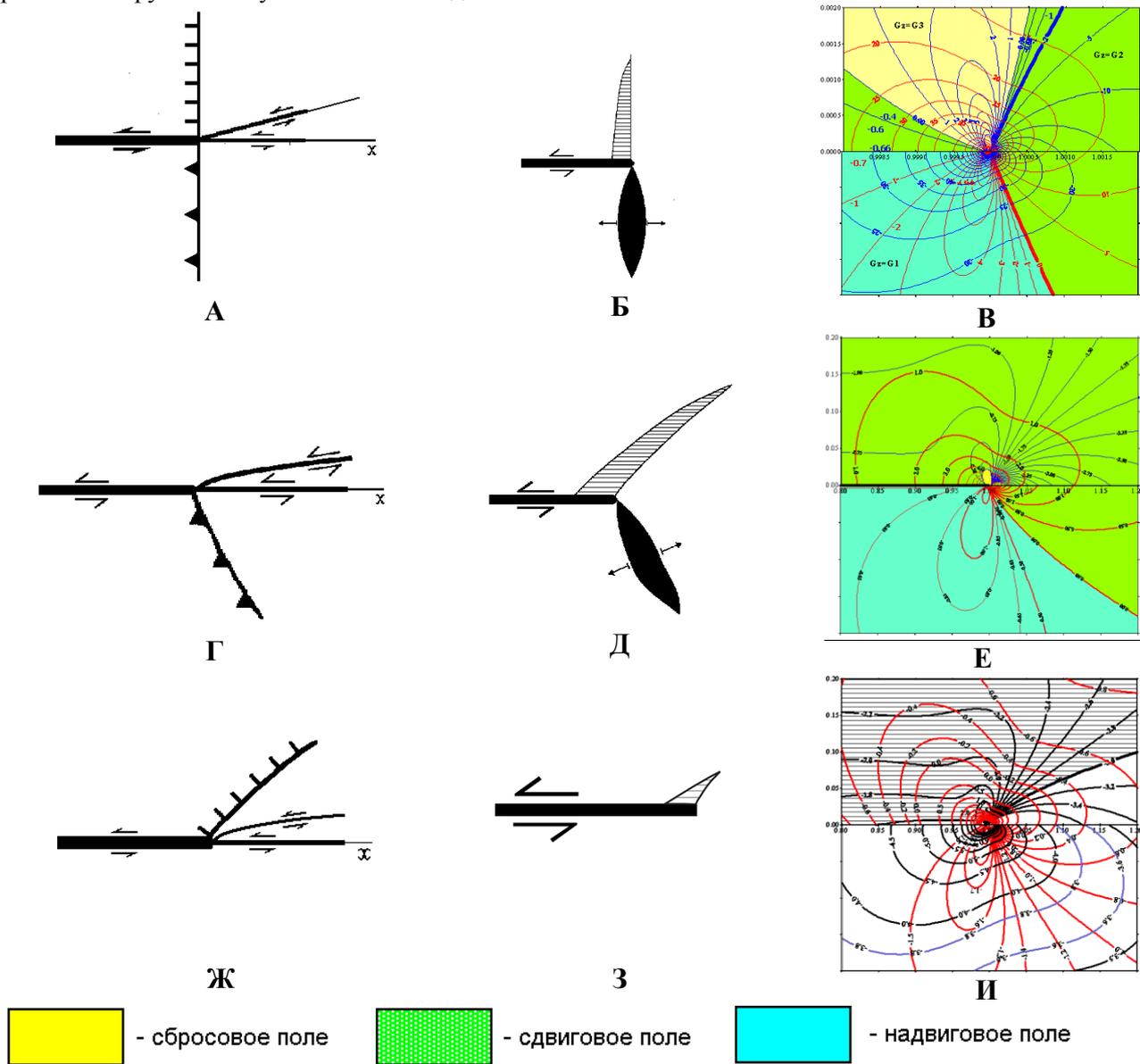


Рис. 7. Прогноз нарушений 2-го порядка около сдвигового разрыва 1-го порядка по локальному полю напряжений разрыва разных масштабных уровней. Показаны схемы прогноза для двух вариантов исходного поля напряжений: для одноосного сжатия ($\sigma_{1,2,3} = 0, -2, 0$, $\mu_\sigma = 1$, $\alpha = 35^\circ$, $\alpha_f = 35^\circ$, $k_k = 0,2$) и для трехосного сжатия ($\sigma_{1,2,3} = -1, -3, -3$; $\mu_\sigma = -1$, $\alpha = 30^\circ$, $k_k = 0,2$). А, Б – сколы (А), отрывы и складки (Б) 2-го порядка, отвечающие полю микроуровня для обоих вариантов исходного поля ; Г, Д, Ж, З – вторичные нарушения, отвечающие полю напряжений субмакроуровня: сколы (Г, Ж), отрывы и складки (Д, З). Схемы прогноза Г, Д отвечают исходному полю одноосного сжатия, схемы Ж, З – полю трехосного сжатия. Локальное поле напряжений субмакроуровня для этих вариантов исходного поля показано на рис. 7, Е и рис. 7, И; локальное поле напряжений микроуровня для случая одноосного сжатия показано на рис. 7, В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые рассчитываются и исследуются поля напряжений нескольких масштабных уровней и выполняется прогноз опережающих разрывов 2-го порядка у окончания разрыва (вертикального сдвига) 1-го порядка, нарушающего слой, в условиях сжатия. Расчеты проведены на основе решения упругой задачи для плоскости с трещиной сдвига и наложения на полученное поле поля одноосного сжатия. Расчеты для трещины рассматриваются как математическое моделирование поля напряжений, обусловленного тектоническим разрывом, а сама трещина – как модель разрыва.

Показано, что для анализа напряжений и генезиса вторичных нарушений недостаточно разделять окрестности окончания основного нарушения на два сектора (сектора растяжения и сжатия), определяемые по одной характеристике поля напряжений или деформаций, как это было принято ранее.

Предлагается использовать для этих целей разделение окрестностей вершины трещины (разрыва) на участки *пересечения секторов* «растяжения» и сжатия, определенных для каждого из главных напряжений 2D поля (в плоскости, нормальной разрыву). Показано, что могут быть выделены три таких участка разного типа, приконцевые участки: «растяжения – растяжения» – УРс, «растяжения – сжатия» или сдвигания – УСд, «сжатия-сжатия» – УСж.

Изучена геометрия этих приконцевых участков и ее зависимости от параметров механизма (задачи). Показано, что она определяется в первую очередь масштабным уровнем поля – при переходе от поля микроуровня к полям более высоких уровней площадь участков УРс и УСж растет, участка УСд – падает.

