

ИЗУЧЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗРЫВА КАК ОБЪЕКТА, ОБЪЕДИНЯЮЩЕГО МЕГАТРЕЩИНУ, ЕЕ ПОЛЯ (НАПРЯЖЕНИЙ, ДЕФОРМАЦИЙ), И ВТОРИЧНЫЕ СТРУКТУРЫ (ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ)

Д.Н. Осокина, Ф.Л. Яковлев, В.Н. Войтенко

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

В структурной геологии понятие и описание тектонического разрыва изначально были введены и использовались при геологическом картировании для целей описания границы между контактирующими массивами горных пород разного состава и возраста. Разрывы

рассматривались либо как поверхности (в частности, как плоскости), либо как объемные тела, в обоих случаях использовалась концепция бесконечного разрыва (см. [Николя, 1992; Ramsay, Huber, 1983, 1987] и др. учебные пособия).

КОНЦЕПЦИИ ОПИСАНИЯ РАЗРЫВОВ В ТЕКТОНОФИЗИКЕ

В тектонофизике тектонический разрыв и вся обусловленная им структура – смещения, деформации, напряжения, вторичные нарушения и складки (центральную часть которой вслед за работой [Шерман и др., 1983] называют зоной его динамического влияния) – один из основных объектов исследования. В тектонофизике и геомеханике можно выделить три концепции (или модели) описания единичного разрыва: 1) зона скалывания (сдвига), 2) дислокация, 3) трещина [Осокина, Войтенко, 2007]. Каждая модель имеет свои особенности структуры локальных полей (напряжений и деформаций) и вторичных нарушений.

1. Концепция описания разрыва как зоны скалывания бесконечной длины отвечает натурным данным, экспериментам и механической модели, задаваемой протяженной зоной конечной ширины, деформируемой за счет движения жестких блоков в различных условиях нагружения (при сдвигании, сжатии или растяжении вкрест к оси зоны, сочетании сдвига со сжатием или растяжением). Большой вклад в изучение зон сдвига внесли Г. Клоос [Cloos, 1928], В. Ридель [Riedel, 1929], М.В. Гзовский [1963, 1975], Дж. Чаленко [Tchalenko, 1968], С. Стоянов [1977], С.И. Шерман и др., [1983, 1991, 1992, 1994], С.А. Борняков (1986, 1990), К.Ж. Семинский [2003], и др. Внутри такой зоны при деформации простого сдвига возникает напряженное состояние чистого сдвига, которому отвечает развитие нескольких систем трещин: диагональные трещины отрыва, складки и несколько типов трещин скола (см. рис. 1, А из работы [Стоянов, 1977]). Амплитуда перемещения по зонам скалывания, как правило, не определяется, и концы их не рассматриваются. Напряжения, деформации и структуры разрушения в зонах скалывания различного типа (отли-

отличающихся от зон сдвига) исследовались на моделях(и реже теоретически) рядом авторов: М.В. Гзовский [1963, 1975], С. Стоянов [1977], С.И. Шерман и др. [1983], С.А. Борняков (1981), А.С. Григорьев и др., (1985, 1987), А.В. Михайлова (1985, 2002), Ю.Л. Ребецкий (1987), П.Л. Ханкок [Hancock, 1985], К.Ж. Семинский [2003], и др.

2. Концепция описания разрыва как дислокации конечной длины перенесена из физики кристаллов и используется в основном западными учеными. Разрыв описывают ограниченной плоскостью, на которой задается скачок смещений (постоянный или изменяющийся вдоль нее по выбранному закону), и рассчитывают возникающие около разрыва напряжения (М.А. Chinnery [1969]; Т. Maruyama (1969); F. Press (1965); D. Healy, G. Yielding, N. Kusznir [2004]; и др.). При расчетах используют математический аппарат упругой теории дислокаций. Пример результатов подобного расчета – двумерные карты напряжений τ_{\max} и прогноза (по ним) вторичных нарушений М.А. Chinnery [1969].

3. Концепция описания разрыва как трещины скола конечной длины основана на анализе натурных данных, теоретических расчетов и экспериментов. Здесь термин «трещина» используется в его механическом понимании, как объект механики разрушения – нарушение сплошности среды, вызывающее локальное возмущение полей напряжений и деформаций в окружающем объеме. В геологии такому нарушению могут отвечать разрывы в широком диапазоне размеров, от долей метра до сотен километров и более. При расчетах трещину представляют ограниченной плоскостью. Задается внешнее поле напряжений и взаимодействие берегов, а скачок смещений и локальные напряжения в окрестно-

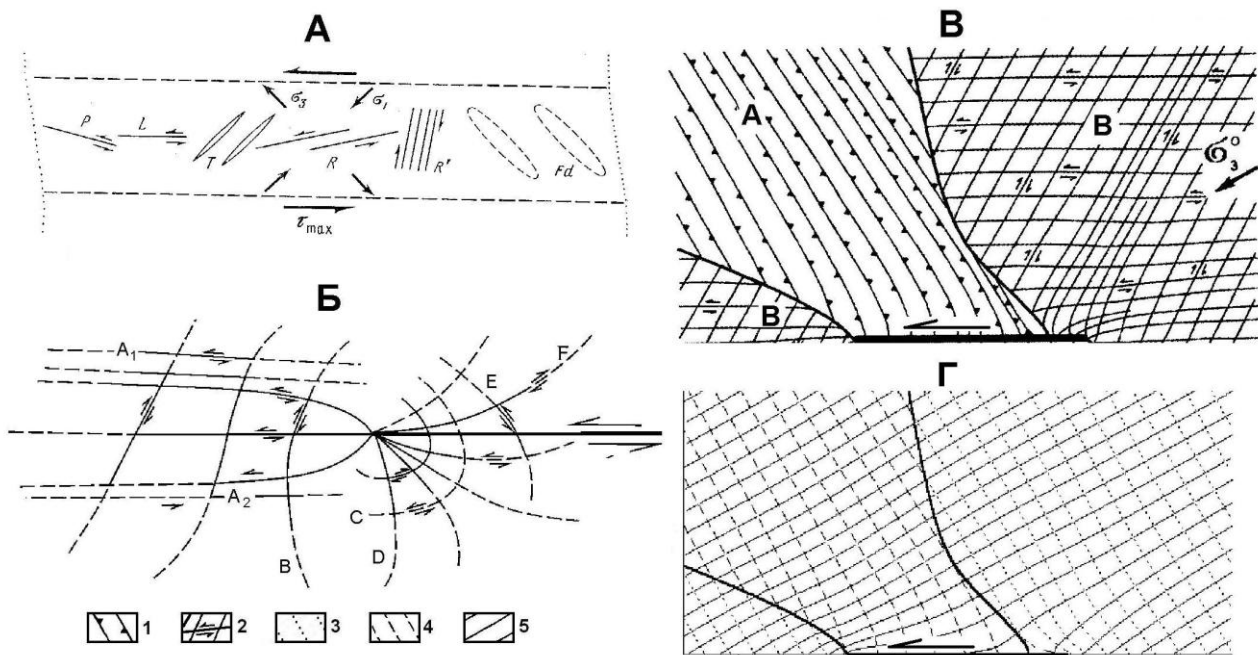


Рис. 1. Разные механические концепции (модели описания) разрыва: зона сдвига, дислокация, трещина. А. Зона сдвига и ее вторичные нарушения – обобщение модельных, натуральных и расчетных данных [Стоянов, 1977]. Б. Дислокация и прогнозируемые для нее вторичные нарушения (сдвиги), построенные по траекториям τ_{\max} — одноосное сжатие, угол α (разрыва с осью сжатия) 30° , расчет [Chinnery, 1969]. В. Разрыв-трещина и траектории следов скальвающих напряжений, определяющие (в областях их повышения) ориентацию и тип прогнозируемых вторичных нарушений (сдвигов, надвигов, сбросов); построены по траекториям главных напряжений 3D поля, при угле скальвания 30° — одноосное сжатие, угол $\alpha = 30^\circ$, расчет [Осокина, 2000]. Г. Разрыв-трещина и траектории главных напряжений 3D для того же случая, расчет [Осокина, 2000]

стях трещины определяют из математического решения: Е.М. Anderson (1951), К. Kasahara (1957), Б.В. Костров, В.Н. Фридман [1975], Д.Н. Осокина и В.Н. Фридман [1987], Д.Н. Осокина [2000, 2004, 2007] и др.

