

УДК 550.34

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЛОКОВЫХ СТРУКТУР: ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА МОДЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

И.М. Ротвайн, А.А. Соловьев

*Международный институт теории прогноза землетрясений  
и математической геофизики Российской академии наук*

Выполнено численное моделирование динамики для трех групп блоковых структур с увеличением раздробленности внутри каждой из групп и для двух типов движений границ. Группируемость землетрясений в полученных искусственных каталогах и фрактальные свойства последовательностей моментов этих событий исследуются с помощью фрактальных размерностей  $d(2)$  и  $d(0)$ . Установлено, что группируемость событий зависит от типа движения границ и от раздробленности структуры, причем тип движения границ является главным фактором. Значения  $d(2)$  и  $d(0)$  фактически зависят только от типа движения границ.

## NUMERICAL MODELING OF BLOCK STRUCTURE DYNAMICS: TEMPORAL CHARACTERISTICS OF A SYNTHETIC EARTHQUAKE FLOW

I.M. Rotwain, and A.A. Soloviev

*International Institute of Earthquake Prediction Theory  
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences*

The numerical modelling dynamics was carried out for three groups of block structures with increasing of the structure separateness inside of each group and for two types of boundary movements. The clustering of earthquakes in the synthetic catalogs obtained and the fractal features of the time sequences of the events are studied by using the fractal dimensions  $d(2)$  and  $d(0)$ . It is found that the clustering of events depends on the boundary movement and structure separateness, the type of boundary movement being the main factor. The values of  $d(2)$  and  $d(0)$  depend in fact on the type of the boundary movement only.

### ВВЕДЕНИЕ

Работа является продолжением начатых в [1] исследований, где анализировалась зависимость основных свойств потока модельных землетрясений от раздробленности структуры и типа движения ее границ. Эти свойства (общее число событий, максимальная магнитуда и параметры основного закона сейсмичности –

закона Гутенберга–Рихтера) фактически стационарны и являются характеристиками потока сейсмичности, не зависящими от времени. Однако несомненный интерес представляет исследование характеристик потока, изменяющихся во времени. В частности известно, что землетрясения группируются во времени, одним из наиболее убедительных примеров такого группирования является кластер, состоящий из форшоков, основного толчка и его афтершоков. Этот тип группирования был исследован рядом авторов (см., например, [2-4]). Свойством группирования обладает и последовательность основных толчков, что отмечено, например, в работе [5]. Было показано также, что распределение землетрясений во времени обладает фрактальными свойствами, а именно – его фрактальная размерность  $d(2)$  меньше единицы [6].

Статья содержит результаты анализа временных характеристик потока модельных событий – группирования и фрактальных свойств последовательности моментов событий. Исследовано влияние геометрии структуры, ее раздробленности и типа движения границ на эти характеристики.

Численное моделирование было выполнено в соответствии с моделью динамики блоковых структур, которая подробно описана в [7-9]. Напомним кратко ее основные положения.

Часть литосферы, соответствующая сейсмоактивному региону, представляется как слой толщины  $H$  между двумя параллельными горизонтальными плоскостями. Этот слой разделен на блоки плоскостями разломов. Блоки предполагаются абсолютно жесткими, так что все деформации возникают только в плоскостях разломов и на подошвах блоков, которые отделяют их от подстилающей среды.

Взаимодействие между блоками и подстилающей средой предполагается вязкоупругим. Смещения блоков возникают вследствие заданных движений боковых границ структуры и подстилающей среды.

В случае, когда на некотором участке плоскости разлома отношение напряжения к давлению превосходит заданный порог, возникает разрыв, который приводит к перераспределению напряжений в системе и, как следствие, может вызвать разрывы на других участках плоскости того же или другого разлома. В модели такой сброс напряжений интерпретируется как землетрясение и результатом численного моделирования является искусственный каталог землетрясений.

Опыт моделирования динамики структур с реальной геометрией сейсмоактивного региона [9] показал, что существует возможность добиться схождения не зависящих от времени характеристик (пространственного распределения эпицентров и параметров закона Гутенберга–Рихтера) модельной и реальной сейсмичности. Однако исследование возможности применения некоторых среднесрочных алгоритмов прогноза сильных землетрясений показало, что существует расхождение во временном поведении используемых в этих алгоритмах функционалов [10] для реальной и модельной сейсмичности. Это можно объяснить грубостью рассматриваемой модели, не позволяющей адекватно описать процесс подготовки сильного землетрясения. В частности, как отмечалось ранее [11], в модели зачастую происходит объединение афтершоков и основного толчка в одно землетрясение, хотя ярко выражена и группируемость событий [12]. Способ "отделения" афтершоков от основных толчков, предложенный в [11], является в значительной мере искусственным, и полученные серии афтершоков не подчиняются закону Омори.

Ниже приводятся результаты исследования более тонких структурных особенностей временных характеристик модельного потока событий в свете влияния на них раздробленности структуры и типа движения, задаваемого в модели. Здесь, как и в [1], численное моделирование проводилось для трех групп блоковых структур, показанных на рис. 1. Каждая структура в плане представляет собой квадрат со стороной 320 км, разделенный на меньшие квадраты. Одна из структур (BS1), состоящая из четырех квадратных блоков, входит во все группы, остальные две структуры в каждой из групп получены из BS1 путем дробления самоподобным образом [13]. В первой группе такое дробление проводится для всех квадратов, во второй – для трех из четырех квадратов и в третьей группе – для двух расположенных по диагонали квадратов.

