

12. Расцветаев Л.М. О некоторых общих особенностях структуры и альпийской геодинамики Большого Кавказа // Основные проблемы геологического изучения и использования недр Северного Кавказа. Ессентуки: 1995. С.257-260.
13. Расцветаев Л.М. Сдвиговые парагенезы в ансамбле коллизионных структур // Структурные парагенезы и их ансамбли. М.: ГЕОС, 1997. С.136-140.
14. Расцветаев Л.М. Большой Кавказ – субдукция или сдвиг? // Актуальные проблемы региональной геологии и геодинамики. М.: МГУ. 1999. С. 23-24.
15. Расцветаев Л.М. Актуальные проблемы структурной геологии и тектонофизики // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С.334-373.
16. Расцветаев Л.М., Греков И.И., Пруцкий Н.И., Энна Н.Л., Литовко Г.В., Компаниец М.А., Трофименко А.А., Корсаков С.Г., Письменный А.Н. Глубинное строение Большого Кавказа // Материалы XXXVII Тектонического совещания. Новосибирск, «ГЕО», 2004. С.100-103.
17. Расцветаев Л.М., Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю. Дизъюнктивные системы и новейшая геодинамика Северо-Западного Кавказа // Общие и региональные проблемы тектоники и тектодинамики, т.2. М.: «ГЕОС», 2008. С. 147-153.
18. Расцветаев Л.М., Тверитинова Т.Ю., Курдин Н.Н., Энна Н.Л., Корсаков С.Г. Расплющивание и тектоническое течение горных пород в осевых зонах Большого Кавказа // Общие вопросы тектоники. Тектоника России. Материалы XXXIII Тектонического совещания. М.:ГЕОС, 2000. С.420-424.
19. Сомин М.Л. О структуре осевых зон Центрального Кавказа // Докл. РАН. Т. 375, №5. 2000. С. 662-665.
20. Хаин В.Е., Афанасьев С.Л., Борукаев Ч.Б., Ломизе М.Г. Основные черты структурно-фациальной зональности и тектонической истории Северо-Западного Кавказа // Геология Центрального и Западного Кавказа, т.3. М.: Гостоптехиздат. 1962. С.547.
21. Шевченко В.И. Происхождение структур горизонтального сжатия в складчатом сооружении (на примере Большого Кавказа). М.: Наука, 1984. 158 с.
22. Шемпелев А.Г., Пруцкий Н.И., Фельдман И.С., Кухмазов С.У. Геолого-геофизическая модель по профилю Туапсе-Армавир // Тектоника неогей: общие и региональные аспекты. Т.2. М.: ГЕОС. 2001. С.316-320.
23. Яковлев Ф.Л. Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа). М.: ОИФЗ РАН, 1997. 76 с.
24. Khain V.E. Structure and Evolution of Nappe-Fold Edifices of the Alpine-Himalayan Belt: A Comparison // Int. Geol. Rev. 1996. Vol. 38. P.374-387.
25. Philip H., Cisternas A., Guishiani A. & Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision. // Tectonophysics. 1989. V. 161. P. 1-21.
26. Saintot A. Reconstruction des champs de paleocontraintes de la Crimée au Caucase nord-occidental, relations avec le développement des structures majeures.. Apport de la teledetection a l'analyse structurale. These Doctorat. Mem. Sc. Terre Univ. P. et M. Curie, Paris, 2000.

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕЛЕ РАЗЛОМА

Ребецкий Ю.Л.

Институт физики Земли РАН, г. Москва, reb@ifz.ru

В механике существует понятие дислокации и трещины, определяющее нарушение сплошности среды и, как следствие, возникновение локализации смещений – скачка смещений. В конструкционной механике такие смещения могут формировать трещины и дислокации сдвига и отрыва, осуществляя сброс части накопленной в среде внутренней упругой энергии. Разница между трещиной и дислокацией заключается в том, что последние, возникая в кристаллах, формируют практически постоянное смещение своих бортов друг относительно друга, за счет наличия вакансий решетки кристалла в своих концевых частях. Трещины имеют вдоль своей протяженности неодинаковое относительное смещение бортов, максимальное в середине и резко уменьшающееся (по параболическому закону) к концевой части (для отрыва и для сдвига). Подобные различия в кинематике приводят к разному типу распределения напряжений, которое теоретически изучалось в работах [Chinnery, 1961; Осокина, 1987].

