

16. *Reasenberg P., Jones L.* Earthquake hazard after a mainshock in California // *Science*. 1989. Vol.243. P.1173-1176.
17. *Vere-Jones D., Davies R.* A statistical survey of earthquakes in the main seismic region of New Zeland. Part II. Time series analiesis // *New Zeland J. Geol. Geophys.* 1966. Vol.9. P.251-284.
18. *Kagan Y., Knopoff L.* Statistical search for non-random features of the seismicity of strong earthquakes // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1976. Vol.9. P.291-318.
19. *Kagan Y., Knopoff L.* Stochastic synthesis of earthquake catalogs // *J. Geophys. Res.* 1981. Vol.86. P.2853-2862.
20. *Дзиевонский А., Прозоров А.Г.* Автомодельное определение группирования землетрясений // *Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных*. М.: Наука. 1984. С.10-21. (Вычисл. сейсмология: Вып. 16).
21. *Прозоров А.Г., Шрейдер С.Ю.* Статистический анализ положительного влияния нормальных землетрясений Тянь-Шаня и Памиро-Алая // *Математические методы в сейсмологии и геодинамике*. М.: Наука. 1986. С.37-47. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).
22. *Vere-Jones D.* A branching model for crack propagation // *Pure and Applied Geophys.* 1975. Vol.114. P.711-726.
23. *Боровков А.А.* Теория вероятностей. М.: Наука. 1986. 470с.
24. *Молчан Г.М.* Оптимальные стратегии в прогнозе землетрясений // *Наст. сб.* С.3-19.
25. *Балакина Л.М.* Крупнейшие землетрясения 1952, 1958, 1969 гг. в литосфере южной половины Курильской островной дуги // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1989. N 2. С.3-16.
26. *Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol.82. P.2981-2987.

УДК 550.34.013

А.А.Любушин (мл)

МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В БЛОКОВОЙ СРЕДЕ

А.А.Lyubushin (jr)

THE MODEL OF SEISMICITY IN A BLOCK MEDIUM

The model of a shallow focus seismicity is suggested which is based on a view on the Earth crust as a hierarchical structure of blocks. Qualitatively the seismicity is represented as a result of dynamical balance between two processes oppositely directed in the hierarchy of block structure: the consolidation of small blocks into the big ones and the destruction (deconsolidation) of big blocks resulted from aftershocks. The model is represented by the system of simple dynamical equations with random parameters. The results of numerical experiments are presented.

Введение

В статье делается попытка построения количественной модели мелкофокусного сейсмического процесса, которая отражала бы как временные, так и пространственные аспекты поведения сейсмичности. В основу модели положены представления о земной коре, как об иерархической структуре блоков. Направление работ по исследованию сейсмического процесса как процесса диссипации тектонической энергии в блоковой среде было инициировано М.А.Садовским [1] и продолжено в работах М.А.Садовского, В.Ф. Писаренко и ряда других авторов [2,3] (подробную библиографию см. в [3]).

Данная статья является продолжением работы [4], в которой предложено моделировать сейсмический процесс траекторией специального вида системы простых уравнений со случайными параметрами. Ниже представлены реализация модели и результаты численных экспериментов.

Обзор работ по моделям сейсмичности занял бы слишком много места. Поэтому укажем лишь последние работы, в которых активно используются те же идеи, что и в настоящей статье – иерархическая структура и блоковость строения коры. В статье [5] предложена стохастическая модель сейсмичности, как случайного процесса дефектообразования, заданного на дереве. В работах [6,7] динамика коры моделируется процессом упругого взаимодействия с сухим трением большого числа одинаковых элементов, имеющих форму прямоугольника или диска.

Основные предположения

Представим некоторый сейсмоактивный регион, в котором проведено геоморфологическое районирование, т.е. выделены линеаменты и им приспаны ранги [8-10]. Будем придерживаться соглашения, что чем крупнее геоморфологический объект, тем меньший ранг он имеет, т.е. самым крупным линеаментам присвоим ранг 1, далее по степени развитости идут ранги 2,3,...,N. Иерархическая структура линеаментов порождает естественную иерархическую структуру блоков земной коры: весь рассматриваемый сейсмоактивный регион представим как блок ранга 1, который линеаментами ранга 1 разбивается на блоки ранга 2. те, в свою очередь, линеаментами 2-го ранга делятся на блоки ранга 3 и так далее. Величину N назовем *глубиной иерархии*, которая зависит от детальности морфоструктурного районирования (обычно $N=3\div 4$).