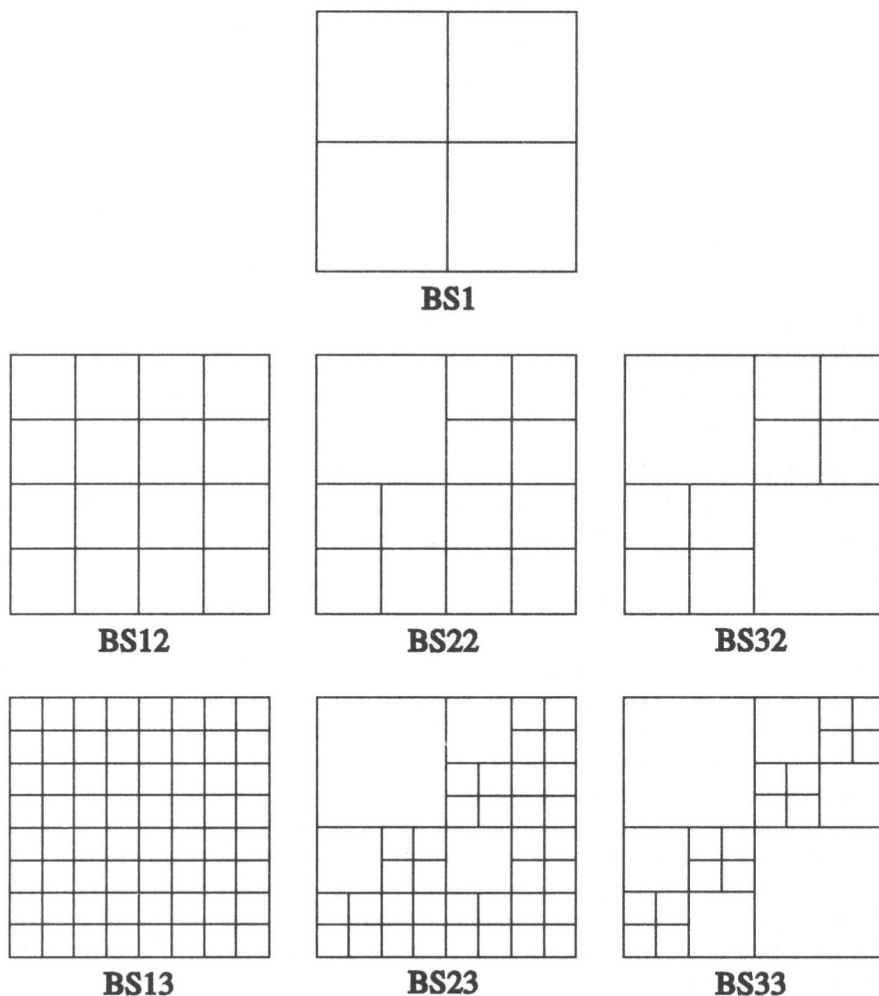


Рис. 1. Геометрия рассматриваемых блоковых структур

Первая группа: BS1, BS12, BS13; вторая группа: BS1, BS22, BS23; третья группа: BS1, BS32, BS33

Рассмотрены два типа движения (рис. 2). В случае движения I типа (рис. 2, а) все границы двигаются поступательно и равномерно со скоростью 10 см за единицу безразмерного времени. В случае движения II типа (рис. 2, б) две противоположные границы структуры двигаются поступательно и равномерно со скоростью 10 см за единицу безразмерного времени, вектор которой параллелен соответствующей границе; две другие противоположные границы вращаются относительно своих центров с угловой скоростью  $-0.625 \times 10^{-6}$  рад за единицу безразмерного времени.

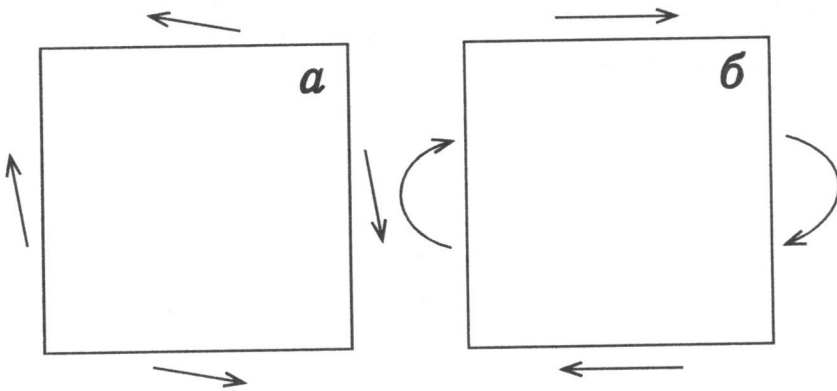


Рис. 2. Рассмотренные типы движения границ (стрелками показаны векторы скоростей движения)

а - I тип (величина всех скоростей 10 см, угол между векторами скорости и соответствующими границами  $10^\circ$ ); б - II тип (величина скоростей поступательного движения 10 см, угловая скорость  $-0.625 \cdot 10^{-6}$  рад.)

В работе [1] показано, что тип движения радикальным образом влияет как на сами основные характеристики потока землетрясений в модели, так и на характер зависимости этих характеристик от раздробленности структуры.

### ГРУППИРУЕМОСТЬ СОБЫТИЙ В МОДЕЛИ

В модели используется безразмерное время. Состояние блоковой структуры определяется в дискретные моменты времени  $t_i = t_0 + i\Delta t$  ( $i = 1, 2, \dots$ ), где  $t_0$  - начальный момент времени, а шаг дискретизации по времени  $\Delta t = 0,001$ . В дальнейшем при описании временных характеристик потока модельных событий мы будем пользоваться этой величиной.

Обозначим через  $\tau_1, \tau_2, \dots$  моменты, когда произошли землетрясения (события) искусственного каталога. Будем считать интервал времени между парой последовательных событий  $\delta\tau_j = \tau_{j+1} - \tau_j$  реализацией случайной величины  $\delta\tau$ . Одной из мер группируемости событий во времени является отношение оценки стандартного отклонения случайной величины  $\delta\tau$  к ее выборочному среднему значению. Обозначим эту величину:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N-1} (\delta\tau_j - \bar{\delta\tau})^2}{(N-1)}} / \bar{\delta\tau}, \quad (1)$$

где  $\overline{\delta\tau} = \sum_{j=1}^{N-1} \delta\tau_j / (N-1)$ , а  $N$  – число рассматриваемых событий искусственного каталога.