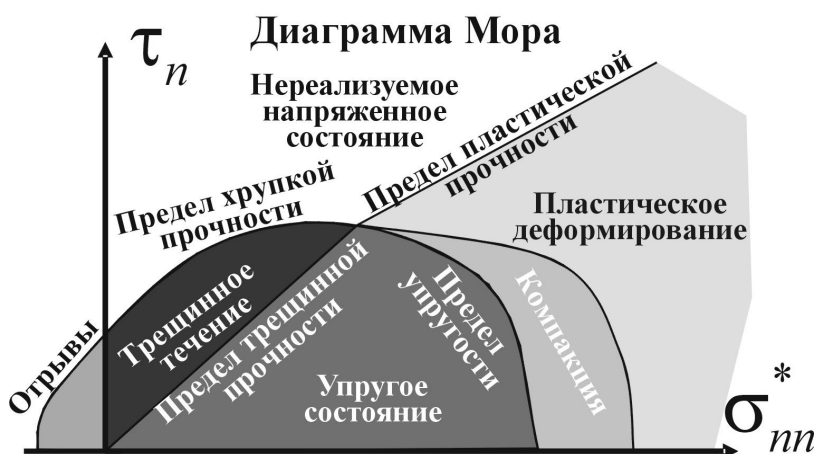
В геологии также наблюдают трещины, к которым относят нарушения сплошности геосреды протяженностью от первых миллиметров до сотен метров. Такие трещины малой протяженности иногда визуально выглядят так же как в конструкционных материалах, в виде очень тонкой «пустоты», разделяющей твердое кристаллическое вещество. Более часто эти трещины заполнены новым минеральным образованием (например, кальцитом), определяющим определенную степень раздвиговой компоненты для бортов трещины и возникшем уже после ее возникновения (стадия залечивания). Здесь так же как в конструкционных материалах, выделяется концевая часть трещины. Более крупные нарушения сплошности протяженностью сотни метров – десятки и сотни километров определяются как разломы. Для них характерна сдвиговая компонента смещений бортов, в некоторых случаях наблюдаемая на поверхности в осадочном чехле развиговая (отрывная) компонента также вызывается сдвигом в глубинной части разлома (например структуры пулл-апарта). Для разломов большой протяженности (первые километры и более) трудно выделить единую линию, разделяющую геосреду на два блока. Разлом, как правило, представляет со-

бой некую зону существенно измененного структурного и вещественного состояния горных пород. Для них иногда трудно выделить точное положение концевой части, а относительное смещение бортов может существенно отличаться от теоретически предсказываемого для трещин [Осокина, Фридман, 1987].

В работах [Стоянов, 1979; Борняков, 1981; Семинский, 2003;] на природном и модельном материалах изучались особенности формирования внутренней разрывной структуры разломных зон, определялись морфологические параметры опережающих и опережающих вторичных трещин для разных кинематических типов разломов земной коры. Отмечалась неоднородность распространения участков дезинтеграции геосреды вдоль разломов, появление областей **дилатансии** и повышенной **компрессии** (всестороннего сжатия). Исходя из этих особенностей строения в работах [Шерман и др., 1983] был введен термин «*зона динамического влияния разлома*», подразумевающий область, где напряженное состояние близко к предельному и где возникают условия, благоприятные для развития зон деструкции. Термин пришел из анализа поведения осадочного чехла над разломом фундамента, выполненного по данным физического моделирования. В дальнейшем его стали употреблять для всех наблюдаемых на поверхности разломов, определяя им объем, вовлеченный в процесс деструкции пород.