Каждому блоку помимо его ранга присвоим также его *идентифицирующий номер* i , при этом нумеровать блоки будем сверху вниз и слева направо. Единственным блоком ранга 1 является блок с номером 1. Блоки, имеющие ранг N и, следовательно, не имеющие дочерних блоков, назовем *терминальными*. Назовем дерево *регулярным*, если любой нетерминальный блок имеет одинаковое число дочерних блоков - это число назовем *коэффициентом ветвления* и обозначим n_b .

Сделаем некоторые замечания относительно используемой терминологии. Говоря о *консолидированном состоянии блока*, будем представлять качественно это состояние, как такое, при котором неоднородности геофизических характеристик внутри блока, обусловленные иерархично-блоковым строением, сведены до минимума. В консолидированном состоянии блок выступает как временная целостная единица, составляющие части которой "подогнаны" друг к другу наиболее компактным образом. Понятия консолидированности и деконсолидированности блоков в рамках предлагаемой модели являются *первичными* и пока еще не могут быть формализованы количественно.

Далее, говоря о том, что землетрясение произошло *в блоке*, будем иметь в виду, что произошла резкая подвижка по границе между какими-либо блоками, имеющими ранг на единицу больше, чем ранг рассматриваемого блока, и входящими в его состав. Таким образом, размер области подвижки, а, значит, и величина выделившейся энергии, находятся в соответствии с линейным размером блока, в котором произошло событие. Следовательно, для заданного блока величина энергии, выделившейся в результате события *в блоке*, лежит в некоторых пределах, определяемых характерным линейным размером блоков данного уровня иерархии. Пока блок консолидирован, в нем событий происходить не может, он может лишь участвовать в событиях "принадлежащих" какому-нибудь блоку высшего ранга, в состав которого входит данный блок.

Кроме того, употребляя термин *энергия запасается в блоке* i , будем иметь в виду, что происходит процесс накопления упругой энергии в максимально крупных составных частях рассматриваемого блока i , которые сами уже консолидированы из своих составных частей на более ранних этапах процесса диссипации, при их взаимных перемещениях.

По завершении консолидации блока i он будет обладать некоторой *внутренней энергией связи* между своими максимально крупными составными частями, уже предварительно консолидированными. Это есть энергия упругих деформаций, которая накопилась в максимально круп-

ных составных частях блока i к моменту завершения его консолидации и поэтому не успела диссипироваться в результате сейсмических подвижек.

Пусть имеется некоторый консолидированный блок i , имеющий ранг $r < N$. Тогда можно говорить об *иерархии уровней внутренней энергии* или *энергии связей* этого блока, поскольку каждая составная часть блока, имеющая ранг $p > r$, $p \leq N$, консолидирована из своих составных частей ранга $(p+1)$ и обладает внутренней энергией связей между этими частями ранга $(p+1)$.

Итак, консолидация есть процесс, направленный в иерархии блокового строения снизу вверх, от малых блоков к образованию более крупных, есть процесс более плотного "упаковывания" составных частей блока во время их взаимных подвижек. Каждая такая подвижка является шагом по пути к консолидации. Но в то же время каждая подвижка интерпретируется как землетрясение (главный толчок), сила которого соответствует линейным размерам или рангам перемещаемых блоков. Известно, что каждое землетрясение инициирует в окружающей среде процессы, приводящие к дальнейшему разрушению структуры этой среды, и которые выражаются в появлении афтершоков. Наиболее вероятная природа афтершоковых процессов - это разупрочняющее действие волны порового давления, распространяющейся по системе разломов от места главного толчка [11,12]. Постулируем в рамках этой модели, что каждый акт консолидации блока ранга r (консолидирующая подвижка между какими-либо уже консолидированными блоками ранга $(r+1)$, входящими в состав этого блока ранга r) инициирует афтершоковые процессы, которые разрушают, деконсолидируют все блоки рангов $(r+1), (r+2), \dots, N$, входящие в состав рассматриваемого блока ранга r . Следовательно, чтобы продолжить консолидацию блока ранга r , необходимо *вновь* консолидировать все блоки ранга $N, (N-1), \dots, (r+1)$, входящие в его состав.

