

УДК 550.34

ЛОКАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ИСКУССТВЕННОГО КАТАЛОГА В МОДЕЛИ ДИНАМИКИ БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ

В.Л. Гасилов

*Институт математики и механики
Уральского отделения Российской академии наук*

А.Г. Прозоров, А.А. Соловьев

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

Анализируется искусственный каталог с использованием метода локальных статистик для оценки влияния сильных событий на интенсивность потока последующих землетрясений. Этот каталог получен в результате численного моделирования динамики блоковой структуры, состоящей из абсолютно жестких блоков, разделенных плоскими разломами пренебрежимо малой толщины. Блоки взаимодействуют друг с другом и с подстилающей средой и движутся вследствие заданного движения граничных блоков и подстилающей среды. Взаимодействие происходит в плоскостях разломов и подошвах блоков, разделяющих блоки и подстилающую среду, и является вязко-упругим. Зависимость плотности упругой силы от относительного смещения предполагается линейной. В случае, когда для какой-либо части разлома напряжение превосходит некоторый порог, возникает разрыв (сброс напряжения), что может вызвать разрывы в других местах. Последовательность таких разрывов рассматривается как землетрясение. Для искусственного каталога землетрясений посредством техники локальных статистик обнаружено статистически значимое увеличение интенсивности потока фоновых землетрясений в течение периода сразу после исходного события (положительное влияние) и уменьшение интенсивности в течение последующего периода (отрицательное влияние).

LOCAL INTERACTION OF SEISMIC EVENTS FROM A SYNTHETIC CATALOG: BLOCK STRUCTURE DYNAMICS

V.L. Gasilov

*Institute of Mathematics and Mechanics,
Ural Division, Russian Academy of Sciences*

A.G. Prozorov, and A.A. Soloviev

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

A synthetic catalog is analysed by using local statistics technique to estimate positive and negative influence of large events. The catalog is obtained by modelling of block structure dynamics. The structure consists of absolutely rigid blocks divided by infinitely thin plane

faults. The blocks interact between themselves and with the underlying medium, and move as a consequence of prescribed motion of boundary blocks and the underlying medium. The interaction is confined to the fault zones and the block bottoms separating the blocks and the underlying medium, and is viscoelastic. The dependence of elastic stress on relative displacement is assumed to be linear. When the stress surpasses a certain strength level for some part of a fault plane, a stress release ("a failure") occurs. It can cause failure for other parts of fault planes. Each sequence of such failures is considered an earthquake. The local statistics technique for the synthetic earthquake catalog reveals a positive influence of large events immediately after them and a negative influence during the subsequent period.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ

Основные принципы процедуры моделирования динамики блоковой структуры сформулированы в [1, 2], а ее подробное описание приведено в [3].

Исследования проведены методом локальных статистик искусственного каталога землетрясений, полученного при численном моделировании динамики блоковой структуры, грубо аппроксимирующей тектоническую структуру в регионе Вранча (Румыния).

Геометрия блоковой структуры

Рассматривается слой толщиной (глубиной) H между двумя горизонтальными плоскостями. Блоковая структура представляет собой ограниченную связанную часть этого слоя. Боковая граница этой структуры состоит из сегментов плоскостей, секущих слой. Структура делится на блоки также посредством плоскостей, секущих слой. Части этих плоскостей, находящиеся внутри блоковой структуры, а также боковые грани называются *разломами*. Линия пересечения плоскостей разломов называется *ребром*.

Геометрия блоковой структуры определяется путем задания линий пересечения разломов с верхней плоскостью (ниже эти линии также называются разломами) и углов наклона плоскостей разломов к верхней плоскости. При этом предполагается, что в одной точке верхней плоскости могут пересекаться не более двух разломов; точка пересечения двух разломов называется *вершиной*. Ребро, пересекаясь с нижней плоскостью, определяет положение вершины на ней. Часть разлома, заключенная между ребрами, соответствующими двум соседним вершинам на разломе, называется *сегментом*. Поскольку верхней и нижней границами сегмента являются линии пересечения плоскости разлома с параллельными плоскостями, то сегмент имеет форму трапеции. Части блоков (на которые разломы делят структуру), общие с верхней и нижней плоскостями, являются многоугольниками, нижнюю из этих частей будем называть *подошвой*.

Предполагается, что к структуре примыкают *границные блоки*. Граничному блоку ставится в соответствие непрерывная часть границы структуры, заключенная между некоторыми двумя ребрами.

Движение блоков

Предполагается, что блоки абсолютно жесткие и все их относительные смещения происходят в плоскостях разделяющих их разломов. В нижней плоскости, ограничивающей структуру, происходит взаимодействие блоков с подстилающей средой.

Движение границ блоковой структуры (граничных блоков) и подстилающей среды под блоками является внешним воздействием на структуру. Предполагается, что скорости этих движений лежат в горизонтальной плоскости и известны.

В модели используется безразмерное время. Поэтому все величины, в размерность которых должно входить время, считаются отнесенными к единице безразмерного времени и в их размерности отсутствует единица измерения времени. Например, скорости в модели измеряются в единицах длины, т.е. скорость 5 см означает 5 см в одну единицу безразмерного времени. При интерпретации результатов единице безразмерного времени присваивается выбранное реальное значение. Например, если одна единица безразмерного времени будет рассматриваться как 1 год, то заданная в модели скорость 5 см будет означать 5 см/год.

Смещения блоков в каждый момент времени определяются таким образом, что структура находится в квазистатическом равновесии. Все смещения предполагаются бесконечно малыми по сравнению с размерами блоков.

Взаимодействие блоков с подстилающей средой

Предполагается, что плотность упругой силы, вызванной относительным смещением блока и подстилающей среды, пропорциональна разности между вектором полного относительного смещения и вектором проскальзывания (неупругого смещения) в рассматриваемой точке подошвы блока. Плотность упругой силы $f^u = (f_x^u, f_y^u)$, действующей в точке (X, Y) в некоторый момент времени t , определяется из формул

$$\begin{aligned} f_x^u &= K_u(x - x_u - (Y - Y_c)(\varphi - \varphi_u) - x_a), \\ f_y^u &= K_u(y - y_u + (X - X_c)(\varphi - \varphi_u) - y_a). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь X_c, Y_c – координаты геометрического центра подошвы блока; (x_u, y_u) и φ_u – вектор сдвига подстилающей среды и угол ее поворота вокруг геометрического центра подошвы блока в момент t ; (x, y) и φ – вектор сдвига и угол поворота блока вокруг геометрического центра его подошвы в момент t ; (x_a, y_a) – вектор неупругого смещения в точке в момент t .

Компоненты вектора неупругого смещения в точке изменяются в соответствии с уравнениями

$$\frac{dx_a}{dt} = V_u f_x^u, \quad \frac{dy_a}{dt} = V_u f_y^u. \quad (2)$$

Коэффициенты K_u и V_u в (1) и (2) могут иметь различные значения для разных блоков.

