

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ И ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ КАК КРИТЕРИИ САМООРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ РАЗРЫВОВ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

© 2003 г. С. А. Борняков, А. С. Гладков, А. Н. Адамович,
В. А. Матросов, В. А. Клепиков

Представлено академиком С.В. Гольдиным 23.01.2003 г.

Поступило 04.02.2003 г.

Зона разлома, как и подавляющее большинство геологических объектов, относится к категории нелинейных систем, для анализа которых применимы принципы неравновесной термодинамики [1], синергетики [2], мезомеханики [3] и фрактальной геометрии [4]. Деформационная эволюция зоны разлома представляет собой синергетический процесс, протекающий в виде последовательной смены структурных уровней деформации, где определяющая роль перехода с одного структурного уровня на другой отводится процессам самоорганизации [5]. Разработка способов их количественной диагностики имеет важное прогностическое значение, поскольку это позволит выявлять критические моменты в эволюции разломной зоны [6], предвещающие быстрые, нередко сейсмогенные перестройки ее внутренней структуры. Из [1, 7] следует, что о наличии или отсутствии в открытой неравновесной динамической системе процессов самоорганизации можно судить по характеру изменения энтропии S . Вариации последней при эволюции системы определяются характером изменения двух ее составляющих

$$dS = dS_e + dS_i, \quad (1)$$

где S_e – внешняя энтропия, привнесенная в систему извне; S_i – внутренняя энтропия, произведенная самой системой. Согласно принципу минимума производства энтропии [7], в моменты развития процесса самоорганизации в такой системе второй член dS_i уравнения (1) убывает.

В настоящем сообщении на примере анализа структурной эволюции зоны растяжения в физи-

ческой модели литосферы представлены результаты первой апробации энтропии как количественного критерия диагностики процессов самоорганизации систем разрывов в зонах разломов и показано ее соотношение с фрактальной размерностью. Не имея возможности оценить для систем разрывов термодинамическую энтропию S , мы ограничились оценкой информационной энтропии S_{inf} . Об их качественной аналогии можно судить по серии работ [1, 8–11 и др.].

Физическое моделирование зоны растяжения выполнено по методике, изложенной в [12]. В моделях при активном механизме приложения нагрузки воспроизводился процесс формирования крупной зоны косоуго растяжения (рис. 1, 2). Моделируемый процесс в ходе эксперимента фотографировался с интервалом в 1 мин в пределах тестовых площадок. По каждой фотографии составлялись структурные схемы, учитывающие все разрывы, и для них рассчитывались информационная энтропия S_{inf} и фрактальная размерность D . Поскольку разрывообразование в активном и пассивном крыльях зоны растяжения различает-

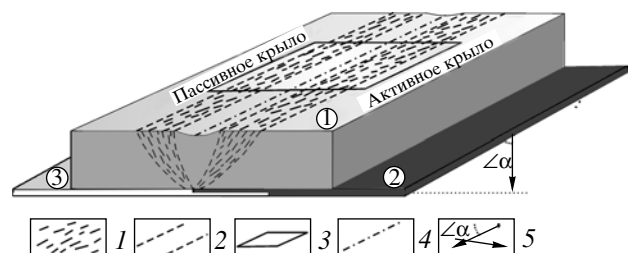


Рис. 1. Схема моделирования. 1 – модель; 2 – подвижный и 3 – неподвижный штампы. Условные обозначения: 1 – области разрывообразования в первую стадию развития зоны растяжения, 2 – их границы; 3 – тестовая площадка; 4 – осевая линия; 5 – направление движения штампа.



Рис. 2. Фрагменты строения интраструктуры зоны растяжения в начальную и конечную стадии развития.

ся в деталях, расчет этих параметров для каждого из них производился отдельно в пределах тестовых площадок равного размера. Их внутренняя граница совпадала с осевой линией зоны растяжения (рис. 1, 2).

Для оценки информационной энтропии в пределах тестовых площадок активного и пассивного крыльев зоны растяжения промерялась суммарная длина всех попавших в них разрывов $\sum L$. Затем каждая тестовая площадка делилась на 50 равновеликих элементов и для каждого из них повторялась процедура промера суммарной длины разрывов $\sum l_i$. Информационную энтропию оценивали по уравнению

$$S_{inf} = -\sum p_i \cdot \ln p_i, \quad (2)$$

где $p_i = \frac{\sum l_i}{\sum L}$.

