

ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕСТРУКТИВНОГО ПРОЦЕССА В СДВИГОВОЙ ЗОНЕ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

С.А. Борняков, С.И. Шерман, А.С. Гладков

Институт земной коры СО РАН

ВВЕДЕНИЕ

Становление и развитие тектонофизики способствовало введению в тектонику количественных методов анализа. Именно благодаря тектонофизике многие тектонические данные стали представляться в числовых характеристиках. Одними из удобных для количественного описания тектонических структур оказались разломы. Первым в конце 50-х годов обратил на это внимание М.В. Гзовский [1963], показав наличие тесной взаимосвязи между длиной разломов (L) и их количеством (N) на тестовых полигонах в пределах Байджансайского антиклинория. Этот первый опыт количественной оценки параметров разломов в дальнейшем нашел многочисленных последователей [Рац, 1963; Шерман, 1977; Ружич, Шерман, 1978; Шерман и др., 1984; Борняков, 1985, 1990; Лобацкая, 1987; Окубо, Аки, 1987; Саньков, 1989; Шерман, Гладков, 1998; и др.]. В процитированных, а также других работах аналогичной тематической направленности было показано, что связи между параметрами разломов имеют нелинейный характер, а коэффициенты в уравнениях, рассчитанных по выборкам одноименных параметров генетически однородных разломов, полученных с разных тестовых полигонов, варьируют и иногда существенно [Шерман и др., 1991, 1992, 1994; Шерман, Гладков, 1998]. Эти вариации объяснялись влиянием на параметрические зависимости таких факторов, как тип напряженного состояния пород, вовлеченных в деструктивный процесс, их реологические свойства и скорость деформирования и др. В сложном же и не всегда однонаправленном действии этих факторов искали и причины отмеченного нелинейного характера взаимосвязей параметров разломов. В последние два десятиле-

тия количественный анализ в различных областях науки пополнился новым эффективным методом — фрактальным анализом [Mandelbrot, 1983]. После его серьезной апробации применительно к разломам [Otzuki, 1978; Aviles, Scholz, 1987; Turcott, 1989, 1997; Main et al, 1990; Velde et al., 1990; Merceron, Velde, 1991; Bons, Jessell, 1995; Шерман и др., 1996, 1999; Goryainov et al., 1997] он вошел в ряд стандартных методов структурного анализа. В приложении к разломной тектонике фрактальный анализ не заменяет уже традиционно используемые и упомянутые выше статистические, корреляционные методы, а существенно дополняет их. Оперируя системой разномасштабных разломов на тестируемой площади как структурированным, кластиризованным множеством, фрактальный анализ дает интегральную количественную характеристику всей системы в целом, а не отдельных ее компонентов. Эта интегральная количественная характеристика — фрактальная размерность — кроме всего прочего, отражает и степень структурированности и кластиризации элементов разломной сети, т.е. степень ее упорядоченности с позиций синергетики [Николис, Пригожин, 1979; Хакен, 1980; Пригожин, 1985; Пригожин, Стенгерс, 1986; Иванова и др., 1994; Пелюхова, Фрадкин, 1997; и др.].

В настоящей статье на примере результатов физического моделирования предпринята попытка объяснить причины вариаций соотношений между параметрами разломов, и их фрактальных размерностей. Опираясь на базовые идеи, выявлены принципиально новые особенности динамики процессов разломообразования.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Процессы деформации и разрушения литосферы локализованы в деструктивных зонах, характеризующихся длительностью и определенной упорядоченностью структурно-динамического развития [Шерман и др., 1984, 1991, 1992, 1994]. В дополнение к опубликованным работам нами было проведено моделирование процесса

формирования деструктивной зоны сдвига (ДЗС) в упруговязкопластичной модели.

Методика физического моделирования подробно описана ранее [Борняков, 1981; Шерман и др., 1984, 1991], что позволяет лишь кратко отметить основные ее моменты. Эксперименты проводились на установке «Разлом» с использо-

ванием однослойной модели [Шерман и др., 1991]. Модель (размером до 1.5 м в длину и 0.5 м в ширину) размещалась на двух плоских рифленых штампах, один из которых смещался по отношению к другому, инициируя деформацию простого сдвига. При подготовке модели на ее поверхность наносилась густая сеть реперных линий, перпендикулярных к простиранию будущей ДЗС. Весь ход эксперимента фотографировался с интервалом 30 с.