На приконцевых участках УРс, УСд, УСж выполнено: построение поля напряжений 3D, выделение границ областей с полями разного типа и прогноз отвечающих этим полям нарушений (разрывов, складок) 2-го порядка.

Показано, что для ряда случаев внешнего (регионального) поля, например для поля одноосного сжатия, на каждом из приконцевых участков возникает «свое» поле микроуровня, со своим максимумом напряжений – очагом зарождения вторичных нарушений. В таких случаях у окончания трещины (разрыва) существуют три «особые точки» (микрообласти) – три разных очага роста вторичных нарушений, очага разрушения. Заметим, что при используемом ранее подходе у конца разрыва предполагалось наличие областей (и структур) разрушения двух типов – растяжения и сжатия

Показано, что границы приконцевых участков и границы областей с полями разного типа могут как совпадать, так и сильно различаться. С участками УРс, УСд, УСж обычно связаны (или тяготеют к ним) сбросовое, сдвиговое, надвиговое поле, соответственно. На этих участках, если они активны, прогнозируются пары нарушений: сбросы и отрывы (раздвиги), сдвиги, надвиги (взбросы) и складки. Но в зависимости от параметров исходного поля напряжений и от уровня локального поля распределение областей с полями разных типов может существенно измениться.

Исследованы закономерности этих изменений. Показано, что они приводят к росту площади для полей одного типа и ее падению для полей другого типа. Сильное уменьшение площади одного из полей приводит к ликвидации отвечающего ему очага образования нарушений. Показано, что на микроуровне могут существовать три варианта активности приконцевых участков, определяемые характером (видом) исходного поля. Для первого варианта возможно образование микроразрывов – «зародышей» во всех трех приконцевых участках, для второго варианта – в двух участках, для третьего – в одном из них.

Рассмотрены и обобщены натурные и модельные данные о разрывах 2-го порядка около окончаний основного разрыва. Проведено сопоставление этих данных с результатами прогноза вторичных нарушений у конца трещины на основе расчета поля напряжений микроуровня. Показано хорошее соответствие между ними. Исходя из этого сделан вывод, что поле напряжений микроуровня у конца основного разрыва определяет зарождение разрывов 2-го порядка, их физическую природу, их кинематику, а также ориентацию микроразрыва – «зародыша».