Взаимодействие блоков в плоскостях разломов

Пусть разлом разделяет блоки с номерами i и j : i -й блок слева от разлома, j -й – справа. Компоненты относительного смещения блоков Δx и Δy в некоторой точке разлома в момент t определяются по формулам

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_i - x_j - (Y - Y_c^i)\varphi_i + (Y - Y_c^j)\varphi_j, \\ \Delta y &= y_i - y_j + (X - X_c^i)\varphi_i - (X - X_c^j)\varphi_j. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $X_c^i, Y_c^i, X_c^j, Y_c^j$ – координаты геометрических центров подошв блоков; (x_i, y_i) и (x_j, y_j) – векторы сдвигов блоков в момент t ; φ_i, φ_j – углы поворота блоков вокруг геометрических центров их подошв в момент t .

В соответствии с предположением, что относительные смещения блоков происходят только вдоль плоскостей разломов, эти смещения связаны с относительными горизонтальными смещениями блоков посредством формул

$$\begin{aligned} \Delta_t &= e_x \Delta x + e_y \Delta y, \\ \Delta_l &= \frac{\Delta_n}{\cos \alpha}, \quad \text{где } \Delta_n = e_x \Delta y - e_y \Delta x. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь Δ_t, Δ_l – смещения в точке вдоль плоскости разлома – параллельное (Δ_t) и перпендикулярное (Δ_l) линии пересечения плоскости разлома с верхней плоскостью; (e_x, e_y) – единичный вектор, направленный вдоль этой линии; α – угол наклона плоскости разлома; Δ_n – горизонтальное смещение, перпендикулярное линии пересечения плоскости разлома с верхней плоскостью.

Плотность упругой силы $f = (f_t, f_l)$, действующей в точке в плоскости разлома, определяется из соотношений

$$f_t = K(\Delta_t - \delta_t), \quad f_l = K(\Delta_l - \delta_l), \quad (5)$$

где δ_t, δ_l – неупругие смещения в точке вдоль плоскости разлома – параллельное (δ_t) и перпендикулярное (δ_l) линии пересечения плоскости разлома с верхней плоскостью в момент t .

Неупругие смещения в точке изменяются в соответствии с уравнениями

$$\frac{d\delta_t}{dt} = V f_t, \quad \frac{d\delta_l}{dt} = V f_l. \quad (6)$$

Коэффициенты K и V в (5) и (6) могут иметь различные значения для разных разломов.

Кроме упругой силы, на блоки действует также сила реакции, которая перпендикулярна плоскости разлома. Эта сила не совершает работу, поскольку все относительные движения параллельны плоскости разлома. Плотность упругой энергии в точке

$$e = (f_t(\Delta_t - \delta_t) + f_l(\Delta_l - \delta_l))/2. \quad (7)$$

Из (4) и (7) вытекает формула для горизонтальной компоненты f_n плотности упругой силы, перпендикулярной линии пересечения плоскости разлома с верхней плоскостью:

$$f_n = \frac{\partial e}{\partial \Delta_n} = \frac{f_l}{\cos \alpha}, \quad (8)$$

она подтверждает, что сила реакции перпендикулярна плоскости разлома.

Плотность силы реакции

$$p_0 = f_l \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

Формулы (3)–(9) верны и для разломов, ограничивающих структуру, когда один из блоков, разделяемых разломом, является граничным. Для таких блоков угол поворота задается относительно начала координат. В этом случае в (3) вместо координат геометрического центра подошвы граничного блока должны быть подставлены нули. Например, если блок номер j – граничный, то в (3) $X_c^j = Y_c^j = 0$.

Уравнения равновесия

Компоненты векторов сдвигов блоков и углы их поворота вокруг геометрических центров подошв определяются из условия, что сумма сил, действующих на каждый блок, и суммарный момент этих сил равны нулю. Это – условие квазистатического равновесия системы и одновременно условие минимума энергии.

В соответствии с формулами, приведенными выше, система уравнений, которая описывает равновесие, имеет следующий вид:

$$Az = \mathbf{b}, \quad (10)$$

где компонентами неизвестного вектора $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_{3n})$ являются компоненты векторов сдвигов блоков и углы их поворота вокруг геометрических центров подошв (n – число блоков), т.е. $z_{3m+1} = x_m$, $z_{3m+2} = y_m$, $z_{3m+3} = \varphi_m$ (m – номер блока, $m = 0, 1, \dots, n-1$).

Для каждого блока момент действующих сил определяется относительно геометрического центра его подошвы.

Дискретизация

Состояние блоковой структуры рассматривается в дискретные моменты времени $t_i = t_0 + i\Delta t$ ($i = 1, 2, \dots$), где t_0 – начальный момент, Δt – шаг дискретизации. Переход от состояния в момент t_i к состоянию в момент t_{i+1} моделируется следующим образом. Вначале из уравнений (2) и (6) вычисляются новые значения неупругих смещений $x_a, y_a, \delta_i, \delta_l$, затем – компоненты векторов сдвигов и углы поворота граничных блоков и подстилающей среды в момент t_{i+1} . После этого вычисляются компоненты вектора правых частей системы уравнений (10) и из нее определяются компоненты векторов сдвигов и углы поворота блоков структуры. Поскольку элементы матрицы A системы уравнений (10) не зависят от времени, то матрица A и соответствующая обратная матрица могут быть вычислены только один раз перед началом моделирования.

Пространственная дискретизация определяется параметром ε и выполняется для поверхностей сегментов разломов и подошв блоков. Дискретизация сегмента разлома производится следующим образом. Поскольку, как было отмечено выше, любой сегмент разлома является трапецией, обозначим соответственно через a, b и h оба ее основания и высоту ($h = H/\sin \alpha$, где H – толщина слоя, а α – угол наклона плоскости разлома). Обозначим также

$$n_1 = \text{ENTIRE}(h/\varepsilon) + 1, \quad n_2 = \text{ENTIRE}(\max(a, b)/\varepsilon) + 1.$$

Трапеция разделяется на $n_1 n_2$ малых трапеций путем проведения двух групп линий внутри нее: $(n_1 - 1)$ линий, параллельных основаниям трапеции, с интервалом h/n_1 и $(n_2 - 1)$ линий, соединяющих точки, равномерно расположенные на основаниях a и b с шагами a/n_2 и b/n_2 соответственно. Полученные малые трапеции

будем называть ячейками. Координаты любой точки ячейки считаются совпадающими с координатами X, Y центра средней линии ячейки. Значения неупругих смещений δ_i, δ_l предполагаются совпадающими для всех точек ячейки.

Подошва блока представляет собой многоугольник. Перед дискретизацией он делится на трапеции (треугольники) линиями, проходящими через его вершины и параллельными оси Y . Дискретизация полученных трапеций (треугольников) выполняется тем же путем, что и в случае сегментов разломов. Полученные малые трапеции (треугольники) также будем называть ячейками. Для всех точек ячейки значения координат X, Y и неупругих смещений x_a, y_a предполагаются одинаковыми.