Граничные условия экспериментов выбирались в соответствии с критерием подобия:

$$\eta/\rho gLT = \text{const}, \quad (1)$$

где η – вязкость, Па·с; ρ – плотность, г/см³; g – ускорение свободного падения, г/см·с²; L – линейные размеры, м; T – время, с [Шерман, 1984; Шерман, Бабичев, 1989]. Согласно этому критерию, процессы в модели и в природном аналоге могут считаться подобными, если сохраняется равенство отношений величин в природе и модели, входящих в уравнение (1). Из (1) следует,

$$C_\eta = C_\rho C_g C_\ell C_T, \quad (2)$$

где C_η , C_ρ , C_g , C_ℓ , C_T – масштабные коэффи-

циенты подобия вязкости, плотности, ускорения свободного падения, линейных размеров и времени, соответственно. Принимая во внимание, что g идентично в природе и в модели, и, следовательно, равно 1, уравнение эксперимента принимает вид

$$C_\eta = C_\rho C_\ell C_T. \quad (3)$$

Нами были выбраны такие соотношения масштабных коэффициентов подобия, при которых 1 мм в модели был эквивалентен 1 км в ее природном аналоге, а 1 мин, соответственно, 1 млн. лет природного процесса.

В качестве модельного материала использовалась водная паста бурой глины, проявляющая упруговязкопластичные свойства и обладающая при определенных влажности и скорости деформирования требуемыми значениями вязкости [Борняков, 1981; Шерман и др., 1984; Семинский, 1986].

Представляя результаты моделирования, мы акцентируем внимание на качественном и количественном описании общих закономерностей динамики деструктивного процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Стадийность развития ДЗС. Деструктивный процесс в модели начинается с заложения в узкой линейновытянутой области многочисленных изолированных друг от друга микросдвигов. Их последующее развитие идет стадийно по ранговому принципу с последовательной сменой одного масштабного ранга другим через структурные перестройки и заканчивается образованием единого магистрального шва (рис. 1). До недавнего времени при описании процессов формирования в моделях деструктивных зон различного морфолого-генетического типа мы оперировали термином «стадия», не давая при этом его точного определения. Детальные структурные наблюдения за динамикой развития ДЗС показали, что по мере деформационного преобразования ДЗС в ее интраструктуре формируется серия эволюционных структурных рядов. Под эволюционным рядом понимается набор морфолого-генетически однородных разломно-блоковых структур, характерных для строго определенных временных интервалов развития деструктивного процесса, каждый из которых целесообразно определить как стадия, а их более дробные компоненты как этапы. Таким образом, процесс формирования ДЗС состоит из стадий и этапов.

С позиции данного выше определения весь процесс структурообразования в ДЗС по структурным критериям разделяется на три стадии. В первой из них в узкой линейно-вытянутой области закладываются две системы многочисленных прямолинейных, пространственно-обособленных друг от друга микросдвигов. По мере развития деструктивного процесса происходит избирательное разрастание и объединение одних микросдвигов, и приостановка развития других (рис. 1, а). Отличительная черта первой стадии – формирование линейновытянутой зоны мелкой трещиноватости, не нарушающей целостность модели. Проявляющаяся фрагментация, (в виде формирования ромбовидных, изометричных микроблоков), не носит повсеместного характера и имеет второстепенное, подчиненное по отношению к разрывообразованию значение.

Во второй стадии первичная упорядоченно-ранжированная по длинам сеть мелких разрывов трансформируется в густую сеть протяженных разрывов с волнистой морфологией сместителей, расчленяющих ДЗС на систему узких, линейновытянутых блоков (рис. 1, б). Исследование деформаций блоков и амплитуд смещений на разделяющих их пограничных разрывах позволяет

