

# РАЗРЫВНЫЕ ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ ЗОН РАЗЛОМОВ: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИРОДА

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

*Институт земной коры СО РАН*

e-mail: [bornyak@crust.irk.ru](mailto:bornyak@crust.irk.ru), [cherem@crust.irk.ru](mailto:cherem@crust.irk.ru)

Особый класс упорядоченных пространственно-временных структур, порождаемый процессами самоорганизации в открытых системах вдали от равновесия, был назван И.Пригожиным диссипативными структурами (Пригожин, Стенгерс, 2000; Пригожин, Кондепуди, 2002). Диссипативные структуры представляют собой аномальное явление в эволюции открытой системы и возникают тогда, когда её внешние параметры достигли критических значений, при превышении которых она может перейти в новое качественное состояние (Эбилинг, 1979).

На основе результатов физического моделирования показано, что зоны разломов относятся к классу открытых систем, а эволюция составляющих их внутреннее строение систем разрывных нарушений представляет собой синергетический процесс со свойственными ему проявлениями процессов самоорганизации (Борняков и др., 2004). Вслед за И.Пригожиным, упорядоченные трехмерные пространственно-временные образования, возникающие в зонах разломов при самоорганизации разномасштабных внутриразломных систем разрывных нарушений названы нами «*разрывными диссипативными структурами (РДС)*». 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. В природных ситуациях распад РДС может сопровождаться в том числе, в виде землетрясений. При этом, чем больший объем области его динамического влияния разлома занимают системы разрывных нарушений, вовлеченные в процесс самоорганизации, тем потенциально более энергоемкой будет возникающая РДС, и соответственно более сильное сейсмическое событие она может генерировать.

С целью поиска количественных критериев пространственно-временной диагностики РДС использованы результаты физического моделирования процесса формирования крупной сдвиговой зоны в упруговязкопластичной модели литосферы. Моделирование выполнено с использованием теории подобия. Граничные условия экспериментов определялись по уравнению:  $\eta / \rho g L T = \text{const}$ , (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. В качестве модельного материала использована водная паста бурой глины, обладающая упруговязкопластичными свойствами. В специальном звукоизолированном боксе моделировался процесс формирования крупной сдвиговой зоны с регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ), излучаемые единичными разрывами при подвижках по ним. Фактическим материалом для анализа 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. Методика этих экспериментов подробно описана в (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 (Velde et. al., 1990). Расчет информационной энтропии производился по стандартному алгоритму  $S_{inf} = -\sum p_i \cdot \ln p_i$ , где  $p_i$  – вероятность (Вентцель, Овчаров, 2000). Фрактальная размерность и информационная энтропия отражают степень кластеризации анализируемой системы. Чем дальше от равномерного пространственное или временное распределение её элементов, тем она считается более кластеризована и упорядочена, и тем меньшими значениями  $D_k$  и  $S_{inf}$  характеризуется, и наоборот, менее кластеризованному и более хаотичному их распределению будут соответствовать большие величины этих параметров.

Вариации во времени всех перечисленных выше параметров представлены на графике (рис. 1). 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 (рис 1-А).

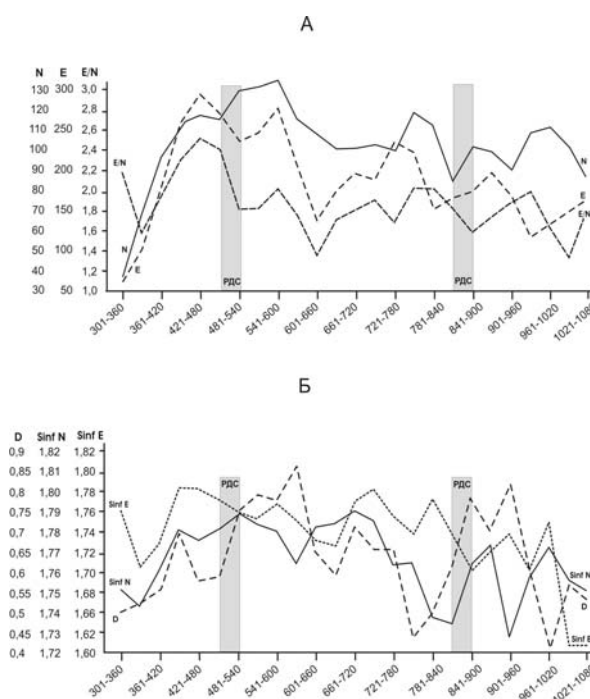


Рис. 1. Вариации параметров акустической эмиссии в процессе формирования сдвиговой зоны в упруговязкопластичной модели (пояснения символов в тексте)

В пределах же РДС (временные интервалы 461-521с и 811-891с) 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 снижению значений их средней энергии даже в тех случаях, когда суммарная энергия  $E$  сигналов возрастает (рис.1-А). При этом распределение сигналов АЭ по энергии становится более кластеризованным и упорядоченным, на что указывает снижение значений информационной энтропии ( $S_{inf} E$ ) (рис. 1-Б). Информационная энтропия и фрактальная

размерность количества сигналов ( $N$ ) в обоих РДС возрастает (рис.1-Б), что говорит о том, что распределение сигналов АЭ в целом становится более хаотичным и однородным.

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 параметра энергии ( $E$ ) сигналов АЭ, значения информационной энтропии которого уменьшаются в пределах РДС (рис.1-Б). Для общего же количества сигналов без учета их энергетического класса ( $N$ ) отмечается противоположная тенденция. Пространственное распределение сигналов АЭ во времени становится более однородным и хаотичным, на что указывают рост фрактальной размерности ( $D$ ) и  $S_{inf}$  соответственно (рис. 1-Б).