Эти вышеперечисленные блоки назовем *подчиненным кластером* рассматриваемого блока ранга r . Таким образом, для терминальных блоков подчиненным кластером является пустое множество, а для блока 1 - все прочие блоки.

Итак, сейсмичность представляется как результат взаимодействия двух процессов - консолидации крупных блоков из составляющих их более мелких (направлен в иерархии снизу вверх) и деконсолидации, разрушения блоков афтершоковыми процессами, возникающими в результате сброса энергии (главного толчка) в каком-либо крупном блоке, в состав которого входят рассматриваемые менее крупные блоки (этот процесс направлен в иерархии в противоположном направлении, сверху вниз).

В процессе деконсолидации блоков подчиненного кластера происходит диссипация внутренней энергии связей на всех уровнях ее иерархии для блоков подчиненного кластера – это интерпретируется как последовательность афтершоков главного толчка – консолидирующей подвижки.

Количественная модель

Пусть i – номер какого-нибудь блока. Введем обозначения:

$r(i)$ – ранг блока i ;

$m(i)$ – число дочерних блоков блока i ;

$i_1, \dots, i_{m(i)}$ – номера дочерних блоков блока i ;

$J(i)$ – подчиненный кластер блока i ;

$K(i)$ – множество соседей блока i , под которым будем понимать блоки того же ранга что и блок i и принадлежащие одному и тому же блоку ранга $r(i)-1$.

Для каждого блока i введем следующие переменные и параметры:

u_i – корень квадратный из энергии, накопленной блоком i ;

Q_i – работа, потраченная на консолидацию блока;

u_i^* – корень квадратный из энергетической прочности блока i ;

Q_i^* – работа, которую необходимо потратить, чтобы консолидировать блок i ;

α_i – параметр интенсивности энергетической накачки блока i (см. дальше);

λ_i – флаг блока $i = \begin{cases} 1, & \text{если блок неконсолидирован;} \\ 0, & \text{если блок консолидирован.} \end{cases}$

К выбору корня квадратного из энергии, накопленной блоком, в качестве переменной блока приводят следующие механические аналогии: если представить блок как упругий элемент с жесткостью k , деформируемый с постоянной скоростью v , то его упругая энергия будет изменяться по закону:

$$\dot{E} = v\sqrt{2k} \sqrt{E} \quad \text{или} \quad \dot{u} = \alpha, \quad \text{где} \quad u = \sqrt{E}, \quad \alpha = v\sqrt{k/2},$$

где α – параметр, характеризующий интенсивность энергетической накачки блока.

Выпишем полную систему уравнений и условий, определяющих динамику модели:

$$\dot{u}_i = \begin{cases} \left\{ \alpha_i \lambda_i (1 - \text{sign}(\lambda_{i_1} + \dots + \lambda_{i_{m(i)}})), \right\} & \text{– для нетерминальных} \\ \text{sign}(0) = 0 & \text{блоков;} \\ \alpha_i \lambda_i & \text{– для терминальных блоков;} \end{cases} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_i = 2u_i \dot{u}_i. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если} \quad u_i \geq u_i^*, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{то} \quad u_i = 0, \lambda_j = 1, u_j = 0, Q_j = 0 \quad \forall j \in J(i). \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если} \quad Q_i \geq Q_i^*, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{то} \quad \lambda_i = 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

Опишем теперь подробнее смысл каждого из уравнений (1)–(6). Уравнение (1) для терминальных блоков означает, что в терминальном блоке i может начаться процесс накопления внутренней энергии связей между его составными частями (которые не вошли в иерархическую структуру в силу своей малости) лишь тогда, когда i -й блок еще не консолидирован ($\lambda_i = 1$).

Уравнение (1) для нетерминальных блоков означает, что в нетерминальном блоке i процесс накопления внутренней энергии связей между его составными частями (т.е. блоками $i_1, \dots, i_{m(i)}$) может начаться лишь тогда, когда сам i -й блок еще не консолидирован, а все составляющие его блоки ранга $(r(i)+1)$ уже завершили свою консолидацию:

$$\lambda_{i_1} + \lambda_{i_2} + \dots + \lambda_{i_{m(i)}} = 0.$$

Отметим, что это автоматически означает, что консолидированы все блоки j из подчиненного кластера $J(i)$.

Скорость прироста количества работы Q_i , потраченной на консолидацию блока i , описывается в виде тривиального балансового уравнения (2).