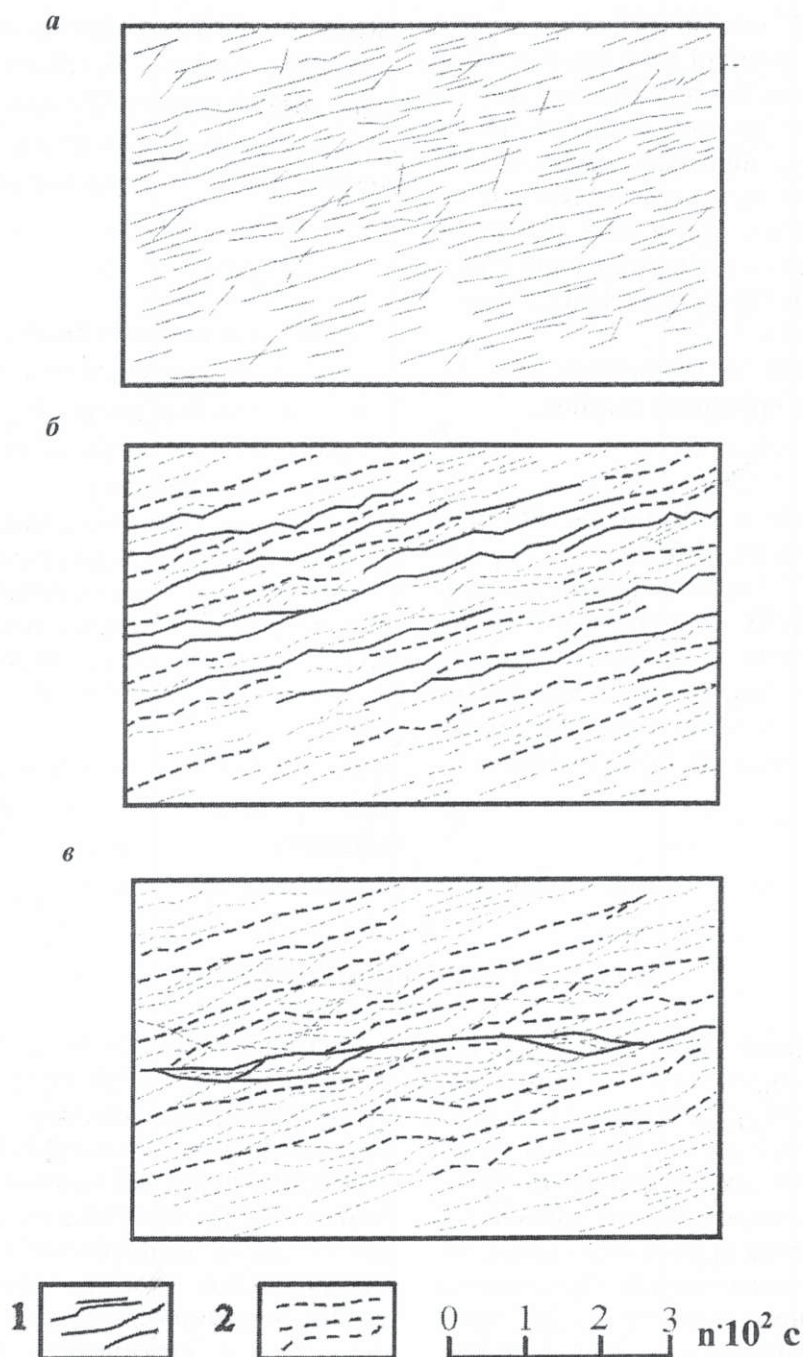


Рис. 1. Структурные схемы ДЗС в первую (а), вторую (б) и третью (в) стадии развития. Разрывы: 1 - активные, 2 - утратившие активность

говорить о структурном приоритете первых по отношению ко вторым. В данном случае разрывы выступают не как обособленные, самостоятельные структурные единицы, а как второстепенный, сопутствующий структурный элемент – граница раздела двух блоков. Процесс блокообразования в ДЗС идет однонаправленно через постепенное укрупнение блоков и уменьшение их количества. Таким образом, вторая стадия – это стадия формирования блоков.

На третьей стадии этот процесс переходит в заключительную фазу с разделением деформируемого слоя на два структурированных блока, граница раздела между которыми представлена в

виде извилистого, теперь уже единого магистрального шва (рис. 1, в). Таким образом, в ДЗС в рамках отмеченных трех стадий формируются три эволюционных ряда структурных элементов: 1 – непротяженные прямолинейные, с простым строением сместителей разрывы и вычленяемые ими ромбовидные блоки; 2 – сложнопостроенные протяженные разрывы с извилистой морфологией сместителей и вычленяемые ими узкие, линейновытянутые блоки; 3 – магистральный, сложнопостроенный шов, разделяющий деформируемый слой на два структурированных блока, во внутреннем строении которых отразилась вся предыстория их структурного развития. Ка-

ждый ряд может рассматриваться как самостоятельная структурная зона, отражающая определенную фазу деструктивного процесса с характерными только для него параметрами. Для их оценки могут быть использованы фрактальные размерности.

Отражение стадийности во фрактальных кривых. Стадийность, как фундаментальное свойство эволюции ДЗС, нашла дополнительное подтверждение в результатах фрактального анализа.

