



УДК 550.31+550.34

О динамике формирования крупных разломов литосферы (результаты физического моделирования)

А. В. Черемных

Институт земной коры СО РАН

Аннотация. Обсуждаются результаты физического моделирования крупных разломных зон, формирующихся в упругопластичных моделях литосферы при сжатии, сдвиге и растяжении. Эксперименты проведены на установке «Разлом» с соблюдением теории подобия и при одинаковых исходных граничных условиях, что позволило сопоставить результаты, полученные с разных моделей. Для всех экспериментально воспроизведенных морфолого-генетических типов разломных зон выполнен анализ деформационной динамики составляющих их внутреннюю структуру систем разрывов. В развитие известных представлений о стадийности формирования разломных зон показано, что деформационная динамика внутриразломных разрывных нарушений в пределах стадий и в переходные временные интервалы между стадиями существенно отличается. Выявлена временная периодичность возникновения критических динамических состояний предразрушения систем разрывов, составляющих внутреннюю структуру разломных зон. Такие состояния зафиксированы как перед межстадийными структурными перестройками, так и в пределах стадий перед сменой этапов. При равномерной скорости деформирования в зонах крупных разломов литосферы каждые 2 или 4 млн лет должны возникать особые динамические состояния с формированием разрывных диссипативных структур (РДС). Масштабно-иерархическое строение разломных зон литосферы предполагает формирование менее крупных РДС за более короткие периоды. Установленные закономерности могут быть полезными при изучении сейсмического процесса, а также структур рудных полей и месторождений.

Ключевые слова: разломные зоны, структурные перестройки, периодичность, физическое моделирование, разрывные диссипативные структуры, подобие.

Введение

Известно, что формирование крупного разлома характеризуется определенной последовательностью развития его внутренней структуры: заложением многочисленных мелких разрывов, их последующим избирательным разрастанием и объединением в крупный магистральный шов [1–4; 9–11]. Исследование динамики структурных преобразований в зонах крупных разломов литосферы затруднено из-за большой продолжительности процесса, составляющей миллионы – десятки миллионов лет. Подобные трудности преодолеваются с помощью экспериментальных методов исследования, в частности физического моделирования.

Так, на основе физического моделирования установлено, что в процессе формирования разломной зоны выделяются четыре последовательно сменяющие друг друга стадии [9; 13]: пликативная, ранняя дизъюнктивная, поздняя дизъюнктивная и стадия полного разрушения. Пликативная стадия характеризуется деформацией модельного материала в зоне будущего разлома без образования видимых разрывов. На ранней дизъюнктивной стадии в пределах широкой зоны разлома наблюдается образование и дальнейший рост не взаимодействующих между собой мелких опережающих основной разлом разрывов. Поздняя дизъюнктивная стадия наступает после слияния мелких разрывов в более протяженные опережающие дизъюнктивные дислокации, включая сегменты будущего магистрального сместителя. На стадии полного разрушения деформации возникают только в непосредственной близости от магистрального сместителя, так как связаны с перемещениями крыльев данного дизъюнктива. На этой стадии формируются разрывы, опережающие основной шов, что связано с волнистостью сместителя. Переход от стадии к стадии происходит быстро относительно длительности формирования всей зоны разлома и в связи со значительным изменением внутреннего строения сети разрывов в пределах зоны назван «структурной перестройкой» [9; 13].

Структурные перестройки в зоне разлома могут быть выявлены на основе анализа количественных параметров участвующих в его внутреннем строении разрывов: длина максимального разрыва, плотность разрывов, амплитуда смещения по разрывам, фрактальная размерность сети разрывов и др. [1–2; 4; 8; 9–11; 13; 15]. Как правило, в моделях выделяется несколько структурных перестроек, главная из которых соответствует переходу между ранней и поздней дизъюнктивными стадиями и выражается весьма контрастным изменением перечисленных выше параметров [13].

Целью проведенного нами экспериментального исследования являлось дальнейшее развитие представлений о деформационной динамике внутренней разрывной структуры зон крупных разломов разных морфолого-генетических типов. Все эксперименты выполнены с соблюдением условий подобия при одинаковых исходных граничных условиях: вязкости модельного материала, мощности модели и скорости ее деформирования.

Методика моделирования и сбора количественных показателей

Моделирование выполнено в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН (г. Иркутск). В разные годы проведено семь экспериментов, отличающихся направлением относительного смещения штампов экспериментальной установки при одинаковых остальных параметрах моделей. Три эксперимента проведены для исследования динамики формирования зоны сдвига. Зоны сжатия литосферы изучены в двух опытах. Также в двух опытах воспроизведено формирование зон растяжения литосферы. Во всех опытах относительное перемещение штампов было горизонтальным и отличалось только направлением вектора подвижного штампа относительно неподвижного (рис. 1).

