

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.24.03+551.243

ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ ЗОН РАЗЛОМОВ И КРИТЕРИИ ИХ ДИАГНОСТИКИ  
(по результатам физического моделирования)

С.А. Борняков, В.А. Трусков, А.В. Черемных

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

Рассматривается зона разлома как открытая неравновесная динамическая система, а эволюция слагающих ее внутреннюю структуру разрывных нарушений как нелинейный синергетический процесс последовательной смены стадий или структурных уровней, при определяющей роли процессов самоорганизации. Для упорядоченных трехмерных пространственно-временных образований, возникающих в зонах разломов при самоорганизации разномасштабных внутриразломных систем разрывных нарушений в преддверии смены структурных уровней, введено новое понятие „разрывные диссипативные структуры“ (РДС). Проведено физическое моделирование процесса формирования сдвиговой зоны в упруго-вязкопластичной модели литосферы. На основе фрактального и энтропийного анализа полученных с моделей данных обосновываются возможности пространственно-временной диагностики РДС по комплексу структурных и динамических критериев.

*Зоны разломов, разрывные нарушения, разрывные диссипативные структуры, физическое моделирование.*

DISSIPATIVE STRUCTURES IN FAULT ZONES AND THEIR DIAGNOSTIC CRITERIA  
(from physical modeling data)

S.A.Bornnyakov, V.A.Truskov, and A.V.Cheremnykh

A fault zone is considered an open nonequilibrium dynamic system in which its constituent subsystems evolve by self-organization in a nonlinear synergetic process of successive changes of structural levels (stages). A new term *fault dissipative structure* is suggested for an ordered 3D space-time structure produced in a fault zone by self-organization of faults of different scales. The approach is used in physical modeling to simulate the evolution of a strike-slip fault zone in an elastic-viscoplastic lithosphere and to recognize space and time criteria diagnostic of fault dissipative structures through fractal and entropy analyses.

*Fault zone, rupture, fault dissipative structure, physical modeling*

ВВЕДЕНИЕ

С позиции неравновесной термодинамики Земля как единая геологическая система, а также все ее разномасштабные структурные элементы относятся к классу открытых неравновесных динамических систем [Keilis-Borok, 1990; Летников, 1992, 2004; Пушаровский, 1998; Гольдин, 2005]. Не являются исключением и разломы. Закладываясь в тектонически-активных участках литосферы, они проходят длительный и сложный путь развития от широких зон, представленных многочисленными непротяженными разрывными нарушениями, через их избирательный рост и объединение в один, относительно узкий магистральный шов [Гзовский, 1975; Стоянов, 1977; Борняков, 1981, 1988; Шерман и др., 1983, 1991; Семинский, 2003]. В целом эволюция зоны разлома представляет собой нелинейный синергетический процесс последовательной смены стадий или структурных уровней с характерными для каждой из них системами разрывных нарушений и механизмами деформаций [Борняков и др., 2001, 2004]. Определяющая роль при смене структурных уровней принадлежит процессам самоорганизации.

Порождаемый самоорганизацией особый класс упорядоченных пространственно-временных структур в свое время был назван И. Пригожиным „короткоживущие, летучие структуры“ — „dissipative structure“ [Эбилинг, 1979; Пригожин, Кондипуди, 2002; Пригожин, Стенгерс, 2003]. Диссипативные структуры представляют собой аномальное явление в эволюции открытой системы и возникают тогда, когда ее внутренние параметры достигли критических значений, при превышении которых она перейдет в качественно новое состояние.

Вслед за И. Пригожиным, упорядоченные трехмерные пространственно-временные образования, возникающие в зонах разломов при самоорганизации разномасштабных внутриразломных систем разрывных нарушений в преддверии смены структурных уровней, мы будем называть „разрывными диссипативными структурами“ (РДС). В масштабе геологического времени они существуют мгновение, и их возникновение указывает на то, что охваченные самоорганизацией системы разрывов находятся в критическом, переходном состоянии. Они исчерпали ресурс развития в рамках существующего структурного уровня, и в условиях прогрессирующей деформации их перестройка и переход в качественно новое состояние неизбежны. Выход такой системы разрывов из критического состояния сопровождается распадом РДС с разрядкой накопленной энергии, проявляющейся в том числе в виде землетрясений. Чем крупнее разлом и чем больший объем области его динамического влияния занимают системы разрывных нарушений, вовлеченные в процесс самоорганизации, тем потенциально более энергоемкой будет возникающая РДС, и, соответственно, более сильное сейсмическое событие она может генерировать.

В настоящей статье обосновываются возможности пространственно-временной диагностики РДС по комплексу структурных и динамических критериев, выявленных по результатам физического моделирования процесса формирования крупной сдвиговой зоны в упруговязкопластичной модели литосферы.

### МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ФАКТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Физическое моделирование выполнено с использованием теории подобия. Граничные условия экспериментов определялись по уравнению:

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

где  $\eta$  — вязкость, Па·с;  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  — линейные размеры, м;  $T$  — время, с. Правомерность использования данного уравнения обсуждалась в серии работ [Гзовский, 1975; Шеменда, 1984; Шерман, 1984; Бабичев, 1987].

В качестве модельного материала использована водная паста бурой глины, обладающая упруговязкопластичными свойствами [Семинский, 1986]. Моделировался процесс формирования крупной сдвиговой зоны с целью выявления комплекса структурных и динамических критериев пространственно-временной диагностики возникающих в ее пределах РДС. Эти критерии представлены качественными и количественными статистическими параметрами, характеризующими особенности пространственно-временного распределения разрывных нарушений в сдвиговой зоне (структурные критерии) и генетически связанных с их развитием сигналов акустической эмиссии (АЭ) (динамические критерии).

Фактический материал для оценки структурных критериев получен из экспериментов, выполненных на установке для тектонического моделирования „Разлом“. Модель длиной 1.5, шириной 0.4 и толщиной 0.08 м размещалась слоем равной толщины на двух штампах, один из которых перемещался параллельно другому с постоянной скоростью 10<sup>-4</sup> м/с. Моделируемый процесс в ходе эксперимента фотографировали с 30-секундным интервалом цифровым фотоаппаратом. На основе каждой фотографии составлялись цифровые варианты структурных схем, используемых впоследствии для статистического корреляционного анализа, фрактального анализа [Mandelbrot, 1982] и анализа информационной энтропии [Вентцель, Овчаров, 2000; Зубарев и др., 2002].

Расчет фрактальной размерности внутриразломных систем разрывов ( $D_b$ ) производился методом покрытий (box-counting метод) по компьютерной программе, основу которой составляет алгоритм

$$D_b = \lg N_i / \lg r_i, \quad (2)$$

где  $N_i$  и  $r_i$  — соответственно число условно разрушенных пикселей и размер системы в единицах размера пиксела, используемого при  $i$ -й итерации [Шерман, Гладков, 1998].

Расчет информационной энтропии производился посредством компьютерной программы, основу которой составляет алгоритм

$$S_{\text{inf}} = - \sum p_i \cdot \ln p_i, \quad (3)$$

где  $p_i$  — вероятность, рассчитываемая как отношение суммарной длины разрывов в  $i$ -й субплощадке ( $\Sigma l_i$ ) к суммарной длине всех разрывов в пределах анализируемой площади ( $\Sigma L$ ). Информационная энтропия отражает степень кластеризации и упорядоченности разрывной системы. Чем дальше от равномерного пространственного или временного распределения ее элементов, тем она считается более кластеризованной и упорядоченной, и тем меньшими значениями  $S_{\text{inf}}$  характеризуется, и наоборот, менее кластеризованному и более хаотичному их распределению будут соответствовать большие величины этого параметра.

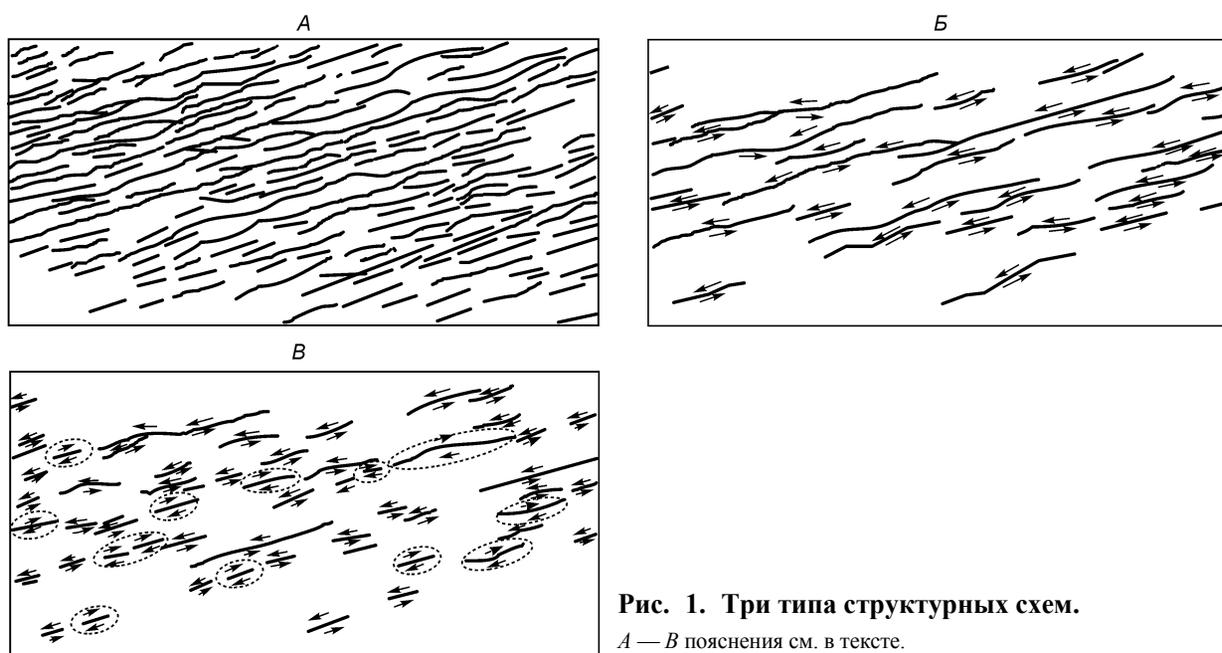
Фактическим материалом для оценки динамических критериев служили спектры сигналов АЭ, полученные из экспериментов, проведенных на специальном оборудовании в звукоизолированном боксе.