Заметим, что если  $\varepsilon = 0$ , то процесс является периодическим, при  $0 < \varepsilon < 1$  – процесс квазипериодический, при  $\varepsilon = 1$  мы имеем пуассоновский процесс, а при  $\varepsilon > 1$  можно говорить о наличии группируемости. Эта мера группируемости была использована, в частности, в работе [14] для исследования долговременной группируемости сильнейших землетрясений мира.

Значения  $\varepsilon$ , полученные на интервале моделирования в 200 единиц безразмерного времени для всех структур в случае I и II типов движения, даны в табл. 1. Там же приведены величины выборочных средних  $\overline{\delta\tau}$  и оценки стандартных отклонений. Поскольку в случае движения II типа число событий почти в 4 раза превышает число событий для аналогичной структуры в случае движения I типа, то при подсчете перечисленных выше величин мы ограничились последними десятью тысячами событий соответствующих каталогов. Из табл. 1 видно, что при I типе движения величины  $\varepsilon$  значительно превышают 1, т.е. можно говорить о группировании событий искусственных каталогов. При II типе движения введенная мера группируемости близка к 1, т.е. последовательность землетрясений искусственных каталогов близка к пуассоновскому процессу.

ТАБЛИЦА 1. Меры группируемости в случае I и II типов движения границ структур

Группа структур	Структура	Выборочное среднее $\overline{\delta\tau}$		Оценка стандартного отклонения		$\varepsilon$	
		I тип	II тип	I тип	II тип	I тип	II тип
		движения		движения		движения	
Первая	BS1	26.10	2.50	74.2	2.40	2.84	0.96
	BS12	17.24	7.16	45.7	9.13	2.65	1.28
	BS13	15.79	34.8	41.1	65.59	2.60	1.88
Вторая	BS1	26.10	2.50	74.2	2.40	2.84	0.96
	BS22	16.17	4.62	45.4	4.93	2.81	1.07
	BS23	14.03	6.63	38.9	7.56	2.77	1.14
Третья	BS1	26.10	2.50	74.2	2.40	2.84	0.96
	BS32	16.80	3.40	48.8	3.55	2.90	1.06
	BS33	16.25	4.10	49.6	4.55	3.05	1.10

Заметим, что внутри каждой из групп структуры различаются числом блоков на каждом шаге дробления: наибольшим числом блоков обладает структура из первой группы, а наименьшим – из третьей. Более того, если бы такое самоподобное дробление продолжалось, то в пределе в первой группе была бы получена структура, имеющая фрактальную размерность 2, во второй группе –  $\log 3 / \log 2$  и в третьей группе – структура размерности 1. Данные, приведенные в табл. 1, позволяют предположить, что имеется монотонное поведение величины  $\varepsilon$  как в зависимости от шага дробления (числа блоков) отдельно внутри каждой из групп, так и в зависимости от группы (от значения фрактальной размерности структуры, получаемой в пределе при дроблении) на одном и том же шаге дробления.

При движении I типа (табл. 1) величина  $\varepsilon$  внутри первой и второй групп уменьшается с увеличением числа блоков, а внутри третьей группы – увеличивается. При уменьшении фрактальной размерности величина  $\varepsilon$  увеличивается. При движении II типа картина, в основном, противоположная: величина  $\varepsilon$  увеличивается и при увеличении фрактальной размерности и при увеличении числа блоков внутри каждой из групп. Тем самым, изменение величины  $\varepsilon$  имеет одну и ту же тенденцию при разных типах движения границ только лишь в случае увеличения числа блоков внутри третьей группы.

Рассмотрим теперь поведение величины  $\varepsilon$ , вычисленной в скользящем временном окне. На рис. 3 показаны величины  $\varepsilon$ , упорядоченные по убыванию, для трех рассматриваемых групп структур в случае I типа движения. Видно, что эффект монотонной зависимости от группы (фрактальной размерности) на одном и том же шаге дробления имеет место не только для всего периода времени в целом, но и при вычислении  $\varepsilon$  в скользящем временном окне. Причем по мере перехода от одного шага дробления (рис. 3,а) к следующему (рис. 3,б) разница величин  $\varepsilon$  для разных групп несколько увеличивается.

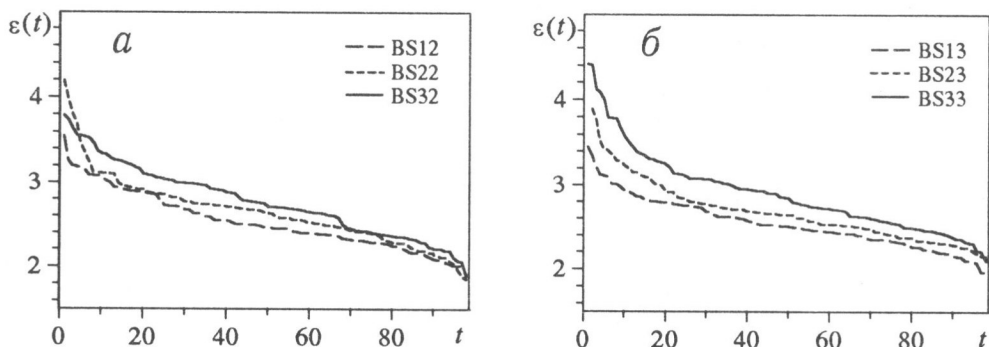


Рис. 3. Значения  $\varepsilon$ , вычисленные в скользящем окне длиной 4 единицы безразмерного времени, сдвигаемом на 2 единицы, для искусственных каталогов, полученных при I типе движения границ

а – структуры, соответствующие первому шагу дробления внутри групп, б – структуры, соответствующие второму шагу дробления. По оси абсцисс отложен номер значения  $\varepsilon$  в порядке убывания

На рис. 4 показана зависимость величины  $\varepsilon$ , вычисленной в скользящем временном окне, от степени раздробленности внутри группы для первой (рис. 4,а) и третьей (рис. 4,б) групп. Эта зависимость отчетливо выражена для третьей группы и соответствует поведению величины  $\varepsilon$ , вычисленной на всем интервале моделирования (см. табл. 1).