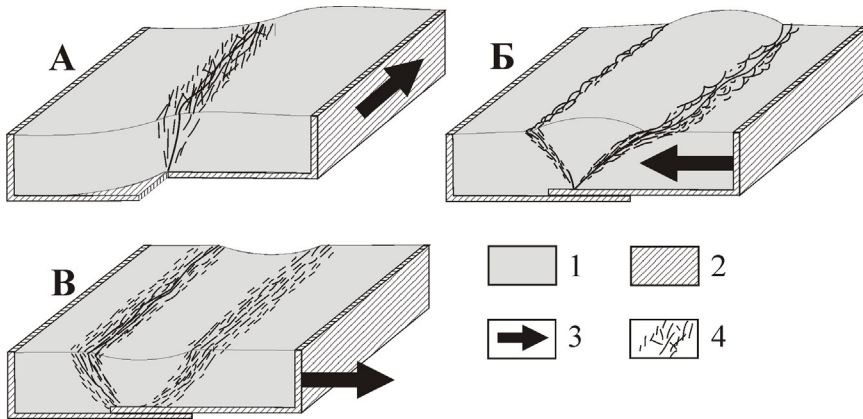


Рис. 1. Схемы моделирования зон сдвига (А), сжатия (Б) и растяжения (В).

1 – модельный материал; 2 – штампы экспериментальной установки;
3 – направление перемещения подвижного штампа; 4 – разрывы

Эксперименты проведены по стандартной методике моделирования на установке «Разлом» [9–11]. Глинистая паста с вязкостью 105 Па·с размещалась на рифленой (для лучшего сцепления) поверхности штампов экспериментальной установки в виде равномерного слоя мощностью 70 мм. Затем один из штампов перемещался с постоянной скоростью, равной 5 мм в минуту. При неизменной длине модели ее ширина оставалась относительно постоянной лишь в условиях сдвига, а при сжатии и растяжении, соответственно, уменьшалась или увеличивалась. Согласно теории подобия [16] при принятых масштабных коэффициентах вязкости, плотности, линейных размеров и времени: 1 мм на модели соответствует 1 км в ее природном аналоге, а 1 минута эксперимента эквивалентна ~1 млн лет природного процесса разломообразования. При таких исходных параметрах модельная скорость смещения 5 мм/мин соответствует природной скорости смещения крыла разлома 5 мм/год.

Формирование магистрального разлома в моделях при заданных параметрах происходит за 17–26 минут в зависимости от способа приложения нагрузки. За это время со средним интервалом в 30–40 секунд производилась фоторегистрация сети разрывов на поверхности моделей (рис. 2). При компьютерной обработке фотографий все имеющиеся на них разрывы переводились в цифровую форму. Полученная таким образом база данных отражала пространственно-временное распределение разрывов в формирующихся разломных зонах. Для количественной оценки изменений, происходящих в пределах моделируемых зон, анализировались длины разрывов, а также плотность и фрактальная размерность сетей разрывов. Плотность разрывов подсчитывалась круглой палеткой с диаметром, равным половине толщины модели, а центр палетки располагался непосредственно в районе формирования магистрального шва. Определение фрактальных размерностей производилось по общей методике для объектов на плоскости [17] – методом подсчета квадратов.

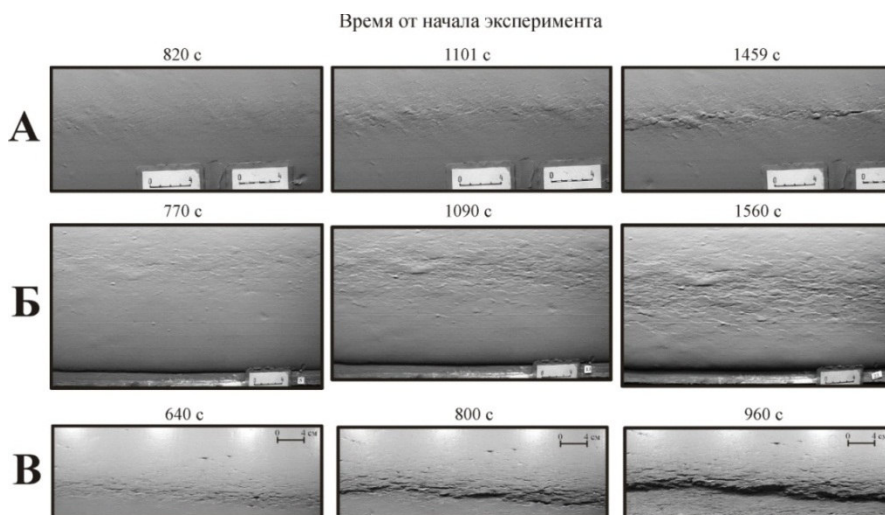


Рис. 2. Фотографии сети разрывов разломных зон в моделях.
А – зона сдвига, Б – зона сжатия, В – зона растяжения

Для анализа деформаций на разных стадиях развития зоны, включая пластическую, на поверхность модели были нанесены маркеры в виде окружностей диаметром 14 мм. В моделях зон растяжения и сжатия литосферы такие окружности были нанесены перпендикулярно простиранию формирующихся разломов, а в опытах простого сдвига создавалась равномерная сеть маркеров как поперек, так и вдоль разломной зоны.