Накопление энергии связей между составляющими частями блока i происходит до тех пор, пока значение u_i не превысит порог u_i^* (условие (3)). При выполнении этого условия в i -м блоке происходит акт диссипации энергии, накопленной всеми блоками подчиненного кластера: сброс величины u_i до нуля, а для блоков j из подчиненного кластера $J(i)$ – деконсолидация ($\lambda_i := 1$), сброс величин u_j и работ консолидации Q_j до нуля (условие (4)). При этом выделяется энергия

$$u_i^2 + \sum_j u_j^2, \quad j \in J(i).$$

В данной модели количество энергии u_i^2 , накопленное как энергия связей между составными частями блока i и затем диссипированная в результате события (3), (4), интерпретируется как работа, потрачен-

ная на консолидацию i -го блока. Вот почему уравнение для Q_i записывается в форме (2). Заметим, что при выполнении условия (3) работа консолидации Q_i не сбрасывается, ее достигнутое значение сохраняется. Сброс работы консолидации, согласно (4), происходит лишь одновременно с деконсолидацией, в результате главного толчка в блоке высшего ранга, в подчиненный кластер которого входит блок i . Условием завершения консолидации i -го блока является (5). В этом случае флаг блока i устанавливается в нуль (условие (6)).

Для корневого блока положим $Q_1^* = +\infty$. Это условие обеспечивает стационарность процесса и не дает ему завершиться консолидацией 1-го блока (рис.1).

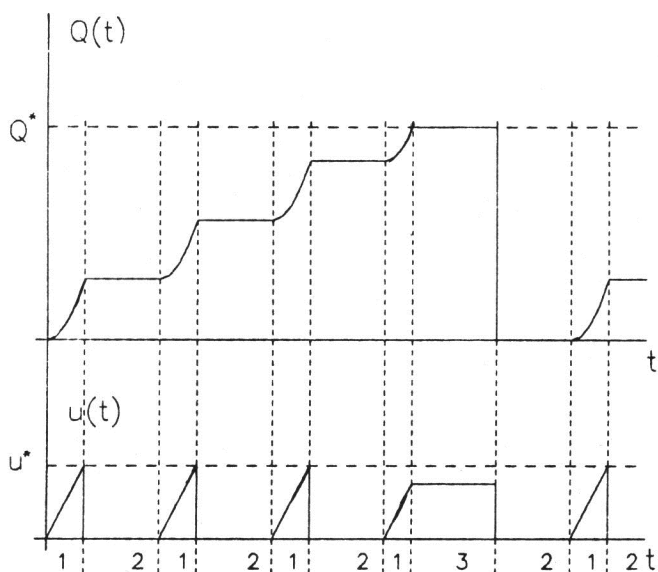
Теперь опишем процедуру выбора параметров $\{q_i, u_i, Q_i\}$.

Промежуток времени между началом накопления энергии связей в i -м блоке и достижением величиной u_i критического порога u_i^* равен

$$\Delta t = u_i^* / q_i \quad \text{или} \quad \lg(\Delta t) = 0,5 \lg(E_i^*) - \lg(q_i), \quad E_i^* = (u_i^*)^2. \quad (7)$$

В рамках рассматриваемой модели этот промежуток Δt интерпретируется как временной интервал подготовки землетрясения. Теперь сравним (7) с эмпирическими зависимостями для длительности ΔT "аномального" периода перед землетрясением от выделившейся энергии E :

$$\lg(\Delta T_{\text{лет}}) = \alpha \lg(E_{\text{Дж}}) - \gamma. \quad (8)$$



Р и с. 1. Условная диаграмма изменения во времени величин u и Q для какого-либо блока (цифрами помечены временные интервалы)

1 - блоки подчиненного кластера консолидированы, $\lambda_i = 1$; 2 - идет консолидация блоков подчиненного кластера, $\lambda_i = 1$; для терминальных блоков этот интервал отсутствует; 3 - блок консолидирован, $\lambda_i = 0$

Величины α и γ принимают следующие значения:

$$\alpha = \{0,49, 0,52, 0,45, 0,53, 0,50\},$$

$$\gamma = \{7,00, 6,96, 6,37, 7,10, 6,91\}.$$

Первая пара значений $\{\alpha, \gamma\}$ взята из [13], остальные - из [14-16]. Если каждую пару значений α, γ считать за результат независимого наблюдения, то их средние значения и дисперсии равны:

$$\alpha = 0,50, \sigma_\alpha = 0,03; \quad \gamma = 6,87, \sigma_\gamma = 0,26.$$

