

ДИССИПАТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ
(по результатам физического моделирования)

С.А. Борняков, Н.В. Семенова

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

Зоны активных разломов относятся к категории открытых систем. Энергия тектонических напряжений, накапливающаяся и перераспределяющаяся в областях их активного динамического влияния под действием разных энергетических источников, расходуется главным образом на медленные тектонические и дискретно проявляющиеся быстрые сейсмические диссипативные процессы. В статье на примере результатов физического моделирования процесса формирования зоны крупного разлома показаны пространственно-временные взаимоотношения тектонического и сейсмического диссипативных процессов и оценены контролирующие их факторы. Показано, что тектонический и сейсмический диссипативные процессы имеют определенную адресную пространственно-временную привязку в структурной эволюции зоны разлома и действуют в противофазе. Как правило, при максимальной реализации одного другой характеризуется минимальным проявлением, и эти моменты совпадают с началом или концом стадий, этапов или других более мелких эволюционных периодов. Частота повторяемости последних, в зависимости от масштабного уровня деформационного процесса, определяет периодичность активизации тектонической и сейсмической диссипации и их пространственные характеристики.

Тектонофизика, разломы, диссипативные процессы, физическое моделирование.

DISSIPATIVE PROCESSES IN FAULT ZONES
(based on physical modeling results)

S.A. Bornyakov and N.V. Semenova

Active fault zones are considered open systems. Tectonic stress energy accumulated and redistributed in the areas of its active dynamic influence under the action of various energy sources is spent mainly in slow tectonic and discrete rapid seismic dissipative processes. Based on the results of physical modeling of the formation of a large fault zone, the spatial and temporal relations between tectonic and seismic dissipative processes are analyzed and their controlling factors are estimated. Tectonic and seismic dissipative processes are in particular spatial and temporal relations during the structural evolution of the fault zone and occur in antiphase. As a rule, the maximum development of one process coincides with the minimum occurrence of the other, and these moments correspond to the beginning or end of stages, phases or other shorter evolutionary periods. Depending on the scale of the deformation process, the frequency of repeatability of these periods determines the periodicity of activation of tectonic and seismic dissipations and their spatial features.

Tectonophysics, faults, dissipative processes, physical modeling

ВВЕДЕНИЕ

Зоны активных разломов как механические системы с трением относятся к категории открытых систем [Пригожин, Кондепуди, 2002]. Энергия тектонических напряжений, накапливающаяся и перераспределяющаяся в областях их активного динамического влияния под действием разных энергетических источников, расходуется главным образом на деформационные процессы, реализующиеся в виде остаточных пластических и разрывных деформаций. Первые связаны с медленно протекающим формоизменением горных пород за пределом текучести, вторые с их быстрым хрупким разрушением за пределом прочности. Такое разделение деформационных энергозатрат позволяет выделить в зонах активных разломов два основных диссипативных процесса, реализующихся одновременно, но с разной интенсивностью: длительно действующий медленный — тектонический, и эпизодически проявляющийся быстрый — сейсмический. Результатом первого являются пликативные структурные формы и медленные крипповые движения по внутриразломным разрывам, результатом второго — дискретные импульсные подвижки по существующим разрывам и сейсмогенное образование новых.

Цель настоящей статьи выявить пространственно-временные взаимоотношения тектонического и сейсмического диссипативных процессов и оценить контролирующие их факторы, используя в качестве фактурной основы результаты физического моделирования.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Процесс формирования крупной разломной зоны в упруговязкопластичной модели воспроизводился при деформации простого сдвига (рис. 1). Моделирование выполнено с соблюдением условий подобия с использованием критерия-комплекса

$$\eta/\rho g L T = \text{const} \quad (1)$$

по стандартной методике [Гзовский, 1975; Шерман и др., 1991]. Модель из водной пасты монтмориллоновой глины с хорошо изученными свойствами [Семинский, 1986] длиной 1.2 м, шириной 0.5 м и толщиной 0.1 м размещалась на двух штампах, один из которых был подвижен и смещался относительно другого с постоянной скоростью $5 \cdot 10^{-5}$ м/с. При такой скорости деформирования модельный материал проявляет вязкость $\eta = 10^{4-5}$ Па·с.

В ходе эксперимента с помощью тензодатчиков фиксировались действующая на модель нагрузка (P) и амплитуда смещения (a_n) на отдельных разрывах внутри формирующейся сдвиговой зоны (см. рис. 1).

Развивающийся в модели процесс разрывообразования фотографировали цифровым фотоаппаратом с периодичностью 30 с, начиная с десятой минуты эксперимента. Поскольку основные структурные преобразования в зоне сдвига, отчетливо отражающиеся в поведении количественных параметров разрывов, происходят в первую и вторую стадии ее формирования [Шерман и др., 1991; Семинский, 2003], то этими двумя стадиями мы ограничили объем сбора и последующей весьма времяземкой обработки исходного фактического материала. Из более чем сорока фотографий, снятых в ходе всего эксперимента, для анализа были использованы первые 20, отражающие эволюцию процесса разрывообразования в модели в первую и вторую стадии (фотографии 1—9 и 10—20 соответственно). Для примера одна из них и составленные по ней структурные схемы с расшифровкой тестируемых количественных параметров приведены на рис. 2.