Как отмечалось выше, по ходу эксперимента проводился фотомониторинг формирующейся в модели ДЗС с временным интервалом в 30 с. Для получения исходной информации для фрактального анализа с каждой фотографии составлялись две структурные схемы. Первая учитывала все разрывы, сформировавшиеся на момент регистрации (статическая схема для области активного динамического влияния – ОАДВ [Шерман и др., 1984], вторая – только те из них, которые к моменту регистрации сохраняли активность (динамическая схема для области активного структурообразования – ОАС [Шерман и др., 1991]. Выделение активных разрывов из их общей совокупности проводилось по методике, изложенной в работе [Bons, Jessell, 1995]. Для каждого типа структурных схем в пределах выбранной стационарной прямоугольной площадки рассчитывалась фрактальная размерность (D) с использованием стандартной процедуры, реализованной в компьютерной программе [Шерман, Гладков, 1998]. Алгоритм расчета имеет вид

$$D = \lg M_i / \lg L_i,$$

где M_i и L_i – число условно разрушенных пикселей и размер системы в единицах размера пикселей, используемых при i -й итерации, соответственно.

Выполненный фрактальный анализ статической и динамической схем разрывной интрасруктуры показал, что ДЗС обладают фрактальными свойствами и позволил установить тесную взаимосвязь полученных фрактальных размерностей с качественным состоянием ДЗС в каждый фиксированный момент времени. Динамика изменения D во времени в пределах одной стационарной площадки для ОАДВ и ОАС неодинакова (рис. 2).

Для ОАДВ фрактальная размерность возрастает от некоторого минимума до асимптотического максимума, тогда как для ОАС после первого временного этапа роста она стремится к некоторому минимуму. При этом каждая из фрактальных кривых испытывает кратковременные

флуктуации (рис. 2). Наблюдения за структурообразованием в модели показали, что, как правило, максимумы этих флуктуаций предшествуют структурным преобразованиям в ДЗС. Сопоставление полученных фрактальных кривых для ОАДВ и ОАС обнаруживает частичное временное несовпадение точек максимумов и минимумов на графиках. Это обусловлено тем, что разрывная интрасруктура ОАДВ более консервативна по интенсивности преобразований, содержит много пассивных элементов, прекративших свое развитие; указанный структурный пассивный балласт вносит существенные коррективы в конечный расчетный результат. В этом смысле фрактальная кривая для ОАС более чувствительна к реальной динамике деструктивного процесса, хотя и она может быть скорректирована по точности своего соответствия процессу.

Несмотря на различия в общих тенденциях направленности изменений в процессе во времени, фрактальные кривые имеют частные сходства. Если в пределах фрактальных кривых провести линии усреднения (1-1, 2-2, 3-3, рис. 2), то отчетливо видно, что каждая из кривых разделяется на три части, соответствующие последовательно сменяющим друг друга временным интервалам – стадиям, в пределах которых изменение D , несмотря на частные флуктуации, подчиняется некоторой общей закономерности. Границы этих временных интервалов совпадают с временными границами выделенных нами по структурным признакам стадий деструктивного процесса. Из этого следует, что фрактальная размерность может быть использована в качестве количественного критерия выделения стадийности деструктивного процесса в ДЗС.

Фрактальная размерность как показатель качественного состояния деструктивного процесса. Общие тенденции увеличения фрактальной размерности для ОАДВ и ее уменьшение для ОАС, а также частные вариации D в пределах стадий вполне объяснимы. Сам механизм расчета D предопределяет зависимость её числовых значений от таких факторов, как суммарная длина участвующих в анализе разрывов, характер их ранжирования по длине и степень упорядоченности распределения в пределах площади. Так, увеличение суммарной длины разрывов сопровождается увеличением D и, наоборот, уменьшение первой приводит к снижению значений второй, что мы и фиксируем в ОАДВ и ОАС. С другой стороны, при равенстве суммарных длин разрывов на двух тестовых площадках фрактальная размерность будет больше на той из них, где присутствует больше длинных разры-