Анализ этих формул показывает, что те простые механические аналогии, которые были положены в основу выбора корня квадратного из накопленной блоками энергии, как основных переменных рассматриваемой модели, дают вполне удовлетворительное соответствие с эмпирическими формулами: отличие коэффициента α от 0,5 незначительно. Что же касается коэффициента γ , то разброс его значений больше. В связи с этим значения параметров q_i - интенсивностей энергетической накачки блоков для имитационных экспериментов - выбирались следующими:

$$q_i = 10^{(s+c\eta)} \frac{(\text{Дж})^{1/2}}{\text{ГОД}}, \quad (9)$$

где $s = \text{const} > 0$ - среднее значение логарифма скорости энергетической накачки блоков, $c = \text{const} > 0$ - параметр разброса значений логарифма скорости энергетической накачки, η - случайная величина, которая моделирует пространственную изменчивость параметров среды; за неимением лучшего выбора в расчетах бралась случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[-1, 1]$ (таким образом, $c = \sigma\sqrt{3}$, где σ - дисперсия).

Теперь определим параметры u_i^* и Q_i^* (напомним, что $Q_1^* = +\infty$). Для этого введем следующие величины:

C_{\max} - максимальное значение энергетического класса главных толчков на наивысшем (первом) уровне иерархии;

C_{\min} - минимальное значение энергетического класса главных толчков на наинижем (ранга N) уровне иерархии;

$\varepsilon = (C_{\max} - C_{\min})/N$ - длина интервала энергетических классов, приходящаяся на каждый уровень иерархии;

$$w_s(1) = (C_{\max} - \varepsilon/2)/2,$$

$$w_s(k) = w_s(k-1) - \varepsilon/2, \quad k \geq 2,$$

$$w_0(k) = \varepsilon/4 \quad \text{для всех } k=1, \dots, N.$$

Здесь $2w_s(k)$ - среднее значение энергетического класса событий на

k -м уровне иерархии, $2w_{\sigma}(k)$ - параметр разброса значений энергетического класса толчков на k -м уровне. В данной конкретной реализации модели значения $w_{\sigma}(k)$ являются равноотстоящими друг от друга, а $w_{\sigma}(k) = \text{const} = \varepsilon/4$.

Выбор параметров u_i^* осуществим согласно формуле

$$u_i^* = 10^{(w_{\sigma}(r(i)) + \eta w_{\sigma}(r(i)))} (\Delta_j)^{1/2} \quad (10)$$

(напомним, что $r(i)$ - ранг i -го блока), где η - случайная величина, равномерно распределенная на $[-1, 1]$. Значения Q_i^* определим формулой:

$$Q_i^* = \beta \cdot (u_i^*)^2, i \geq 2, \quad (11)$$

где $\beta = \text{const} > 1$ - параметр модели, имеющий смысл среднего значения количества толчков в блоках одного и того же ранга, необходимого для их консолидации.

Введем теперь в динамику модели дополнительный механизм, который назовем *сейсмической встряской*: если в блоке i выполнилось условие (3), то после операции сброса энергии (4) значения параметров $q_i, u_i^*, Q_i^*, \{q_j, u_j^*, Q_j^* \text{ для } j \in J(i)\}$ выбираются заново, в соответствии с (9)-(11), причем значения случайной величины η берутся для каждого параметра независимо. Сейсмическая встряска моделирует изменение параметров геофизической среды после главного толчка в области его афтершоков - в его подчиненном кластере.

Кроме того, введем также операцию *взаимодействия соседних блоков*. Именно, пусть в блоке i произошел главный толчок. Тогда, после сброса энергии подчиненного кластера и сейсмической встряски, произведем следующие изменения параметров блоков:

$$q_i = q_i - \Delta q, \quad q_j = q_j - \Delta q / l_i \text{ для } j \in L(i), \quad (12)$$

где $L(i) = \{j \mid j \in K(i), \lambda_j = 1\}$ - множество неконсолидированных соседних блоков i -го блока, l_i - число элементов множества $L(i)$.