Изучение 2D и 3D напряжений полей более высоких уровней (от мезо- до макроуровня) в окрестностях окончания трещины позволило заключить, что развитие нарушения (разрыва) 2-го порядка определяется соотношением типов полей напряжений микроуровня и всех более высоких уровней. Совпадение типов полей соседних уровней обуславливает возможность развития разрыва 2-го порядка после перехода его под контроль поля более высокого уровня. Несовпадение типов полей соседних уровней приводит к остановке роста (блокированию) разрыва 2-го порядка на границе этих полей. В зависимости от характера исходного поля напряжений, возможны разные варианты развития микроразрыва 2-го порядка: от превращения в

макросдвиг до остановки роста в пределах поля микроуровня.

Результаты изучения вторичных нарушений впервые позволяют понять их генезис, его связь с местом их образования и параметрами внешнего поля напряжений, т. е. дать физическую интерпретацию природных нарушений 2-го порядка и условий в земной коре на момент их образования. До последнего времени объяснение генезиса оперяющих нарушений 2-го порядка у окончания разлома оставалось неоднозначным. Сопоставление природных данных по этим нарушениям с результатами их прогноза путем расчета показывает, что значительная часть этих нарушений формируется в локальном поле разлома у его концов и объясняет их важную особенность – различную ориентацию плоскостей (и часто различную кинематику нарушений) в разных

крыльях основного разлома.

Все закономерности, полученные при анализе расчетов для упругой среды, должны оставаться действительными для моделей и геомассивов, поскольку они определяются не огромными напряжениями у концов трещины или разлома, а такими конечными величинами, как значения главных напряжений исходного поля и т.п. Результаты могут быть полезны при решении ряда прямых и обратных задач геодинамики, связанных с разломами и изучением их сейсмогенности. Кроме того, парагенезы вторичных нарушений, развившихся вблизи окончаний разлома, могут быть использованы для оценки вида тензора напряжений регионального поля. Эти данные могут быть важны для «перебора» решений при уточнении представлений об очагах сильных землетрясений, параметрах их моделей и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

- Белюсов В.В.* Основы структурной геологии. М.: Недра. 1985. 207 с.
- Буртман В.С., Лукьянов А.В., Пейве А.В., Руженцев С.В.* Горизонтальные смещения по разломам и некоторые методы их изучения // Разломы и горизонтальные движения земной коры. Труды ГИН, вып. 80. М.: Изд. АН СССР. 1963. С. 5–33.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
- Копп М.Л.* Структуры латерального выжимания в альпийско-гималайском коллизионном поясе. М.: Научный Мир. 1997. 314 с.
- Костров Б.В., Фридман В.Н.* Механика хрупкого разрушения при сжатии // Физика очага землетрясений. М.: Наука. 1975. С. 30–45.
- Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра. 1996. 447 с.
- Николя А.* Основы деформации горных пород. М.: Мир. 1992.
- Осокина Д.Н.* Моделирование тектонических полей напряжений, обусловленных разрывами и неоднородностями в земной коре // Экспериментальная тектоника: методы, результаты, перспективы. М.: Наука. 1989. С. 163–197.
- Осокина Д.Н.* Исследование механизмов деформирования массива в зоне разрыва на основе изучения трехмерного поля напряжений (математическое моделирование) // М.В.Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука. 2000. С. 220–245.
- Осокина Д.Н.* Поле напряжений, разрушение и механизмы деформирования геосреды в зоне разрыва (математическое моделирование) // Тектонофизика сегодня. М.: Изд. ОИФЗ РАН. 2002. С. 129–174.
- Осокина Д.Н.* Скальвающие кулоновы напряжения и области различного деструктивного поведения массива в окрестностях разрыва // Очерки геофизических исследований. 2004. М.: Изд. ОИФЗ РАН. С. 351–359.
- Осокина Д.Н.* Поле напряжений в окрестностях конца разлома как фактор, определяющий развитие нарушений второго порядка, характер роста разлома, разрушения массива и сейсмичности // Фундаментальные проблемы геотектоники. Материалы XL Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС. 2007а. С. 62–66.
- Осокина Д.Н.* Сейсмогенные области вторичного разрушения вблизи активного разлома и в малой зоне у его конца, связь их геометрии с полем напряжений и прочностью массива (на основе расчета кулоновых напряжений) // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сборник трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В.Федынского. М.: Научный мир. 2007б. С. 270–278.
- Осокина Д.Н.* Поле кулоновых напряжений и области разрушения в окрестности разрыва // Настоящий сборник. М.: Изд. ИФЗ РАН. 2008.
- Осокина Д.Н., Войтенко В.Н.* Концепции описания тектонического разрыва. Локальные поля напряжений и деформаций разрыва-трещины, их роль в образовании областей разрушения и приразломных структур, их связь с амплитудой смещения // Фундаментальные проблемы геотектоники. Материалы XL Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС. 2007. С. 67–70.
- Осокина Д.Н., Ребецкий Ю.Л.* Закономерности разрушения кулоновской среды (на примере

