

УДК 550.34

УДАЛЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ИСКУССТВЕННЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В БЛОКОВОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ

И.А. Воробьева, А.А. Соловьев

Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

Блоковая модель динамики литосферы исследована с целью найти явление удаленного взаимодействия между искусственными землетрясениями. В модели рассматриваются абсолютно жесткие блоки, разделенные бесконечно тонкими плоскостями разломов. Взаимодействие блоков между собой в плоскостях разломов и с подстилающей средой является вязкоупругим. Векторы скоростей, определяющих движение границ структуры и подстилающей среды, являются входными параметрами модели. Когда на какой-либо части плоскости разлома отношение напряжения к давлению превосходит заданный порог, в соответствии с законами сухого трения происходит сброс напряжения (*разрыв*). Это может вызвать разрывы в других частях того же разлома или других разломов. Численные эксперименты с простой блоковой структурой дают аргументы в пользу того, что существует удаленное взаимодействие между искусственными землетрясениями. Такие аргументы получены путем статистического анализа искусственного каталога землетрясений. В то же время, увеличение порога прочности для отдельных разломов, позволяющее исключить возникновение на них землетрясений, существенно воздействует на поток землетрясений на других разломах. Это означает, что можно объяснить удаленное взаимодействие, обнаруженное в реальной сейсмичности, если считать литосферные блоки абсолютно жесткими по сравнению с разделяющими их зонами разломов и подстилающей средой.

LONG-RANGE INTERACTION BETWEEN SYNTHETIC EARTHQUAKES IN THE MODEL OF LITHOSPHERE BLOCK DYNAMICS

I.A. Vorobieva, A.A. Soloviev

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

The model of block structure dynamics is studied to find the phenomenon of long-range interaction between synthetic earthquakes. Perfectly rigid blocks separated by thin plane faults are considered in the model. The interaction of blocks along fault planes and with the underlying medium is viscoelastic. The velocity vectors prescribing the motion of structure boundaries and the medium underlying blocks are input model parameters. When the ratio of stress to pressure exceeds a certain strength level at some part of a fault plane a stress drop ("a failure") occurs in accordance with the laws of dry friction; it can cause failures in other parts of the same fault or within other faults. In the model, failures represent earthquakes, so a synthetic earthquake catalog is produced. Numerical experiments with a simple block structure favours the existence of long-range interaction between synthetic earthquakes. This conclusion follows from the statistical analysis of synthetic earthquake catalogs. Moreover, an increase of the strength level at a fault ruling out earthquakes that could otherwise occur there significantly affects earthquake flows on other faults. This means that the long-range interaction found in the observed seismicity could be explained by considering lithosphere blocks being perfectly rigid in comparison with fault zones and the underlying medium.

Введение

Изучение последовательностей моментов возникновения землетрясений приводит к заключению о существовании взаимодействия между ними. Впервые гипотеза о возможной взаимной зависимости землетрясений с магнитудой $M \geq 8$ была выдвинута Беньоффом [1]. Дуда [2] обнаружил, что это можно распространить на землетрясения с $M \geq 7$. В работе В.И. Кейлис-Борока и Л.Н. Малиновской [3] было обнаружено и исследовано явление аномального возрастания суммарной площади очагов фоновых землетрясений перед сильными землетрясениями. Это послужило основой для формулировки предвестника сильных землетрясений и в дальнейшем было использовано при разработке алгоритмов долгосрочного и среднесрочного прогноза землетрясений [4–9].

Удаленное взаимодействие между землетрясениями на расстояниях, значительно превышающих размеры их очагов, было обнаружено и исследовано А.Г. Прозоровым [10–13] для нескольких сейсмоактивных регионов.

Пресс и Аллен, используя опыт совместного с И.М. Гельфандом, В.И. Кейлис-Бороком и др. [14] исследования, применили методы распознавания образов к анализу каталога землетрясений Южной Калифорнии [15]. В результате были найдены признаки, характеризующие землетрясения системы разломов Сан-Андреас (СА-землетрясения) и не связанные с Сан-Андреасом землетрясения (НСА-землетрясения). Следующая гипотеза была предложена для объяснения полученных признаков: землетрясения Южной Калифорнии происходят внутри большой системы, включающей Большой Бассейн и Калифорнийский залив; периоды активности в этих соседних регионах предшествуют последующему увеличению интенсивности СА-землетрясений; при отсутствии активности в этих соседних регионах интенсивность СА-землетрясений уменьшается, а НСА-землетрясения происходят чаще. Взаимодействие землетрясений в этом случае происходит на расстояниях в несколько сотен километров.