В работах [Паталаха и др., 1987; Чиков и др., 1989] обращалось внимание на зональность **метаморфических преобразований** и особенность структурно-вещественного состояния горных пород разломных зон. Основным характерным элементом строения разломов является уменьшение размера зерен по мере приближения к ядру – центральной части разлома. Породы разломов представляют собой модификации милонитовых пород от протомилонитов до ультрамилонитов и бластомилонитов, которые являются не результатом механического перетирания зерен, а следствием их рекристаллизации – **диспергации кристаллической среды** [Поспелов, 1972], происходящей в зонах сдвига в условиях повышенного флюидосодержания, что само по себе является другой важной особенностью разломов. Здесь надо отметить, что еще одной особенностью зон разломов является их повышенная **флюидонасыщенность**. Если для трещин флюид заполняет все пространство между ее бортами, вызывая в дальнейшем сплошную **минерализацию этого пространства**, то в зонах разломов флюид проникает в области локального дилатансионного разуплотнения, игнорируя локальные участки повышенной компрессии. Проникая в трещины, флюид определяет не только возможность их залечивания, но и возможность последующей активизации в виде сдвига за счет **снижения сил трения** между бортами трещины [Terzaghi, 1948]. Еще одной особенностью разломных зон является неравномерность распределения в их трещинно-поровом пространстве флюидного давления. Само наличие флюидного давления в трещинах и порах горных пород определяет более благоприятные условия для хрупкого разрушения как механизма сброса внутренней энергии, накопленной в упругих деформациях. Отметим также, что участки повышенного всестороннего давления, которые иногда возникают во внутренних участках разломных зон, могут создавать условия для возникновения **компакции геосреды**, определяя возможность **квази-пластического и истинно пластического деформирования**.

Поскольку зоны разлома являются флюидонасыщенными системами, представляющими собой вместилище разномасштабных трещин различного кинематического типа, то такое множество происходящих в них явлений определяет сложную взаимосвязь условий нагружения и ответную реакцию геосреды (см. рис.). В отдельные моменты времени давление флюида в трещинно-поровом пространстве повышается настолько, что снижает силы сопротивления «сухого» кулоновского трения до предельных значений [Byerlee, 1978]. Этот период можно определять как наиболее опасные для возникновения хрупкого разрушения. В периоды локализованного сдвигового течения (локализованный крип) в разломах наблюдается дилатансия пород – появление микро- и макротрещин отрыва, которая тем выше, чем большая структурная неоднородность существует на микро- и макроуровнях. В эти моменты времени флюидное давление падает из-за увеличивающегося объема трещинно-порового пространства, происходит упрочнение геосреды – возможность возникновения хрупкого разрушения уменьшается.



Области различного, зависящего от напряженного состояния (не только от уровня напряжений, но от и взаимосвязи девиаторных напряжений и эффективного всестороннего давления), механического поведения горных пород на диаграмме Мора.

По вертикальной оси – касательные напряжения, по горизонтальной – эффективные нормальные напряжения (вычитается флюидное давление), действующие на произвольных наклонных площадках

Перечисленные процессы: диспергация и дилатансия пород, изменение флюидного давления происходят на фоне физико-химических изменений состояния породного материала разломов. Эти изменения определяются метаморфическими преобразованиями пород, которые в тех условиях, которые существуют в разломах, происходят по законам, отклоняющимся от традиционно изучаемых в петрохимии [Коржинский, 1973]. Подобная особенность прежде всего определяется структурным состоянием пород разломов, *милонитовым их составом*. Подобное состояние определяет резкое возрастание скорости диффузии дисперсных систем, т.к. начиная с некоторого размера (меньше миллиметра) дисперсные частицы приобретают ряд свойств химических компонентов. Высокая дисперсность реагентов, а также наличие флюида способствует более быстрому поступлению вещества к месту роста новых фаз. В таких тонкодисперсных зонах значение энергии, определяющей кинетический барьер между метастабильным и активированным состояниями, может резко падать. Следовательно, изменяются условия начала метаморфических реакций. Но не только степень диспергированности среды и наличие жидкой фазы ускоряет прохождение реакций. Существенную роль играют *девиаторные напряжения и скорости деформирования*. Повышенное их значение в сочетании с *тонкодисперсностью исходных реагентов* может привести к тому, что скорости реакции возрастут на несколько порядков. Эксперименты показывают, что при достаточно высоком уровне сдвиговых напряжений в образцах, изготовленных из порошкообразных солей металлов [Ениколопан и др., 1987], реакция дегидратации осуществляется взрывным образом, со скоростью диффузионного процесса на несколько порядков превышающей скорость диффузии в жидкой фазе. Этот эндотермический процесс происходит в изотермических условиях. Требуемое для реакции тепло выделяется в момент взрыва и полностью используется в ходе химических превращений. Высокий уровень девиаторных напряжений так же, как и высокое всестороннее сжатие, переводит кристаллическую решетку минералов в энергетически возбужденное состояние, что способствует переходу механической энергии непосредственно в химическую. При таком развитии реакции дегидратации в областях сдвига в поровое пространство практически мгновенно впрыскивается большой объем флюида. Подобные процессы, с одной стороны, могут порождать резкое изменение химического состава флюидов, электросопротивления среды и являться источниками электромагнитных излучений, а с другой – сами достаточно сильно зависят от электрических, электромагнитных и радиационных полей.