Землетрясение и крип

Обозначим

$$k = \frac{\|(f_t, f_l)\|}{P - p_0}, \quad (11)$$

где (f_t, f_l) – вектор плотности упругой силы, определяемый из (5), $\|(f_t, f_l)\|$ – его модуль, P – разность между литостатическим и гидростатическим давлениями, которая имеет одну и ту же величину для всех разломов, p_0 – плотность силы реакции, определяемая из (9).

Для каждого разлома задаются величины следующих трех порогов:

$$B > H_f \leq H_s.$$

Начальные условия для моделирования динамики блоковой структуры задаются так, чтобы неравенство $k < B$ было выполнено для всех ячеек сегментов разломов. Если в некоторый момент t_i величина k в некоторой ячейке достигает порога B соответствующего разлома, то происходит срыв ("землетрясение"). Срыв означает проскальзывание, в течение которого неупругие смещения δ_t, δ_l в ячейке резко изменяются так, что величина k уменьшается до значения порога H_f .

Новые значения неупругих смещений вычисляются из формул

$$\delta_i^e = \delta_t + \gamma f_t, \quad \delta_l^e = \delta_l + \gamma f_l, \quad (12)$$

где $\delta_t, \delta_l, f_t, f_l$ – неупругие смещения и компоненты вектора плотности упругой силы перед срывом; коэффициент

$$\gamma = \left(1 - \frac{PH_f}{\sqrt{f_t^2 + f_l^2} + H_f f_l \operatorname{tg} \alpha} \right) \frac{1}{K}. \quad (13)$$

Из (5), (9), (11)–(13) следует, что сразу после срыва величина k равна порогу H_f .

После вычисления новых величин неупругих смещений ячеек, в которых произошли срывы, пересчитываются компоненты вектора \mathbf{b} и из системы уравнений (10) определяются векторы сдвига и углы поворота для блоков структуры. Если после этого для некоторой ячейки $k \geq B$, то приведенная выше процедура повторяется для этой ячейки (или ячеек). В противном случае землетрясение закончилось и состояние блоковой структуры в момент t_{i+1} определяется обычным способом.

Ячейки, в которых произошли срывы, считаются находящимися в состоянии крипа. Это означает, что для этих ячеек параметр V_s ($V_s \geq V$) используется вместо V в уравнениях (6), которые описывают изменение неупругого смещения. Значения V_s могут быть различны для различных разломов. Ячейка находится в состоянии крипа до тех пор, пока в ней $k > H_s$. Когда $k \leq H_s$, ячейка возвращается в обычное состояние и после этого параметр V используется в (6) для этой ячейки.

Параметры землетрясения определяются следующим образом: t_i – время; координаты и глубина – взвешенные суммы координат и глубин ячеек, в которых произошли срывы (вес ячейки – это ее площадь, деленная на сумму площадей ячеек); магнитуда вычисляется по формуле

$$M = D \lg S + E, \quad (14)$$

где D и E – эмпирические постоянные; S – сумма площадей ячеек, км^2 , в которых произошли срывы в течение этого землетрясения.

ОПИСАНИЕ РАССМАТРИВАЕМОЙ БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ

Рассматриваемая структура (рис. 1) состоит из трех блоков, конфигурация которых выбрана в соответствии с основными литосферными блоками региона Вранча: Восточно-Европейская плита (граничный блок), Мизийская плита, Черное море и Карпато-Паннонский регион. Однако в данной работе не ставилась задача сравнительного анализа реального каталога землетрясений региона Вранча с искусственным каталогом, полученным в модели. Анализировались только свойства искусственного каталога.

На рис. 1 в качестве начала координат выбрана точка с географическими координатами 44.2°N и 26.1°E , ось X направлена на восток, ось Y – на север. Глубина слоя (расстояние между верхней и нижней плоскостями) $H = 50$ км.

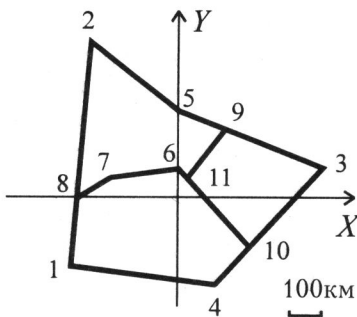


Рис. 1. Конфигурация рассматриваемой блоковой структуры
Цифры – номера вершин

Угловые вершины структуры (с номерами 1–7) имеют следующие координаты, км: $(-330; -210)$, $(-270; 480)$, $(450; 90)$, $(110; -270)$, $(0; 270)$, $(0; 90)$, $(-210; 60)$. Вершины, лежащие на внутренних частях разломов (с номерами 8–11), имеют следующие относительные положения на разломах, которым они принадлежат: 0.3; 0.33; 0.67; 0.87. (Относительное положение вершины – это отношение расстояния от начальной точки разлома до вершины к длине разлома.) Вершины 1, 5,

3 и 10 рассматриваются в качестве начальных точек разломов при определении относительных положений вершин 8–11. Структура содержит девять разломов (табл. 1, 2).

Движение подстилающей среды под блоками задано поступательным (вращение отсутствует), табл. 2 содержит компоненты V_x, V_y скорости этого движения. Отметим, что эти скорости и значения постоянных V, V_s и V_u приведены в табл. 1 и 2 с учетом того, что в процедуре моделирования используется безразмерное время.

ТАБЛИЦА 1. Значения постоянных для разломов

Номер разлома	Номера вершин	Угол наклона разлома, °	K , бар/см	V , см/бар	V_s , см/бар	B	H_f	H_s
1	1, 8, 2	45	0	0	0	0.1	0.085	0.07
2	2, 5	120	1	0.05	200	0.1	0.085	0.07
3	5, 9, 3	120	1	0.05	200	0.1	0.085	0.07
4	3, 10, 4	45	0	0	0	0.1	0.085	0.07
5	4, 1	45	0	0	0	0.1	0.085	0.07
6	10, 11, 6	100	1	0.05	200	0.1	0.085	0.07
7	6, 7	100	1	0.05	200	0.1	0.085	0.07
8	7, 8	100	1	0.05	200	0.1	0.085	0.07
9	11, 9	60	1	0.05	200	0.1	0.085	0.07

Движение границы структуры, состоящей из разломов 2 и 3, задано поступательным со скоростями $V_x = V_y = -16$ см (разлом 2) и $V_x = -10$ см, $V_y = -20$ см (разлом 3). Граничные разломы 1, 4 и 5 неподвижны. Отметим, что $K = 0$ для этих разломов (см. табл. 1) и, следовательно, в соответствии с формулами (5) и (8) все силы на них равны нулю.

ТАБЛИЦА 2. Значения постоянных для блоков

Номер блока	Номера вершин	K_u , бар/см	V_u , см/бар	V_x , см	V_y , см
1	2, 8, 7, 6, 11, 9, 5	1	0.05	20	10
2	3, 9, 11, 10	1	0.05	-20	10
3	4, 10, 11, 6, 7, 8, 1	1	0.05	-20	10

Разность между литостатическим и гидростатическим давлениями P в формуле (11) равна 2 кбар. Магнитуда землетрясения (14) вычисляется при следующих значениях постоянных:

$$D = 0.98, \quad E = 3.93, \quad (15)$$

которые были выбраны в соответствии с [4].