В случае II типа движения, как и ранее, рассматривался период времени, соответствующий последним десяти тысячам событий, и длительность временного окна подбиралась из условия, что в него попадает около 100 событий; как и в случае I типа движения сдвиг окна по времени составлял половину от его длительности. На рис. 5 показаны величины  $\varepsilon$ , упорядоченные по убыванию, полученные в случае II типа движения для трех рассматриваемых групп структур на первом (рис. 5,а) и втором (рис. 5,б) шагах дробления. Видно, что эффект монотонной зависимости

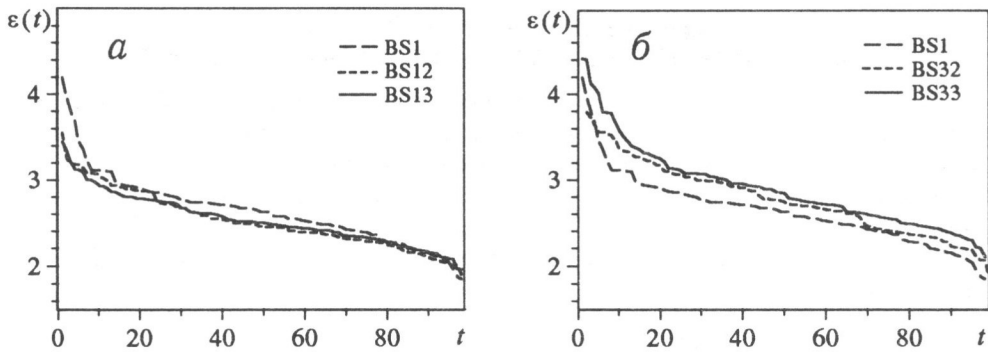


Рис. 4. Сравнение тех же значений  $\varepsilon$ , что и на рис. 3, для уровней дробления структур внутри групп

*a* – структуры первой группы, *б* – структуры третьей группы

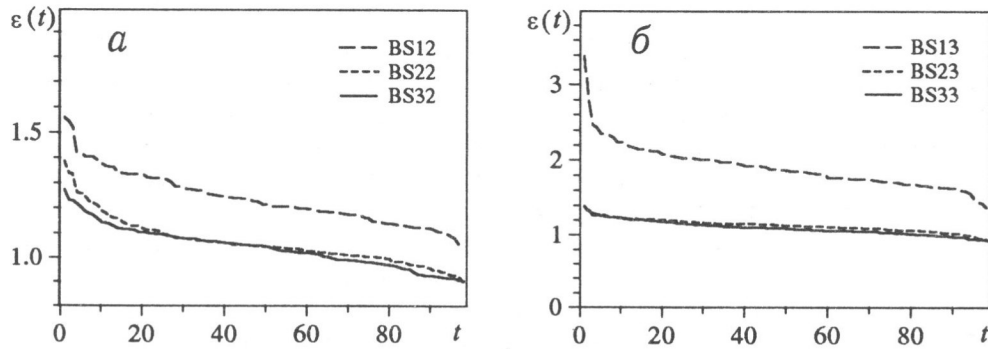


Рис. 5. То же, что на рис. 3, но при II типе движения границ

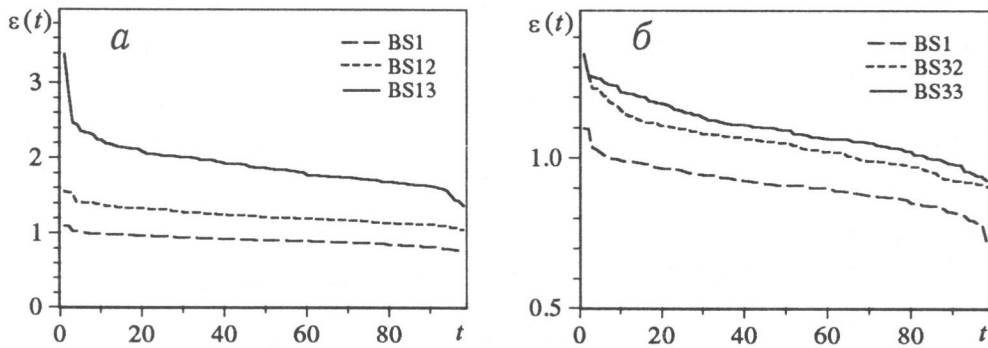


Рис. 6. То же, что на рис. 4, но при II типе движения границ

от группы (фрактальной размерности) остается, но выражен весьма слабо при переходе от второй к третьей группе. Значительно большее влияние на группировку событий (величину  $\varepsilon$ ) оказывает степень дробления структуры внутри групп (рис. 6): по мере дробления структуры величина  $\varepsilon$  увеличивается. Как показано выше, аналогичный эффект отмечался в третьей группе и в случае I типа движения.

## ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

С целью анализа фрактальных свойств последовательности событий искусственного каталога оценивались размерности  $d(2)$  и  $d(0)$  [15, 16] для последних 4991 события из соответствующего каталога. Контрольные эксперименты показали, что ограничение на число событий каталога не влияет на результаты, приведенные ниже.

Вначале рассмотрим корреляционную фрактальную размерность  $d(2)$ . Определим величину

$$C_2(\delta) = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i,j} H(\delta - |\tau_i - \tau_j|), \quad (2)$$

где

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0, \end{cases}$$

$n$  – число рассматриваемых событий, а суммирование ведется по всем  $i > j$ . Таким образом  $C_2(\delta)$  – это относительное число пар событий, интервал времени между которыми не более  $\delta$ . Корреляционная фрактальная размерность  $d(2)$  вычисляется как угол наклона линейной интерполяции функции  $F(\beta) = \lg C_2(\delta)$ , где  $\beta = \lg \delta$ , и может интерпретироваться как мера самоподобия группировки событий.