Акустический датчик размещался над моделью и сигналы с него записывались в аналоговом виде комплексом аппаратуры и впоследствии выводились на самописец. Методика этих экспериментов подробно описана в работе [Шерман и др., 1991]. При обработке полученных записей в последовательных десятисекундных интервалах подсчитывались: общее количество сигналов без ранжирования их по амплитудам ( $N$ ); суммарное количество выделившейся акустической энергии ( $E$ ); средняя энергия сигнала ( $E_{cp} = E/N$ ). За энергетический показатель сигнала принималась его амплитуда, выраженная в условных единицах. Далее десятисекундные интервалы группировались в минутные и для них рассчитывались: фрактальная размерность ( $D_k$ ) для  $N$ ; информационная энтропия  $S_{inf}$  для  $N$  и  $E$  соответственно. Фрактальная размерность  $D_k$  рассчитывалась методом Кантора по аналогии с [Smalley et al., 1987; Velde et al., 1990, 1991]. Этот показатель отражает степень кластеризации элементов анализируемой системы. Чем выше степень кластеризации, тем меньше значения  $D_k$  и наоборот [Velde et al., 1990, 1991].

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФАКТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

**Результаты анализа структурных схем.** Эволюция зоны сдвига в модели протекает односторонне от многочисленных мелких трещин, через их разрастание и избирательное объединение к магистральному шву. Этот процесс реализуется в рамках трех структурных уровней, при смене которых происходит существенная перестройка внутриразломных систем разрывов. По ходу структурных преобразований от стадии к стадии постепенно снижается активность части непротяженных разрывов с последующим их переходом в пассивное, латентное состояние на фоне роста разрывов наибольшей длины с одновременным уменьшением их количества [Борняков и др., 2001, 2004]. В нашем случае к активным разрывам относились те, у которых за контрольный интервал времени происходили смещения крыльев. Таким образом, в каждый фиксированный момент структурной эволюции зоны сдвига из всей совокупности участвующих в ее внутреннем строении разрывов активными являются не все, а только часть из них. Для оценки их активности, по фотографиям, использовался дистанционный метод, предложенный в работе [Bons, Jessell, 1995.]. Дальнейший детальный анализ амплитуд смещений крыльев протяженных активных разрывов показал, что они, в свою очередь, активны не по всей своей длине, а представлены разновеликими активными сегментами со смещениями, разделенными пассивными сегментами без смещений. По фотографиям, полученным с моделей, были составлены три типа структурных схем, на которых отражались: I — все разрывы, существующие на момент фотографирования (рис. 1, А), II — только те разрывы, которые были активны за контрольный интервал времени (см. рис. 1, Б), III — только активные сегменты активных разрывов (см. рис. 1, В).

Анализ количественных соотношений между суммарными длинами разрывов на трех типах схем показал, что они лимитированы и зависят от стадии развития сдвиговой зоны. Так, суммарная длина активных разрывов (структурные схемы II) составляет 35—25, 25—15 и 15—10 % от суммарной длины всех разрывов (структурные схемы I) для 1-, 2- и 3-го структурных уровней соответственно. При этом в



**Рис. 1. Три типа структурных схем.**

А — В пояснения см. в тексте.



**Рис. 2.** Вариации фрактальной размерности: 1 — для всех разрывов, 2 — для активных разрывов (А) и сегментов активных разрывов (Б) в сдвиговой зоне в модели.