Смысл операции (12) состоит в следующем. Главный толчок в блоке i снимает локальные напряжения в его окрестности и уменьшает энергетическую нагрузку на величину Δq . В то же время это приводит к увеличению нагрузки на соседние неконсолидированные блоки, причем уменьшение нагрузки на блок i компенсируется увеличением нагрузки на блоки $j \in L(i)$. Взаимодействия подобного рода (распределение нагрузки на соседние элементы после разрушения слабейшего), по всей видимости ответственны за явления уменьшения интервала между событиями в последовательности землетрясений внутри сейсмических циклов [15,16]. Параметр Δq выберем согласно формуле

$$\Delta q = 10^{-10} \cdot 10^{(s-\delta_s)} \quad (13)$$

где $\delta_s = \text{const} > 0$ - параметр модели.

Итак, полный набор параметров модели следующий:

$$\{s, c, C_{\max}, C_{\min}, \beta, \delta_s\}. \quad (14)$$

Результаты расчетов

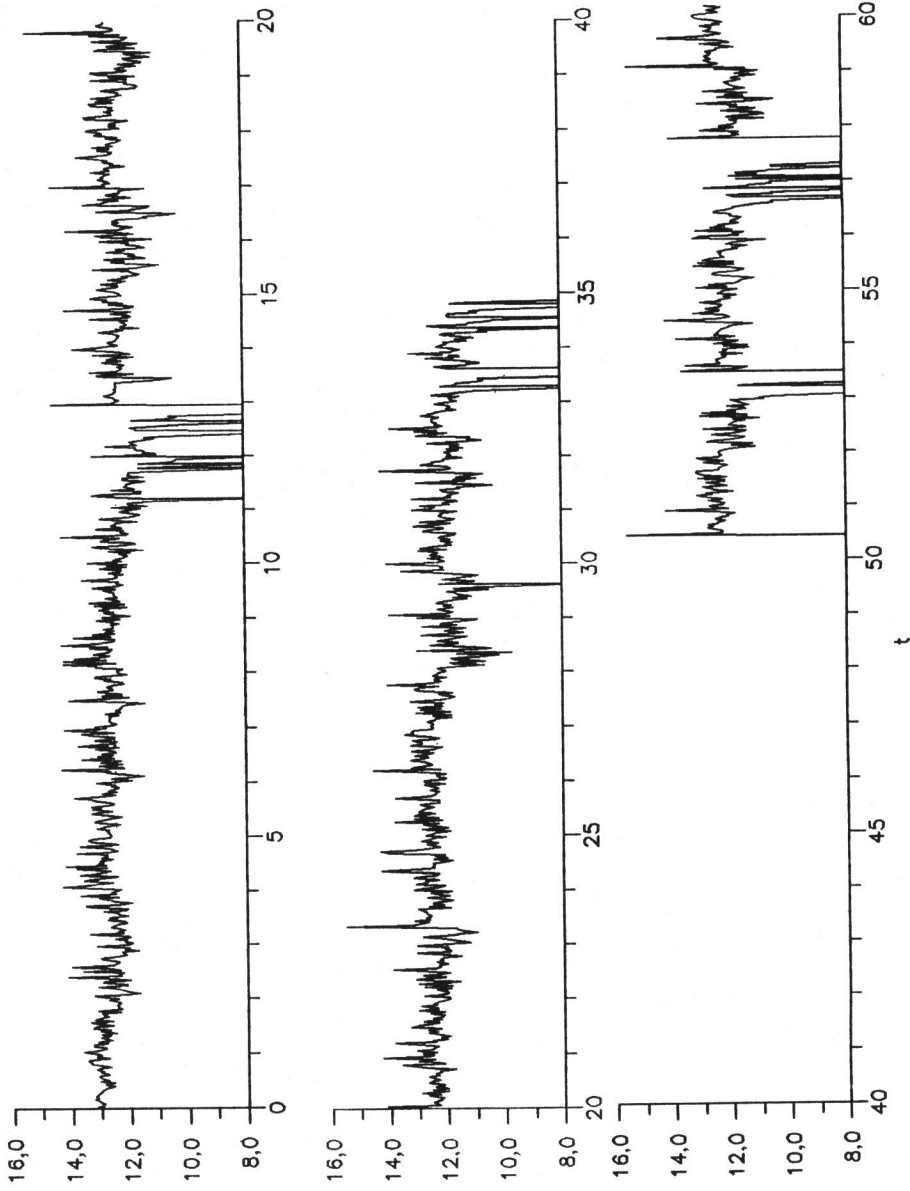
Расчеты производились для регулярных деревьев (рис.2). Для расчетов бралось регулярное дерево с коэффициентом ветвления $n_b=4$ и общим числом уровней иерархии $N=6$. Значения параметров (14) выбирались следующими: $s=6,8$; $c=0,5$; $C_{\max}=16,8$; $C_{\min}=9,3$; $\beta=2$; $\delta_s=0,1$.