В природе и на моделях смещениям на разломе и напряжениям вблизи него более точно отвечает концепция разрыва-трещины.

Решение 2D задачи теории упругости для

трещины сдвига (конечной длины) с трением в обстановке сжатия получено в общем виде Б.В. Костровым и В.Н. Фридманом [1975], а в работе Д.Н. Осокиной и В.Н. Фридмана [1987] решение двумерной задачи для сдвиговой трещины (разрыва) с трением при сжатии было представлено в аналитической форме и доведено до реализации и построения карт параметров.

ДВУМЕРНОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗРЫВА-ТРЕЩИНЫ

Двумерное поле разрыва-трещины (трещины скола конечной длины) рассчитывалось как решение задачи теории упругости о равновесии упругой плоскости, нагруженной на бесконечности сжимающими усилиями и нарушенной разрывом (трещиной) с сомкнутыми берегами (рис. 2, А), на которых действует закон сухого трения [Осокина, Фридман, 1987]. Было исследовано распределение вблизи разрыва характеристик тензора напряжений в зависимости от параметров задачи: ориентации разрыва, вида исходного поля и т.д. [Осокина, Фридман, 1987] (рис. 2, Б-Г).

Трехмерное локальное поле напряжений разрыва-трещины было получено для слоя с разрывом, в предположении, что на берегах дей-

ствует трение, деформации малы, вторичные нарушения еще не возникли [Осокина, 2000]. Принималось, что исходное поле напряжений есть поле трехосного сжатия (рис. 3, А), два главных напряжения которого лежат в плоскости слоя xu , нормальной к разрыву, а третье – постоянно (вариант I) или задано весом массива (вариант II). 3D поле получали наложением поля одноосного сжатия (по оси z) на 2D поле разрыва в плоскости xu , полученное в [Осокина, Фридман, 1987]. Исследовались характеристики 3D поля в зависимости от параметров задачи для ряда ее вариантов (механизмов деформирования), строились карты их распределения около разрыва [Осокина, 2000, 2004, 2007; Osokina et al., 1992] (см. рис. 1, В, Г; рис. 3, Б-Г).

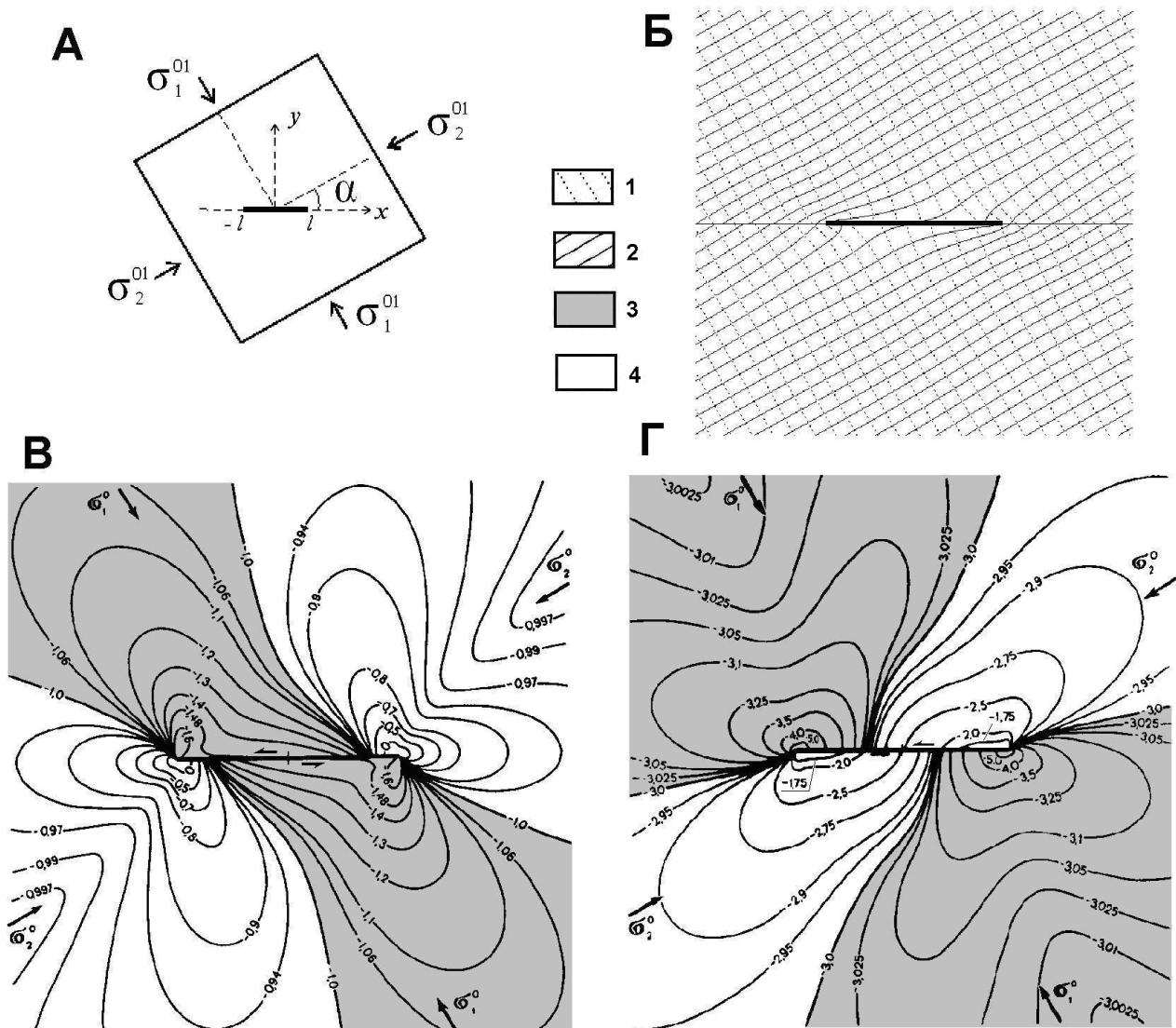


Рис. 2. Локальное поле напряжений 2 D, обусловленное сдвиговым разрывом. Случай левой подвижки [Осокина, Фридман, 1987]. **А** – постановка задачи; **Б – Г** – карты характеристик поля разрыва в координатах $x/l - y/l$ ($2l$ – длина разрыва), параметры задачи: $\sigma_1^0 = -1, \sigma_2^0 = -3, \alpha = 30^\circ, k = 0.1$. **Б** – траектории главных напряжений σ_1^1 и σ_2^1 ; **В, Г** – изолинии главных напряжений; σ_1^1 (**В**) и σ_2^1 (**Г**): выделены сектора «растяжения», где величины σ_1^1 и σ_2^1 выше, чем в исходном поле, и сектора «сжатия», где σ_1^1 и σ_2^1 ниже этих значений

1, 2 – траектории осей главных напряжений: σ_1^1 (1) и σ_2^1 (2); 3, 4 – сектора «растяжения» (3) и «сжатия» (4) на картах изолиний напряжений; σ_1^1 (**В**) и σ_2^1 (**Г**)

КОМПЛЕКСНЫЙ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ РАЗРЫВА КАК ТРЕЩИНЫ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ: ОСНОВЫ И ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами предлагается и развивается подход к описанию тектонического разрыва с позиций тектонофизики и механики, дополняющий представление о нем, принятое в геологии, рассмотрением его как разрыва-трещины [Осокина, Войтенко, 2007; Осокина и др., 2007; Osokina et al., 2007]. Тем самым разрыв рассматривается как поверхность разрушения конечной длины и ширины, окруженная конечным трехмерным объемом, в котором в результате смещения крыльев разрыва возникает неодно-

родное локальное 3D поле напряжений, вызывающее развитие структур второго порядка (разрывов, складок и т.д.). Изучение этого поля является и инструментом, и одной из задач данного исследования. Вторая его задача – изучение характеристик разрывов второго порядка (вида разрушения, ориентации плоскости, кинематического типа). Основой данного подхода является математическое моделирование локального поля напряжений, возникающего около разрыва (вертикального сдвига) с трением берегов после их