При вычислении фрактальных размерностей мы учитывали тот факт, что моменты событий в модели кратны шагу дискретизации по времени  $\Delta t$ . Поэтому в (2) рассматривались только значения  $\delta$ , кратные  $\Delta t$ , и  $\delta$  наряду с интервалом между событиями  $\tau_i - \tau_j$  измерялись числом шагов дискретизации по времени, т.е.  $\delta = q$  означает, что в единицах безразмерного времени  $\delta = q\Delta t$ .

В случае I типа движения (рис. 7) для всех структур наблюдается одно и то же поведение функции  $C_2(\delta)$ . Имеется три характерных интервала значений  $\delta$ :  $2 - 32$ ,  $32 - 10^3$  и  $10^3 - 10^5$  (с учетом величины  $\Delta t$  в единицах безразмерного времени – это интервалы  $0.002 - 0.032$ ,  $0.032 - 1$  и  $1 - 100$ ); соответственно для значений  $\beta = \lg \delta$  это интервалы:  $0.3 - 1.5$ ,  $1.5 - 3$  и  $3 - 5$ . Эти три интервала имеют разные коэффициенты самоподобия (значения  $d(2)$ ): для первого интервала этот коэффициент близок к 1, т.е. фрактальность отсутствует; для второго интервала он колеблется от 0.58 до 0.68; для третьего интервала он близок к 0.90 (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Величины  $d(2)$  в случае I типа движения границ структур

Группа структур	Структура	$d(2)$ для интервалов $\lg \delta$		
		от 0.3 до 1.5	от 1.5 до 3.0	от 3.0 до 5.0
Первая	BS1	$0.95 \pm 0.17$	$0.58 \pm 0.03$	$0.91 \pm 0.04$
	BS12	$0.95 \pm 0.17$	$0.67 \pm 0.10$	$0.91 \pm 0.05$
	BS13	$0.98 \pm 0.13$	$0.63 \pm 0.10$	$0.92 \pm 0.04$
Вторая	BS1	$0.95 \pm 0.17$	$0.58 \pm 0.03$	$0.91 \pm 0.04$
	BS22	$0.96 \pm 0.17$	$0.60 \pm 0.08$	$0.91 \pm 0.04$
	BS23	$0.99 \pm 0.15$	$0.68 \pm 0.10$	$0.90 \pm 0.07$
Третья	BS1	$0.95 \pm 0.17$	$0.58 \pm 0.03$	$0.91 \pm 0.04$
	BS32	$0.97 \pm 0.10$	$0.57 \pm 0.07$	$0.91 \pm 0.03$
	BS33	$0.98 \pm 0.10$	$0.61 \pm 0.10$	$0.91 \pm 0.05$