На photographиях в центральной части сдвиговой зоны выделялась рабочая прямоугольная площадка размером 0.275×0.125 м, разделенная на 33 равновеликие субплощадки. Для каждой из них определялись количество разрывов (N), их длина (L) и накопленная амплитуда смещения (A) с последующим суммированием их значений ($\sum N_i$, $\sum L_i$, $\sum A_i$) по всем субплощадкам. Дополнительно для двух пространственно разнесенных реперных линий № 40—40 и № 55—55 оценивалась суммарная амплитуда смещения на всех пересекаемых ими разрывах ($\sum a_i$) (см. рис. 2). Вариации перечисленных параметров отражают интегральную динамику разрывообразования в разломной зоне. Для получения представлений о деталях этого процесса по простираению двух протяженных разрывов, выбранных как эталонные, были оценены вариации амплитуды смещения по перемещению реперных линий (a_i) и пластических деформаций модельного материала по изменению расстояний между смежными парами реперных линий (m_i) одновременно в их активном и пассивном крыльях (см. рис. 2, B). При этом за активное принималось крыло, расположенное со стороны подвижного штампа экспериментальной установки (см. рис. 1).

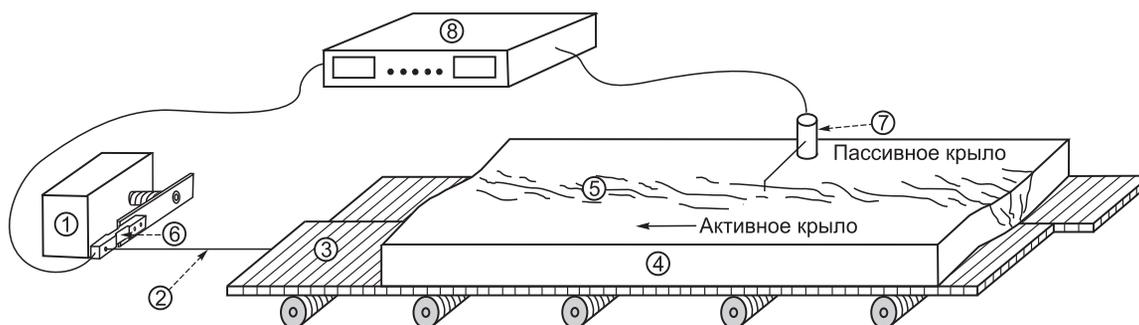


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для моделирования зоны сдвига с инструментальным комплексом для мониторинга действующей на модель нагрузки и амплитуд смещений по разрывам.

1 — электромеханический привод, 2 — тросик, 3 — подвижный штамп установки, 4 — модель, 5 — формирующаяся зона сдвига, 6 — тензодатчик нагрузки, 7 — тензодатчик амплитуд смещений, 8 — электронный блок для регистрации показаний тензодатчиков.