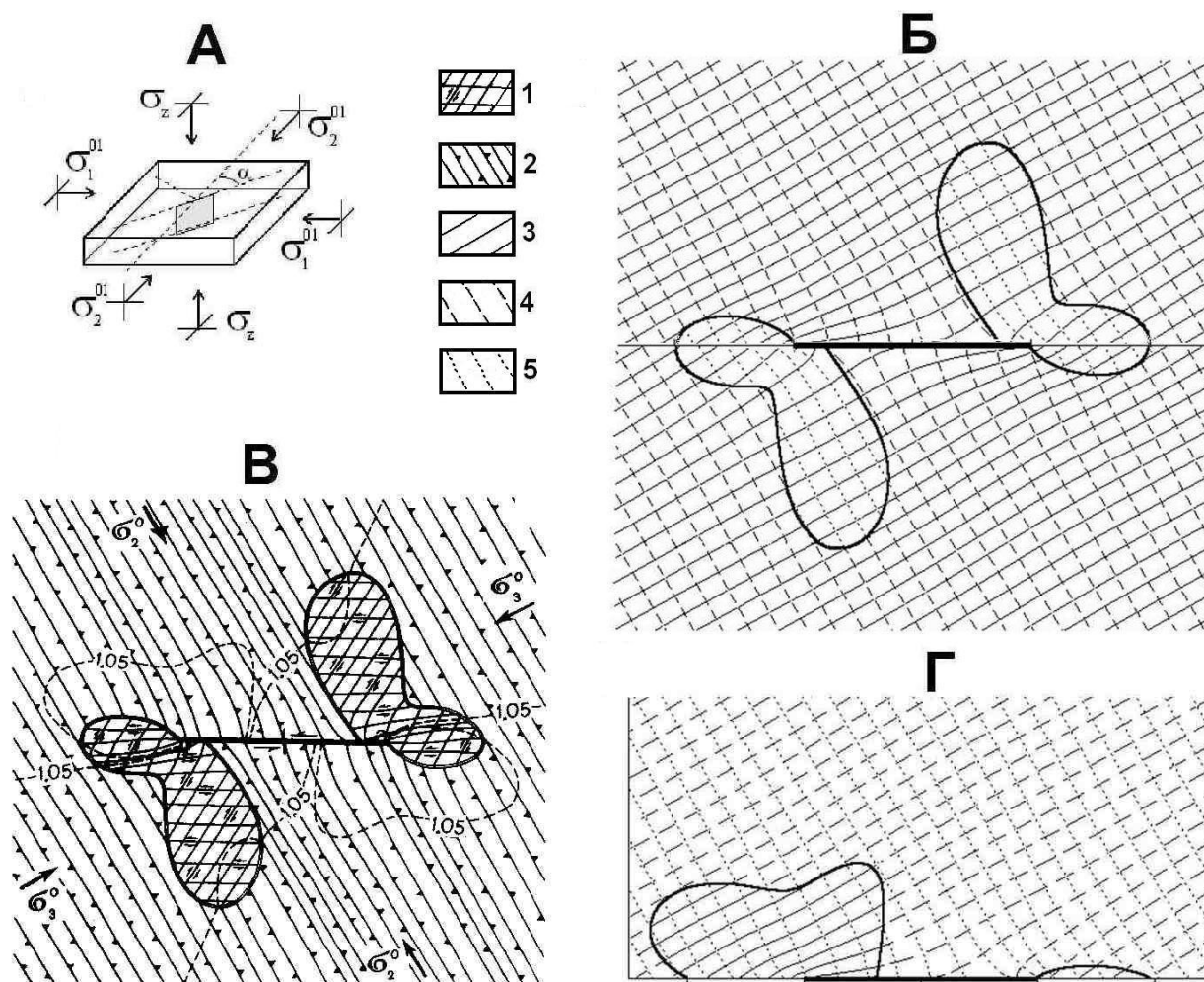


Рис. 3. Локальное поле напряжений 3D около нормального к слою сдвигового разрыва. Вариант задачи I ($\sigma_z = \text{const}$), левая подвижка, исходное поле – трехосное сжатие [Осокина, 2000, 2004]. Рисунки в плоскости слоя xu (план). 3D поле получено наложением третьего главного напряжения на 2D поле в плоскости слоя (см. рис. 2), параметры задачи которого: $\sigma_1^0 = -1$, $\sigma_2^0 = -3$, $\alpha = 30^\circ$, $k = 0.1$. А – постановка задачи; Б – Г – карты характеристик 3D поля в координатах x/l , y/l ($2l$ – длина разрыва); Б, Г – траектории осей напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 : Б – при $\sigma_z = -0.9$ ($\sigma_1^0 = -0.9$, $\sigma_2^0 = -1$, $\sigma_3^0 = -3$); Г – при $\sigma_z = -3.1$ ($\sigma_1^0 = -1$, $\sigma_2^0 = -3$, $\sigma_3^0 = -3.1$); В – схема следов скальвающих напряжений, позволяющая прогнозировать вторичные нарушения, ориентацию их следов и тип кинематики на участках возможного разрушения. Схема построена по картине траекторий осей σ_1 , σ_2 , σ_3 (см. рис. 3, Б), угол α (между разрывом и осью σ_2^0) равен 30° ; угол скальвания принят 30° .

1, 2 – следы и кинематика плоскостей скальвающих напряжений, определяющие вторичные нарушения: 1 – сдвиги, 2 – надвижки; 3-5 – оси главных напряжений: 3 – σ_1 , 4 – σ_2 , 5 – σ_3

смещения (вызывающего перестройку однородного исходного поля) на основе аналитического решения упругой задачи [Осокина, Фридман, 1987] (см. выше). Данная методика позволила выполнить комплекс количественных исследований напряжений и областей разрушения около разрыва-трещины: изучить особенности строения его локальных полей напряжений 2D и 3D, в том числе описать изменения направлений осей и величин главных напряжений этих полей в горизонтальных поперечных сечениях, показать эффект переиндексации главных напряжений 3D поля и появление областей с разными типами локального поля [Осокина, Фридман, 1987; Осокина, 1988; Осокина, 2000]; изучить поля

кулоновых напряжений и на их основе прогнозировать области хрупкого разрушения и вязкого разрушения (пластического поведения) среды около разрыва [Осокина, 2004, 2007]; изучить локальные поля напряжений 2D и 3D малой зоны у конца разрыва [Осокина, 2007, а, б]; прогнозировать (на основе знания 3D поля разрыва) парагенезы нарушений второго порядка: разрывов (отрывы-раздвиги, сбросы, сдвиги, надвижки) и складок, в областях разрушения (т.е. там, где напряжения выше прочности), прежде всего – в малой зоне у конца разрыва [Осокина, 2007, а, б].

Предполагается, что наборы теоретических решений для разных условий нагружения и разной реологии среды позволят помочь

интерпретации природных разломных структур разного масштаба для задач, связанных с восстановлением геометрии структуры (ее размеров, распределения вторичных нарушений и т.п.), с выявлением этапов развития разлома, с определением внешнего поля напряжений, реологии среды и т.п. Рассмотрено соотношение предлагаемого подхода с известными направлениями и известными результатами изучения разрывов второго порядка около крупного разрыва (разлома). В ряде работ имеют место ситуации неполного описания или неоднозначной интерпретации этих разрывов. Большинство натуральных исследований описывает разрывы 2-го порядка не для всей разрывной структуры, включая ее концы, а для ее частей, что затрудняет интерпретацию. Поэтому в задачи исследования входит

также сравнение связанных с разломами «расчетных» нарушений 2-го порядка с такими же натурными нарушениями, выяснение их генезиса и этапа возникновения, их классификация [Осокина, Яковлев, Войтенко, 2007; Osokina, Yakovlev, Voitenko, 2007].

В развитие данного подхода была рассмотрена также возможность диагностики деформированного состояния (удлинения или укорочения) участков зоны сдвига по типам вторичных нарушений [Яковлев, 2008]. Было показано, что трещины скальвания Риделя (R и R'), в случае обстановки, близкой к простому сдвиганию, образуются при разном внешнем нагружении и отвечают разной деформации участка зоны сдвига: R – его удлинению, R' – его укорочению.