преддверии структурных перестроек, суммарная длина активных разрывов в пределах РДС уменьшается на 10—20 % от их среднего значения. Суммарная же длина активных сегментов (структурные схемы III) оказалась более консервативным параметром, и составляет около 70 % от суммарной длины активных разломов с отчетливо выраженной тенденцией ее увеличения перед структурными перестройками.

За количественные критерии пространственно-временной диагностики РДС возникающих в сдвиговой зоне, приняты фрактальная размерность ( $D_b$ ) и информационная энтропия ( $S_{inf}$ ) систем разрывов, участвующих в ее внутреннем строении [Борняков и др., 2004]. Эти два параметра взаимно дополняют друг друга. Фрактальная размерность выступает показателем степени геометрической сложности и самоподобия разрывных нарушений, а информационная энтропия отражает характер их пространственного распределения.

Как уже отмечалось выше, формирование сдвиговой зоны в модели представляет собой нелинейный синергетический процесс последовательной смены трех стадий или структурных уровней с характерными для них системами разрывных нарушений и механизмами деформаций и с определяющей ролью при структурных преобразованиях разномасштабных процессов самоорганизации [Борняков и др., 2001, 2004]. О проявлении последних можно судить по вариациям фрактальной размерности и информационной энтропии внутриразломных систем разрывов (рис. 2). Так, масштабные процессы самоорганизации, сопровождающиеся структурными перестройками, имели место на временных отметках 9.6·100 с и (13—15)·100 с и им предшествовал рост  $D_b$  (см. рис. 2). Анализ вариаций информационной энтропии всей совокупности разрывов (структурные схемы I типа) показал, что ее значения уменьшаются перед структурными перестройками. Аналогичное ее поведение отмечается и для активных разрывов (структурные схемы II типа) (см. рис. 2). Повышение фрактальной размерности и уменьшение информационной энтропии разрывов в РДС, находящихся в критическом, переходном состоянии перед структурными перестройками, говорит о том, что эволюция как всей разрывной системы, так и ее активизированной части идет по пути геометрического усложнения с повышением степени упорядоченности и самоподобия. Это подтверждается и характером распределения разрывов по длинам, выявленным по результатам моделирования. Так, в пределах РДС наблюдается закономерное масштабно-иерархическое их распределение с характерным видом гистограмм распределения разрывов по длинам (рис. 3) [Черемных и др., 2005].

Иная ситуация наблюдается в поведении сегментированной сети активных разрывов (структурные схемы III типа), для которых в преддверии структурных перестроек и фрактальная размерность, и информационная энтропия возрастают (рис. 3).

Такие вариации фрактальной размерности и информационной энтропии систем разрывных нарушений в РДС, находящихся в критическом состоянии перед структурными перестройками, говорят о том, что эволюция разных типов разрывных нарушений происходит по-разному. Так, вся совокупность разрывных нарушений и ее активная часть эволюционируют по пути усложнения ее структуры с повышением степени самоподобия и упорядоченности. Сегментированная же сеть активных разрывов, наоборот, с одной стороны, стремится к более высокой степени самоподобия, с другой, — к хаотическому состоянию с более однородным пространственным распределением сегментов. Аналогичная тенденция проявляется и в распределении амплитуд смещений на сегментах. Для получения данных, сдвиговая зона делилась по простиранию на две равновеликие части по осевой линии и все необходимые замеры и последующая обработка собранных данных проводились отдельно для каждого ее крыла. Такой отдельный анализ вариаций информационной энтропии амплитуд смещений на сегментах показал, что структурная эволюция сегментированной сети разрывов в разных крыльях зоны разлома протекает неодинаково,

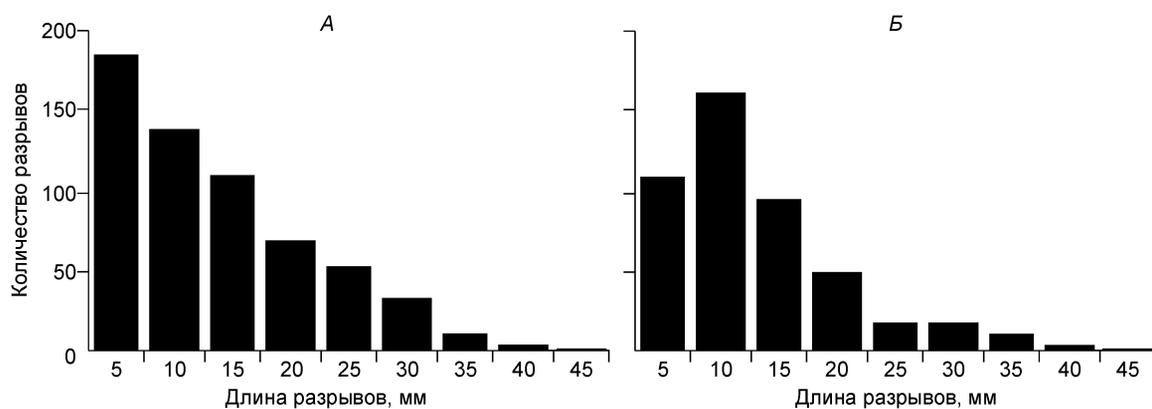


Рис. 3. Примеры распределения разрывов по длинам в РДС (А) и вне ее (Б).