Статистический анализ удаленного взаимодействия на основе каталогов наблюдаемых землетрясений затруднен короткой историей инструментальных наблюдений, покрывающей период не более 100 лет. Явления, обнаруженные в таком каталоге землетрясений, могут быть лишь видимостью и не повторяться в будущем. Искусственные каталоги землетрясений, полученные путем численного моделирования, могут покрывать длительные интервалы времени, что позволяет анализировать статистическую значимость рассматриваемого явления.

Блочные модели динамики литосферы [16–21], разработанные на основе подхода, предложенного В.И. Кейлис-Бороком и А.М. Габриэловым [22, 23], дают возможность моделировать динамику различных блоковых структур, задавая произвольные тектонические движения. Результатом моделирования являются искусственные каталоги землетрясений.

Сейсмически активный регион представляется в виде системы абсолютно жестких блоков, разделенных бесконечно тонкими плоскими разломами. Под блоками находится подстилающая среда. Блоки взаимодействуют между собой и с подстилающей средой. Поскольку блоки считаются абсолютно жесткими, то все деформации происходят в зонах разломов и на подошвах блоков, разделяющих блоки и подстилающую среду. Относительные смещения блоков происходят вдоль плоскостей разломов. Предположение об абсолютной жесткости блоков опирается на тот факт, что эффективные модули упругости существенно меньше у зон разломов, чем у литосферных блоков. Система блоков движется вследствие движения границ структуры и подстилающей среды. Скорости этих движений являются входными параметрами модели и не меняются в процессе численного моделирования. Движение блоков структуры определяется из условия, что в каждый момент времени система находится в состоянии квазистатического равновесия.

В “нормальном” состоянии, т.е. когда отношение напряжения к давлению не превосходит заданный порог, взаимодействие блоков вдоль плоскостей разломов является вязкоупругим. При достижении этого порога на какой-либо части плоскости разлома в соответствии с моделью сухого трения возникает сброс напряжения или *разрыв*. Локальный разрыв может вызвать

разрывы на других частях плоскостей разломов. Разрывы интерпретируются в модели как землетрясения. Сразу после разрывов и еще в течение некоторого времени соответствующие части плоскостей разломов находятся в состоянии крипа, после чего они возвращаются в нормальное состояние. Результатом численного моделирования является искусственный каталог землетрясений.

В работе рассмотрена простая структура, состоящая из четырех блоков. Статистическими методами было установлено существование удаленного взаимодействия между искусственными землетрясениями, происходящими на различных плоскостях разломов.

1. Описание модели

Численное моделирование было выполнено в соответствии с моделью динамики блоковых структур, которая подробно описана в [16, 17]. Методика моделирования основана на следующих предположениях.

Рассматриваемая блоковая структура представляет собой часть слоя толщины $H = 20$ км между двумя параллельными горизонтальными плоскостями. Боковые границы структуры и границы между блоками образованы плоскостями, секущими слой, которые будем называть плоскостями разломов. Структура состоит из четырех блоков, общие части которых с верхней плоскостью являются квадратами со стороной 50 км. Соответственно, общая часть всей структуры с верхней плоскостью является квадратом со стороной 100 км, она показана на рис. 1. Для всех плоскостей разломов угол их наклона к верхней плоскости составляет 85° .

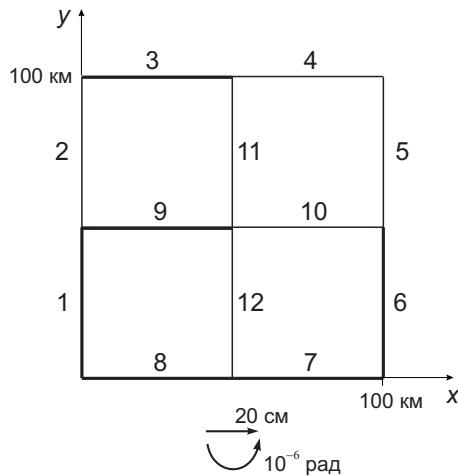


Рис. 1. Конфигурация (на верхней плоскости) разломов рассматриваемой структуры (цифры обозначают сегменты разломов) и заданное движение границы, состоящей из сегментов 7 и 8

Блоки считаются абсолютно жесткими. Предполагается, что в плоскостях разломов блоки взаимодействуют между собой и с границами структуры, а в нижней плоскости – с подстилающей средой. Это взаимодействие является вязкоупругим. Все деформации возникают только в плоскостях разломов и на подошвах блоков, которые отделяют их от подстилающей среды. Смещения блоков возникают вследствие заданных движений боковых границ структуры и подстилающей среды.