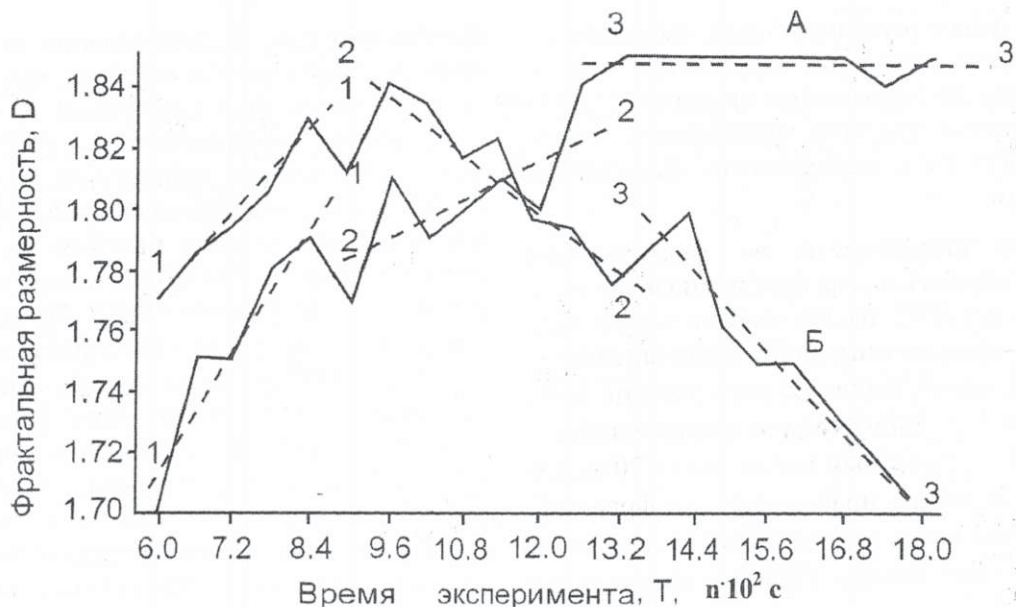


Рис. 2. Изменение фрактальной размерности D во времени T для всей совокупности разрывов в деструктивной зоне сдвига (А) и только для активных разрывов (Б).

вов, а в случае равного количества последних — на той, на которой эти разрывы имеют более упорядоченное пространственное распределение. Последний из перечисленных факторов оказывает весьма существенное влияние на фрактальную размерность в пределах каждой стадии. На начальном этапе первой стадии степень упорядоченности в пространственном распределении разрывов в ДЗС достаточно низкая, однако она постепенно возрастает по мере смены этапов и приближения к межстадийной структурной перестройке. Рассматривая внутреннюю организацию ДЗС с позиции степени порядка в системе, в свете изложенного, можно предполагать, что чем большего структурного совершенства в масштабной иерархии и упорядоченности в пространственном распределении элементов достигла ин-

траструктура на какой-то стадии своего развития, тем выше будут значения характеризующего ее фрактального показателя и тем заметнее и интенсивнее будут протекать очередные структурные преобразования. Не исключено, что для фрактальных кривых, отражающих динамику деструктивных зон, существует некоторое пороговое значение фрактальной размерности, выше которого все перестройки их интраструктуры будут носить быстрый динамический характер. По крайней мере, такие тенденции как будто бы намечаются по анализу форшоковых последовательностей [Main et al., 1990].

Природа и механизм возникновения упорядоченного состояния интраструктуры ДЗС удовлетворительно объясняются с позиции основных положений синергетики.

СИНЕРГЕТИКА ДЗС

Как и большинство развивающихся геологических объектов, ДЗС представляет открытую неравновесную динамическую систему. Универсальная особенность таких систем — их прохождение по мере эволюции через серию стационарных состояний, разделенных быстрыми бифуркационными переходами, с характерными для них качественно иными состояниями [Николис, Пригожин, 1979; Пригожин, Стенгерс, 1986; Летников, 1992; Пелюхова, Фрадкин, 1997].

Выявленная нами стадийность развития деструктивного процесса в сдвиговой зоне представляет собой не что иное, как последовательную, иерархическую смену стационарных состояний. В общем виде эволюционная схема этого процесса может быть представлена следующим образом.

В начале первой стадии в ДЗС зарождаются многочисленные непротяженные прямолинейные разрывы, пространственное распределение которых хаотично. Каждый разрыв развивается независимо от других как самостоятельный структурный элемент. Количество и плотность разрывов постепенно возрастают и при некотором пороговом их значении, при наличии достаточного уровня накопленной внутренней энергии, срабатывает механизм самоорганизации, порождающий диссипативную разрывную систему.

С момента возникновения диссипативной системы развитие всех активных разрывов становится строго согласованным, когерентным, что, в свою очередь, является источником порядка в интраструктуре ДЗС. Деструктивный про-

цесс в ней переходит в квазистационарное состояние. Его функциональной особенностью является реализация принципа ле Шателье – Брауна, в соответствии с которым неравновесная система стремится не выйти из стационарного состояния путем такой организации своей интраструктуры, которая сводила бы к минимуму внешнее воздействие на нее [Пригожин, 1979; Пригожин, Стенгерс, 1986; Летников, 1992; Пеллохова, Фрадкин, 1997]. Только в упорядоченном состоянии, свойственном диссипативным структурам, интраструктура ДЗС способна оказывать максимальное противодействие внешнему деформационному влиянию. В нашем случае показателем степени упорядоченности интраструктуры ДЗС служит фрактальная размерность сети разрывов, максимальные значения ее отвечают их более упорядоченному состоянию (рис. 2). Дополнительным критерием упорядоченности разрывной сети, как это будет показано ниже, может выступать также степень тесноты связи между количественными параметрами разрывов, выраженная через коэффициент корреляции для описывающих эту связь уравнений.