Следует отметить, что, в отличие от единой сдвиговой деструктивной зоны, при растяжении и сжатии в моделях формируются две крупные разломные зоны: одна со стороны подвижного штампа, другая – неподвижного (см. рис. 1). При сопоставлении динамики развития зон различного кинематического типа для растяжения и сжатия были использованы данные по сети разрывов со стороны неподвижного штампа, где процесс происходит быстрее и более контрастно выражен во внутренней структуре зоны.

Результаты экспериментов

Анализ полученных с фотографий количественных параметров разрывов в моделях разломных зон литосферы позволил установить следующую специфику динамики их формирования. Временные вариации фрактальной размерности сетей разрывов в зонах растяжения, сжатия и сдвига показали скачкообразный характер графиков (рис. 3). Увеличению фрактальной размерности сети разрывов в разломной зоне, как правило, предшествует относительное постоянство данного параметра. При растяжении завершение стадии относительного постоянства наблюдается на 720-й и 841-й секундах от начала опыта (см. рис. 3, А). По двум значениям невозможно установить периодичность процесса. Изменение фрактальной размерности сети разрывов в зоне сдвига также не позволяет надежно выявить период, так как на графике фиксируется лишь одно контрастное изменение параметра, соответ-

ствующее главной структурной перестройке (см. рис. 3, *Б*). Имеющиеся изменения графика до и после этого момента сложны для однозначной интерпретации. Достоверно установить периодичность увеличения фрактальной размерности сети разрывов удалось для зоны сжатия (см. рис. 3, *В*). На графике достаточно определенно выделяются моменты, предшествующие увеличению данного параметра – 695, 890, 1090 и 1290 секунд. Таким образом, период составил 200 секунд.



Рис. 3. Графики изменения фрактальной размерности сети разрывов в моделях разломных зон растяжения (А), сдвига (Б) и сжатия (В). Крупными значками на графике отмечены моменты времени, предшествующие контрастному увеличению параметра

Кроме того, анализ длин разрывов во времени выявил еще одну характерную особенность. Известно, что деструктивный процесс в зоне формирующегося разлома во времени идет по пути увеличения длин разрывов с уменьшением их количества [9]. Проведенные нами эксперименты показали, что перед структурными перестройками такой ход процесса нарушается. Фиксируется увеличение количества мелких разрывов как за счет образования новых, так и за счет активизации разрывов, ранее прекративших свое развитие и находившихся в пассивном состоянии в разрывной структуре зоны разлома. Во временной последовательности гистограмм, отражающих распределение внутриразломных разрывных нарушений по длине во всех трех типах разломных зон, в различные моменты времени такие ситуации выявляются по характерному строению гистограммы (рис. 4). В частности, они возникали в зоне сдвига на 660-й, 900-й и 1141-й секундах (см. рис. 4, *А*), в зоне сжатия на 890, 1090 и 1290 секундах (см. рис. 4, *Б*) и в зоне растяжения на 720-й и 920-й секундах (см. рис. 4, *В*). Видно, что на гистограммах, характеризующих эти временные моменты, сеть разрывов в разломных зонах подчиняется закономерной масштабной иерархии, а именно: количество разрывов в каждом последующем интервале длины меньше, чем в предыдущем. Отмеченные особенности деформационной эволюции крупных раз-

ломных зон трактуются нами с позиции синергетики и связываются с периодическим проявлением процессов самоорганизации внутриразломных разрывных систем. Совокупность разноранговых разрывов, вовлеченных в самоорганизацию, мы называем разрывными диссипативными структурами (РДС) [3]. В проведенных экспериментах РДС образуются через 200 секунд в зонах сжатия и растяжения и через 240 секунд в зонах сдвига (рис. 4). При этом в зонах сдвига РДС образуются уже на 11-й минуте эксперимента, в зонах растяжения – на 12-й минуте, а в зонах сжатия – лишь на 17-й минуте опыта.