ЛОКАЛЬНОЕ 2D ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ РАЗРЫВА-ТРЕЩИНЫ ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Строение 2D поля напряжений вблизи разрыва-трещины с трением в условиях сжатия изучалось на моделях (М.В.Гзовский [1963, 1975], Д.Н.Осокина, Н.Ю.Цветкова [1979] и др.) и на основе теоретического расчета [Осокина, Фридман, 1987; Osokina, 1988] (рис. 2). Основными чертами строения этого поля являются:

1) Разделение полей каждого из главных напряжений поля σ_1^1 и σ_2^1 на две пары секторов: сектора «растяжения» (ослабления сжатия) и сектора «сжатия» (усиления сжатия) – см. рис. 2, В, Г.

2) Изменение вблизи разрыва ориентации траекторий главных напряжений σ_1^1 и σ_2^1 : их поворот и разделение на два потока, в которых оси

напряжений стремятся подойти к разрыву субнормально или субпараллельно (рис. 2, Б).

3) Различие локальных полей напряжений в разных крыльях разрыва. Переход через разрыв вызывает скачок величин напряжений (кроме σ_y), изменение ориентации их осей и часто – их переиндексацию.

4) Для изолиний напряжений τ_{\max} положение участка высоких τ_{\max} зависит от угла α_2 между разрывом и осью сжатия исходного поля. При $\alpha_2 < 45^\circ$ этот участок лежит в секторе сжатия, а при $\alpha_2 > 45^\circ$ – в секторе растяжения [Осокина, Цветкова, 1979; Осокина, Фридман, 1987].

ЛОКАЛЬНОЕ 3D ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ОБЛАСТИ РАЗРУШЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТЯХ РАЗРЫВА-ТРЕЩИНЫ ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Строение 3D поля напряжений вблизи разрыва-трещины с трением (в слое, нормальном к разрыву) изучено в [Осокина, 2000]. Часть особенностей 3D поля повторяет свойства 2D поля (поворот осей главных напряжений вблизи разрыва и разделение их на два потока, различие локального поля в разных крыльях разрыва и т.п.). При наложении сжатия σ_z (по оси z) на локальное 2D поле трещины в плоскости ху и сравнении σ_z с напряжениями 2D поля по алгебраической величине, в полученном 3D поле слоя имеет место переиндексация осей напряжений и возникают области (объемы) с разными типами поля. В простом случае число таких типов равно трем. Если разрыв является сдвигом, то это надвиговое, сдвиговое и сбросовое поля (рис. 1, В, Г; рис. 3, Б-Г). Размеры и положение

областей с различными типами поля определяются соотношением главных девиаторных напряжений исходного поля (рис. 1, Г; рис. 3, Б-Г). Поля напряжений разного типа должны иметь различную ориентацию главных деформаций и разную кинематику вторичных нарушений.

Области разрушения вблизи разрыва-трещины и их геометрия были изучены на основе расчета кулоновых напряжений в слое с трещиной [Осокина, 2004, 2007; Osokina D.N., Rebetsky, 2005] и использования оценок прочности геосреды [Ребецкий, 2007]. Зона влияния разрыва была разделена по величине кулоновых напряжений на области поведения среды 4-х типов: I – упругое; II, III – хрупкое (II – активизация разрывов, III – их образование); IV – пластическое. Зависимости геометрии об-

ластей разрушения от определяющих ее параметров (прочности среды, исходного 3D поля и

разрыва) изучены в [Осокина, 2004, 2007; Osokina, Rebetsky, 2005].

НАТУРНЫЕ НАРУШЕНИЯ 2-ГО ПОРЯДКА В ЗОНАХ СКАЛЫВАНИЯ И ИХ СВЯЗЬ С РАЗЛОМАМИ

Для зон сдвига и скалывания (до образования в них магистрального разрыва) природные картины нарушений второго порядка установлены и объяснены с позиций механики ([Cloos, 1928; Riedel, 1929; Гзовский, 1963, 1975; Tchalenko, 1968; Стоянов, 1977; Никола, 1992; Шерман и др., 1983; 1991, 1992, 1994; Ramsay, Huber, 1987; Семинский, 2003; Ребецкий, 2007). Здесь возникают кулисообразные ряды трещин отрыва и скола. В зонах сдвига ориентация трещин этих рядов отвечает напряженному состоянию чистого сдвига [Гзовский, 1963, 1975; Стоянов, 1977 и др.].

В тех зонах скалывания, где на простое сдвигание накладывается небольшое сжатие или растяжение вкрест оси зоны, напряженное состояние может остаться близким к чистому сдвигу, но ориентация осей сжатия и растяжения и определяемая ею ориентация трещин в рядах различного типа закономерно изменяются (рис. 4, В) [Гзовский, 1963, 1975; Стоянов, 1977; Семинский, 2003 и др.]. Это исходное поле напряжений зон сдвига (скалывания) и его трещины можно считать отвечающими 1-му этапу развития магистрального разрыва – этапу его подготовки.

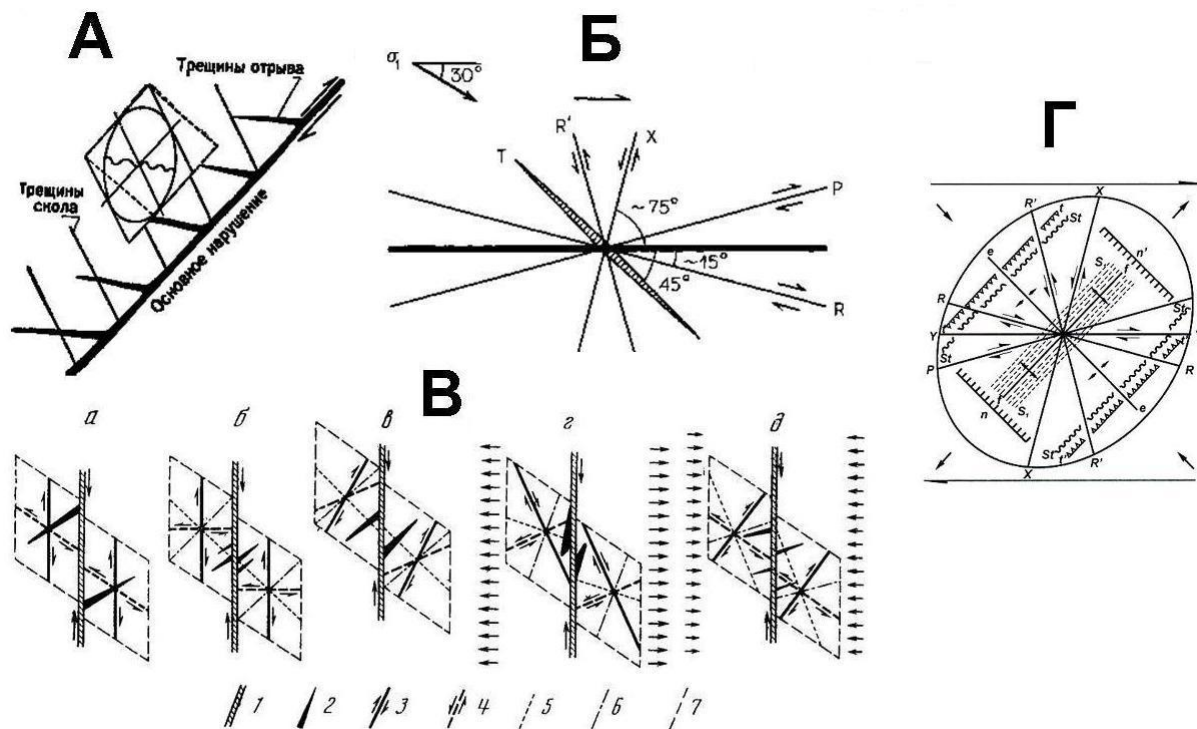


Рис. 4. Используемое в структурной геологии рассмотрение характеристик зоны скалывания (ориентации главных напряжений и прогнозируемых по ним трещин), совмещенное с магистральным разломом.

А. Схема образования трещин оперения вблизи поверхности основного нарушения [Смирнов, 1976] (рис. 373).