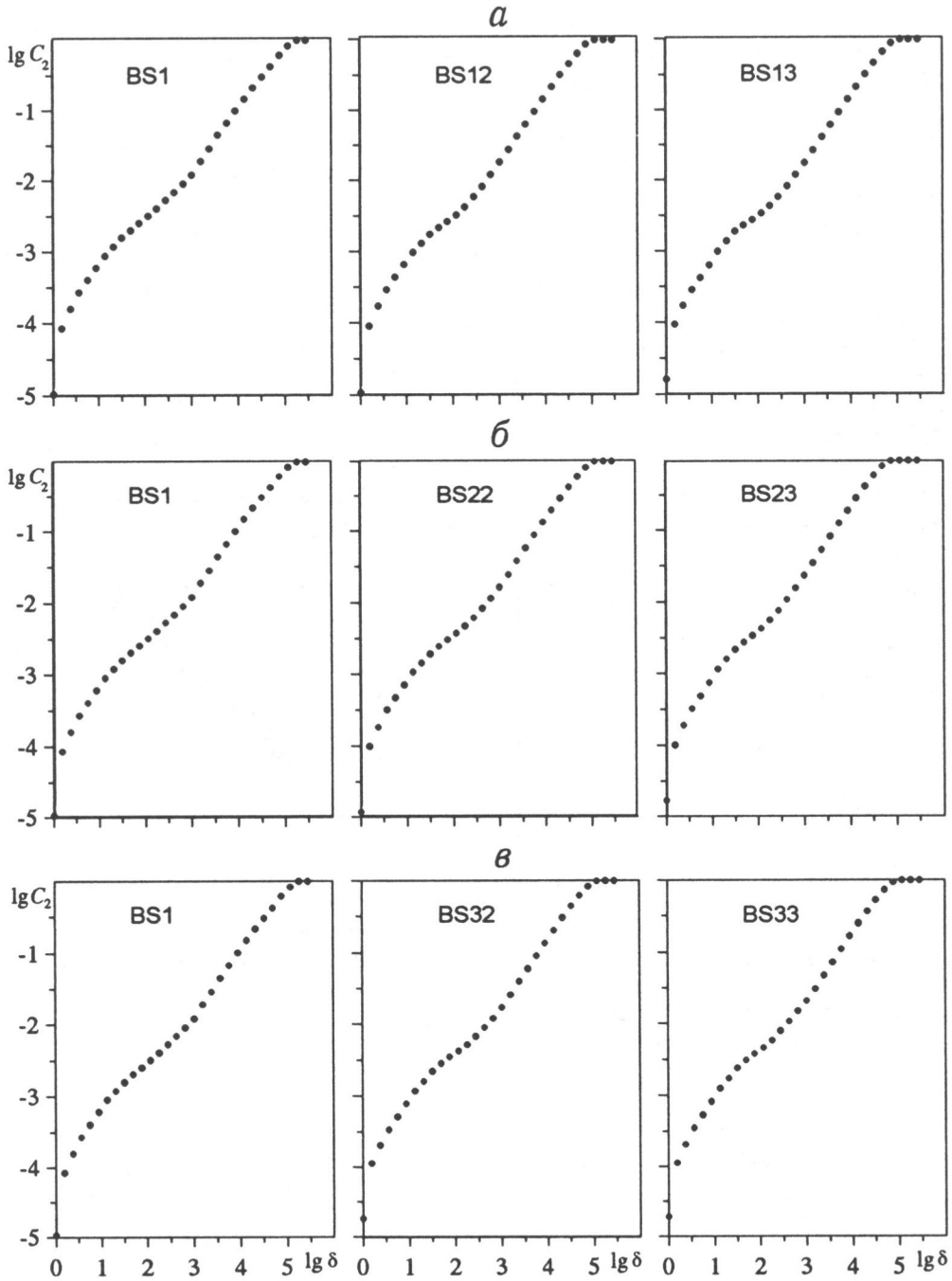


Рис. 7. Зависимость  $\lg C_2(\delta)$  от  $\beta = \lg \delta$  и корреляционная фрактальная размерность  $d(2)$ , вычисленные для искусственных каталогов, полученных при I типе движения границ  
 а - структуры первой группы, б - структуры второй группы, в - структуры третьей группы

Таким образом для интервалов времени от 0.032 до 100 единиц безразмерного времени между парами последовательных событий можно говорить о самоподобном (фрактальном) поведении группирования событий. Причем коэффициент самоподобия значительно отличается для малых (от 0.032 до 1 безразмерного времени) и для больших (от 1 до 100 единиц безразмерного времени) интервалов времени.

Поведение функции  $C_2(\delta)$  в случае II типа движения показано на рис. 8. Как и в случае I типа движения, это поведение не зависит ни от группы, к которой принадлежит структура, ни от степени ее дробления. Исключение, может быть, составляет структура BS13, поведение  $C_2(\delta)$  для которой несколько отличается. Для всех структур величина  $d(2)$  практически равна 1, что подтверждает отмеченное ранее отсутствие группировки в случае II типа движения.

Еще раз подчеркнем, что ни группа, к которой принадлежит структура, ни уровень дробления не влияют существенно на характер поведения функции  $C_2(\delta)$  как при движении I типа, так и при движении II типа. Фрактальная размерность  $d(0)$  определяется как угол наклона линейной интерполяции функции  $G(\beta) = C_0(\delta)$ , где  $\beta = \lg \delta$ , а  $C_0(\delta)$  – относительное число интервалов длины  $\delta$  между событиями, которые не содержат ни одного события. Таким образом величина  $d(0)$  позволяет оценить меру самоподобия "дырчатости" последовательности.

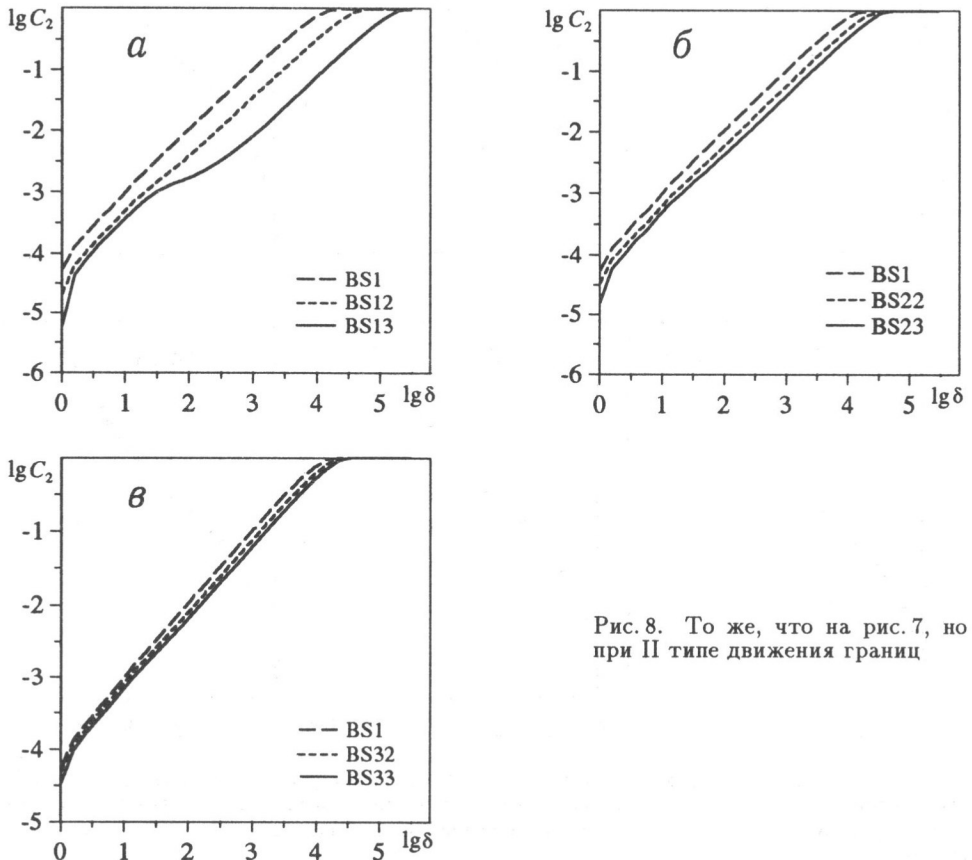


Рис. 8. То же, что на рис. 7, но при II типе движения границ

Поведение функции  $C_0(\delta)$  при движении I и II типа показано на рис. 9 и 10, в отличие от рис. 7 и 8 здесь  $\delta$  измеряется в единицах безразмерного времени. Для I типа движения картина поведения  $C_0(\delta)$  аналогична для всех рассматриваемых структур. Поскольку величины  $d(0)$  (табл. 3) значимо меньше 1 и существенно отличаются от 0, то можно говорить о фрактальном характере и самоподобии распределения "дырок" в последовательности моментов событий искусственных каталогов землетрясений, полученных для I типа движения. Соответствующие величины  $d(0)$  (табл. 3) практически не изменяются (их изменения остаются в пределах ошибки вычислений) ни в зависимости от группы, ни в зависимости от уровня дробления.