Величина плотности (на единицу площади) упругой силы в точке подошвы блока или плоскости разлома пропорциональна разности смещения блока относительно подстилающей среды или относительного смещения блоков в плоскости разделяющего их разлома и неупругого смещения в этой точке. Скорость роста неупругого смещения пропорциональна величине плотности упругой силы. Соответственно

$$\mathbf{f} = K(\Delta\mathbf{r} - \mathbf{d}), \quad \frac{d\mathbf{d}}{dt} = W\mathbf{f}, \quad (1)$$

где \mathbf{f} – вектор плотности упругой силы в рассматриваемой точке, принадлежащей нижней плоскости, или плоскости разлома; $\Delta\mathbf{r}$ – вектор смещения блока относительно подстилающей среды

в нижней плоскости, или вектор относительного смещения блоков в плоскости разделяющего их разлома; \mathbf{d} – вектор неупругого смещения и W – константа. Для всех подошв блоков и плоскостей разломов были заданы одинаковые значения постоянных в формуле (1): $K = 1$ бар см⁻¹, $W = 0,05$ см бар⁻¹. В модели и, следовательно, в формуле (1) используется безразмерное время. Этим определяется размерность постоянной W .

В каждый момент времени векторы сдвига и углы поворота блоков, которые определяют их горизонтальные смещения, вычисляются из условия равенства нулю суммы сил, действующих на каждый из блоков, и равенства нулю суммарного момента этих сил, т.е. из условия квазистатического равновесия структуры. Все смещения предполагаются бесконечно малыми по отношению к геометрическим размерам блоков, что позволяет не учитывать изменение геометрии структуры во время моделирования.

Для реализации численного моделирования выполнена пространственная дискретизация: поверхности (плоскости разломов и подошвы блоков), на которых действуют силы, разбиты на ячейки, имеющие форму трапеций, с линейными размерами, не превосходящими постоянную $\varepsilon = 5$ км. Предполагается, что вектор неупругого смещения \mathbf{d} , координаты X, Y горизонтальной системы координат и векторы плотности сил одинаковы во всех точках одной ячейки.

Обозначим через f и p , соответственно, величину действующей на единицу площади плоскости разлома упругой силы, вектор которой лежит в плоскости разлома, и величину силы реакции, нормальной к плоскости разлома. Введем отношение

$$\kappa = f/(P \pm p), \quad (2)$$

где постоянная $P = 2$ кбар имеет одно и то же значение для всех разломов и может быть интерпретирована, как разность между литостатическим и гидростатическим давлением в земной коре. Знаки плюс и минус в (2) относятся, соответственно, к растяжению и сжатию в направлении, перпендикулярном плоскости разлома. Для каждого разлома задаются значения трех порогов: $B > H_f > H_s$. Начальные значения смещений и поворотов блоков и неупругих смещений на разломах задаются таким образом, чтобы везде было выполнено соотношение $\kappa < B$. Если в какой-то момент времени на каком-либо разломе (в одной или нескольких ячейках) значение отношения κ достигает или превосходит значение порога B для соответствующего разлома, то возникает разрыв, что сводится к вычислению новых значений неупругих смещений так, чтобы для нового значения κ было справедливо равенство $\kappa = H_f$. Затем определяются новые положения блоков из условия квазистатического равновесия, что приводит к перераспределению напряжений в системе. Если затем значение κ превосходит порог B для какой-либо ячейки или ячеек, процесс пересчета неупругих смещений и определения новых положений блоков повторяется. Это интерпретируется как землетрясение.

Для всех разломов были заданы следующие значения порогов: $H_f = 0.085$, $H_s = 0.07$; значение порога B вначале задавалось равным 0.1, а затем изменялось в некоторых экспериментах, как будет описано ниже.

В качестве координат эпицентра и глубины очага землетрясения вычисляются взвешенные суммы координат и глубин ячеек, для которых значение κ превосходило порог B с весами, пропорциональными площадям ячеек. Магнитуа землетрясения M вычисляется по формуле:

$$M = 0.98 \lg S + 3.93, \quad (3)$$

где S – сумма площадей (в км²) ячеек, образующих землетрясение, а значения коэффициентов выбраны в соответствии с [24].