Параметры дискретизации имели следующие значения: $\Delta t = 0.001$, $\varepsilon = 7.5$ км.

ИСКУССТВЕННЫЙ КАТАЛОГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Искусственный каталог землетрясений был получен в результате моделирования с нулевыми начальными условиями в течение 150 единиц безразмерного времени.

Каталог содержит 62 427 событий со значениями магнитуды M от 5.25 до 7.40. Минимальная величина M соответствует минимальной площади одной ячейки в соответствии с (14) и (15). Кумулятивный график повторяемости представлен на рис. 2.

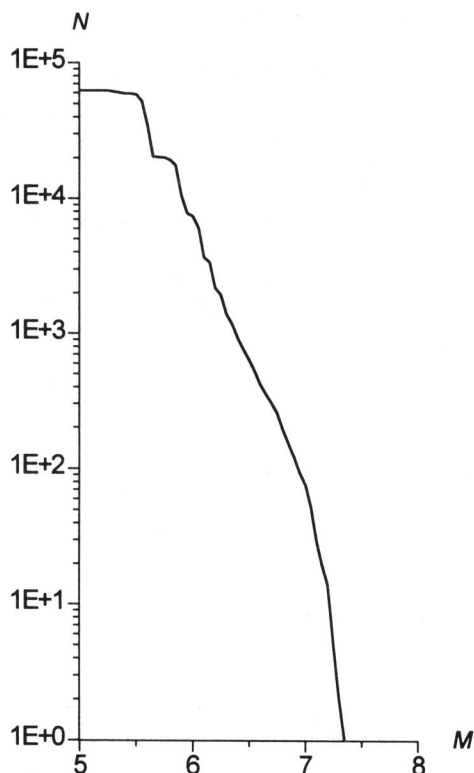


Рис. 2. Кумулятивный график повторяемости, построенный для искусственного каталога

M — магнитуда, N — число событий

Одна единица безразмерного времени интерпретируется как один год (365 дней). Начальное время — 0 ч 00 мин 1 января 1900 г. Соответственно дата первого события в каталоге — 16 августа 1904 г., дата последнего события — 24 ноября 2049 г.

Гистограмма числа событий для различных интервалов магнитуды длиной 0.2 за периоды в 5 лет, представленная на рис. 3, показывает, что ежегодное число событий устойчиво после 1 января 1910 г.

Для малых магнитуд число событий не убывает монотонно при увеличении магнитуды для отдельных ее интервалов. Это особенно заметно на рис. 4, где гистограмма построена для магнитудных интервалов меньшей длины (0,1), чем

Время, годы	Магнитуда												Сумма
	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	
1900-04	.	27	46	23	17	7	.	.	.	.	.	.	120
1905-09	74	673	530	275	84	10	8	.	.	.	.	.	1654
1910-14	74	809	666	459	154	36	11	.	.	.	.	.	2209
1915-19	80	771	648	411	182	41	14	3	1	.	.	.	2151
1920-24	81	836	706	450	190	45	16	9	4	3	.	.	2340
1925-29	80	846	717	455	186	52	14	5	2	2	.	.	2359
1930-34	68	796	660	428	168	51	22	6	3	3	.	.	2205
1935-39	56	830	659	471	179	38	17	10	2	2	.	.	2264
1940-44	63	778	683	464	170	52	20	5	6	1	3	1	2246
1945-49	64	796	640	393	159	40	7	6	2	1	2	.	2110
1950-54	48	761	686	393	213	56	17	11	9	3	2	.	2199
1955-59	41	770	655	389	177	34	9	2	6	2	1	.	2086
1960-64	43	758	649	419	180	50	11	4	8	10	1	.	2133
1965-69	58	713	635	383	175	56	14	5	4	3	1	.	2047
1970-74	79	719	669	398	175	42	22	14	12	3	.	.	2133
1975-79	59	763	649	425	165	42	19	11	3	.	.	.	2136
1980-84	75	739	635	417	204	58	35	18	3	.	.	.	2184
1985-89	62	746	688	401	183	39	17	7	2	.	.	.	2145
1990-94	71	827	700	398	203	55	18	21	4	.	.	.	2297
1995-99	70	738	686	369	201	45	17	6	1	.	.	.	2133
2000-04	71	801	696	464	197	61	29	15	2	.	.	.	2336
2005-09	67	738	668	400	166	44	15	11	1	.	.	.	2110
2010-14	84	750	644	439	207	53	33	16	3	.	.	.	2229
2015-19	66	700	627	395	187	48	15	3	2	3	1	.	2047
2020-24	71	750	623	400	173	73	18	7	5	6	2	.	2128
2025-29	45	701	636	414	169	43	31	10	8	3	.	.	2060
2030-34	55	695	669	434	166	42	16	5	7	2	.	.	2091
2035-39	59	697	641	403	228	52	12	14	8	4	.	.	2118
2040-44	73	715	671	362	154	42	17	6	4	3	.	.	2047
2045-49	62	717	651	409	185	42	22	5	6	11	.	.	2110
Сумма	1899	21960	19133	11941	5197	1349	516	235	118	65	13	1	

Рис. 3. Гистограмма зависимости числа событий искусственного каталога от магнитуды при $\Delta M = 0.2$, $\Delta t = 5$ лет

Последняя колонка – число событий за 5 лет, последняя строка – число событий в магнитудном интервале

на рис. 3. Кумулятивный график повторяемости (см. рис. 2) имеет ступенчатый характер. Из этого видно, что имеются наиболее типичные значения площади одной ячейки, суммы площадей двух, трех и более ячеек, которые соответствуют локальным максимумам функции зависимости числа событий от магнитуды.

Пространственное распределение числа событий показано на рис. 5, из сравнения которого с рис. 1 видно, что землетрясения произошли на разломах 2, 3, 7, 8, 9 и на сегменте между вершинами 11 и 6 разлома 6. Таким образом, события отсутствуют только на разломах, где силы равны нулю, и на сегменте между вершинами 10 и 11 разлома 6.

На рис. 6 показано пространственное распределение максимальной магнитуды событий искусственного каталога. Сильнейшие землетрясения произошли на сегменте между вершинами 9 и 3 разлома 3.