Б. Картина трещиноватости второго порядка в связи с правосторонним разломом (жирная линия) [Никола, 1992] (с. 59, рис. 5.23 – по В. Риделю [Riedel, 1929]). **В.** Схемы расположения осей напряжений и трещин в момент их возникновения при деформации сдвига (Гзовский, 1975) – с. 148, рис. 31): *а* – широко распространенная неправильная схема; *б-д* – рекомендуемая схема при углах скалывания: *б* – 45°, *в* – меньше 45°, *г* – при угле 45° и дополнительном растяжении, *д* – при угле 45° и дополнительном сжатии.

1 – шов главного разрыва; *2* – трещины отрыва; *3, 4* – сопряженные трещины скалывания; *5, 6* – оси напряжений σ_1 и σ_3 ; *7* – условные границы рассматриваемого участка ([Гзовский, 1975] – с. 148, рис. 31).

Г. Общая схема вторичных нарушений, иллюстрирующая системы эшелонированных структурных элементов, которые образуются в сдвиговой разломной зоне при простом скалывании [Нансокс, 1985]. Обозначения: *R, R', X, P, Y* – попарно сопряженные и одиночные системы сдвигов, *n* и *n'* – сопряженные системы сбросов, *t* и *t'* – сопряженные системы надвигов, *e* – разрывы растяжения, *f* – складки, *St* – стилолиты, *kl* – кливаж

Для уже живущих активных разломов (разрывов) природная картина нарушений второго порядка изучена недостаточно для полного понимания, а объяснения ее с позиций механики могут быть разными [Николя, 1992; Hancock, 1985; Семинский, 2003; Осокина и др., 2007; Osokina et al., 2007]. Около разломов (которые образовались, вероятно, в зонах скалывания) наблюдаются такие же ряды трещин, как в этих зонах, скорее всего, в них и образовавшиеся. Ведь очевидно, что после возникновения в зоне скалывания магистрального разрыва около него возникнет новое локальное поле напряжений, создающее новые трещины (2-й этап). А «старые» трещины зоны станут частью оперения разрыва. Но многие авторы трактуют эти «старые» трещины 2-го порядка как нарушения, либо возникшие в зоне сдвига после смещения бортов разрыва (А.В. Пэк [1939], В.В. Смирнов [1976] и мн. др.), либо вызванные смещением его бортов, но без явной связи с зоной сдвига

[Николя, 1992]. Эти представления отображаются схемами (рис. 4, А, Б), где совмещены трещины 1-го этапа и сам разрыв (2-й этап). В итоге геометрия вторичных нарушений, возникших в зоне скалывания (на 1-м этапе) дается верно, но неверно объяснен их генезис, а вторичные нарушения 2-го этапа не показаны вовсе.

Отметим, что у отдельных авторов имеет место другой (верный) подход. Так, на рис. 4, В показаны схемы вторичных разрывов, построенные М.В. Гзовским [1963, 1975] для зон сдвига и близких к ним зон скалывания до возникновения в них разрыва. В тексте этой работы автор не раз отмечает, что изучаются зоны деформирования в условиях простого сдвига и близких к ним. Разрыв вдоль оси зоны здесь нарисован, вероятно, чтобы показать его положение в будущем. Р.Л. Hancock [1985] приводит сводную схему рядов вторичных структур, наблюдаемых в зонах сдвига до образования в них магистрального разрыва (рис. 4, Г).

ПРОГНОЗ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ РАЗРЫВОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА У ОКОНЧАНИЯ ОСНОВНОГО РАЗРЫВА ПО ЛОКАЛЬНЫМ ПОЛЯМ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗНЫХ УРОВНЕЙ

В данной работе и в одной из статей настоящего сборника [Осокина, 2008а] приводятся результаты расчета полей напряжений разных уровней у окончаний вертикального сдвига 1-го порядка (в условиях преобладания внешнего сжатия) и полученные на этой основе результаты прогноза разрывов 2-го порядка в этих областях. Отметим, что поля разных уровней (называемых ниже микро-, мезо-, субмакро- и макроуровнями), характеризуются величиной параметра масштаба (m), равной отношению $h/2L$, где h – ширина «окна расчета» (см. рис. 5), $2L$ – длина разрыва. Величины $h/2L$ соседних уровней отличаются на порядок. Они составляют: 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 для полей микро-, мезо-, субмакро- и макроуровня.

Учитывая иерархическую структуру поля напряжений [Гзовский, 1963, 1975; Osokina, 1988; Семинский, 2003; Ребецкий, 2007], следует ожидать зарождения разрывов 2-го порядка в малой зоне у конца разрыва под действием напряжений микроуровня. Ранее в работах [Осокина, 2007а, б] было показано, что для поля микроуровня эта малая зона может быть разделена по характеристикам 2D поля на участки трех типов («растяжения», «сдвига» и «сжатия») и что каждый участок имеет свой максимум напряжений со своим типом 3D поля. Таким образом было установлено (вероятно, впервые), что конец трещины (разрыва) совмещает три различные особые точки – три очага разрушения.

Для нескольких вариантов внешнего поля напряжений, обычных для земной коры (одноосное сжатие и ряд других) и при углах 30-35° (между осью сжатия внешнего поля и простиранием разрыва), показано, что для напряжений микроуровня на участках «растяжения» прогнозируются сбросы и отрывы с простиранием вкрест разрыву (под углом 90° к нему), на участках «сжатия» – надвиги и складки вкрест разрыву (под углом 270° к нему), на участках «сдвига» – сдвиги под небольшим углом к разрыву (0 – 25°) [Осокина, 2007а, б; Osokina et al., 2007].

Результаты изучения разрывов 2-го порядка у концов сдвигового разрыва по данным геологии и экспериментов [Буртман и др., 1963; Гзовский, 1963, 1975; Стоянов, 1977; Шамина, 1981; Белоусов, 1985; Hancock, 1985; Ramsay, Huber, 1987; Шерман и др., 1991, 1992, 1994; Николя, 1992; Семинский, 2003; и др.] были обобщены и сопоставлены с данными теоретического расчета. Полученное достаточно хорошее (или удовлетворительное) соответствие между этими данными позволяет считать, что напряжения микроуровня у конца разлома определяют место зарождения вторичных разрывов, а также кинематику и ориентацию их «зародышей» [Осокина, 2007а, б].

Рассмотрим теперь развитие макроразрыва 2-го порядка и его связь с локальными полями напряжений разных уровней у конца разрыва. Очевидно, что не все микроразрывы, зародив-