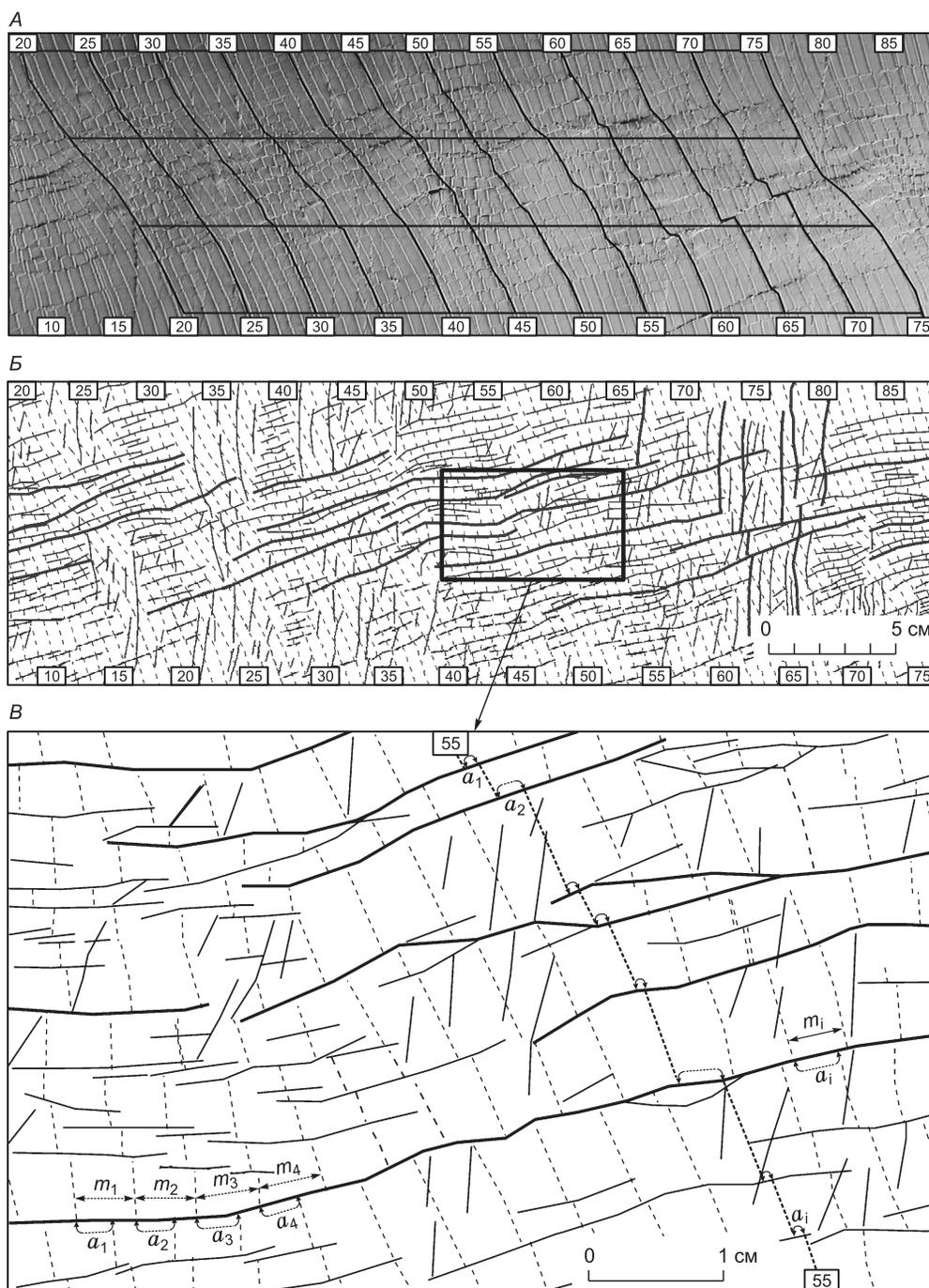


Рис. 2. Сдвиговая зона на модели (вид в плане) (А), ее структурная схема (Б) и увеличенный фрагмент структурной схемы (В).

Расшифровка параметров $a_1 \dots a_p$, $\Delta m_1 \dots \Delta m_i$ дана в тексте. Цифры — реперные линии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Все полученные данные по перечисленным выше количественным параметрам представлены в виде графиков. На большинстве из них по горизонтальной оси через порядковые номера фотографий опосредованно отображено время. Как отмечено выше, временной интервал фотосъемки составлял 30 с.

Первая группа графиков отражает динамику изменений приложенной к модели деформирующей нагрузки в ходе эксперимента (рис. 3).

Общей характерной их особенностью является наличие вариаций ее значений во времени в виде разных по амплитуде и длительности циклов рост—снижение, среди которых уверенно выделяются периоды разной длительности. Первые три периода продолжительностью от 6 до 10 мин соответствуют трем стадиям развития разломной зоны (см. рис. 3, *А*) [Шерман и др., 1991; Семинский, 2003]. Каждая из стадий подразделяется на три этапа, которым соответствуют более дробные периоды по 1.5—3 мин (рис. 3, *А*). Они, в свою очередь, содержат в себе более мелкую периодичность в пределах 3—15 и 0.2—1.5 с (см. рис. 3, *Б*, *В*). В пересчете через уравнение подобия (1) выделенным модельным периодам 6—10 и 1.5—3 мин, 3—15 и 0.2—1.5 с будут соответствовать природные периоды 6—10 и 1.5—3 млн лет, 50—250 и 3—25 тыс. лет, отражающие динамику развития зоны крупного разлома протяженностью до тысячи и более километров с шириной области активного динамического влияния до сотни километров и более, при скорости смещения его крыльев 6 мм/год. Из приведенных результатов следует, что самые крупномасштабные сейсмические активизации, в которые вовлекается вся внутриразломная структура при межстадийных перестройках, по экспериментальным оценкам, могут протекать первые миллионы лет. Менее масштабные сейсмические активизации между этапами и внутри этапов могут укладываться в ряд длительностей, измеряемых первыми сотнями, первыми десятками тысяч лет, первыми тысячами лет.

Вторая группа графиков отражает динамику развития разрывных нарушений сдвиговой зоны в пределах тестовой площадки в ходе ее структурной эволюции (рис. 4). На них представлены вариации суммарных значений количества разрывов N (см. рис. 4, *А*), их длины L (см. рис. 4, *Б*) и амплитуды смещения по ним A (см. рис. 4, *В*). Из приведенных кривых следует, что изменение во времени всех перечисленных параметров носит закономерный периодический характер. Для выбранных граничных условий эксперимента длительность вариации рост—снижение параметров составляет 1—1.5 мин. Во временных рамках каждой стадии имеют место три таких вариации, что позволяет говорить о реализации в их пределах трех качественно повторяющихся деформационных этапа (см. рис. 4). Сопоставление полученных кривых показывает в целом достаточно высокую степень согласованности в поведении всех рассмотренных параметров разрывов. Однако такая «региональная» синхронность не всегда проявляется на локальном уровне. В разных локальных участках сдвиговой зоны изменения одноименных тестовых параметров в одни и те же моменты времени могут отличаться как по абсолютным значениям, так и по направленности. Это наглядно демонстрирует следующая группа графиков, отражающих вариации суммарных накопленных амплитуд смещений по разрывам и их частных изменений за контрольные интервалы времени на пространственно разнесенных двух профилях (№ 40—40 и 55—55) (см. рис. 2; рис. 5, *А*, *Б*) и трех субплощадках (№ 7, 16, 21) (см. рис. 5, *В*, *Г*). Эта же тенденция характерна для вариаций суммарных, кумулятивных амплитуд смещений и их частных