По мере накопления внутренней энергии под действием продолжающейся деформации интраструктура ДЗС достигает предела устойчивости и выходит из стационарного состояния первой стадии. Происходит разрушение существовавшей диссипативной структуры и деструктивный процесс через быструю перестройку старой

структуры, (через бифуркацию в терминологии неравновесной термодинамики) переходит на новую, вторую стадию эволюции. При этом выбор пути эволюции деструктивного процесса определяется принципом минимума производства энтропии [Пригожин, Стенгерс, 1986; Климонтович, 1989]. В рамках второй стадии после кратковременной разупорядоченности интраструктуры (на что указывает снижение значений фрактальных размерностей, см. рис. 2), деструктивный процесс снова входит в стационарное состояние с образованием нового порядка, новой диссипативной структуры, время существования которой также ограничено. При неизменных граничных условиях эксперимента деструктивный процесс неизбежно приближается к очередной структурной перестройке и переходу в третью, заключительную стадию эволюции с повторениями на качественно новом уровне.

Таким образом, из приведенного описания видно, что наблюдаемая в модели эволюция интраструктуры ДЗС представляет собой типичный синергетический процесс, характеризующийся последовательностью упорядоченных стационарных состояний и бифуркаций [Пеллохова, Фрадкин, 1997]. Степень упорядоченности интраструктуры ДЗС находит отражение не только в значениях фрактальной размерности, но и во взаимосвязях количественных параметров разрывов. Рассмотрим это на примере анализа взаимосвязи амплитуд смещения a с длиной разрывов L .

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ АМПЛИТУД СМЕЩЕНИЯ С ДЛИНОЙ РАЗРЫВОВ В ДЗС

Связь между длинами сдвиговых разрывов и амплитудами смещений установлена в ряде работ [Шерман, 1977; Шерман и др., 1996; и др.]. Опираясь на другую исходную концепцию, была проведена серия экспериментов для дополнительного изучения формирования во времени амплитуды смещения и ее структуры.

Анализ амплитуды смещения с длиной разрыва был выполнен нами в двух вариантах. В первом случае в расчетах участвовала только максимальная амплитуда смещения a_{\max} , зафиксированная на разрыве. Во втором случае оценивалось ее усредненное значение a_{midl} , вычисляемое как сумма всех замеренных амплитуд на разрыве, делённая на количество замеров.

Сбор цифровой информации с моделей проводился следующим образом. Как отмечалось выше, до начала эксперимента на поверхность модели наносилась реперная сетка прямых линий, перпендикулярных простиранию будущей ДЗС. Расстояние между реперными линиями составляло 5 мм. При таком плотном расположении реперные линии многократно

единичные протяженные разрывы, что позволяло фиксировать и производить вдоль их простирания до 20 замеров амплитуд смещений и более. Проведенный фотомониторинг процесса формирования ДЗС с интервалом 30 с. позволил по многочисленным фотографиям собрать необходимую для количественного анализа представительную цифровую информацию.

Результаты расчетов представлены уравнениями вида

$$a = kL + C, \quad (4)$$

где a – амплитуда смещения; L – длина разрыва; k и C – коэффициенты.

Для полученных уравнений проанализированы вариации коэффициентов корреляции R (рис. 3). Как показано выше по результатам фрактального анализа (см. рис.2), примерно на отметках 9.6 мин и 14.4 мин происходит смена стадий развития ДЗС. Из анализа графика коэффициент корреляции R – время T видно, что в начале и в середине первой стадии связи a_{\max} и a_{midl} практически отсутствуют. Лишь во вто-

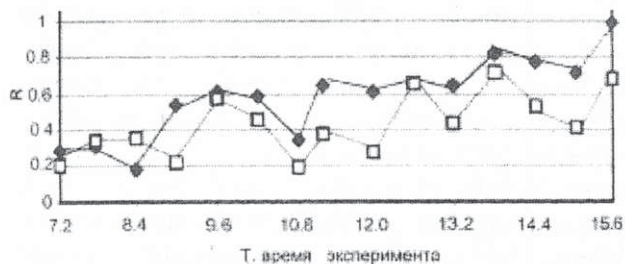


Рис. 3. Вариации коэффициента корреляции R во времени для взаимосвязей максимальной a_{\max} (кривая, трассированная ромбами) и усредненной a_{midl} (кривая, трассированная незалитыми квадратами) амплитуды смещения с длиной разрывов L .