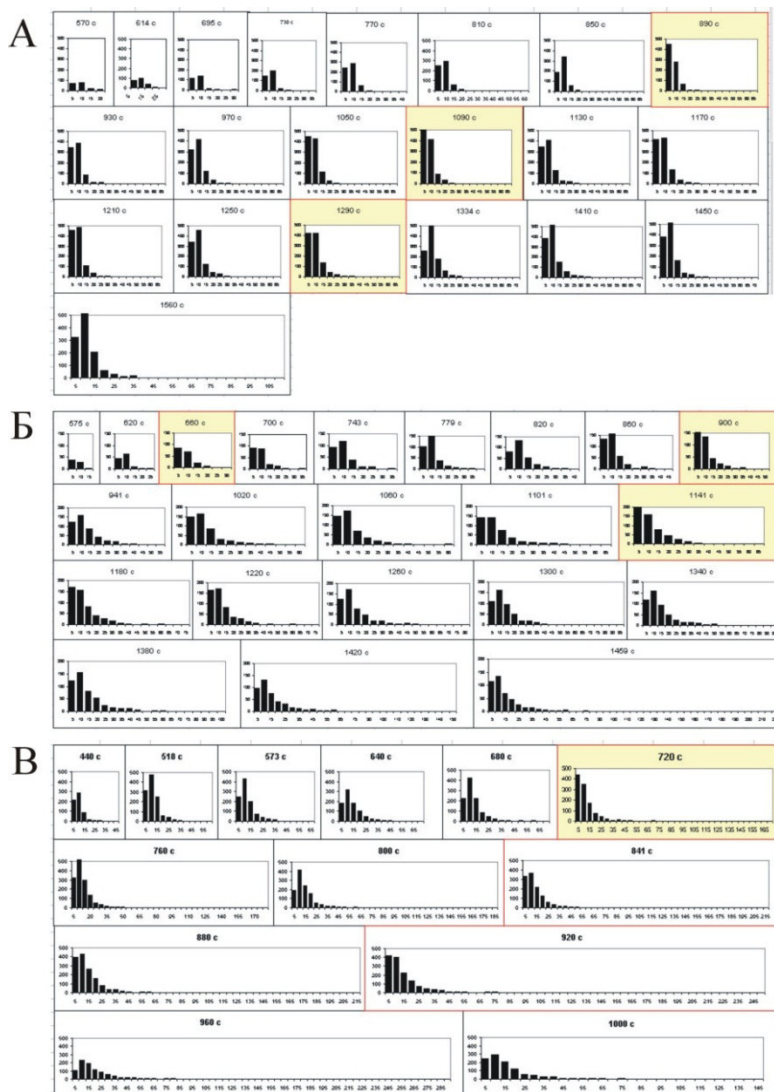


Рис. 4. Гистограммы длин разрывов в моделях разломных зон. А – зона сдвига, Б – зона сжатия, В – зона растяжения. Цветом на гистограммах выделены моменты образования в моделях разрывных диссипативных структур

Отмеченная периодичность возникновения РДС проявляется и во временных вариациях деформационных параметров кольцевых маркеров и плотности разрывов в центральной части сдвиговой зоны. В процессе деформации кольцо превращается в эллипс и испытывает вращательное движение в направлении смещения активного крыла разлома. С моделями снимались замеры длинной оси эллипса и угол между этой осью и простиранием зоны сдвига (рис. 5). Из приведенных графиков видно характерное изменение всех параметров через каждые 240 секунд. Эти моменты отмечены на графиках пунктирной линией. Как правило, до или после этих моментов фиксируются резкие изменения угла между длинной осью эллипса и простиранием зоны (см. рис. 5, *А*), длины этой оси (рис. 5, *Б*) и плотности разрывов (рис. 5, *В*). Кроме этого интервала, дополнительно намечается 120-секундный интервал. Как отмечено выше, первым временным интервалом связано возникновение РДС перед межстадийными структурными перестройками. В работах [4; 14] показано, что, так же как весь процесс формирования зоны разлома подразделяется на стадии, каждая стадия в свою очередь подразделяется на этапы. Возможно, выделяющийся временной интервал в 120 секунд характеризует продолжительность этапов внутри стадии. Смене таких этапов предшествует появление локальных РДС, распад которых сопровождается быстрыми структурными преобразованиями разрывной сети в локальном объеме зоны разлома.

В зонах растяжения и сжатия сопоставить деформации маркеров с РДС сложнее, так как заранее трудно определить область зоны, в пределах которой сформируется магистральный сместитель, чтобы установить маркер по центру. Анализ удлинения маркера, наиболее близко расположенного к магистральному шву зоны растяжения, также позволяет выявить состояния предразрушения (рис. 7). В такие моменты скорость деформации – смещение за единицу времени – заметно снижается с последующим возрастанием, что наблюдается на 573, 720 и 960 секундах эксперимента. При этом величина периодов образования особых состояний в среднем составляет ~ 200 секунд.

Обсуждение полученных результатов

Основные закономерности деформационного процесса в моделях помогают нам составить самые общие представления о процессах структурообразования в зонах разломов в природе. Несомненно, разломообразование в гетерогенной геологической среде при изменчивой геодинамической активности намного сложнее и многообразнее по сравнению с однородными моделями, деформируемыми с постоянной скоростью. Тем не менее многие экспериментально выявленные закономерности в том или ином виде проявляются и в природе.