синхронизируясь только в моменты масштабных проявлений процессов самоорганизации и возникновения РДС в преддверии структурных перестроек. Информационная энтропия в такие моменты возрастает.

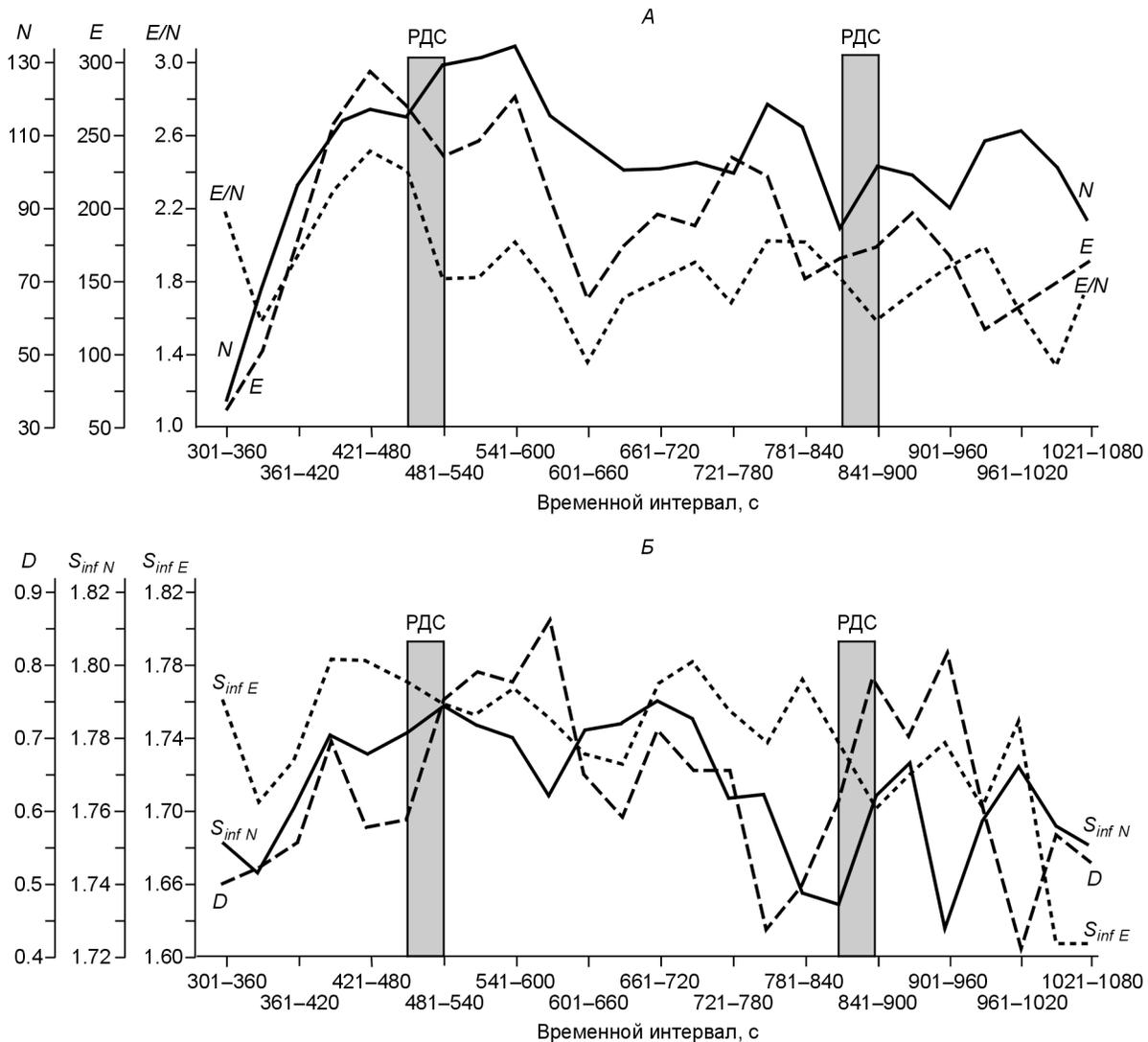
**Результаты анализа спектров сигналов АЭ.** Для полученного спектра сигналов АЭ, как отмечалось выше, в последовательных временных интервалах анализировались общее количество сигналов ( $N$ ); суммарное количество выделившейся акустической энергии ( $E$ ); средняя энергия сигнала ( $E/N$ ); фрактальная размерность  $D_k$  для  $N$  и информационная энтропия  $S_{\text{inf}}$  для  $N$  и  $E$ . Вариации перечисленных параметров во времени представлены на рис. 4.