Расчет фрактальной размерности D осуществлялся с помощью апробированной программы по методу клеточной размерности (box counting technique)

$$D = \frac{\lg N_i}{\lg r_i}, \quad (3)$$

где N_i и r_i – соответственно число условно разрушенных пикселей и размер системы в единицах размера пикселей, используемых при i -й итерации [13].

Результаты расчетов S_{inf} и D представлены на сводном графике (рис. 3). Видно, что информационная энтропия систем разрывов по мере развития зоны растяжения в целом возрастает за исключением двух временных интервалов – 11–12 мин и 16–17 мин, где ее значения уменьшаются. Поскольку в экспериментах деформация модели

осуществлялась с постоянной скоростью, мы можем считать приток внешней энтропии dS_e постоянной величиной и все изменения полной энтропии dS связывать с изменениями второго члена dS_i уравнения (1). Ее уменьшение, согласно принципу минимума производства энтропии [7], указывает на развитие в рамках отмеченных временных интервалов процессов самоорганизации.

Общее сопоставление кривых общих трендов изменения D и S_{inf} во времени для активного и пассивного крыльев показывает, что эти два параметра в целом связаны между собой прямой зависимостью. Рассчитанные для них уравнения парной

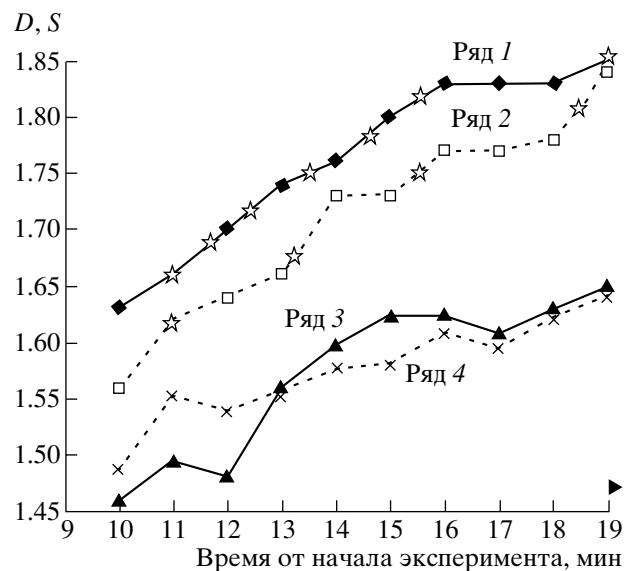


Рис. 3. Вариации во времени фрактальной размерности D (ряды 1 и 2) и информационной энтропии S_{inf} (ряды 3 и 4) систем разрывов в активном (сплошная линия) и в пассивном (штриховая линия) крыльях зоны растяжения. Звездочками отмечены расчетные пороговые значения D .

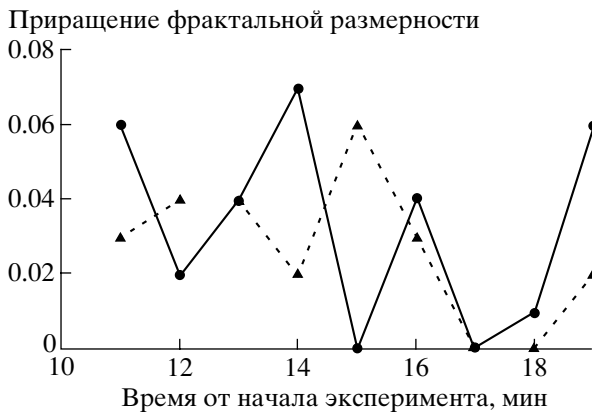


Рис. 4. Вариации во времени приращения фрактальной размерности D разрывной системы разрывов в активном (сплошная линия) и в пассивном (штриховая линия) крыльях зоны растяжения.

корреляции при высоких коэффициентах корреляции имеют вид

$$D = 1.0596 S_{\text{inf}} + 0.095, R = 0.95$$

(для активного крыла),

$$D = 1.8364 S_{\text{inf}} - 1.187, R = 0.96$$

(для пассивного крыла),

где R – коэффициент корреляции.