Как видно из графиков выделения энергии, события, генерируемые моделью, имеют четкую тенденцию группироваться во времени, причем каждая группа начинается с интенсивного выброса, после чего следует некоторый интервал времени, заполненный постепенно затухающими событиями. Отметим, что рис. 2 представляет собой сумму выделений энергии со всех блоков модели, т.е. независимо от их "пространственного" расположения. Особенно наглядно эффект группирования виден на интервалах 10+15, 33+35 и 50+60. Интервал 35-50 заполнен "глобальным" сейсмическим затишьем, завершившимся сильным толчком.

Заметим, что в поведении модели наблюдается "закон повторяемости" в следующем виде: отношение числа событий на уровне ранга r к числу на уровне ранга $(r-1)$ есть величина не зависящая от r и равная приблизительно $\beta \cdot n_b$ для регулярных деревьев.

Поскольку иерархическая структура модели позволяет с легкостью сопоставить каждому блоку "географические" границы, то можно получить также пространственно-временную картину событий (которая будет зависеть от способа проектирования дерева на плоскость). Однако проиллюстрировать этот аспект поведения модели в статье не представляется возможным.

В заключение отметим следующее. Известно, что перед сильными землетрясениями наклон графика закона повторяемости имеет тенденцию уменьшаться, а после землетрясения восстанавливает свое нормальное значение [16]. Как показано в [17] с помощью численного моделирования, эта закономерность может быть объяснена уменьшением раздробленности вещества земной коры в области подготовки, т.е. консолидацией, и последующим увеличением раздробленности после события. Подобная картина совпадает с предлагаемым в данной модели качественным описанием сейсмичности.



Р и с. 2. График логарифма значений выделившейся энергии за последовательные временные промежутки длиной 0,027 (10 "дней") при шаге интегрирования системы 0,0054 (2 "дня")

Литература

1. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // ДАН СССР. 1979. Т.247, N 4. С.871.
2. Садовский А.М., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф., Шнирман М.Г. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. N 2. С.3-15.
3. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.:Наука, 1987.100с.
4. Любушин А.А.(мл.). Иерархическая модель сейсмического процесса // Изв.АН СССР. Физика Земли. 1987. N 11. С.43-52.
5. Шнирман М.Г.Динамическая иерархическая модель дефектообразования//Численное моделирование и анализ геофизических процессов. М.: Наука, 1987.С.87-95. (Вычисл. сейсмология; Вып.20).
6. Габриэлов А.М., Кейлис-Борок В.И., Левшина Т.А., Шапошников В.А. Блоковая модель динамики литосферы //Теория и анализ сейсмологической информации.М.:Наука, 1985. С.31-38. (Вычисл. сейсмология; Вып.18).
7. Писаренко В.Ф., Примаков И.М., Шнирман М.Г. Поведение деформируемого массива подвижных элементов //Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С.76-85.
8. Герасимов И.П. Опыт геоморфологической интерпретации общей схемы геологического строения СССР// Проблемы физической географии. М.:Л.: Изд-во АН СССР, 1946. Т.12. С.33-46.
9. Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран (Проблемы конструктивной географии). М.: Наука, 1979. 170с.
10. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я. и др. Прогнозирование мест землетрясений в районах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 176с.
11. Nur A., Booker J.R. Aftershocks caused by pore fluid flow ? // Science. 1972. Vol.175, N 4024. P.885-887.
12. Райс Дж. Механика очага землетрясений. М.: Мир, 1982. 217с.
13. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. М.:Наука, 1978. 232с.
14. Рикитакэ Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388с.
15. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264с.
16. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382с.
17. Huang J., Turcotte D.L. Fractal distribution of stress and strength and variations of b -value//Earth and Planet.Lett.1988. Vol.91, N 1/2. P.223-230.