Время, годы	Магнитуда																			Сумма				
	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	7.0		7.1	7.2	7.3	7.4
1900-09	26	48	61	639	559	17	171	127	81	20	14	3	6	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1774
1910-19	62	92	128	1452	1260	54	580	290	263	73	48	29	15	10	1	2	1	.	.	.	.	.	.	4360
1920-29	68	93	161	1521	1354	69	610	295	278	98	52	45	15	15	8	6	1	5	5	.	.	.	.	4699
1930-39	54	70	154	1472	1263	56	600	299	248	99	55	34	21	18	7	9	3	2	3	2	.	.	.	4469
1940-49	54	73	134	1440	1268	55	576	281	255	74	58	34	17	10	7	4	6	2	3	2	5	.	.	4356
1950-59	40	49	149	1382	1271	70	505	277	287	103	63	27	14	12	5	8	11	4	5	2	1	.	.	4285
1960-69	61	40	127	1344	1211	73	522	280	258	97	71	36	10	15	4	5	7	5	8	5	2	.	.	4180
1970-79	66	72	136	1347	1228	90	536	287	254	86	62	22	27	14	10	15	10	5	3	.	.	.	.	4269
1980-89	76	61	141	1344	1258	65	508	310	277	110	60	37	30	22	16	9	2	3	.	.	.	.	.	4329
1990-99	66	75	172	1393	1285	101	499	288	280	124	63	37	19	16	19	8	4	1	.	.	.	.	.	4430
2000-09	71	67	140	1399	1290	74	568	296	256	107	56	49	26	18	10	16	3	.	.	.	.	.	.	4446
2010-19	73	77	139	1311	1195	76	544	290	281	113	69	32	27	21	12	7	5	.	.	1	2	1	.	4276
2020-29	63	53	143	1308	1194	65	543	271	239	103	84	32	29	20	8	9	5	8	6	3	2	.	.	4188
2030-39	54	60	119	1273	1258	52	519	318	280	114	70	24	19	9	5	14	10	5	5	1	.	.	.	4209
2040-49	62	73	122	1310	1258	64	508	263	248	91	56	28	27	12	5	6	6	4	14	.	.	.	.	4157
Сумма	896	1003	2025	19935	18152	981	7789	4152	3785	1412	881	468	302	214	117	118	74	44	50	15	12	1	1	1

Рис. 4. Гистограмма зависимости числа событий искусственного каталога от магнитуды при $\Delta M = 0.1$, $\Delta t = 10$ лет

Долгота, °	Широта, °																							
	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	
49.0	273	1736	525	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
48.5	.	360	2023	497	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
48.0	.	.	311	2459	656	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
47.5	.	.	.	459	3056	583	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
47.0	390	2874	575	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
46.5	511	2584	611	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
46.0	463	2291	387	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
45.5	290	2096	485	4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
45.0	1	483	1757	980	127	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
44.5	1	115	1007	1465	698	31	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	8	50	471	1728	1483	476	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	3	83	1077	279	410	1142	947	96	.	.	.	.	.	.	.
	5	634	711	97	83	88	431	766	214	34	.	.	.	.	.
	1	16	749	923	61	13	18	21	22	45	229	444	158	10	.
	26	553	695	889	830	581	8076	320	.	.	.	.	.	.	.
	108	620	481	126	79	15	1	369	.	.	.	.	.	.	.
	151	499	18	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	19	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Рис. 5. Пространственное распределение числа событий искусственного каталога

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОБЫТИЙ ИСКУССТВЕННОГО КАТАЛОГА

Локальные статистики

Идея о наличии взаимодействия сейсмических событий основана на предположении, что практически вся сейсмическая энергия выделяется через сильнейшие землетрясения в их непосредственной пространственно-временной окрестности, обозначенной афтершоковой активностью. Это значительно уменьшает вероятность сильного землетрясения в течение периода, когда вследствие непрерывного тектонического движения энергия накапливается до тех пор, пока она не станет близкой к критическому уровню. При достижении этого уровня происходит следующее сильное землетрясение.

Для исследования взаимного влияния землетрясений используется статистика \mathcal{L} , которая представляет собой вектор (τ, d) , где τ обозначает временной интервал между исходным событием и первым из последующих событий в каталоге землетрясений, а d – расстояние между этими событиями.

Оценка двумерных распределений статистики \mathcal{L} обычно обладает большой неопределенностью из-за малого объема выборки, поэтому эти распределения принято проецировать на одну из осей τ или d . Соответствующие одномерные статистики будем обозначать \mathcal{T} и \mathcal{D} . Отметим, что \mathcal{T} является статистикой временных промежутков между последовательными землетрясениями и в случае потока независимых событий с интенсивностью λ имеет экспоненциальную функцию распределения

$$P\{\tau \leq x\} = 1 - e^{-\lambda x}. \quad (16)$$

При использовании \mathcal{T} и \mathcal{D} для исследования каталога землетрясений целого региона трудно обнаружить взаимное влияние событий, поскольку оно слабо проявляется на случайном фоне удаленных друг от друга независимых землетрясений. Эта трудность может быть преодолена путем использования локальных статистик \mathcal{L}_{r_0} , \mathcal{T}_{r_0} и \mathcal{D}_{r_0} , главное преимущество которых по сравнению с \mathcal{L} , \mathcal{T} и \mathcal{D} – это оценка временных или пространственных интервалов между последовательными событиями не в целом регионе, где они, скорее всего, независимы, а внутри локальных окрестностей – кругов некоторого радиуса r_0 с центрами в эпицентрах исходных событий.

В настоящей работе для исследования пространственно-временного распределения землетрясений искусственного каталога применяется метод локальных статистик, предложенный в [5] и развитый в [6]. Локальные статистики ранее были использованы для оценки пространственно-временных параметров так называемого *положительного влияния* или увеличения интенсивности потока последующих событий в некоторой пространственно-временной окрестности исходного события. В [7] показано, что положительное влияние имеет свойство автономности в широком диапазоне магнитуд исходных событий. За пределами области положительного влияния по пространству и особенно по времени можно исследовать существование отрицательного влияния или уменьшения последующих сейсмических событий в окрестности исходного сильного события. В [8] обнаружено существование отрицательного влияния, которое в определенной степени автономно в некотором диапазоне магнитуд исходных сейсмических событий. Но его величина мень-

ше, чем величина положительного влияния, и статистическая значимость этого результата невысока.

Положительное или отрицательное влияние событий исследуемого каталога землетрясений выявляется путем сравнения распределений локальных статистик, полученных для этого каталога, с эталонными их распределениями в предположении нулевой гипотезы о полностью независимом потоке событий. В [8] получены формулы, которые могут быть использованы для вычисления оценок эталонных распределений. Однако эти вычисления трудоемки для больших каталогов землетрясений, и для получения оценок эталонных распределений использован метод Монте-Карло, т.е. такие оценки вычисляются путем осреднения распределений локальных статистик, полученных для набора случайных каталогов.

Случайный каталог строится из исходного каталога землетрясений в соответствии со следующим алгоритмом.

Пусть исходный каталог содержит N землетрясений $\{t_i, \mathbf{x}^i, M_i\}$, где t_i , \mathbf{x}^i и M_i соответственно – время, координаты и магнитуда i -го события, ($i = 1, 2, \dots, N$). Времена \hat{t}_i , координаты $\hat{\mathbf{x}}^i$ и магнитуды \hat{M}_i событий случайного каталога получаем следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{t}_1 &= t_1, \\ \hat{t}_i &= \hat{t}_{i-1} + \tau, \text{ если } i > 1, \\ \hat{\mathbf{x}}^i &= \mathbf{x}^j, \\ \hat{M}_i &= M_j. \end{aligned}$$

Здесь τ – случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону (16), где в качестве λ используется его оценка $\bar{\lambda} = N/T$ (T – длина периода, покрытого исходным каталогом); номер j равномерно разыгрывается среди $N - i + 1$ номеров событий исходного каталога, координаты и магнитуда которых не были использованы в первых $i - 1$ событиях случайного каталога.