Из приведенных графиков видно, что изменение  $N$ ,  $E$  и  $E/N$  вне пределов РДС происходит преимущественно синхронно: рост или уменьшение первого параметра соответственно сопровождается аналогичными изменениями двух других (см. рис. 4, А). В пределах же РДС (временные интервалы 461—521 и 811—891 с) на фоне роста общего количества сигналов ( $N$ ) их средняя энергия ( $E/N$ ) уменьшается. При этом суммарная энергия сигналов ( $E$ ) уменьшается в пределах первой, и незначительно возрастает в пределах второй РДС, хотя градиент роста снижается по сравнению с предыдущим и последующим временными интервалами. Анализ распределения сигналов АЭ, ранжированных по амплитуде на группы, показал, что в пределах РДС существенно возрастает количество сигналов малых амплитуд на фоне сокращения количества сигналов с большими амплитудами, что в совокупности и приводит к снижению значений их средней энергии даже в тех случаях, когда суммарная энергия  $E$  сигналов возрастает (см. рис. 4, А). При этом распределение сигналов АЭ по энергии становится более кластеризованным и упорядоченным, на что указывает снижение значений информационной энтропии ( $S_{\text{inf}} E$ ) (см. рис. 4, Б). Информационная энтропия и фрактальная размерность количества сигналов ( $N$ ) в обеих РДС возрастает (см. рис. 4, Б), что говорит о том, что распределение сигналов АЭ в целом становится более хаотичным и однородным.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дадим интерпретацию полученных результатов с позиции исходной авторской концепции, рассматривающей зоны разломов как открытые неравновесные динамические системы. Универсальной особенностью их эволюции является периодическое чередование двух качественных состояний внутриразломных систем разрывов — организации и самоорганизации [Летников, 1992, 2004]. В условиях организации эволюция многочисленных разноранговых разрывов происходит несогласованно и независимо друг от друга, сопровождаясь преимущественно ростом их  $S_{\text{inf}}$  и снижением  $D$ . В условиях же самоорганизации в границах возникающей РДС разрывы превращаются в единую взаимосвязанную динамическую систему с согласованным, кооперативным поведением, суммарным эффектом которого является уменьшение для них информационной энтропии  $S_{\text{inf}}$  и повышение фрактальной размерности  $D_b$  [Борняков и др., 2001]. Если в условиях организации рост  $S_{\text{inf}}$  и снижение  $D_b$  отражает стремление систем разрывов к хаотическому, более однородному пространственному распределению, то уменьшение  $S_{\text{inf}}$  и рост  $D_b$  в пределах РДС отражает обратную тенденцию перехода этих систем в более упорядоченное состояние.

Усиление детерминированной составляющей проявляется не только в пространственном распределении внутриразломных систем разрывов, но и в соотношениях характеризующих их количественных параметров. Так, установлено, что в пределах РДС взаимосвязь амплитуд смещений с длинами разрывов  $a = f(L)$  существенно возрастает [Борняков, Шерман, 2003].



**Рис. 4. Вариации параметров акустической эмиссии в процессе формирования сдвиговой зоны в упруговязкопластичной модели.**

Пояснения см. в тексте.

Другой важной особенностью эволюции внутриразломных систем разрывов в РДС является их масштабная „инвариантность“. Если вне РДС приоритет в развитии имеет преимущественно один выделенный масштабный ранг, как правило наиболее крупный, то в пределах РДС в деформационный процесс вовлекаются все масштабные ранги, что выражается в проявлении определенной масштабной иерархии в распределении разрывов по длинам [Черемных и др., 2005].

Поскольку акустическая эмиссия генетически связана с динамикой внутриразломных разрывных нарушений, то логично предполагать, что их переход в критическое состояние в РДС должен находить отражение во временных реализациях сигналов АЭ. Другими словами, повышение степени упорядоченности в пространственном распределении систем разрывов при их самоорганизации должно сопровождаться более упорядоченным распределением во времени параметров АЭ. Однако, как показывают приведенные выше результаты экспериментов, это характерно только для энергии ( $E$ ) сигналов АЭ, значения информационной энтропии которой уменьшаются в РДС (см. рис. 4, Б). Для общего же количества сигналов без учета их энергетического класса ( $N$ ) отмечается противоположная тенденция. Пространственное распределение сигналов АЭ во времени становится более однородным, на что указывают рост фрактальной размерности ( $D$ ) и  $S_{inf N}$  соответственно (см. рис. 4, Б).