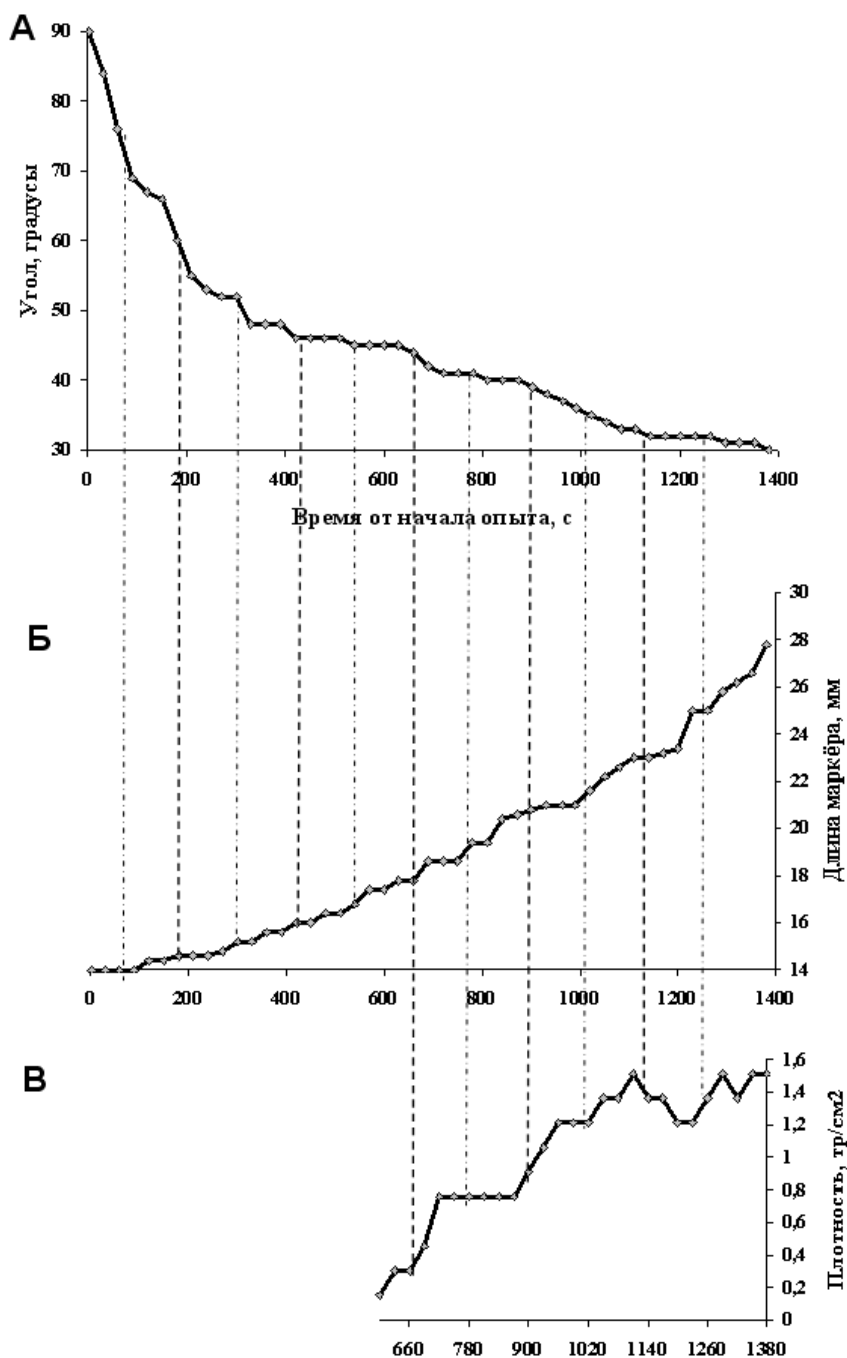


Рис. 5. Динамика изменения количественных параметров в зоне сдвига.
 А – угол между направлением длинной оси эллипса-маркера и простиранием зоны,
 Б – размер длинной оси эллипса-маркера, В – плотность разрывов в центральной части зоны