Положительное и отрицательное влияние сильных событий искусственного каталога

В табл. 3 приведено распределение локальной статистики \mathcal{L}_{r_0} для исходных событий с $M \geq 7$, которые принадлежат временному отрезку искусственного каталога с 1950 по 1975 г. При этом учитывалось только первое последующее событие, которое произошло на расстоянии от исходного, не превосходящем $r_0 = 1000$ км.

Компоненты вектора (τ, d) локальной статистики \mathcal{L}_{r_0} для каждого исходного землетрясения искусственного каталога квантуются по времени (в логарифмическом масштабе) на 15 уровней и по пространству (в равномерном масштабе) на 5 уровней. В каждой клетке табл. 3 находится соответствующее число последующих событий. Правый столбец и нижняя строка представляют собой сумму всех столбцов и строк соответственно, т.е. одномерные статистики T_{r_0} и \mathcal{D}_{r_0} . Параллельно эта процедура продлевается с эталонным каталогом, построенным путем перемешивания искусственного каталога по указанному выше алгоритму. Разность этих двух распределений характеризует увеличение или уменьшение интенсивности последующих событий в той или иной пространственно-временной окрестности исходного события, т.е. положительное или отрицательное влияние

ТАБЛИЦА 3. Распределение локальной статистики для исходных событий с $M \geq 7$ с учетом только первого последующего события

Расстояние, км	Время, дни														Сумма (D_{r_0})	
	. . . . . 10	. . . . . 100	. . . . . 1000												
Фактическое распределение для искусственного каталога																
250	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
200	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
150	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
100	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
50	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	
Сумма (T_{r_0})	12	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	
Эталонное распределение																
250	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	2	7	
200	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
150	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	2	6	
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	3	
50	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	4	
Сумма (T_{r_0})	1	0	0	0	0	1	1	1	2	0	3	1	3	4	21	
Разность фактического и эталонного распределений																
250	0	0	0	0	1	-1	0	0	-1	0	-2	0	0	-2	-1	-6
200	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1	-1	-2	-5
100	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	2
50	7	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	-2	3
Сумма (T_{r_0})	11	0	1	0	2	-1	-1	-1	-2	0	-3	-1	-3	-4	-4	-6

исходного события в каталоге. Его статистическая значимость должна оцениваться по критериям математической статистики с использованием данных первых двух распределений.

Анализ данных табл. 3 приводит к следующим выводам.

1. Все сильные землетрясения сконцентрированы в пространственной области радиусом приблизительно 250 км (верхний предел рассмотренных расстояний 1000 км, но так как интервал 250-1000 км не содержит никаких событий, он в таблице не приводится). Эта особенность пространственного распределения сильнейших событий видна также и на рис. 6.

2. Фактическое распределение содержит на 11 событий (афтершоков) больше эталонного в течение 1 дня после возникновения исходного события и на 3 больше в следующие 9 дней. Это – проявление положительного влияния или увеличения интенсивности потока сейсмических событий после исходного, 250 км и 10 дней – параметры расстояния и длительности такого влияния. Отметим, что эталонное распределение содержит только одно событие в этом пространственно-временном диапазоне, что показывает возможный уровень случайных колебаний изучаемого параметра.

ТАБЛИЦА 4. Распределение локальной статистики для исходных событий с $M \geq 7$ и всех последующих с $M \geq 6$

Расстояние, км	Время, дни															\mathcal{D}_{T_0}
	Фактическое распределение для искусственного каталога															
1000	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	1	9	8	13	15	50
950	0	0	0	0	0	0	1	2	4	3	2	8	6	32	23	81
900	0	0	0	0	0	0	0	4	5	3	5	11	18	26	42	114
850	0	0	0	0	0	0	0	3	11	2	4	14	30	49	50	163
800	6	0	0	1	0	1	1	4	13	8	10	27	30	59	56	216
750	2	0	1	2	1	0	0	2	8	11	7	20	45	52	95	246
700	2	0	0	1	0	1	1	6	18	8	3	32	40	46	76	234
650	1	3	1	2	0	0	1	1	7	7	5	31	33	41	65	198
600	5	1	6	0	0	0	2	6	9	5	4	27	31	47	70	213
550	4	6	8	6	0	1	2	1	9	6	1	19	39	53	59	214
500	2	3	7	2	1	3	3	3	11	8	3	21	25	51	48	191
450	4	1	9	3	1	0	1	4	11	2	4	23	16	33	36	148
400	4	3	1	4	0	1	0	2	7	10	3	15	23	36	46	155
350	0	2	4	3	0	1	4	0	2	3	0	8	10	29	31	97
300	0	0	2	4	0	2	0	2	0	2	1	12	11	26	36	98
250	0	0	9	3	1	2	0	0	0	0	6	14	3	5	22	65
200	1	6	11	3	1	0	0	1	0	0	1	6	2	2	12	46
150	8	12	10	2	0	0	0	0	0	0	3	8	0	1	9	53
100	22	4	3	0	0	0	0	0	0	0	4	5	2	0	9	49
50	27	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	7	38
T_{T_0}	88	44	72	36	5	12	17	41	116	80	67	310	373	601	807	2669
	Эталонное распределение															
1000	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	2	3	14	17	19	59
950	0	0	0	0	0	1	2	1	2	8	5	5	21	23	40	108
900	0	0	0	3	0	1	0	3	1	8	4	15	17	26	40	118
850	0	0	0	1	1	0	1	5	4	4	9	20	19	46	58	168
800	3	1	0	0	0	0	1	7	3	6	9	22	33	48	82	215
750	2	0	0	1	1	0	1	7	10	9	13	25	30	66	94	259
700	0	0	1	2	1	2	2	3	4	8	18	23	41	45	92	242
650	0	1	1	2	1	1	0	2	7	9	9	20	36	38	100	227
600	0	0	1	0	2	0	3	6	7	5	16	25	33	60	99	257
550	0	0	1	2	0	1	3	4	9	4	12	29	32	40	82	219
500	1	0	0	0	1	3	0	3	10	8	17	15	36	43	65	202
450	0	0	1	0	2	0	0	1	3	2	10	10	26	34	56	145
400	0	0	0	0	0	1	0	5	3	2	12	16	13	40	54	146
350	0	0	0	1	0	0	1	2	4	2	4	13	22	29	42	120
300	1	0	0	0	1	0	0	3	2	3	8	19	13	28	59	137
250	2	0	0	1	0	2	0	0	3	7	6	14	15	18	46	114
200	0	0	0	0	1	0	0	3	0	4	6	15	14	18	55	116
150	1	0	0	0	1	0	2	0	2	4	3	9	14	33	46	115
100	0	0	0	1	2	1	2	3	3	1	6	10	15	26	56	126
50	0	0	0	0	0	0	1	4	2	3	10	6	17	23	55	121
T_{T_0}	10	2	5	15	14	14	19	62	79	99	179	314	461	701	1240	3214