Таким образом, представленный выше анализ показывает, что разлом, конечно, не просто поверхность контакта двух смежных геологических блоков, как это рассматривается применительно к трещинам. **Разлом сам является трехмерным геологическим телом**, существенно отличающимся от консолидированных блоков не только по структурному строению, но и по вещественному составу. Для разлома трудно выделить концевую область, он как бы постепенно «растворяется». В этой связи и характер перемещений вдоль разлома не соответствует тому, что наблюдается для трещины, где вблизи конца происходит резкое уменьшение амплитуд сдвига. Разлому более характерно постепенное, плавное снижение относительных смещений его бортов. С механической точки зрения закономерности изменения напряженного состояния в окрестности хрупкого разрыва зависят от масштаба явления, разделяясь на типы, отвечающие: дислокациям, трещинам и разрывам.

С позиции анализа возможности формирования в массивах горных пород крупномасштабного хрупкого разрушения – землетрясения, следует говорить о развитии в теле разлома структурно-динамической неоднородности, обусловленной разной стадией процесса механо-химического преобразования вещества [Ребецкий, 2004, 2006, 2007]. Эта неоднородность определяет возникновение «жестких» сегментов – упрочненных разломов, где существуют пониженные кулоновские напряжения при относительно высоком уровне всестороннего тектонического давления и пониженном флюидном давлении. Эти сегменты при резком увеличении флюидного давления наиболее благоприятны для хрупкого разрушения. Другому типу областей, формирующихся в теле разлома, отвечает высокая степень диспергированности среды (ультрамилониты) и низкая скорость дилатансии. Здесь непрерывно идет реакция дегидратации, поддерживающая достаточно высокое флюидное давление. Эти области – *мягкие включения*, они благоприятны для квазипластического течения за счет вращения зерен и агрегатов. В процессе осуществления сверхбыстрой реакции дегидратации в одном из жестких включений начальный кинетический импульс, порожденный пластическими и квазипластическими деформациями на микро-, макро и мегауровне, может привести к хрупкому разрушению близлежащей упрочненной, энергетически насыщенной области. Если процесс хрупкого разрушения будет подхвачен и в соседних упрочненных областях, то он может привести к возникновению протяженного сейсмического разрыва. Другим вариантом может быть прекращение развития разрыва при его внедрении в мягкое включение большого объема. Неустойчивость развития процесса хрупкого разрушения, обусловленная пространственной неоднородностью разломных зон, определяет эти участки как зоны *метастабильного состояния* [Гольдин, 2007].

Неоднородность структурно-вещественного состояния тела разлома порождает и реологическую его неоднородность. Способность различных участков разлома со временем релаксировать действующие в них напряжения различна. По аналогии с квазипластическим течением, осуществляемом не за счет активизации дислокаций кристаллов, а за счет вращения зерен и агрегатов, следует говорить о квазивязком течении, происходящем в «мягких включениях» (участки крипа).