- прогноза областей предельного состояния геомассива в зоне влияния разлома) // Тезисы докладов 7-ой международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Геофизическая обсерватория «Борок», 17–21 октября 2005. М.: Изд. ИФЗ РАН. 2005. С. 43–44
- Осокина Д.Н., Фридман В.Н.* Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 74–119.
- Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю.* Метод моделирования локальных полей напряжений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 139–162.
- Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л., Войтенко В.Н.* Тектонофизический анализ полей напряжений, деформаций, нарушений второго порядка около единичного разлома и возможности его практических приложений // Девятые геофизические чтения им. В.В. Федынского. Тезисы докладов. М.: 2007. С. 75–76.
- Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л., Войтенко В.Н.* Изучение тектонического разрыва как объекта, объединяющего мегатрещину, ее поля (напряжений, деформаций), и вторичные структуры (тектонофизический анализ) // Настоящий сборник. М.: Изд. ИФЗ РАН. 2008.
- Поль Б.* Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения // Разрушение. Т. 2. «Математические основы теории разрушения». Гл. 4. Ред. Либовиц. М.: Мир. 1975. С. 336–520.
- Ребецкий Ю.Л.* Методология исследования напряженно-деформированного состояния и свойств массивов горных пород в естественном залегании // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Новосибирск: Изд. СО РАН. 2003. С. 145–149.
- Ребецкий Ю.Л.* Напряженно-деформированное состояние и механические свойства массивов горных пород по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин: Автореф. дисс. докт. физ.-мат. наук. М.: Изд. ОИФЗ. 2003. 54 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: Наука. 2007. 406 с.
- Райс Дж.* Математические методы в механике разрушения // Разрушение. Том 2 «Математические основы теории разрушения». Гл. 3. М.: Изд. Мир. 1975. С. 204–335.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектоно-физический аспект. Новосибирск: Сиб. Изд. СО РАН, филиал «ГЕО». 2003. 244 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика очага и предвестники землетрясения. М.: Наука. 2003. 470 с.
- Стоянов С.* Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с.
- Суворов А.С.* Главные разломы Казахстана и Средней Азии. // Разломы и горизонтальные движения земной коры. Труды ГИН, вып. 80. М.: Изд. АН СССР, 1963. С. 173–237.
- Чернышев С.Н.* Трещины горных пород. М.: Наука. 1983. 240 с.
- Шамина О.Г.* Модельные исследования физики очага землетрясений. М.: Наука. 1981. 192 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука СО. 1983. 112 С.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Лобацкая Р.М., Адамович А.Н., Трусков В.А., Бабичев А.А.* Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука СО. 1991. 262 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Адамович А.Н., Лобацкая Р.М., Лысак С.В., Леви К.Г.* Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения. Новосибирск: Наука СО. 1992. 228 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Адамович А.Н., Буддо В.Ю.* Разломообразование в литосфере. Зоны сжатия. Новосибирск: Наука СО. 1994. 254 с.
- McGrath A.G., Davison I.* Damage zone geometry around fault tips // J. Of Struct. Geology. 1995. V. 17, N 7. P. 1011–1024.
- Osokina D.N. and Rebetsky Yu.L.* The high stress action and geo-massif fracturing in a zone of the fault influence based on the calculation of the Coulomb stress fields // Regularities of the structure and evolution of the geospheres. Proceedings of VII International Interdisciplinary Scientific Symposium and International Geoscience programme (IGCP-476). Vladivostok. 2005: P. 33–37.
- Osokina D.N., Yakovlev F.L., Voitenko V.N.* Second rank fractures and 3D stress & strain local fields of fault with sides friction as ones development stages evidence: theory, experiment and natural examples (on the basis of «fracture-crack» and «fracture – shear zone» models study) // Geophysical Research Abstracts. Vol. 9. 10465. 2007.
- Petit J.-P., Barquins M.* Can natural faults propagate under Mode II conditions ? // Tectonics. 1988. Vol. 7. P. 1243–1256.
- Ramsay J.G., Huber M.I.* The techniques of modern structural geology. V. 1. Strain analysis. London: Acad. Press. 1983. 307 p.

Ramsay J.G., Huber M.I. The techniques of modern structural geology. V. 2. Fold and fractures. London: Acad. Press. 1987. P. 308–700.

Wallace R.E., (editor). The San Andreas Fault System, California.: USGS Professional Paper 1515, 1990. 283 p.