рой половине первой стадии значения R начинают расти, и связь между анализируемыми параметрами становится значимой. Появление значимых коэффициентов корреляции указывает на иницирование механизма самоорганизации и образование диссипативной структуры. После перестройки в начале второй стадии установившиеся ранее связи нарушаются, чтобы восстановиться уже в рамках новой диссипативной структуры (для a_{\max} на 11 мин, для a_{midl} — несколько позже). После очередной структурной перестройки связь между анализируемыми парамет-

рами снова временно ослабевает с последующим её усилением. Таким образом, из приведенных графических материалов видно, что теснота связи между амплитудой смещения и длиной разрыва непостоянна и зависит от качественного состояния интраструктуры ДЗС. Более упорядоченные состояния ее свойственны для временных интервалов существования диссипативных структур, тогда как вне их связи характеризуются разбалансированностью и разупорядоченностью, что и находит отражение в изменениях значений коэффициентов корреляции R .

Из приведенных данных следует, что качественное описание деструктивного процесса, выполненное в предыдущем разделе с синергетических позиций, хорошо согласуется с результатами проведенного количественного анализа. Можно констатировать, что именно временная последовательность процессов самоорганизации приводит к периодическому возникновению особого динамического состояния интраструктуры ДЗС, обеспечивающего упорядоченное состояние элементов разрывной сети в ней, что и находит отражение в усилении тесноты связей между амплитудой смещения и длиной разрывов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по экспериментальной тектонике получили существенное развитие благодаря многим идеям М.В.Гзовского [Белоусов, Гзовский, 1964; Гзовский, 1971, 1975]. Его работы показали необходимость использования критериев подобия при моделировании тектонических процессов и неоднократного повторения экспериментов для получения статистически достоверных результатов. Появление новых приборов и оборудования, новых методов математического анализа результатов моделирования позволило расширить возможности экспериментальной базы и анализа результатов, в целом развивающих основные идеи М.В.Гзовского.

Приведенные результаты физического моделирования показывают, что ДЗС является сложной структурно-динамической системой с хорошо выраженными фрактальными свойствами. С позиций синергетики ее стадийная эволюция есть следствие многоуровневых процессов само-

организации. Именно самоорганизация является тем функциональным свойством интраструктуры ДЗС, обеспечивающим возникновение упорядоченного ее строения.

С позиций стадийности развития ДЗС и многоуровневой самоорганизации ее интраструктуры находят объяснение все те многочисленные расхождения в оценках взаимосвязи амплитуды с длиной разломов, полученные в разное время различными исследователями. Эти выводы показывают, что при сравнительном анализе тех или иных соотношений между количественными параметрами разломов, помимо комплекса уже известных факторов, оказывающих на них влияние, следует учитывать стадии развития анализируемых деструктивных процессов и их качественные состояния, количественным критерием которых могут быть фрактальные размерности.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, грант № 01-05-64485.

ЛИТЕРАТУРА

- Белоусов В.В., Гзовский М.В. Экспериментальная тектоника. М.: Недра, 1964. 117 с.
- Борняков С.А. Тектонофизический анализ процесса формирования трансформной зоны в