Причина такого поведения параметров АЭ кроется в особенностях эволюции РДС. Предлагаемая ниже модель ее эволюционной динамики следует из основных функциональных свойств и приоритетов

открытых систем. К таковым относятся их аттрактивность, энтропийность, синергизм [Летников, 2004]. Они проявляются в том, что система всегда стремится к аттрактору — состоянию, в котором она через возникновение упорядоченного состояния ее элементов и их кооперативное поведение может минимизировать внешнее воздействие на нее. Для открытых систем таким аттрактором является неравновесное стационарное состояние с минимумом производства энтропии. В этом плане образование РДС в зоне разлома есть функциональная закономерность эволюции внутриразломных систем разноранговых разрывов. Входя в критическую фазу своей эволюции, они переходят в неравновесное стационарное состояние с минимумом производства энтропии, что, в свою очередь, характерно и для процессов самоорганизации. Их дальнейшее кооперативное поведение в РДС предопределено принципом ЛеШателье—Брауна [Летников, 1992; Пригожин, Кондипуди, 2002; Пригожин, Стенгерс, 2003] и направлено на самосохранение. Это достигается благодаря реализации двух процессов. Первый из них призван в целом сделать разрывную систему более устойчивой к деформационному воздействию через избирательное развитие разрывов с повышением степени их упорядоченности, второй — нивелирует уровень напряжений через механизм сегментации разрывов [Борняков, Адамович, 2002]. По своей термодинамической сути РДС, как и любые другие диссипативные структуры, являются энергосберегающими [Летников, 1992]. Если вне их направленность развития активных сегментов повторяет направленность развития разрывов от структурного уровня низкого ранга к структурному уровню более высокого ранга, то в пределах РДС этот процесс имеет обратную направленность. Активные разломы начинают сегментироваться на большее количество сегментов с меньшей средней длиной. Подчеркнем, что вышеотмеченная особенность относится только к процессу сегментации уже существующих разрывов, но не к процессу разрывообразования, развитие которого во времени идет в одном направлении — от коротких разрывов к длинным. Сеть активных разрывов в РДС стабилизируется, их суммарная длина, как правило, возрастает. При этом количество сегментов возрастает с одновременным сокращением их средней длины. Аналогичная тенденция характерна и для распределения сигналов АЭ по энергии, о чем отмечалось выше.

Экспериментально выявленные структурные и динамические критерии диагностики РДС могут быть адаптированы к анализу разломов и сейсмичности сейсмоактивных областей для целей долго- и среднесрочного прогноза землетрясений.

Долгосрочный прогноз сейсмических событий может осуществляться на базе результатов фрактального анализа и анализа информационной энтропии, систем разрывных нарушений, слагающих внутреннее строение зон крупных разломов. Оконтуренные области максимальных значений  $D_b$  и  $S_{inf}$  в соответствии с экспериментально выявленной тенденцией, могут рассматриваться как области потенциально возможного проявления процессов самоорганизации и возникновения РДС. По косвенным оценкам, длительность существования диссипативной структуры, зависящая от рангового уровня готовящейся перестройки разрывной сети, исчисляется месяцами — первыми годами, что вписывается в рамки среднесрочного прогноза. Из этого следует, что сам факт обнаружения функционирующей диссипативной структуры содержит в себе элементы прогноза места и примерного времени вероятного будущего сейсмического события. С учетом вышеприведенных результатов физического моделирования, в качестве основных таких критериев могут быть приняты: общее количество сейсмических событий ( $N$ ), суммарное количество выделившейся сейсмической энергии ( $E$ ) и средняя энергия одного события ( $E/N$ ); фрактальная размерность  $D$  для  $N$  и информационная энтропия  $S_{inf}$  для  $N$  и  $E$ . По характерной направленности изменения перечисленных параметров в анализируемых временных рядах сейсмических событий, пространственно совмещенных с предполагаемой диссипативной структурой, можно проводить диагностику последней.

## ВЫВОДЫ

Полученные посредством физического моделирования процессов формирования зон сдвига результаты позволяют определить основные критерии пространственно-временной диагностики РДС в крупных сдвиговых зонах. Из них следует, что:

1. В крупных сдвиговых зонах потенциально благоприятными для возникновения РДС являются участки с высокими значениями информационной энтропии ( $S_{inf}$ ) и фрактальной размерности ( $D_b$ ) внутриразломных систем разрывов.