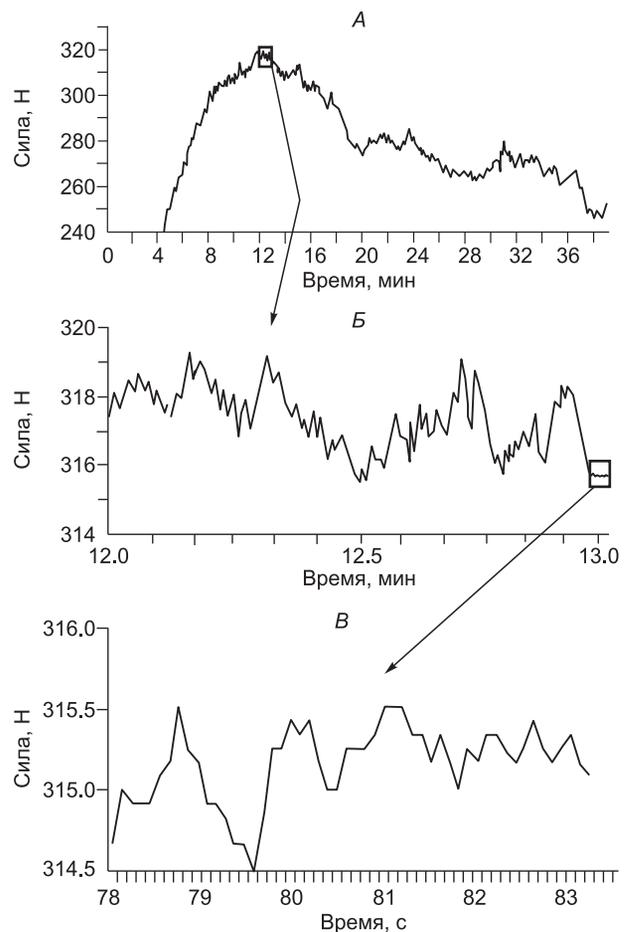


Рис. 3. Вариации приложенной к модели нагрузки при формировании в ней сдвиговой зоны для всего процесса (*А*), его минутных (*Б*) и секундных (*В*) временных интервалов.

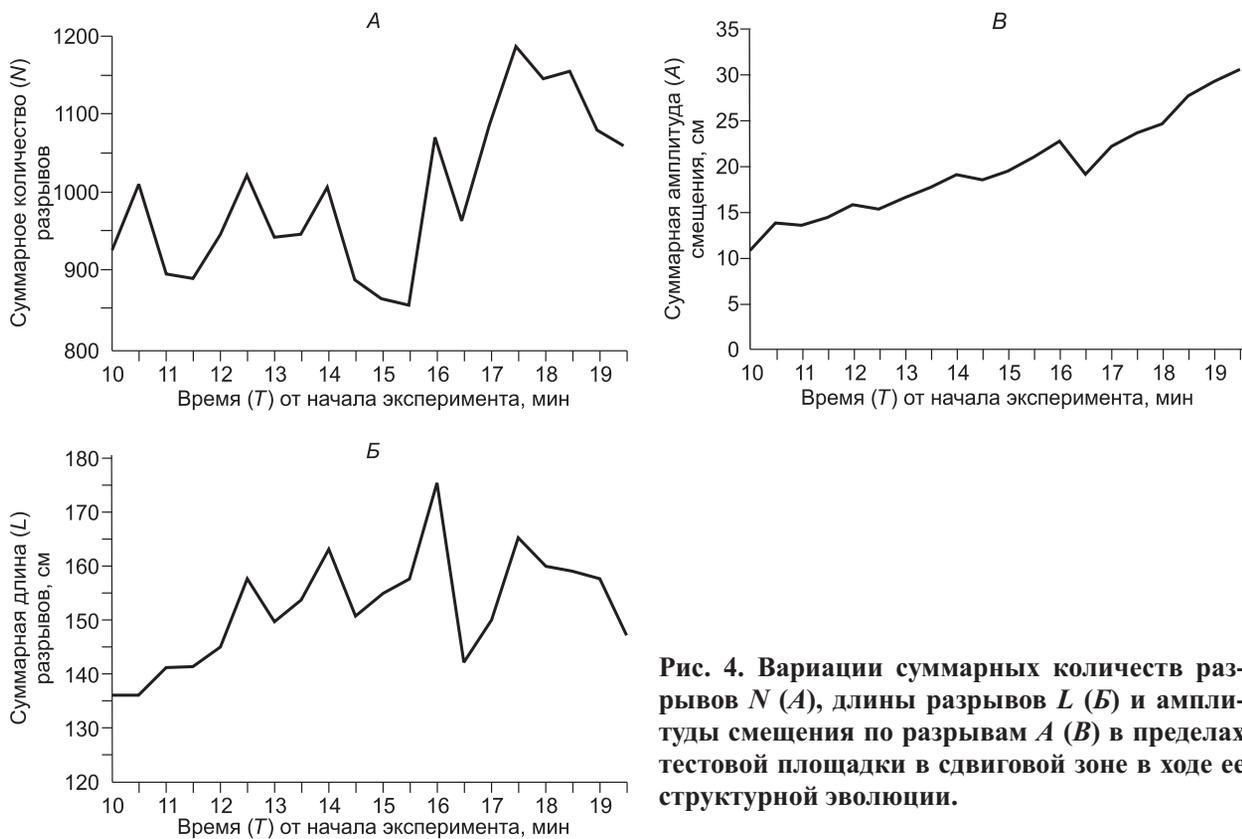


Рис. 4. Вариации суммарных количеств разрывов N (A), длины разрывов L (B) и амплитуды смещения по разрывам A (B) в пределах тестовой площадки в сдвиговой зоне в ходе ее структурной эволюции.

изменений за единичные интервалы времени и на двух отдельных разрывах вдоль их простирания (см. рис. 2, B; рис. 6, A, B), а также для вариаций значений пластической деформации модельного материала в областях динамического влияния этих же разрывов в их активных и пассивных крыльях (см. рис. 2, B; рис. 7; 8, A, B).