Для II типа движения поведение  $G(\beta)$  и, соответственно,  $C_0(\delta)$  различно для трех характерных интервалов значений  $\beta = \lg \delta$ , причем длительность первого и третьего интервалов невелика и не позволяет надежно определить величину  $d(0)$ . Что же касается второго (промежуточного) интервала, то величина  $d(0)$  для него близка к 0 (табл. 3), что и следовало ожидать, поскольку в случае II типа движения группировка отсутствует.

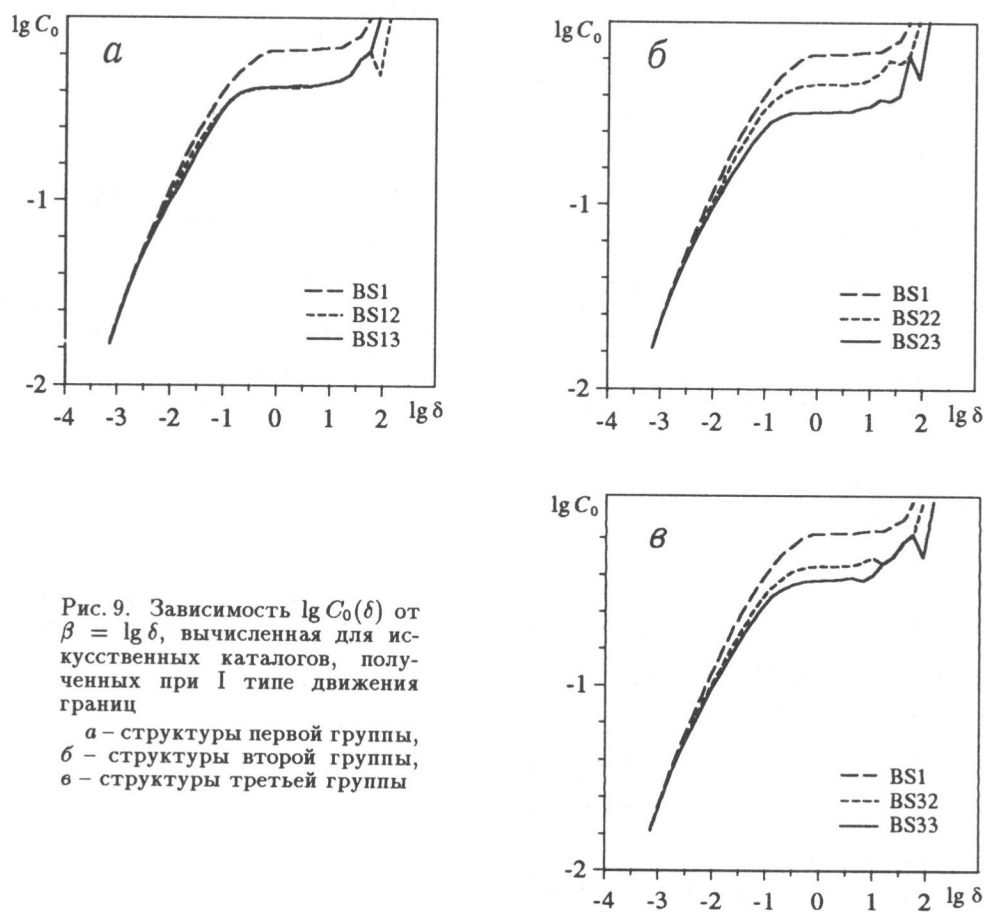


Рис. 9. Зависимость  $\lg C_0(\delta)$  от  $\beta = \lg \delta$ , вычисленная для искусственных каталогов, полученных при I типе движения границ

а - структуры первой группы,  
б - структуры второй группы,  
в - структуры третьей группы

ТАБЛИЦА 3. Величины  $d(0)$  в случае I и II типов движения границ структур

Группа структур	Структура	$d(0)$	
		при I типе движения	при II типе движения
Первая	BS1	$0.68 \pm 0.05$	$0.02 \pm 0.02$
	BS12	$0.64 \pm 0.06$	$0.02 \pm 0.02$
	BS13	$0.62 \pm 0.07$	$0.03 \pm 0.02$
Вторая	BS1	$0.68 \pm 0.05$	$0.02 \pm 0.02$
	BS22	$0.64 \pm 0.05$	$0.01 \pm 0.01$
	BS23	$0.60 \pm 0.07$	$0.02 \pm 0.01$
Третья	BS1	$0.68 \pm 0.05$	$0.02 \pm 0.02$
	BS32	$0.65 \pm 0.06$	$0.05 \pm 0.03$
	BS33	$0.62 \pm 0.07$	$0.03 \pm 0.01$

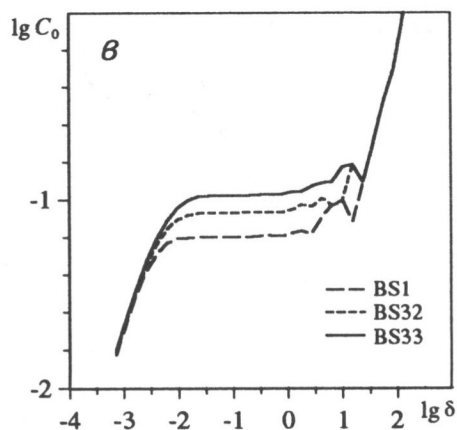
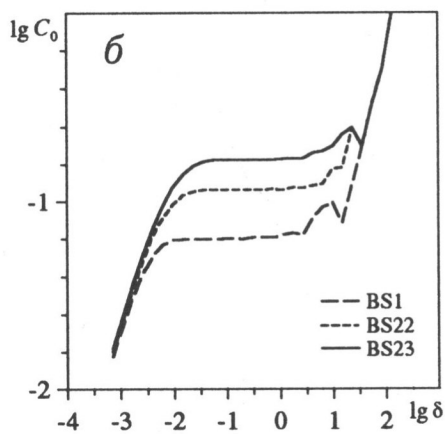
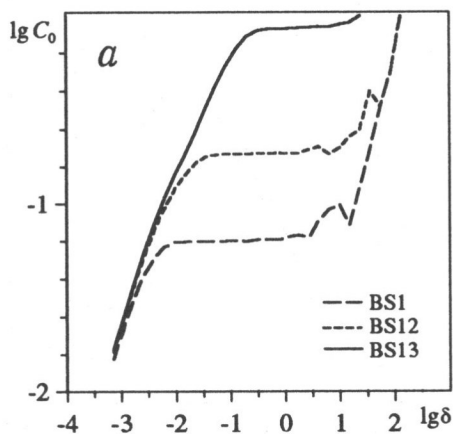