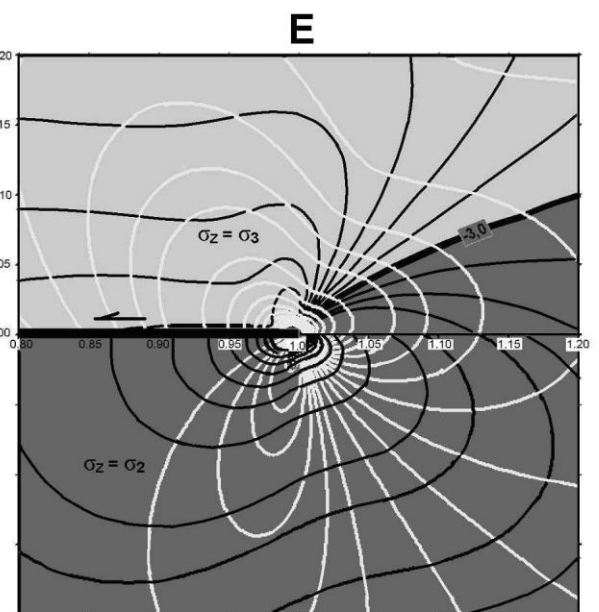
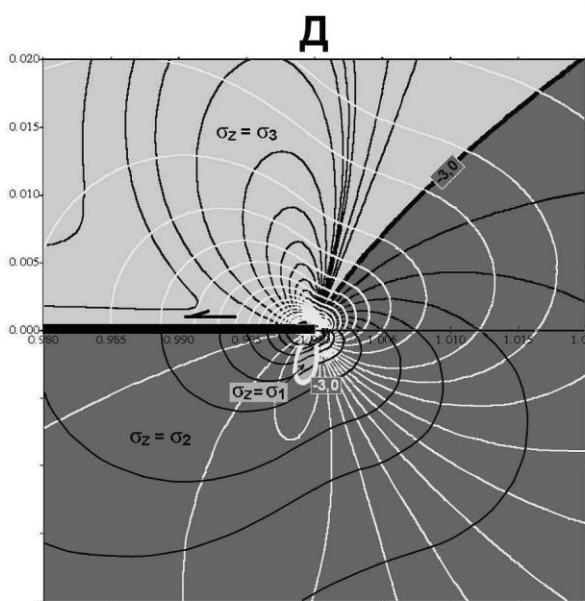
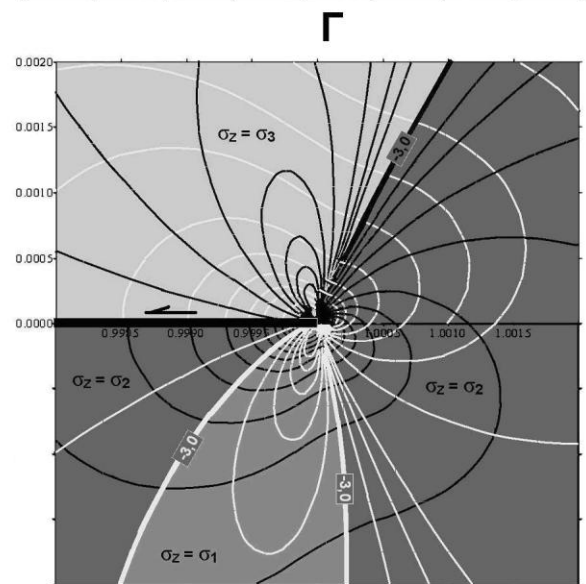
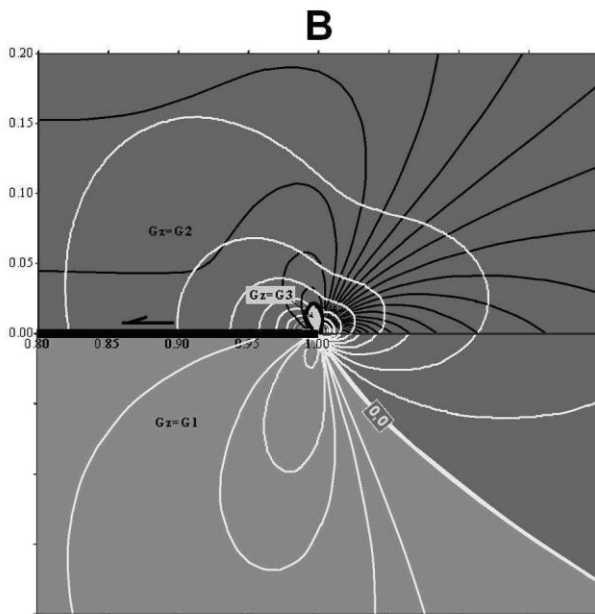
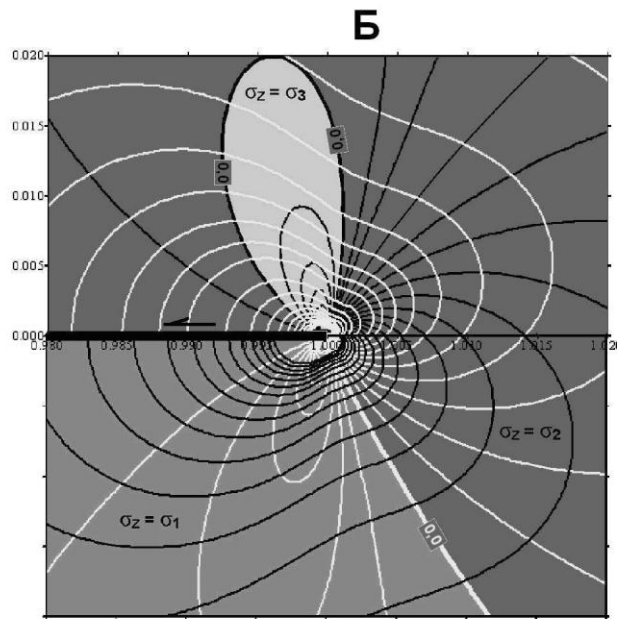
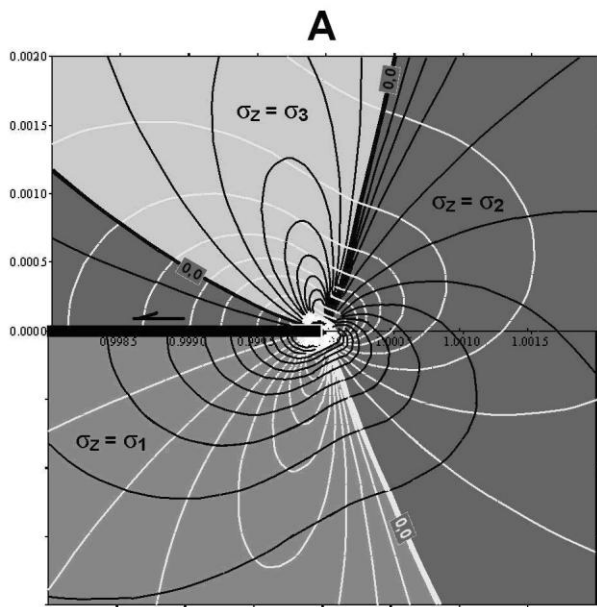


Рис. 5. Локальное 3D поле напряжений у конца вертикального разрыва-сдвига и зависимость этого поля от его масштабного уровня и характера внешнего (регионального) поля как основа прогноза нарушений 2-го порядка. Результаты расчета.

А–Е – карты размещения областей с локальным полем сбросового, сдвигового и надвигового типа и изолинии главных напряжений (2D) этого поля для случаев внешнего поля напряжений одноосного сжатия (А–В) и трехосного сжатия (Г–Е). Масштабные уровни локального поля и их параметр m : А, Г – микроуровень (0.001); Б–Д – мезоуровень (0.01); В–Е – субмакроуровень (0.1).

Параметры задачи: коэффициент трения берегов разрыва $k = 0.2$ (А–Е), угол оси сжатия внешнего поля с простиранием разрыва (α): 35° (А–Г) и 30° (Д, Е); безразмерные главные напряжения и параметр Лоде – Надаи внешнего поля: 0, 0, -2 и 1.0 (А–В); -1 , -3 , -3 и -1.0 (Г–Е)

1 – изолинии напряжений наименьшего сжатия («растяжения»); 2 – граница областей сбросового и сдвигового поля; 3 – изолинии напряжений наибольшего сжатия; 4 – граница областей сдвигового и надвигового поля; 5 – область сбросового поля; 6 – область надвигового поля; 7 – область сдвигового поля; 8 – магистральный разрыв (трещина) – концевая часть

шиеся в поле напряжений микроуровня, смогут превратиться в разрывы макроуровня. Возникает задача: найти критерий возможности развития «зародыша» в крупный разрыв 2-го порядка.

Анализ характеристик полей напряжений разных уровней (рис. 5) и их выраженная зависимость от параметра масштаба m показали, что возможность развития крупного разрыва 2-го порядка определяется соотношением типов полей напряжений разных уровней на участке развития разрыва – вдоль его траектории [Осокина, 2008б]. Так, если эти типы одинаковы и при росте микроразрыва – «зародыша», он все время остается в поле одинакового типа («своего» типа, того, в котором возник), то он может стать макроразрывом. В случае несовпадения типа полей напряжений соседних уровней (например, микро- и мезоуровня) выход «зародыша» на границу этих полей блокирует его дальнейший рост – макроразрыв не формируется. Соотношение типов полей разных

уровней у конца основного разрыва определяется характеристиками тензора напряжений внешнего поля. Например, для поля одноосного сжатия наблюдается блокирование сбросов, тогда как для развития сдвигов и надвигов условия благоприятны (рис. 5, а-в).

Расчеты показали, что распределение полей напряжений разных типов у конца разрыва-трещины сильно зависит от уровня поля, т.е. от размера «окна расчета» – от масштаба m . Так, для исходного поля одноосного сжатия рост параметра масштаба h/L от 0.001 до 1.0 вызывает резкое уменьшение размера сбросового поля, оно сжимается, а затем «исчезает», заменяясь сдвиговым полем (рис. 5, а-в). Для случая другого внешнего поля – трехосного сжатия (отвечающего одноосному девиаторному растяжению) – с ростом масштаба m изменяется надвиговое поле: оно сжимается, а затем «исчезает», заменяясь сдвиговым полем (рис. 5, г-д). В этом случае блокируется развитие надвигов и складок, тогда как для развития сбросов, раздвигов и сдвигов – условия благоприятны [Осокина, 2008б].