Тензометрическая регистрация амплитуд смещений на отдельных контрольных разрывах также показала неравномерность их накопления во времени (рис. 9). Из приведенных графиков следует, что перемещение активных крыльев этих разрывов в локальной точке наблюдения то ускоряется, то замедляется, о чем можно судить по изменению угла наклона отдельных отрезков кривых к оси абсцисс по ходу развития деформационного процесса. Чем больше его значения, тем выше скорость смещения по тестируемому разрыву (см. рис. 9). Кроме вариаций скорости однонаправленного левостороннего смещения, согласно с направлением движение крыльев сдвиговой зоны, на отдельных разрывах имеют место криповые и импульсные подвижки обратного знака — правосторонние смещения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее на основе результатов моделирования и полевых исследований было показано, что внутренняя структура зон разломов развивается в рамках трех стадий неравномерно, но однонаправленно, от многочисленных мелких разрывов, через избирательное разрастание одних и переход в пассивное состояние других, к единому магистральному шву [Шерман и др., 1983, 1991; Семинский, 2003]. Основные перестройки их внутренней разрывной структуры происходят при смене стадий в относительно короткие временные отрезки и предваряются масштабными процессами самоорганизации с образованием разрывных диссипативных структур (РДС) [Борняков и др., 2004, 2008]. Их специфическая кооперативная внутренняя динамика способствует накоплению в их пределах высоких напряжений, достаточных не только для активизации ранее перешедших в пассивное состояние внутриразломных разрывных нарушений, но и для образования новых. В отличие от тектонической диссипации, постоянно, но с разной интенсивностью проявляющейся в активной разломной зоне, сейсмическая диссипация характеризуется пространственно-временной избирательностью. Она реализуется дискретно и в двух видах. Значительная ее часть приходится на временные моменты выхода разрывных систем из критического состояния, т.е. при распаде разномасштабных РДС на границах между этапами и стадиями. Протекающий в них «сейсмогенный» процесс по своему механизму соответствует модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Мячкин и др., 1975]. В пределах этапов и стадий сейсмическая диссипация в основ-

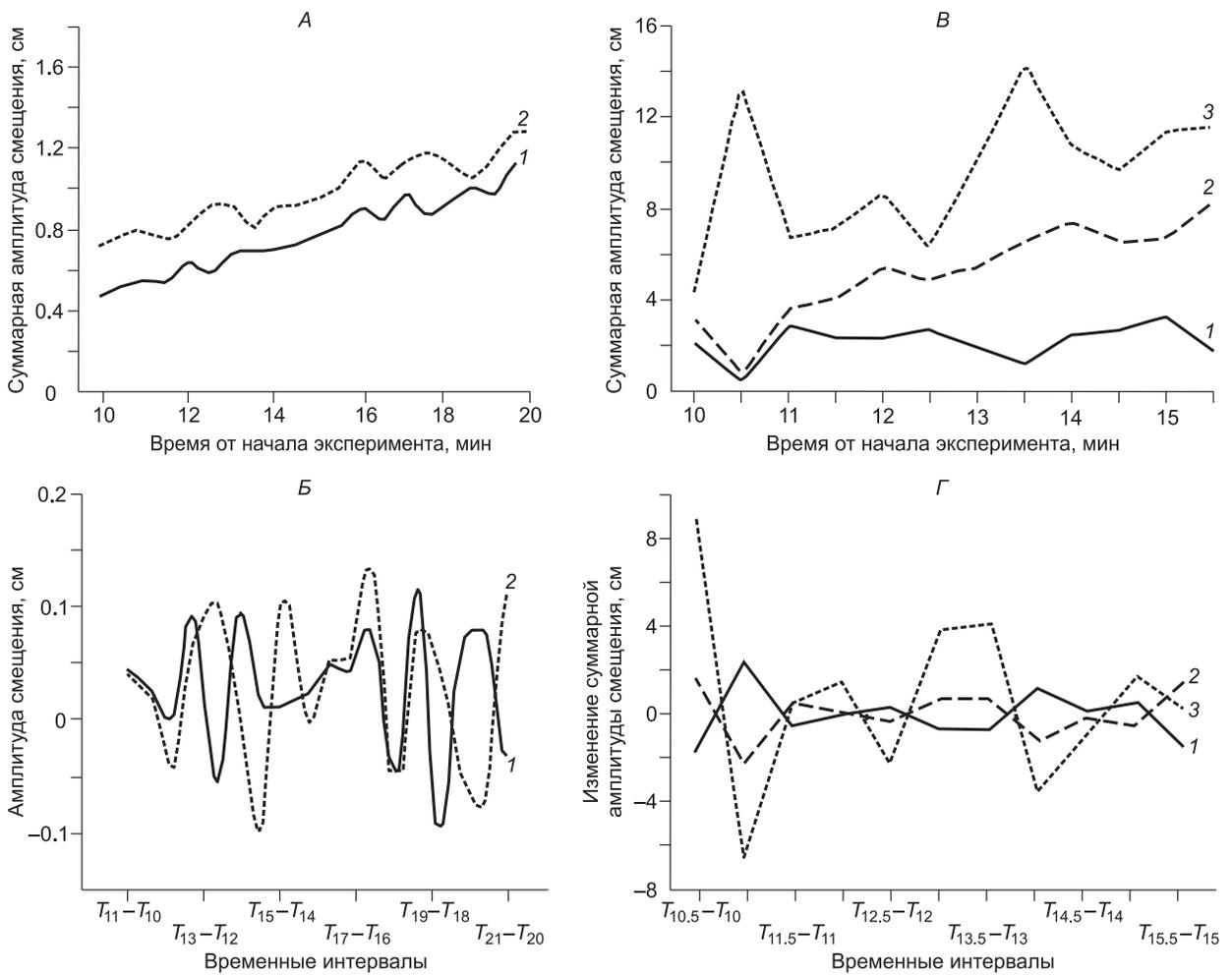


Рис. 5. Вариации суммарных накопленных амплитуд смещений (А, В) по разрывам и их частных изменений (Б, Г) за контрольные 30-секундные интервалы времени на пространственно разнесенных двух профилях (А, В) и трех субплощадках (В, Г).