- упруговязкой модели // Проблемы разломной тектоники. Новосибирск: Наука, 1981. С. 26-44.
- Борняков С.А.* Методические аспекты количественного анализа параметров разломов (на примере результатов физического моделирования) // Количественный анализ геологических явлений. Иркутск, 1985. Ч. 1. С.45-50.
- Борняков С.А.* Динамика развития деструктивных зон межплитных границ (результаты моделирования) // Геология и геофизика. 1988. № 6. С.3-10.
- Борняков С.А.* Количественный анализ параметров разномасштабных сдвигов (по результатам моделирования) // Геология и геофизика, 1990. № 9. С. 34-42.
- Гзовский М.В.* Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. М.: Изд-во АН СССР, 1963. Ч. 3,4. 544с.
- Гзовский М.В.* Математика в геотектонике. М.: Недра, 1971. 240 с.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.:Наука, 1975. 535 с.
- Иванова В.С., Баланкин А.С. Бунин И.Ж., Оксогоев А.А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
- Климонтович Ю.Л.* Проблемы статистической теории открытых систем // УФН. 1989. Т.158, вып.1. С. 59-74.
- Летников Ф.А.* Синергетика геологических систем. Новосибирск, 1992. 228 с.
- Лобацкая Р.М.* Структурная зональность разломов. М.: Недра, 1987. 128 с.
- Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
- Паталаха Е.И.* Морфологическая тектоника. Алма-Ата, 1981. 179 с.
- Пеллохова Е.Б., Фрадкин Э.Е.* Самоорганизация физических систем. СПб: Изд-во Университета, 1997. 323 с.
- Пригожин И.* От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985. 327 с.
- Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 429 с.
- Рац М.В.* Статистико-генетический метод изучения трещиноватости // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1963. Т. 38, № 6. С. 54-64.
- Ружич В.В., Шерман С.И.* Оценка связи между амплитудой и длиной разрывных нарушений // Динамика земной коры Восточной Сибири. Новосибирск, 1978. С. 52-57.
- Саньков В.А.* Глубины проникновения разломов. Новосибирск: Наука, 1989. 136 с.
- Семинский К.Ж.* Структурно-механические свойства глинистых паст как модель разломов в тектонических экспериментах. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1986. 130 с. Деп. в ВИНТИ 13.08.86 г., №5762. В86.
- Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
- Шерман С.И.* Физические закономерности развития разломов в земной коре. - Новосибирск: Наука, 1977. 102 с
- Шерман С.И.* Эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика . 1984. № 3. С.8-18.
- Шерман С.И., Бабичев А.А.* Теория подобия и размерностей в приложении к тектоническому моделированию // Экспериментальная тектоника: Методы, результаты, перспективы. М.: Наука, 1989. 303 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов (по результатам моделирования) Новосибирск, 1984.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Семинский К.Ж. и др.* Комплексное исследование процессов разломообразования в литосфере // Литосфера Центральной Азии: Основные результаты исследований Института земной коры СО РАН в 1992-1996гг. Новосибирск.: Наука, 1996. С. 124-133.
- Шерман С.И., Гладков А.С.* Новые данные о фрактальной размерности разломов и сейсмичности в Байкальской рифтовой зоне // Докл. АН. 1998. Т. 361. С. 685-688.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др.* Разломообразование в литосфере: зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 262 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др.* Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения. Новосибирск: Наука, 1992. 240 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др.* Разломообразование в литосфере: зоны сжатия. Новосибирск: Наука, 1994. 260 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В.* Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии // Тихоокеан. геология. 1999. Т.18, № 2. С. 41-53.
- Aviles C.A., Scholz C.H.* Boatwright Fractal analysis applied to characteristic of the San Andreas fault // J. Geophys. 1987. Vol.92, NB1. P. 331-344.
- Bons P.D., Jessell M.W.* Strain analysis in deformation experiments with pattern matching or a stereoscope // J. Struct. Geol. 1995. Vol.17, № 6. P. 917-921.
- Goryainov P.M., Ivanyuk G.Yu., Sharov N.V.* Fractal analysis of seismic and geological data // Tectonophysics. 1997. Vol.269. P. 247-257.
- King G.* The accomodation of large strain into upper lithosphere of the Earth and other solids by self-

- similar fault systems: geometrical riging b-value // Pure and Appl. Geophys. 1983. Vol. 121. P. 761-815.
- Main I.G., Meredith P.G., Sammonds P.R., Jones C.* Influence of fractal flow distributions on rock deformation in the brittle field // Deformation mechanism, reology and tectonics/Ed. by P.J.Knipe, E.H.Rutter) London. Spec. Publ. Geol. Soc. 1990. Vol. 54. P. 81-96
- Mandelbrot B.B.* The fractal geometry nature. N.Y.: Freeman, 1983. 480 p.
- Merceron T., Velde B.* Application of Cantor's method for fractal analysis of fractures in the Toyoha Mine, Hokkaido. Japan // J. Geophys. Res. 1991. Vol.96, NB10. P. 16641-16650.
- Okubo P., Aki K.* Fractal geometry in the San Andreas fault // J. Geophys. Res. 1987. Vol.92. NB1. P. 345-355.
- Otzuki K.* On relationship between the width of shear zone and the displacement along fault // J. Geol. Soc. Japan. 1978. Vol. 84. P. 661-669.
- Scholz C.H., Aviles C.A.* The fractal geometry of faults and faulting // Earthquakes source mechanics/Ed. S.Das et al. Am. Geoph. Union. Monogr. N37. P. 147-156.
- Turcott D.L.* Fractals in geology and geophysics // Pure and Appl. Geophys. 1989. Vol. 131. P. 171-196.
- Turcott D.L.* Fractals and chaos in geology and geophysics 2nd ed. Cambridge Univ.Press, Cambridge: 1997. 398 p.
- Velde B., Dubois J., Bardi A., Touchard G.* Fractal analysis of fractures in rocks: The Cantor's dust method // Tectonophysics. 1990. V.179. P. 345-352.