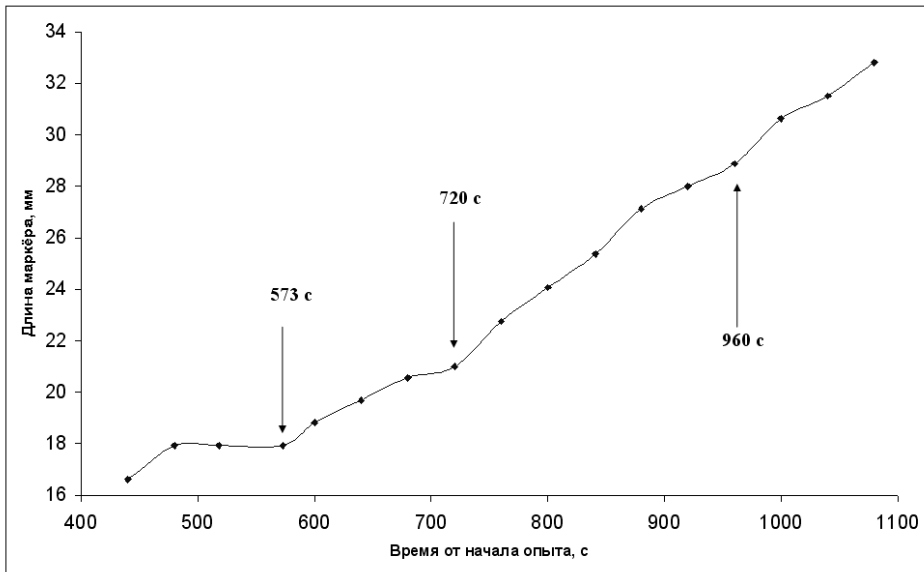


Рис. 6. Динамика изменения длинной оси эллипса-маркера в зоне растяжения

Проведенное моделирование показало, что структурные перестройки, сопровождающиеся быстрым усложнением сети разрывов, происходят в разломной зоне регулярно и могут быть «предсказаны». При равномерной скорости деформирования в зонах крупных разломов литосферы каждые 2 или 4 млн лет (согласно расчетам по теории подобия) должны возникать особые динамические состояния с формированием разрывных диссипативных структур. Масштабно-иерархическое строение внутриразломных систем разрывов предполагает возникновение в зонах разломов РДС разных масштабов и с разной периодичностью. При этом соотношение масштаба и периодичности должно быть близким к закону Гутенберга – Рихтера. Так, самые значительные деформации наблюдаются через наиболее продолжительный период времени и, по-видимому, генерируются всей зоной. Разрывные диссипативные структуры, формирующиеся перед этим событием, охватывают всю зону. В пределах сегментов зоны деформации характеризуются меньшими величинами, а РДС образуются чаще. Последние маркируют в моделях состояния предразрушения. Дальнейшее исследование выявленных закономерностей может представлять интерес для прогноза землетрясений.

Кроме того, установленная специфика формирования зон крупных разломов может быть причиной периодичности магматических образований. Так, в работе Н. Л. Добрецова [7] показано, что периодичность вулканических извержений от сотен тысяч до миллионов лет обусловлена перестройками в зонах спрединга и субдукции. С магматическими породами часто связаны месторождения полезных ископаемых. Существует многочисленная группа месторождений в зонах крупных разломов земной коры [5; 12], ору-

денение в пределах которых связано с особенностями внутренней структуры разрывных нарушений. Также в работе [5] отмечено вероятное влияние временной неравномерности формирования внутренней структуры дизъюнктивов на распространение в их зонах месторождений, косвенным подтверждением которого являются значительные различия проявлений магматизма и оруденения в разломных зонах разных стадий развития. Результаты проведенного моделирования дополняют известные представления о неравномерности процесса разломообразования, в связи с чем могут быть полезными при изучении структур рудных полей и месторождений, особенно с полициклическим развитием оруденения.

Заключение

Известная динамика формирования крупных разломов дополнена выявленной периодичностью образования в моделях особых состояний предразрушения. В эти моменты формируются разрывные диссипативные структуры. Последние, по-видимому, являются разноранговыми. Выявлена периодичность формирования разрывных диссипативных структур наибольшего ранга, охватывающих всю разломную зону. Период их образования составляет 200 секунд при сжатии и растяжении и 240 секунд в условиях простого сдвига. В пределах локального участка зоны простого сдвига намечается дополнительно интервал с меньшим периодом формирования разрывных диссипативных структур, составляющим 120 секунд. В соответствии с теорией подобия в природе подобные структуры должны формироваться каждые 2 или 4 млн лет. Выявленные закономерности требуют дальнейшего изучения, так как имеют практические следствия.

В частности, энергия сейсмического события коррелирует с длиной образовавшегося или активизировавшегося разлома, в связи с чем вероятен прогноз сильных событий на основе анализа графиков повторяемости землетрясений. Для прогноза сильнейших землетрясений необходим анализ сейсмичности в пределах всей зоны и за наиболее продолжительный период времени. Сейсмические события с меньшей магнитудой должны генерироваться сегментами зоны, системами разломов или отдельными разломами. Они происходят чаще, но в меньших по размерам объемах земной коры. Для выявления особых состояний предразрушения необходимо при анализе графиков повторяемости учитывать землетрясения, вызванные формированием зоны соответствующего ранга, и за определенный период времени.