Здесь и далее: 1—3 — ряды.

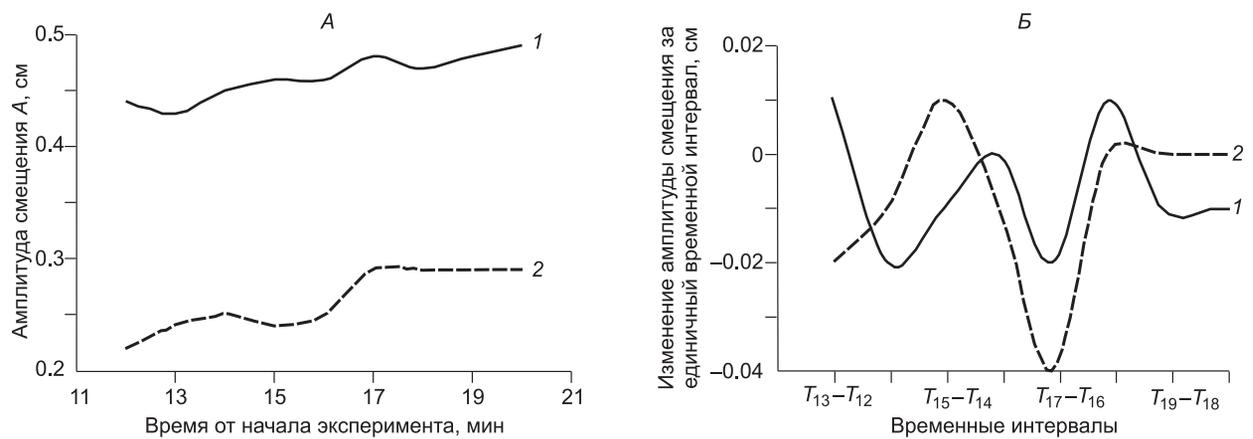


Рис. 6. Вариации суммарной амплитуды смещения (А) и ее частных изменений (Б) на двух контрольных разрывах вдоль их простирания за единичные интервалы времени.

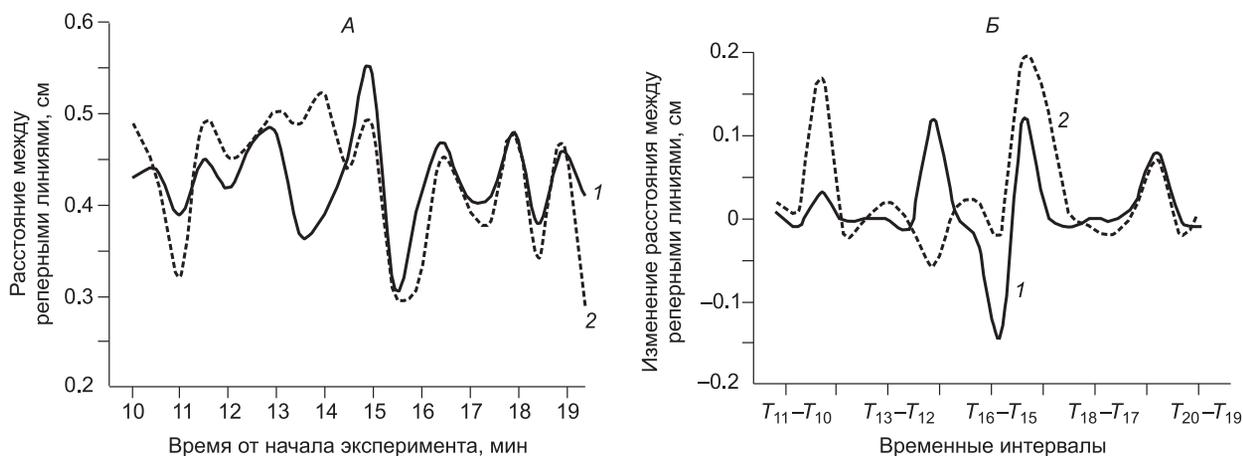


Рис. 7. Вариации расстояний между реперами в активном (ряд 1) и пассивном (ряд 2) крыльях по простираанию разрывов по всей их длине (А) и на отдельных локальных участках (Б).