2. В пределах РДС общее количество сигналов АЭ существенно возрастает за счет увеличения числа событий низких энергетических классов на фоне сокращения событий высоких классов. При этом снижается средняя энергия одного события в рамках единичных временных интервалов.

3. В пределах РДС сигналы АЭ без учета их энергетического класса стремятся к более равномерному временному распределению, что выражается в росте значений фрактальной размерности ( $D_k$ ) и росте значений информационной энтропии ( $S_{inf}$ ) для  $N$ .

Перечисленные критерии диагностики РДС могут быть адаптированы для анализа активных разломов и сейсмичности сейсмоактивных областей с целью прогнозных построений на новой концептуальной основе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 05-05-64327, 05-04-64348) и комплексных интеграционных проектов СО РАН № 6.18 и № 27.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Бабичев А.А.** О некоторых принципиальных вопросах использования критериев подобия при моделировании трещин и разрывов // Геология и геофизика, 1987 (4), с. 36—42.

**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.** Динамика развития деструктивных зон межплитных границ (результаты физического моделирования) // Геология и геофизика, 1988 (6), с. 3—10.

**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., Шерман С.И.** Стадии развития сдвиговой зоны и их отражение в соотношениях амплитуд смещения с длинами разрывов // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (7), с. 712—718.

**Борняков С.А., Шерман С.И., Гладков А.С.** Структурные уровни деструкции в сдвиговой зоне и их отражение во фрактальных размерностях // Докл. РАН, 2001, т. 377, № 1, с. 72—75.

**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.

**Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М., Высшая школа, 2000, 383 с.

**Гзовский М.В.** Основы тектонофизики. М., Наука, 1975, 536 с.

**Гольдин С.В.** Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика, 2005, т. 8, № 1, с. 5—14.

**Зубарев Д.Н., Морозов В.Г., Репке Г.** Статистическая механика неравновесных процессов. М., Физматлит, 2002, т. 1, 431 с.

**Летников Ф.А.** Синергетика геологических систем. Новосибирск, Наука, 1992, 228 с.

**Летников Ф.А.** Синергетика геологических систем // Планета Земля. Энциклопедический справочник. Том „Тектоника и геодинамика“. Изд-во ВСЕГЕИ, 2004, с. 134—139.

**Пригожин И., Кондипуди Д.** Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур. М., Мир, 2002, 461 с.

**Пригожин И., Стенгерс И.** Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. М., Эдиториал УРСС, 2003, 240 с.

**Пуцаровский Ю.М.** Геологическое выражение нелинейных геодинамических процессов // Геотектоника, 1998, № 1, с. 3—14.

**Семинский К.Ж.** Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. М., 1986, 130 с. Деп. в ВИНТИ 13.08.86. № 5762-B86.

**Семинский К.Ж.** Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2003, 243 с.

**Стоянов С.С.** Механизм формирования разрывных зон. М., Недра, 1977, 143 с.

**Черемных А.В., Борняков С.А., Татарников А.С.** Особенности динамики развития внутренней структуры зон разломов и их отражение в трещиноватости горных пород // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии, 2005, вып. 3, с. 173—176.

**Шеменда А.И.** Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика, 1983 (10), с. 10—19.

**Шерман С.И.** Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика, 1984 (3), с. 8—18.

**Шерман С.И., Гладков А.С.** Новые данные по фрактальной размерности разломов и сейсмичности Байкальского рифта // Докл. РАН, 1998, т. 361, № 5, с. 685—688.

**Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.** Области динамического влияния разломов. 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, 261 с.

**Эбилинг В.** Образование структур при необратимых процессах. М., Мир, 1979, 419 с.

**Bons P.D., Jessell M.W.** Strain analysis in deformation experiments with pattern matching or stereoscope // J. Struct. Geol., 1995, v. 17, p. 917—922.

**Keilis-Borok V.I.** The lithosphere of the Earth as non-linear system with implications for earthquake prediction // Rev. Geophys., 1990, v. 28, p. 19—34.

**Mandelbrot B.B.** The fractal geometry of nature. N.Y., Freeman, 1982, 480 p.

**Smalley R.F., Chatelain J.L., Turcotte D.L., Prevot R.** A fractal approach to the clustering of earthquakes: application to the seismicity of the New Hebrides // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1987, v. 77, p. 1368—1381.

**Velde B., Dubois J., Touchard G., Badri A.** Fractal analysis of fractures in rocks: the Cantor's Dust method // Tectonophysics, 1990, v. 179, p. 345—352.

**Velde B., Dubois J., Moore D., Touchard G.** Fractal patterns of fracture in granites // Earth Planet. Sci. Lett., 1991, v. 104, p. 25—35.

*Рекомендована к печати 22 мая 2007 г.  
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию  
22 декабря 2006 г.*