Другое прикладное значение выявленных закономерностей связано с изучением структур рудных полей и месторождений полезных ископаемых. Как показало физическое моделирование, формирование зоны разлома является периодическим процессом, в ходе которого возможны благоприятные условия для внедрения магмы и рудоотложения. С подобным процессом в природе могут быть связаны фазы или этапы оруденения, наблюдаемые через фиксированные промежутки времени.

Автор благодарен кандидату геолого-минералогических наук С. А. Борнякову за ценные советы и замечания, позволившие значительно улучшить текст статьи, а также коллегам по лаборатории тектонофизики А. С. Черемных и Е. А. Маслову за помощь в проведении экспериментов и первичной обработке фактического материала.

Некоторые виды представленных исследований выполнены при поддержке РФФИ проект № 16-05-00154.

Список литературы

1. Борняков С. А. Стадии развития сдвиговой зоны и их отражение в соотношениях амплитуд смещения с длинами разрывов / С. А. Борняков, С. И. Шерман // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 7. – С. 712–718.
2. Борняков С. А. Диссипативные структуры зон разломов и критерии их диагностики (по результатам физического моделирования) / С. А. Борняков, В. А. Трусков, А. В. Черемных // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49. – № 2. – С. 179–187.
3. Борняков С. А. Диссипативные процессы в зонах разломов (по результатам физического моделирования) / С. А. Борняков, Н. В. Семенова // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 862–870.
4. Борняков С. А. Многоуровневая самоорганизация деструктивного процесса в сдвиговой зоне (по результатам физического моделирования) / С. А. Борняков, С. И. Шерман // Физ. мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 4. – С. 107–115.
5. Внутренняя структура континентальных разломных зон: прикладной аспект / К. Ж. Семинский [и др.]. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, Филиал «ГЕО», 2005. – 293 с.
6. Динамика формирования генеральных разломов в зонах растяжения литосферы (результаты физического моделирования) / С. И. Шерман [и др.] // Физ. мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 2. – С. 79–86.
7. Добрецов Н. Л. О периодичности и разномасштабных факторах вулканических извержений // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 12. – С. 2107–2117.
8. Закономерности развития систем разрывов в деструктивных зонах литосферы (результаты физического моделирования) / А. В. Черемных [и др.] // Фракталы и прикладная синергетика : Тр. ФИПС-03 / под ред. В. С. Ивановой, В. У. Новикова. – М., 2003. – С. 94–98.
9. Разломообразование в литосфере: зоны сдвига / С. И. Шерман [и др.]. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1991. – 262 с.
10. Разломообразование в литосфере: зоны растяжения / С. И. Шерман [и др.]. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1992. – 228 с.
11. Разломообразование в литосфере: зоны сжатия / С. И. Шерман [и др.]. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1994. – 263 с.
12. Семинский Ж. В. Тектонофизический анализ обстановок локализации рудных полей и месторождений в разломных зонах земной коры / Ж. В. Семинский, К. Ж. Семинский // Геология рудных месторождений. – 2004. – № 6. – С. 695–708.
13. Семинский К. Ж. Внутренняя структура континентальных разрывных зон: тектонофизический аспект / К. Ж. Семинский. – Новосибирск : ГЕО, – 2003. – 244 с.
14. Тарасова А. А. Экспериментальное исследование закономерностей пространственно-временной активизации разломов в деструктивных зонах литосферы / А. А. Тарасова, С. А. Борняков // Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле. – 2014. – Т. 9. – С. 118–131.
15. Черемных А. В. Динамика роста разломов зон растяжения литосферы (результаты моделирования) // Тектоника неогена: общие и региональные аспекты : материалы 34-го Тектон. совещания. – М., – 2001. – Т. 2. – С. 290–294.

16. Шерман С. И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика. – 1984. – № 3. – С. 8–18.

17. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature / B. B. Mandelbrot. – N. Y. : Freeman, 1982. – 121 p.

About Dynamics of the Formation of Major Faults Lithosphere (Results of Physical Modeling)

A. V. Cheremnykh

Institute of the Earth's Crust SB RAS

Abstract. The article discusses the results of physical modeling of major fault zones formed in the elasto-plastic models of the lithosphere under compression, shear and tension. The experiments were carried out at the «Fault» with respect to the theory of similarity and using the same initial boundary conditions that allow to compare results obtained with different models. For all experimentally reproduced morpho-genetic types of the fault zones the analysis of the deformation dynamics of the components of the inner structure of the systems ruptures. In the development of known ideas about the stages of formation of fault zones, it is shown that the deformation dynamics internal faults within the stages and in the transient time intervals between stages is significantly different. Revealed temporal periodicity of critical dynamical states prefracture systems break of the internal structure of fault zones. Such states are noted as before interstage structural rearrangements, and within stages, before the stage change. Fault dissipative structure (FDS) should be formed in major fault zones every 2 and 4 million years. Scale-hierarchic structure of fault zones in the lithosphere involves the formation of a smaller FDS for shorter periods. The installed regularities can be useful in the study of the seismic process and structures of ore fields and deposits.