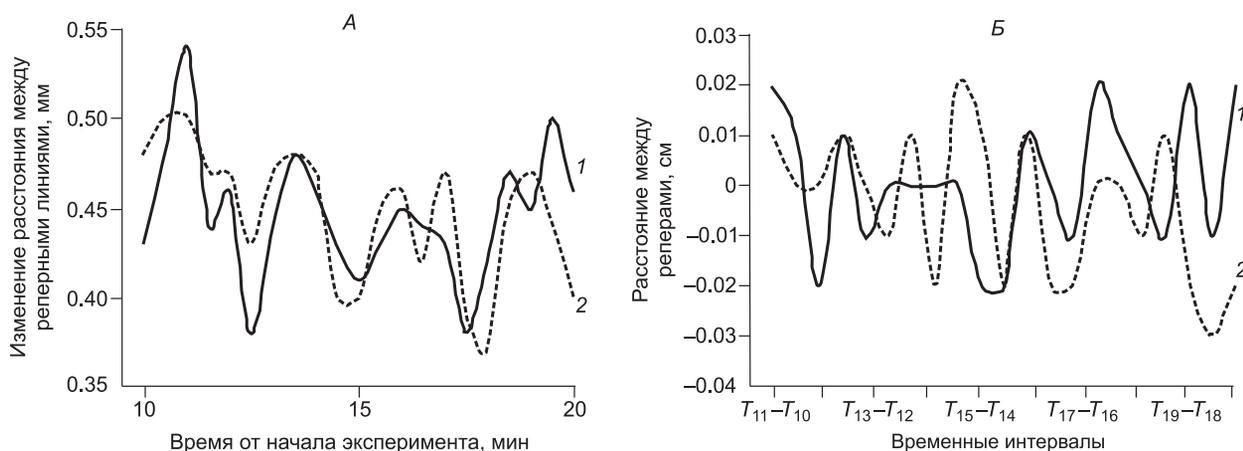
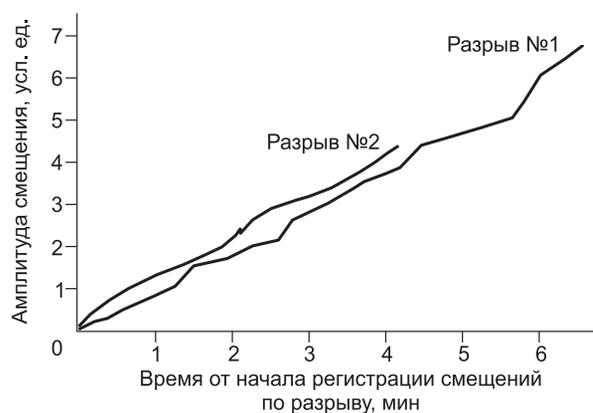


Рис. 8. Вариации кумулятивных значений расстояний между двумя смежными реперами (А) и их приращений за единичные интервалы времени в активном (ряд 1) и пассивном (ряд 2) крыльях разрыва в процессе развития сдвиговой зоны.

ном реализуется за счет импульсных подвижек по внутриразломным разрывам по модельному механизму stick-slip [Brace, Byerlee, 1966].

Выявленная ранее периодическая динамика внутренней разрывной структуры зоны разлома в виде последовательной смены трех стадий находит свое продолжение в рамках каждой отдельной стадии. Так, анализ поведения параметров N , L и A показывает, что в пределах стадий деформационный процесс также развивается неравномерно, проявляя автомодельность на более низком пространственно-временном масштабном уровне. Так же как весь эволюционный процесс структурообразования в зоне крупного разлома подразделяется на стадии, каждая отдельная стадия, в свою очередь, подразделяется на три временных, качественно повторяющихся интервала или этапа. В первый этап закладываются многочисленные непротяженные разрывы первого масштабного ранга, их количество (N) возрастает до некоторого максимума, что указывает на то, что они исчерпали свой эволюционный ресурс, достигнув некоторой критической плотности. Из-за дифференцированного характера распределения деформаций и скоростей деформации в сдвиговой зоне [Борняков, 1981; Шерман и др., 1983, 1991; Семинский, 2003] разрывообразование в пределах разных ее локальных участков отличается по степени деформационной активности и времени перехода в критическое состояние. В том локальном этапе, где это состояние достигнуто, подвижность крыльев разрывов снижается, что отражается в уменьшении накопленной суммарной амплитуды смещения (A) за контрольные интервалы времени, т.е. в снижении доли сейсмической диссипации упругих напряжений за счет подвижек по разрывам. При постоянной скорости сме-

Рис. 9. Графики накопления амплитуды смещения в локальных точках двух контрольных разрывов по тензометрическим данным.



шения крыльев формирующейся зоны разлома, уменьшение параметра A неизбежно сопровождается локальным ростом уровня напряжений, поскольку даже существенно увеличивающаяся при этом тектоническая диссипация не релаксирует их в условиях прогрессирующей деформации. В таких стесненных условиях несколько существующих разрывов первого ранга, как правило наиболее крупных, объединяются, порождая разрыв нового масштабного ранга. Другая часть разрывов, попавшая в область его динамического влияния, прекращает свое развитие, переходя в пассивное состояние. Заложение в локальных участках новообразованных разрывов сопровождается резкой интенсификацией деструктивного процесса с возрастанием сейсмической диссипации и минимизацией диссипации тектонической. После заложения разрывов второго ранга, деформационный процесс вступает во второй этап, и качественно повторяется, со временем переходя в завершающий для первой стадии третий этап. После межстадийной структурной перестройки деструктивный процесс в формирующейся разломной зоне вступает во вторую стадию с аналогичным трехэтапным сценарием разрывообразования в рамках новообразованной системы и на новом масштабном уровне. Принципиальное отличие структурных перестроек между этапами и стадиями заключается в том, что первые способствуют избирательному дискретно-эволюционному разрастанию существующей системы разрывов, не оказывая существенного влияния на ширину области активного структурообразования (ОАС) разломной зоны [Борняков, 1990], тогда как вторые приводят к заложению новой системы на фоне резкого сокращения латеральных размеров ОАС.