РАЗДЕЛЕНИЕ РАЗРЫВОВ 2-ГО ПОРЯДКА НА «ОПЕРЕЖАЮЩИЕ» И «ОПЕРЯЮЩИЕ»

С тех пор как Г. Клоос [1928] предложил называть разрывы второго порядка в зонах сдвига *оперяющими*, этот термин использовался для всех таких разрывов – и в зонах скалывания, и около разломов. Позднее М. Рац, С.Н. Чернышев, а затем К.Ж. Семинский (см. [Семинский, 2003] предложили называть трещины и разрывы второго порядка, предшествующие основному разрыву, *опережающими* (leading, advanced). Это предложение представляется удачным и имеющим физический смысл. Приняв его, будем считать оперяющими (feathering) только трещины, возникающие вместе с подвижкой по разрыву или после нее, т.е. эти названия разделяют нарушения

2-го порядка и по возрасту, и по полю напряжений, в котором они образуются: опережающие – в исходном поле зоны скалывания или массива, оперяющие – в локальном поле разрыва. Можно считать, что совокупность нарушений 2-го порядка в окрестностях разрыва есть сумма нарушений двух типов. Нарушения первого типа возникают (в зонах скалывания или в исходном поле массива) до образования разрыва (на 1-м этапе). Эти нарушения – «старые», опережающие. Нарушения второго типа возникают под действием локального поля разрыва. Это разрывы и трещины 2-го этапа, «молодые» – оперяющие. Они, как правило, возникают на участках вблизи концов разрыва.

НАТУРНЫЕ ПРИМЕРЫ СТРУКТУР, ПОЛЕЙ И ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С РАЗЛОМАМИ

Генерируемые крупными разломами вторичные нарушения, напряжения, деформации и другие структуры, согласующиеся с расчётами для концепции разрыва-трещины, наблюдаются на большом числе примеров региональных и мелких разломов, структур рудных полей, гидротермальных месторождений и локальных полей деформации метаморфизованных толщ. С позиций предлагаемого подхода описывается ряд природных структур разного масштаба, такие, как «динамопары» разломов по С.А. Суворову – образование крупного надвига в секторе «сжатия» крупного разлома – сдвига [Суворов, 1963 и др.]. Примеры таких структур приводят В.С. Буртман, А.В. Лукьянов и др. [1963], С.А. Суворов [1963], С. Стоянов [1977], J.G. Ramsay, M.I. Huber [1983, 1987], P.L. Hancock [1985], В.В. Белоусов [1985], С.И. Шерман и др. [1991, 1992, 1994], Н.И. Мишин и др. [1992], А. Николая [1992], К.Ж. Семинский [2003] и др. авторы.

Известно, что развитие разрыва идет как чередование этапов движения и остановок его конечного участка. Можно предполагать, что во время остановок, с учетом прочности и реологии среды, должны сильнее развиваться вторичные разрывы и деформации вмещающих пород (что, видимо, вызывает периодические колебания ширины зоны влияния, отмеченные С.И. Шерманом и др. [1983], а также отмечавшиеся в механике трещин). Поэтому крайне важно исследовать деформации вокруг разрывов, в особенности – концевые зоны, так как характеристики поля деформации могут быть связаны с амплитудой перемещения по разлому и именно в концепции «разрыва – трещины конечной длины» можно дать прогнозируемую величину смещения. Иллюстрацией на качественном уровне могут служить изменения локальных полей пластических деформаций, изученные по результатам стрейн-анализа складчато-надвиговых структур Таласского Алатау [Войтенко, Худолей, 2006]. Во время остановок в областях разупрочнения, наиболее сильного у самого конца разлома, могут формироваться углеводородные и гидротермальные месторождения. Примером подобных процессов могут служить много-численные натурные данные по структурам рудных полей гидротермальных месторождений, сформированных магистральным рудоконтролирующим разломом [Мишин и др., 1992].

В качестве примера использования концевых деформационных структур для интерпретации типа разрывных нарушений разного размера и прогноза их распространения приведем описание крупного разлома, проявленного в неотектонических структурах поднятия и опускания [Osokina et al., 2007]. На Дальнем Востоке есть крупная неотектоническая структура, длиной не менее 1200–1600 км, которая подходит под описание сдвига с концевыми структурами поднятия и опускания (рис. 6). Глубинный разлом, идущий из района г. Биробиджан к Ляодунскому заливу, отделяет друг от друга структуры Китайской плиты на северо-западе и мезокайнозойские блоки хр. Сихотэ-Алинь и Корейского полуострова на юго-востоке. Зона разлома представляет собой узкий грабен, к восток – северо-востоку переходящий в неотектоническую депрессию в районе г. Хабаровска и нижнего течения р. Сунгари. Размеры депрессии – около 500 км в длину в северо-восточном направлении, при ширине около 200 км. Амплитуда неотектонического опускания составляет до 1 км. К северо-западу от депрессии наблюдается область поднятия, составленная из мозаики крупных блоков, общей длиной до 300 км в северо-восточном направлении при ширине 150–200 км. Амплитуда поднятия – 1.5 км. Центросимметрично к этим областям на другом конце разлома располагаются депрессия Ляодунского залива и к юго-востоку от нее – поднятие Ляодунского полуострова. Разлом далее к югу переходит в другую крупную разрывную структуру в основании Шандуньского полуострова (разлом Тан-Лу). Общая конфигурация разлома и областей поднятия и опускания соответствует «разрыву-трещине», отвечающему правому сдвигу и ожидаемой около него картине вертикальных смещений (рис. 6, Б). Амплитуды поднятия и опускания, по крайней мере – в северной части разлома, являются наиболее резкими и существенными во всем регионе. Для обсуждаемого района были закартированы ориентировки осей сжатия и растяжения, [Rebetsky et al., 1997], выявленные по механизмам очагов землетрясений (рис. 6, А). Основной особенностью ориентировки осей напряжений является диагональное по отношению к структуре расположение региональных осей сжатия и осей растяжения, в целом соответствующее сдвиговому полю напряжений, распространенному на всей терри-