Keywords: fault zones, structural adjustment, frequency, physical modeling, fault dissipative structure, similarity.

References

1. Bornyakov S.A., Sherman S.I. Multilevel self-organization of destruction in a shear zone (data of physical modeling). *Physical Mesomechanics*. [Fizicheskaja mezomehanika], 2000, vol. 3, no. 4, pp. 107-115 (in Russian).

2. Bornyakov S.A., Sherman S.I. Multistage evolution of strike-slip faults reflected in their displacement-fault length relationship (tectonophysical modeling). *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 2003, vol. 44, no. 7, pp. 712-718 (in Russian).

3. Bornyakov S.A., Truskov V.A., Cheremnykh A.V. Dissipative structures in fault zones and their diagnostic criteria (from physical modeling data). *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 2008, vol. 49, no. 2, pp. 138-143 (in Russian).

4. Bornyakov S.A., Semenova N.V. Dissipative processes in fault zones (based on physical modeling results). *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 2011, vol. 52, no 6, pp. 862-870 (in Russian).

5. Dobretsov N.L. Periodicity and driving forces of volcanism. *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 2015, vol. 56, no. 12, pp. 1663-1670 (in Russian).

6. Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A. et al. *Razlomoobrazovanie v litosfere: zony sdviga* [Faulting in the lithosphere. Wrench fault zones]. Novosibirsk, Nauka, 1991. 262 p.

7. Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A. et al. *Razlomoobrazovanie v litosfere: zony rastjazhenija* [Faulting in the lithosphere. Extensional zones]. Novosibirsk, Nauka, 1992. 228 p.
8. Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A. et al. *Razlomoobrazovanie v litosfere: zony szhatija* [Faulting in the lithosphere. Compressional zones]. Novosibirsk, Nauka, 1994. 263 p.
9. Seminskii Zh.V., Seminskii K.Zh. Tectonophysical analysis of environments for localization of ore fields and deposits in fault zones of the earth's crust. *Geologija rudnyh mestorozhdenij* [Geology of Ore Deposits], 2004, vol. 46, no. 4, pp. 252-262 (in Russian).
10. Seminsky K.Zh. *Vnutrennjaja struktura kontinental'nyh razryvnyh zon: tektonofizicheskiy aspekt* [Internal structure of continental fault zones: tectonophysical aspect]. Novosibirsk, GEO, 2003. 244 p.
11. Seminsky K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V. et al. *Vnutrennjaja struktura kontinental'nyh razlomnyh zon: prikladnoj aspekt* [Internal structure of continental fault zones: applied aspect]. Novosibirsk, Geo, 2005. 293 p.
12. Tarasova A.A., Bornyakov S.A. Experimental study of regularities space and temporal fault activation in destructive zones of shear. *Izvestiya IGU. Ser. "Nauki o Zemle"*. The Bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences", 2014, vol. 9, pp. 118-131 (in Russian).
13. Cheremnykh A.V. Dynamics of fault zones stretching of the lithosphere (modeling results). *Tektonika neogeja: obshhie i regional'nye aspekty* [Neogea tectonics: General and regional aspects]. Moscow, 2001, vol. 2, pp. 290-294 (in Russian).
14. Cheremnykh A.V., Bornyakov S.A., Gladkov A.S. et al. Regularities of formation of the ruptures systems in the destructive zones of the lithosphere (physical modeling results). *Fraktaly i prikladnaja sinergetika* [Fractals and applied synergetics]. Moscow, 2003, pp. 94-98 (in Russian).
15. Sherman S.I. The physical experiment in the tectonics and the similarity theory. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 1984, no. 3, pp. 8-18 (in Russian).
16. Sherman S.I., Cheremnykh A.V., Bornyakov S.A. et al. Dynamics of major faulting in extension zones of the lithosphere (Physical modeling results). *Fizicheskaja mezomehanika* [Physical Mesomechanics], 2002, vol. 5, no. 2, pp. 73-79 (in Russian).
17. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. N. Y., 1982, 121 p.

Черемных Александр Викторович
 кандидат геолого-минералогических
 наук, доцент, старший научный
 сотрудник
 Институт земной коры СО РАН
 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
 тел.: (3952) 42-47-59
 e-mail: cherem@crust.irk.ru

Cheremnykh Alexander Victorovich
 Candidate of Sciences (Geology
 and Mineralogy), Associate Professor,
 Senior Researcher
 Institute of the Earth's Crust SB RAS
 128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
 tel.: (3952) 42-47-59
 e-mail: cherem@crust.irk.ru