Раздельный анализ вариаций количественных параметров (N , A и L) по субплощадкам и отдельным разрывам показал, что если протекающий во всей тестовой площадке разлома деформационный процесс, описываемый интегральными, кумулятивными значениями количественных параметров, предстает в целом коррелированным в пространстве и во времени, то при его пространственной дифференциации отчетливо выявляются элементы несогласованности. В пределах одних субплощадок он идет более интенсивно, чем в других, и фазы высокой активности тектонического и сейсмического диссипативных процессов в разных локальных участках могут быть смещены по времени (см. рис. 5).

Анализ вариаций амплитуд смещений во времени по отдельным разрывам по фотоматериалам и по результатам тензометрических замеров показал, что их эволюционная динамика закономерна и подчиняется общему этапно-стадийному сценарию развития структурообразования в зоне разлома. В первой половине этапов или стадий новообразованный масштабный ранг разрывов обладает максимальной свободой перемещения своих крыльев, реализующегося в виде ускоряющихся или замедляющихся крипповых смещений с остановкой или без них, и дискретных импульсных подвижек, соответствующих известной модели stick-slip [Brace, Byerlee, 1966]. Во второй половине этапов или стадий по мере приближения к моменту очередной структурной перестройки эволюционирующей системы активных разрывов усиливаются стесненные условия на фоне роста напряжений, что сказывается на подвижности их крыльев. Крипповые смещения в этом динамическом состоянии зоны разлома имеют минимальное проявление, дискретные же импульсные подвижки, наоборот, преобладают. Причем для последних характерно существенное увеличение во времени их количества на фоне снижения средних значений амплитуд. Возникающий дефицит смещений на внутриразломных разрывах в конце этапов и стадий частично компенсируется усилением пликативных деформаций. Для этих временных интервалов характерна интенсивная сегментация протяженных разрывов с проявлением подвижек разных знаков по сегментам [Борняков, Адамович, 2002]. Наблюдаемая в моделях разнонаправленная возвратно-поступательная динамика смещений по разрывам согласуется с результатами инструментальных наблюдений за движениями в зонах активных разломов на геодинамических полигонах [Василенко, Богданова, 1986; Захаров, Василенко, 1986].

ВЫВОДЫ

Как показало проведенное экспериментальное исследование, тектонический и сейсмический диссипативные процессы являются взаимосвязанными и взаимодополняющими друг друга элементами внутренней эволюционной динамики зон крупных разломов. Первый из них складывается из медленных

крипповых движений по внутриразломным системам разрывных нарушений и пликативных деформаций вычленяемых ими блоков, второй представлен импульсными подвижками по уже существующим разрывам или избирательным «сейсмогенным» образованиям новых.

Тектонический и сейсмический диссипативные процессы имеют определенную адресную пространственно-временную привязку в структурной эволюции зоны разлома и действуют в противофазе. Как правило, при максимальной реализации одного другой характеризуется минимальным проявлением, и эти моменты совпадают с началом или концом стадий, этапов или других более мелких эволюционных периодов. Частота повторяемости последних, в зависимости от масштабного уровня деформационного процесса, определяет периодичность активизации тектонической и сейсмической диссипации и их пространственные характеристики.

Работа выполнена в рамках проектов Отделения наук о Земле РАН (ОНЗ-7.7), РФФИ (07-05-00251-а) и ФЦП (госконтракт № 02.740.11.0446) и НОЦ «Байкал».

ЛИТЕРАТУРА

Борняков С.А. Тектонофизический анализ процесса формирования трансформной зоны в упруго-вязкой модели // Проблемы разломной тектоники. Новосибирск, Наука, 1981, с. 26—44.

Борняков С.А. Количественный анализ параметров разномасштабных сдвигов (по результатам моделирования) // Геология и геофизика, 1990 (9), с. 34—42.

Борняков С.А., Адамович А.Н. Механизм сегментации и характер взаимодействия сегментов (по результатам физического и математического моделирования) // Тектонофизика сегодня (к юбилею М.В. Гзовского). М., ОИФЗ, 2002, с. 203—211.

Борняков С.А., Гладков А.С., Адамович А.Н., Матросов В.А., Клепиков В.А. Нелинейная динамика разломообразования по результатам физического моделирования // Геотектоника, 2004, № 5, с. 85—95.

Борняков С.А., Трусков В.А., Черемных А.В. Диссипативные структуры зон разломов и критерии их диагностики (по результатам физического моделирования) // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (2), с. 179—187.

Василенко Н.Ф., Богданова Е.Д. Горизонтальные движения земной поверхности в зоне Центрально-Сахалинского разлома // Тихоокеанская геология, 1986, № 3, с. 45—49.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М., Наука, 1975, 535 с.

Захаров В.К., Василенко Н.Ф., Наумов Н.В. Горизонтальные деформации земной поверхности на островах Сахалин и Шикотан // Тихоокеанская геология, 1986, № 3, с. 119—121.

Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясений. М., Наука, 1975, с. 6—29.

Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур. М., Мир, 2002, 460 с.

Семинский К.Ж. Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск, 1986, 130 с. Деп. в ВИНТИ 13.08.86. № 5762-В86.

Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2003, 244 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, 1991, 262 с.

Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // Science, 1966, v. 153, p. 990—992.

*Рекомендована к печати 7 октября 2010 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
20 января 2010 г.*