Исследования поддержаны грантом ОНЗ программа № 6 и РФФИ 03-05-64709 и 07-05-64998.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борняков С.А. Тектонофизический анализ процесса формирования трансформной зоны упруго-вязкой модели. В кн.: Проблемы разломной тектоники. Новосибирск: Наука, Сиб. отд. 1981. С. 26-44.
2. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37-54.
3. Ениколопан Н.С., Мхитрян А.А., Карагезян А.С., Хзарджян А.А. Критические явления при взрыве твердых веществ при высоком давлении // ДАН СССР. 1987. Т. 29, № 3. С. 887-890.
4. Коржинский Д.С. Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М.: 1973. 288 с.
5. Осокина Д.Н. Взаимосвязь смещений по разрывам с тектоническими полями напряжений и некоторые вопросы разрыва горного массива // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 120-135.
6. 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.
7. Паталаха Е.И., Лукиенко А.И., Дербенев В.А. Тектонофации мезозоны. Изд. Наука Каз. ССР. Алма-Ата. 1987. 181 с.
8. Поспелов Г.С. Диспергиты и автодиспергация как важная проблема физики лито-петро- тектогенеза. Геология и геофизика. 1972. № 12. С. 53-73.
9. Ребецкий Ю.Л. От анализа тектонических напряжений к новой модели очага землетрясения // «Сейсмические исследования земной коры». Сборник трудов Международной научной конференции. г. Новосибирск. Академгородок. 23-25 ноября 2004. Новосибирск: Изд. СО РАН. 2004. С. 250-256.
10. Ребецкий Ю.Л. Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегании. Сб. Флюид и Геодинамика. М.: Наука. 2006. С. 120-146.
11. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Изд. Наука. 2007. 406 с.
12. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006. Т. 47. № 11. С. 1192-1206.
13. Семинский К. Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд. СО РАН, фил. ГЕОС. 2003. 241 с.
14. Стоянов С.С. Механизм деформирования разрывных зон. М.: Недра, 1979. 144 с.
15. Чиков Б.М., Каргаполов С.А., Ушаков Г.Д. Экспериментальное стресс-преобразование пироксенита // Геология и геофизика. 1989. № 6. С. 75-79.
16. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, Сиб. Отд. 1983. 112 с.
17. Byerlee J.D. Friction of Rocks // Pure and applied geophysics. 1978. Vol. 116. P. 615-626.
18. Chinnery M.A. The deformation of the ground around surface fault // Bul. Seism. Soc. Am. 1961. Vol. 51, N 3. P. 355-372.
19. Terzaghi K. Theoretical soil mechanics. Wiley. New York. 1943. 506 p.

СОВРЕМЕННОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Ребецкий Ю.Л.¹, Сычева Н.А.²¹Институт физики Земли РАН, г. Москва, reb@ifz.ru²Научная станция РАН «Бишкек», г. Бишкек, Киргизия, nelya@gdirc.ru

В самое последнее время для ряда сейсмоактивных регионов получены данные о параметрах напряженного состояния земной коры с использованием метода катакластического анализа (МКА) механизмов очагов землетрясений [1]. Было установлено различие не только характера ориентации осей главных напряжений для участков близки границ литосферных плит и для внутриплитовых областей, но и различие в уровне действующих там напряжений. Однако этот результат мог рассматриваться как исключительный, поскольку реконструкция для внутриплитовой области была выполнена только для одного Алтае-Саянского внутриплитового орогена [2]. Поэтому было выжно получить подтверждение указанной выше закономерности и для других участков повышенной внутриплитовой сейсмичности. С этой целью нами была выполнена реконструкция напряженного состояния земной коры центрального Тянь-Шаня на основе сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений, полученных для сети KNET в период времени с 02.02.1999 по 30.12.2007 [3]. Каталог сети KNET содержал 805 событий с магнитудами от 1.1 до 5.4. Реконструкция напряжений выполнялась по сетке $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ в латеральном направлении и 5 км по глубине. Получены данные о параметрах напряжений для 283, 384, 328 и 176 доменов для глубин 5, 10, 15 и 20 км соответственно.

По результатам реконструкции установлено, что погружение осей максимального сжатия направлено в основном на север – северо-запад (рис. 1, а). При этом существуют области, где эти оси имеют субвертикальное направление, что отвечает режиму горизонтального растяжения (рис. 1, б). Большая часть региона имеет режим горизонтального сдвига при достаточно широком представителе режима горизонтального сжатия. Касательные напряжения на горизонтальных площадках, характеризующие направление воздействия со стороны мантии на земную кору, имеют достаточно мозаичное распределение в отличие от того, что наблюдается для зон субдукции [2]. Около 90% действующих касательных напряжений взаимно компенсированы.