Рис. 10. То же, что на рис. 9, но при II типе движения границ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Искусственные каталоги землетрясений, полученные в результате численного моделирования динамики блоковых структур, могут обладать свойством группировки, которое отражается в значениях меры группировки (1).

2. Наличие или отсутствие группировки для рассмотренных структур, а также степень группировки определяются типом задаваемых движений границ, типом структуры и уровнем ее раздробленности, решающую роль при этом играют движения границ.

3. Результаты вычисления фрактальных размерностей  $d(2)$  и  $d(0)$  для рассмотренных структур показывают, что они практически не зависят от геометрии структуры, но определяются типом движения границ. Полученные значения  $d(2)$  и  $d(0)$  согласуются со значением меры группировки  $\varepsilon(1)$ , т.е. при отсутствии группировки, когда значение  $\varepsilon$  близко к 1,  $d(2)$  также близко к 1, а  $d(0)$  близко к 0.

Обнаруженные зависимости фрактальных свойств последовательности моментов событий искусственных каталогов от характера движения границ рассматриваемых блоковых структур ставят вопрос о поиске аналогов в реальной сейсмичности. Авторы планируют провести такой анализ в дальнейших исследованиях.

Авторы выражают благодарность М.Г. Шнирману и И.В. Заляпину за полезные советы и консультации при выполнении этих исследований, а также П.Н. Шербалину за предоставленные программы вычисления фрактальных размерностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 96-05-65710 и РФФИ 97-05-65802), Международного научно-технического центра (г.Москва, грант N 415-96), ИНТАС (грант INTAS 93-457, продолжение) и Национального фонда научных исследований США (грант EAR 94 23818).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M., Soloviev A.A.* Numerical modeling of block structure dynamics: dependence of a synthetic earthquake flow on the structure separateness and boundary movements // *J. of Seismol.* 1997. Vol.1, N 2. P.151-160.
2. *Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Rotwain I.M.* Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes // *Nature.* 1980. Vol.283. P.258-263.
3. *Дзиевонский А.М., Прозоров А.Г.* Автомодельное определение группирования землетрясений // *Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных.* (Вычисл. сейсмология. Вып.16). М.: Наука, 1984. С.10-21.
4. *Молчан Г.М., Дмитриева О.Е.* Идентификация афтершоков: обзор и новые проблемы // *Современные методы интерпретации сейсмологических данных.* (Вычисл. сейсмология. Вып.24). М.: Наука, 1991. С.19-50.
5. *Соболев Г.А.* О связи между сильными землетрясениями Курило-Камчатской зоны // *Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Шикотанское землетрясение 4(5).10.1994 г. Экстренный выпуск, ноябрь 1994.* С.68-70.

6. *Kagan Y., Knopoff L.* Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1978. Vol.55. P.67-68.
7. *Габриэлов А.М., Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Интерпретация блоковой структуры региона посредством блоковой модели динамики литосферы // Математическое моделирование сеймотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. Вып. 1. М.: МИТП РАН, 1993. С.11-19.
8. *Гасилов В.Л., Прозоров А.Г., Соловьев А.А.* Локальное взаимодействие сейсмических событий искусственного каталога в модели динамики блоковой структуры // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. (Вычисл. сейсмология. Вып. 28). М.: Наука, 1996. С.110-130.
9. *Panza G.F., Soloviev A.A., Vorobieva I.A.* Numerical modelling of block-structure dynamics: application to the Vrancea region // *PAGEOPH.* 1997. Vol.149. P.313-336.
10. *Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M.* Diagnosis of time of increased probability of strong earthquakes in different regions of the world: algorithm CN // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1990. Vol.61. P.57-72.
11. *Gasilov V., Maksimov V., Kossobokov V., Prozorov A., Soloviev A.* Numerical simulation of block structure dynamics. II. Examples. Third workshop on non-linear dynamics and earthquake prediction 6-17 November 1995. H4.SMR/879-3. Trieste: ICTP. 1995. 48 p.
12. *Максимов В.И., Соловьев А.А.* Группирование землетрясений в блоковой модели динамики литосферы // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. (Вычисл. сейсмология. Вып. 28). М.: Наука, 1996. С.148-152.
13. *Bariere B., Turcotte D.L.* Seismicity and self-organized criticality // *Phys. Rev. E.* 1994. Vol.49, N 2. P.1151-1160.
14. *Kagan Y.Y., Jackson D.D.* Long-term earthquake clustering // *Geophys. J. Int.* 1991. Vol.104. P.117-133.
15. *Halsey T.C., Jensen M.H., Kadanoff L. et al.* Fractal measure and their singularities: The characterization of strange sets // *Phys. Rev. A.* 1986. Vol.33, N A2. P.1141-1151.
16. *Гейликман М.Б., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф.* Самоподобная иерархическая структура поля эпицентров землетрясений // Компьютерный анализ геофизических полей. (Вычисл. сейсмология. Вып. 23). М.: Наука, 1990. С.123-139.