Система разрывов в зоне разлома любого морфолого-генетического типа в условиях прогрессирующей деформации эволюционирует по пути формирования фрактального кластера. При этом фрактальная размерность является аддитивной величиной, неравномерно увеличивающейся на протяжении всего процесса разрывообразования. Согласно [14], можно утверждать, что для каждой прогрессивно эволюционирующей разрывной системы существует ряд дискретно возрастающих пороговых значений фрактальной размерности, при которых проявляется ее предрасположенность к самоорганизации. Так как в нашем случае D возрастает во времени (рис. 3), то следует признать, что сам факт ее роста является важной, но не определяющей предпосылкой развития процесса самоорганизации. Для реализации последнего в рамках текущего временного отрезка необходимо выполнение как минимум двух условий: достижения фрактальной кривой пороговой точки и наличия в пределах разрывной системы определенного энергетического баланса. Отчасти подтверждение этому вытекает из сопоставления кривых фрактальной размерности и энтропии с учетом пороговых значений фрактальной размерности, рассчитанных по универсальному алгоритму [14] (рис. 3).

Анализ показывает, что масштабные процессы самоорганизации, отчетливо фиксируемые по падению энтропии, одновременно проявляются в обоих крыльях зоны растяжения и предвещают кардинальные перестройки разрывной сети при смене структурных уровней на 11–12-й и 16–17-й минутах. Им предшествует совпадение по времени пороговых значений D (рис. 3). Серия менее масштабных проявлений процессов самоорганизации в локальных участках тестовых площадок наблюдается в рамках тех временных интервалов, в которых присутствуют пороговые значения фрактальной размерности и в которых фиксируются снижение скорости приращения энтропии и повышение скорости приращения фрактальной размерности. Такие локальные проявления процессов самоорганизации не приводят к существенным структурным преобразованиям зоны растяжения, а лишь являются составным элементом протекающего в рамках стадии или структурного уровня пространственно-временного деструктивного процесса и отражают этапы формирования фрактального разрывного кластера.

Анализ величин приращения характеризующей его фрактальной размерности позволил выявить важную деталь динамики этого процесса. Как показывают результаты экспериментов, приращение фрактальной размерности в разных крыльях зоны растяжения идет асинхронно, в противофазе вплоть до завершающей стадии развития (рис. 4). Этот процесс латеральной миграции активности надстройки фрактальных кластеров во времени из крыла в крыло хорошо согласуется с инструментально выявленной ранее миграцией деформационной активности [12].

Представленные результаты анализа структурной эволюции зоны растяжения показывают, что информационная энтропия и фрактальная размерность могут быть использованы как количественные критерии диагностики разномасштабных процессов самоорганизации участвующих в ее внутреннем строении систем разрывов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 01–05–64485, 01–05–64482, 03–05–65276.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 429 с.
2. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
3. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Макаров П.В. и др. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 297 с.
4. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. N.Y.:Freeman, 1983. 480 p.

5. Борняков С.А., Шерман С.И. // Физ. мезомеханика. 2000. Т. 3. №4. С. 107–114.
6. Курдюмов С.П., Князева Е.Н. В сб.: Самоорганизация и наука. М., 1994. С. 162–186.
7. Климонтович Ю.Л. // УФН. 1989. Т. 158. В. 1. С. 59–91.
8. Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация. М.: Мир, 1966. 271 с.
9. Зубарев Д.Н., Морозов В.Г., Рёнке Г. Статистическая механика неравновесных процессов. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 431 с.
10. Вознесенский А.С. Физика и механика геоматериалов. 2002. С. 5–47.
11. Акопян С.Ц. // ДАН. 1995. Т. 340. №4. С. 531–535.
12. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере: зоны растяжения. Новосибирск: Наука, 1992. Т. 1. 226 с.
13. Шерман С.И., Гладков А.С. // ДАН. 1998. Т. 361. № 6. С. 685–688.
14. Иванова В.С., Встовский Г.В. // Физ. мезомеханика. 1999. Т. 2. № 5. С. 19–25.