ТАБЛИЦА 4 (окончание)

Расстояние, км	Время, дни															D_{T_0}
	10					100					1000					
Разность фактического и эталонного распределений																
1000	0	0	0	-1	0	-1	1	0	1	0	-1	6	-6	-4	-4	-9
950	0	0	0	0	0	-1	-1	1	2	-5	-3	3	-15	9	-17	-27
900	0	0	0	-3	0	-1	0	1	4	-5	1	-4	1	0	2	-4
850	0	0	0	-1	-1	0	-1	-2	7	-2	-5	-6	11	3	-8	-5
800	3	-1	0	1	0	1	0	-3	10	2	1	5	-3	11	-26	1
750	0	0	1	1	0	0	-1	-5	-2	2	-6	-5	15	-14	1	-13
700	2	0	-1	-1	-1	-1	-1	3	14	0	-15	9	-1	1	-16	-8
650	1	2	0	0	-1	-1	1	-1	0	-2	-4	11	-3	3	-35	-29
600	5	1	5	0	-2	0	-1	0	2	0	-12	2	-2	-13	-29	-44
550	4	6	7	4	0	0	-1	-3	0	2	-11	-10	7	13	-23	-5
500	1	3	7	2	0	0	3	0	1	0	-14	6	-11	8	-17	-11
450	4	1	8	3	-1	0	1	3	8	0	-6	13	-10	-1	-20	3
400	4	3	1	4	0	0	0	-3	4	8	-9	-1	10	-4	-8	9
350	0	2	4	2	0	1	3	-2	-2	1	-4	-5	-12	0	-11	-23
300	-1	0	2	4	-1	2	0	-1	-2	-1	-7	-7	-2	-2	-23	-39
250	-2	0	9	2	1	0	0	0	-3	-7	0	0	-12	-13	-24	-49
200	1	6	11	3	0	0	0	-2	0	-4	-5	-9	-12	-16	-43	-70
150	7	12	10	2	-1	0	-2	0	-2	-4	0	-1	-14	-32	-37	-62
100	22	4	3	-1	-2	-1	-2	-3	-3	-1	-2	-5	-13	-26	-47	-77
50	27	3	0	0	0	0	-1	-4	-2	-3	-10	-6	-16	-23	-48	-83
T_{T_0}	78	42	67	21	-9	-2	-2	-21	37	-19	-112	-4	-88	-100	-433	-545

3. Интервал отрицательного влияния исходного события на интенсивность потока последующих событий – от 10 до 1000 дней. Эталонное распределение содержит 20 событий в этом интервале, фактическое распределение – ни одного. Это может быть интерпретировано следующим образом: высвобождение энергии в результате землетрясения с $M \geq 7$ делает невозможным другое такое землетрясение в течение интервала, начинающегося через 10 дней и заканчивающегося через 1000 дней после исходного события.

Табл. 4 показывает влияние исходных землетрясений с магнитудой $M \geq 7$ на последующие события с $M \geq 6$. В этом случае положительное влияние прослеживается на большем расстоянии – до 800 км от эпицентра исходного события, но продолжительность его остается прежней – 10 дней. В табл. 4 были учтены все события с $M \geq 6$ после исходного, а не только первое событие (как в табл. 3). Поскольку магнитуда исходного события существенно превосходит магнитуды последующих, то не возникает проблемы, связанной с двойным учетом последующих событий.

Отрицательное влияние исходных событий здесь видно более отчетливо. Можно говорить о его статистической значимости, поскольку два числа 2669 и 3214, обозначающие общее число последовавших событий в фактическом и эталонном распределениях, очевидно, не могут быть реализациями одной пуассоновской случайной величины, так как их разность (545) значительно превосходит стандартное отклонение этой величины, равной квадратному корню из их суммы (77).

ТАБЛИЦА 5. Распределение локальной статистики для исходных событий с $M \geq 7$ и всех последующих без ограничения магнитуды

Расстояние, км	Время, дни															\mathcal{D}_{r_0}
	10					100					1000					
Фактическое распределение для искусственного каталога																
1000	3	1	0	0	0	1	4	2	23	11	32	49	75	151	199	551
950	4	4	3	1	2	2	5	8	24	25	52	71	116	178	280	775
900	2	0	2	2	1	1	5	15	24	33	81	102	152	331	419	1170
850	2	3	9	9	1	5	16	9	40	38	77	125	211	335	526	1406
800	9	1	5	2	3	2	10	18	50	41	99	144	211	361	554	1510
750	5	1	5	4	2	8	11	15	48	38	74	145	220	338	564	1478
700	8	2	3	7	1	6	17	21	58	56	63	176	235	349	517	1519
650	8	4	8	9	3	5	17	16	49	60	70	162	276	419	588	1694
600	11	3	8	9	5	8	24	36	48	66	74	189	246	417	637	1781
550	17	9	11	13	10	12	19	20	65	54	82	179	252	410	608	1761
500	10	6	8	12	6	11	17	26	52	73	68	166	212	388	615	1670
450	12	4	13	12	5	6	12	29	49	64	88	198	198	371	559	1620
400	17	6	8	12	11	14	20	39	64	89	98	251	327	593	868	2417
350	3	2	6	10	4	8	9	16	28	47	75	138	158	310	480	1294
300	0	0	6	8	3	9	9	15	25	42	42	128	124	235	343	989
250	0	0	11	6	1	5	6	8	15	29	47	110	81	151	246	716
200	1	6	11	3	3	5	6	3	14	10	34	76	33	70	158	433
150	8	12	10	2	2	3	3	0	4	9	31	75	23	40	133	355
100	22	4	3	0	0	0	4	0	3	4	36	91	26	20	118	331
50	27	3	0	0	0	0	4	0	2	0	10	64	21	2	91	224
T_{r_0}	169	71	130	121	63	111	218	296	685	789	1233	2639	3197	5469	8503	23694
Эталонное распределение																
1000	0	0	2	2	2	3	2	5	14	19	29	51	99	124	182	534
950	0	0	0	4	3	3	6	12	19	31	38	85	108	216	333	858
900	3	0	0	4	6	7	15	17	37	42	78	111	173	274	462	1229
850	5	0	2	3	6	7	10	23	40	44	69	166	203	333	502	1413
800	4	2	0	4	5	4	9	23	37	64	68	124	206	358	562	1470
750	4	1	0	8	9	2	11	21	39	51	87	146	210	349	581	1519
700	2	0	3	8	8	10	7	27	47	58	90	152	244	341	624	1621
650	5	3	6	4	11	5	11	24	40	55	103	172	239	388	629	1695
600	1	0	4	5	10	13	11	31	40	68	119	172	254	451	733	1912
550	1	1	3	4	2	14	18	31	47	65	99	184	274	422	731	1896
500	4	0	2	3	7	13	8	23	34	64	92	161	239	372	575	1597
450	3	1	2	3	8	4	19	24	36	61	83	171	231	405	625	1676
400	5	2	3	8	7	10	12	37	58	66	121	230	312	587	880	2338
350	2	0	0	2	9	9	15	23	36	36	66	117	219	309	504	1347
300	3	1	1	3	5	7	3	16	34	32	51	102	139	251	415	1063
250	3	1	0	2	4	7	8	7	16	27	29	79	111	195	298	787
200	0	0	0	1	3	1	3	9	9	17	33	70	98	129	248	621
150	3	1	1	1	2	2	2	11	12	22	16	53	65	121	190	502
100	1	0	0	2	2	2	7	13	8	8	20	46	51	87	192	439
50	0	0	0	1	0	1	2	6	4	8	24	17	39	67	137	306
T_{r_0}	49	13	29	72	109	124	179	383	607	838	1315	2409	3514	5779	9403	24823