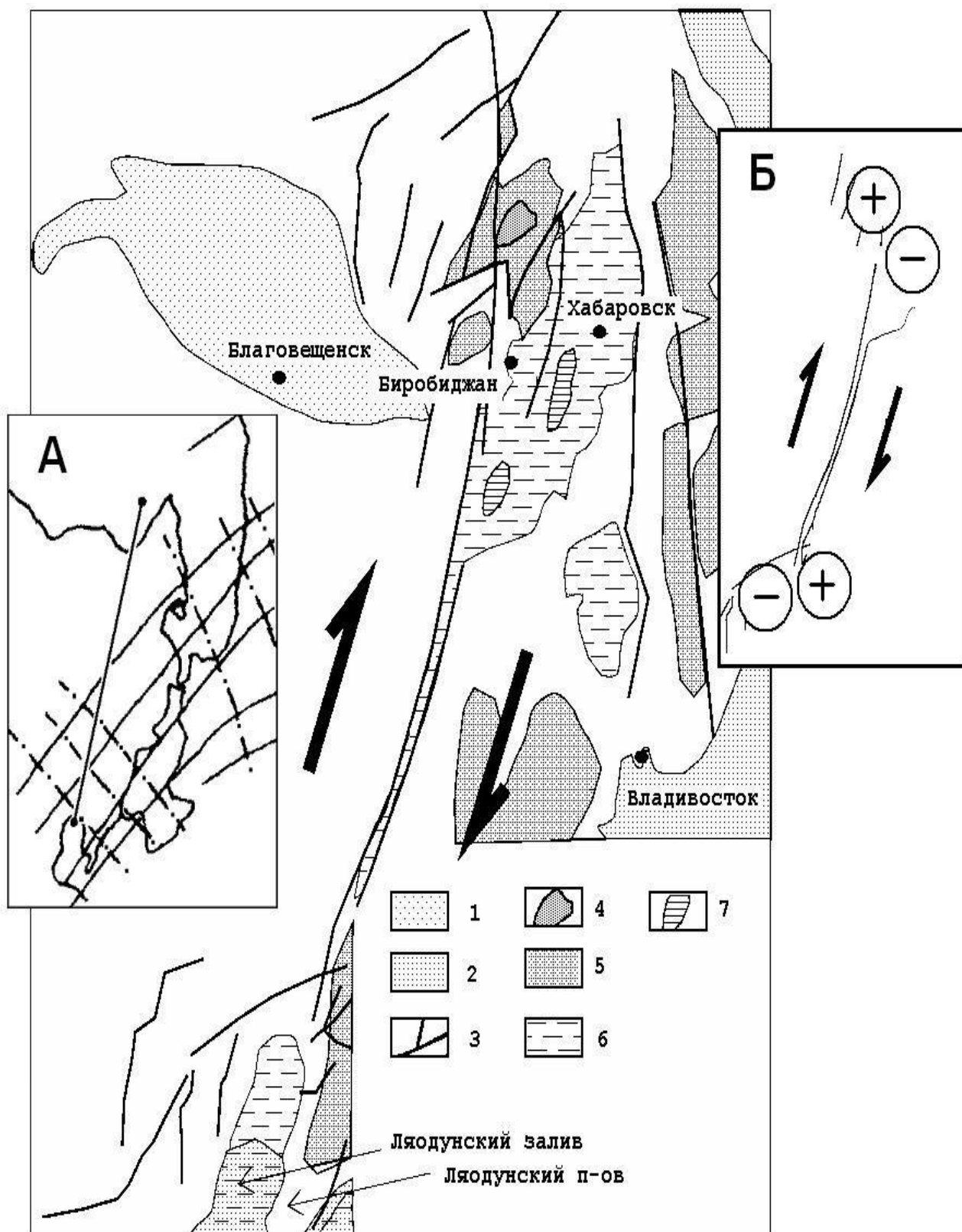


Рис. 6. Интерпретация Амуро-Ляодунского разлома как правого сдвига по амплитудам вертикальных неотектонических движений (по материалам [Карта новейшей..., 1997]). На врезках показаны: А – ориентировки осей сжатия (сплошные линии) и осей растяжения (штрих-пунктирные линии) в районе обсуждаемой структуры (линия с точками на концах), определенные по механизмам землетрясений [Rebetsky et al., 1997]; Б – общая схема структуры с расположением областей поднятия («+») и опускания («-»).

1 – Амурская плита, 2 – акватория Тихого океана, 3 – разрывы, 4 – области максимальных поднятий, 5 – области среднеамплитудных поднятий, в том числе вне зоны влияния разрыва (хр. Сихотэ-Алинь), 6 – области среднеамплитудных погружений, 7 – области максимальных погружений

тории северной части Китая и Монголии. Таким образом, в современных полях напряжений эта структура также должна проявлять себя как правый сдвиг. Выявленная по типичной конфигурации областей поднятия и

опускания крупная региональная структура, активная как единое целое, может быть определена как разлом, потенциально опасный для возникновения особо крупных землетрясений (с магнитудой до 8.5 – 9).

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемый подход к комплексному тектонофизическому описанию разрыва как единого объекта (трещина конечной длины и объем с измененными внутри него полями) впервые дает возможность описывать совместно поле напряжений и поле деформаций, а, значит, – давать прогноз амплитуд смещения по разрыву, а также типов и ориентировок структур разрушения второго порядка.
2. На основе концепции описания разрыва как единого объекта (трещина и измененный объем) дается разделение вторичных нарушений в окрестностях разрыва (трещин и разрывов «оперения») на три типа: а) «старые», возникшие в региональном поле до образования магистрального разрыва; б) трещины концевых участков, возникшие в локальном поле разрыва («новые», мезомасштаб); в) трещины концевых участков, возникшие в том же поле, рост которых остановлен изменением параметров поля («новые», микромасштаб).
3. Дано описание условий возникновения и разрастания вторичных трещин от микромасштаба до мезомасштаба, что может быть использовано для восстановления особенностей поля напряжений природных объектов по имеющимся вторичным нарушениям.
4. Анализ природных объектов на основе комплексного тектонофизического описания разрыва показал возможность выделения разрыва как единого объекта, возникающего в определенном поле напряжений, а также возможность описания этого поля.

ЛИТЕРАТУРА

- Белоусов 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.
- Войтенко В.Н., Худoley А.К.* Закономерности локального деформационного поля надвиговых структур (по результатам стрейн-анализа пород зеленосланцевого комплекса Таласского Алатау, Кыргызстан) // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли. Материалы 39 Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС. 2006. С. 100–103.
- Гзовский М.В.* Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Часть III и IV. М.: Изд. АН СССР. 1963. 544 с.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
- Карта новейшей тектоники Северной Евразии, М-6 1:500 000 (гл. ред. А.Ф. Грачев). М.: ОИФЗ РАН. 12 листов. 1997.
- Костров Б.В., Фридман В.Н.* Механика хрупкого разрушения при сжатии // Физика очага землетрясений. М.: Наука. 1975. С. 30–45.
- Мишин Н.И. и др.* Формирование рудных полей гидротермальных месторождений магистральным рудоконтролирующим разломом – МРР // ДАН СССР. 1992. Т. 323. С. 349–353.
- Николя А.* Основы деформации горных пород. М.: Мир. 1992. 167 с.
- 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.* Скальвающие кулоновы напряжения и области различного деструктивного поведения массива в окрестностях разрыва // Сборник трудов ИФЗ РАН. Исследования в области геофизики. М.: ОИФЗ РАН. 2004. 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 XI Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС. 2007а. С. 62–66.
- Осокина Д.Н.* Сейсмогенные области вторичного разрушения вблизи активного разлома и в ма-

- лой 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., 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., 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.
- Пэк А.В.* Трещинная тектоника и структурный анализ. Изд. АН СССР. 1939.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: Наука. 2007. 406 с.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд. СО РАН, филиал ГЕО. 2003. 244 с.
- Смирнов В.И.* Геология полезных ископаемых. М.: Недра. 1976. 688 с.
- Стоянов С.* Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра. 1977. 144 с.
- Суворов А.И.* Главные разломы Казахстана и Средней Азии // Разломы и горизонтальные движения земной коры. Труды ГИН, вып. 80. М.: Изд. АН СССР. 1963. С. 173–227.
- 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. 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. Сиб. Отд. 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. Сиб. Отд. 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. Сиб. Отд. 1994. 254 с.
- Яковлев Ф.Л.* О диагностике деформированного состояния крыльев разломов и их внутренней зоны по типам вторичных нарушений // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XLI Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС. 2008. с. 516–519.
- Chinnery M.A.* Theoretical fault models // Publ. Domin. Observ., Ottawa: 1969. V. 37, № 7. P. 211–223.
- Cloos H.* Experiment zur inneren tektonik // Z. Mineral. 1928. No 12. P. 609–621.
- Hancock P.L.* Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.
- Healy D., Yielding G., Kuznir N.* Fracture prediction for the 1980 El Asnam, Algeria earthquake via elastic dislocation modeling Tectonics. V. 23, TC6005, doi:10.1029/2003TC001575. 2004.
- Osokina D.N.* Hierarchical properties of a stress field and its relation to fault displacements // J. Geodyn. 1988. V. 10. P. 331–344.
- Osokina D.N., Kuznetsova K.I., Bagmanova N.Kh.* Local stress and strain fields near a fault as indicators of movement on its surface: mechanics and seismicity // Tectonophysics. 1992. V. 202. P. 239–246.
- 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. V. 9. 10465. 2007.
- Ramsay J.G., Huber M.I.* The techniques of modern structural geology. London: Acad. Press, V.1. Strain analysis., 1983. 307 p.; V. 2. Fold and fractures. 1987. P. 308–700.
- Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rassanova G.V., Fursova E.V.* II. Stress-monitoring: the modern field of regional stresses in South-East Asia and Oceania. Principles of quasiplastic deforming of fractured media // Journal of earthquake prediction research. 1997. V. 6. P. 11–36.
- Riedel W.* Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // Zbl. Mineralogie, Geol. Und Palaentol., Abt. B, 30. 1929. S. 354–368.
- Tchalenko J.S.* The evolution of kink-bands and the development of compression textures in sheared clays // Tectonophysics. 1968. V. 6, N 2. P. 159–174.