Экспериментально выявленные критерии диагностики РДС были адаптированы к анализу разломов и сейсмичности. (БРЗ). Для центральной части Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) была составлена схема активных разломов, представляющая собой дополненный вариант схемы из (Levi et.al., 1997) и для неё выполнены фрактальный и энтропийный анализы, с последующим построением схем площадного распределения значений фрактальной размерности  $D_b$  и информационной энтропии  $S_{inf}$  в изолиниях. Фрактальная размерность в последнем случае рассчитывалась методом покрытий (box-counting) по алгоритму  $D_b = \lg N_i / \lg r_i$  (2), где  $N_i$  и  $r_i$  - соответственно число условно разрушенных пикселей и размер системы в единицах размера пикселя, используемого при  $i$ -й итерации (Шерман, Гладков, 1998). Области максимальных значений параметров  $D_b$   $S_{inf}$ , в соответствии с экспериментально выявленной ранее тенденцией (Борняков и др., 2004; 2005), были приняты нами за области потенциально благоприятные для возникновения РДС за счет проявления процессов самоорганизации участвующих в их внутреннем строении систем разрывов. Всего выделено и оконтурено 12 таких областей в виде трапеций с размерами 20x30 минут в географической системе координат.

Для каждой такой трапеции сделана выборка всех инструментально зафиксированных землетрясений за период 1960-2001 гг. и для полученных временных рядов сейсмических событий по аналогии с выше описанными экспериментами рассчитаны параметры  $N$ ,  $E$ ,  $E/N$ ,  $D$  и  $S_{inf}$  по  $N$ . При расчетах за единичный временной интервал принимался 1 год. По характерной направленности изменения  $N$ ,  $E/N$ ,  $D$ ,  $S_{inf}$  для анализируемых временных рядов сейсмических событий в пределах тестовых трапеций были выделены временные интервалы проявления процессов самоорганизации и существования РДС. Анализ вариаций расчетных параметров для одной из трапеций (рис.2) позволяет предполагать что в её пределах РДС существовали в 1969-1970; 1971-1972; 1978-1980; 1986-1987; 1992-1993; 1994-1995 и 1998-2000 годы.

Весь комплекс полученных данных показывает, что РДС кратковременное явление, длительность существования которых в нашем случае не превышает двух лет. В возникновении РДС не наблюдается массовой синхронизации по времени, что говорит об отсутствии дальнедействующих корреляций между ними, что в свою очередь указывает на отсутствие масштабных процессов самоорганизации в сейсмической системе центральной части БРЗ.

В целом, проведенное исследование показало правомерность применения синергетической концепции и её методологии для анализа разломов и сейсмичности. Она позволяет отойти от традиционного рассмотрения разломов и сейсмических событий как статических геометрических образов и вести исследование с позиции принципов эволюции открытой

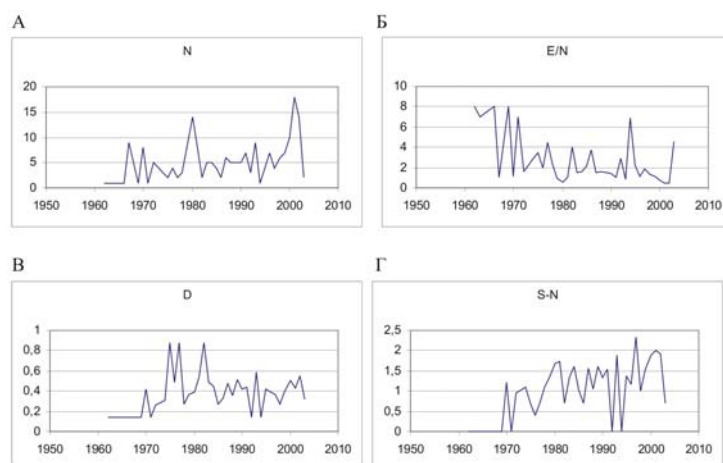


Рис.2. Вариации параметров сейсмических событий в пределах одной из тестовых трапеций (пояснения в тексте)

системы. Такой подход несомненно обладает большими потенциальными возможностями и позволяет освещать ранее неизвестные стороны анализируемых объектов и процессов не только качественно, но и в количественных параметрах.

Авторы благодарят академика Ф.А.Летникова за консультации по широкому кругу вопросов геологической синергетики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 05-05-64327, 05-04-64348) и СО РАН (интеграционные проекты № 6.18 и №27).

*Список литературы:*

- 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., Шерман С.И., Черемных А.В., Дзюба И.А., Татарников А.С. Диссипативные структуры деструктивных зон литосферы (по результатам физического моделирования) // Тектоника земной коры и мантии; Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых. Том 1. Межвед. тектонич. Комитет. Москва, 2005. С.65-68.*
- Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 383 с.*
- Шерман С.И., Гладков А.С. Новые данные по фрактальной размерности разломов и сейсмичности Байкальского рифта // ДАН. 1998. т.361. №5. С.685-688.*
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере: Зоны сдвига. Новосибирск. Наука, Сиб. Отд-е, 1991. 261 с.*
- Пригожин И., Кондипуди Д. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир. 2002.461с.*
- Эббинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 419с.*
- Levi K.G., Miroshnichenko A.I., San'kov V.A., et al. Active faults of the Baikal depression // Bull. Centre Elf Explor. Prod. – 1997. v.21. № 2. P. 399-434/*
- Velde B., Dubois J., Touchard G., Badri A. Fractal analysis of fractures in rocks: the Cantor's Dust method //Tectonophysics, 1990. 179. P. 345-352.*