ТАБЛИЦА 5 (окончание)

Расстояние, км	Время, дни															D_{T_0}
	. . . . .	10	. . . . .	100	. . . . .	1000										
Разность фактического и эталонного распределений																
1000	3	1	-2	-2	-2	-2	2	-3	9	-8	3	-2	-24	27	17	17
950	4	4	3	-3	-1	-1	-1	-4	5	-6	14	-14	8	-38	-53	-83
900	-1	0	2	-2	-5	-6	-10	-2	-13	-9	3	-9	-21	57	-43	-59
850	-3	3	7	6	-5	-2	6	-14	0	-6	8	-41	8	2	24	-7
800	5	-1	5	-2	-2	-2	1	-5	13	-23	31	20	5	3	-8	40
750	1	0	5	-4	-7	6	0	-6	9	-13	-13	-1	10	-11	-17	-41
700	6	2	0	-1	-7	-4	10	-6	11	-2	-27	24	-9	8	-107	-102
650	3	1	2	5	-8	0	6	-8	9	5	-33	-10	37	31	-41	-1
600	10	3	4	4	-5	-5	13	5	8	-2	-45	17	-8	-34	-96	-131
550	16	8	8	9	8	-2	1	-11	18	-11	-17	-5	-22	-12	-123	-135
500	6	6	6	9	-1	-2	9	3	18	9	-24	5	-27	16	40	73
450	9	3	11	8	-3	2	-7	5	13	3	5	27	-33	-34	-66	-56
400	12	4	5	4	4	4	8	2	6	23	-23	21	15	6	-12	79
350	1	2	6	8	-5	-1	-6	-7	-8	11	9	21	-61	1	-24	-53
300	-3	-1	5	5	-2	2	6	-1	-9	10	-9	26	-15	-16	-72	-74
250	-3	-1	11	4	-3	-2	-2	1	-1	2	18	31	-30	-44	-52	-71
200	1	6	11	2	0	4	3	-6	5	-7	1	6	-65	-58	-90	-188
150	5	11	9	1	0	1	1	-11	-8	-13	15	22	-42	-81	-57	-147
100	21	4	3	-2	-2	-2	-3	-13	-5	-4	16	45	-25	-67	-74	-108
50	27	3	0	-1	0	-1	2	-6	-2	-8	-14	47	-18	-65	-46	-82
T_{T_0}	120	58	101	49	-46	-13	39	-87	78	-49	-82	230	-317	-310	-900	-1129

В табл. 5 показана локальная статистика для исходных событий с $M \geq 7$ и последующих с меньшими магнитудами, покрывающими весь интервал $M \leq 7$. Уровень фона возрос в 7.7 раза по сравнению с предыдущим вариантом (табл. 4) (расчет выполнен на основе оценки эталонного распределения).

Положительное влияние или число афтершоков также возросло, но не в той пропорции, что фоновая сейсмичность, – всего в 1.58 раз, что означает его уменьшение относительно уровня фоновой сейсмичности почти в 5 (4.88) раз. Временной интервал афтершоковой активности остается тем же самым: от 0 до 10 дней после исходного события. Прослеживаемая область положительного влияния в пространстве по сравнению с табл. 4 слегка увеличивается до 1000 км (верхний предел таблицы). Эта величина близка к размеру всей структуры. Пространственное распределение интенсивности афтершоков остается почти постоянным до 600 км и начинает снижаться при больших расстояниях, что может быть связано с влиянием геометрического фактора – конечных размеров исследуемой структуры.

Отрицательное влияние после исходного события возрастает почти в 2 раза в абсолютном числе недобора сейсмических событий в течение интервала от 10 до 1000 дней: с -753 (табл. 4) до -1457 (табл. 5). Однако если принять во внимание возрастание уровня фоновой сейсмичности, то отрицательное влияние уменьшается относительно уровня фоновой сейсмичности в 4 раза, что несколько меньше отмеченного выше относительного уменьшения положительного влияния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженный в искусственном каталоге эффект локального (по пространству и времени) положительного и отрицательного влияния сильных землетрясений позволяет надеяться, что рассматриваемая модель может оказаться полезным инструментом для исследования механизмов этих явлений при изучении реальной сейсмичности. Предполагается применить моделирование для изучения сейсмичности региона Вранча. При этом в качестве первого этапа необходимо добиться соответствия искусственного потока землетрясений реальному, что может быть достигнуто путем вариации геометрии блоковой структуры, значений параметров и движений границ структуры и подстилающей среды.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (грант 008-94) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95-05-14826а).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Габриэлов А.М., Левшина Т.А., Ротвайн И.М.* Блоковая модель динамики литосферы и прогноз землетрясений // Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных. М.: Наука, 1989. С.46-55. (Вычисл. сейсмология; Вып.22).
2. *Gabrielov A.M., Levshina T.A., Rotwain I.M.* Block model of earthquake sequence // Phys. Earth Planet Inter. 1990. Vol. 61. P.18-28.
3. *Габриэлов А.М., Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Интерпретация блоковой структуры региона посредством блоковой модели динамики литосферы // Математическое моделирование сейсмических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. М.: МИТП РАН, 1993. С.11-19.
4. *Utsu T., Seki A.* A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock // J.Seism. Soc. Japan. 1954. Vol.7. P.233-240.
5. *Кейлис-Борок В.И., Подгаецкая В.М., Прозоров А.Г.* О локальных статистиках каталога землетрясений // Алгоритмы интерпретации сейсмических данных. М.: Наука, 1971. С.55-79. (Вычисл. сейсмология; Вып.5).
6. *Прозоров А.Г.* Характеристики группирования землетрясений мира // Прогноз землетрясений и изучение строения Земли. М.: Наука, 1983. С.18-26. (Вычисл. сейсмология; Вып.15).
7. *Дзиевонский А.М., Прозоров А.Г.* Автомодельное определение группирования землетрясений // Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных. М.: Наука, 1984. С.10-21. (Вычисл. сейсмология; Вып.16).
8. *Прозоров А.Г.* О пониженной вероятности сильных толчков в некоторой пространственно-временной окрестности сильных землетрясений мира // Вопросы прогноза землетрясений и строения Земли. М.: Наука, 1978. С.35-47. (Вычисл. сейсмология; Вып.11).