После землетрясения соответствующие ячейки разломов находятся в состоянии крипа. Это означает, что для них скорость роста неупругих смещений больше, чем в обычном состоянии при той же величине плотности упругой силы, т.е. в (1) вместо постоянной W используется постоянная W_s ($W_s > W$). Состояние крипа прекращается, когда наступает момент времени, в который $\kappa \leq H_s$. Для всех разломов задавалось $W_s = 1$ см бар⁻¹.

В модели были заданы следующие движения. Часть границы, состоящая из сегментов разломов 7 и 8 (см. рис. 1), двигается поступательно со скоростью $V_x = 20$ см и $V_y = -5$ см и вращается вокруг начала координат с угловой скоростью 10^{-6} рад (значения скоростей отнесены к одной единице безразмерного времени). Отметим, что это движение эквивалентно поступательному движению со скоростью $V_x = 20$ см и $V_y = 0$ и вращению вокруг точки с координатами $X = 50$ км, $Y = 0$ с той же самой угловой скоростью (как показано на рис. 1). Остальные части границы и подстилающая среда под всеми блоками неподвижны.

Искусственные каталоги землетрясений были получены в результате численного моделирования с нулевыми начальными условиями (нулевые смещения граничных блоков и подстилающей среды и нулевые значения неупругих смещений во всех ячейках). Моделирование выполнено на интервале 2000 единиц безразмерного времени с шагом дискретизации по времени $\Delta t = 0.01$.

2. Анализ удаленного взаимодействия

Пусть рассматриваются два покрывающих один и тот же период времени каталога землетрясений C_1 и C_2 , относительно которых ставится вопрос: *происходили ли землетрясения с магнитудой $M \geq M_2$ из C_2 чаще в периоды времени после землетрясений с $M \geq M_1$ из C_1 , чем в другие периоды времени.* Для ответа на этот вопрос выполняется следующий анализ.

Пусть k – число землетрясений с $M \geq M_1$ в каталоге C_1 и $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ – времена, когда они произошли. Рассмотрим интервал времени $\Delta\tau$ и вычислим число $m(\Delta\tau)$ землетрясений с $M \geq M_2$ из каталога C_2 , времена которых попадают в отрезки времени $[\tau_i, \tau_i + \Delta\tau]$, $i = 1, 2, \dots, k$. Поскольку эти отрезки могут перекрываться, то одно и то же землетрясение из C_2 может попасть сразу в несколько отрезков. При вычислении $m(\Delta\tau)$ такое землетрясение будет учитываться только один раз. Если $\eta(\Delta\tau) \geq \Delta\tau k$ – общая продолжительность периода времени, покрытого этими отрезками, то $\mu(\Delta\tau) = m(\Delta\tau)\Delta\tau/\eta(\Delta\tau)$ – среднее число землетрясений с $M \geq M_2$ из каталога C_2 , которые произошли в течение интервала времени $\Delta\tau$ после какого-либо землетрясения с $M \geq M_1$ из каталога C_1 , а $\lambda(\Delta\tau) = m(\Delta\tau)/\eta(\Delta\tau)$ – интенсивность потока таких землетрясений в течение этого периода. Рассматривая полный период времени, покрытый C_2 , вычисляем безусловную интенсивность Λ потока землетрясений с $M \geq M_2$ в этом каталоге и среднее число $M(\Delta\tau) = \Lambda\Delta\tau$ таких землетрясений, которые произошли за время $\Delta\tau$.

Если для некоторого $\Delta\tau$ величины $\mu(\Delta\tau)$ и $\lambda(\Delta\tau)$ значительно превосходят $M(\Delta\tau)$ и Λ , соответственно, то можно сказать, что землетрясения с $M \geq M_2$ из C_2 происходят чаще после землетрясений с $M \geq M_1$ из C_1 , чем обычно, и следовательно, существует взаимодействие между этими событиями. Если каталоги C_1 и C_2 относятся к различным зонам разломов, то это взаимодействие является удаленным взаимодействием землетрясений, происходящих в различных зонах разломов.

Для оценки статистической значимости того, что $\mu(\Delta\tau)$ превосходит $M(\Delta\tau)$, вводим случайную величину $\xi(\Delta\tau)$, которая является числом землетрясений с $M \geq M_2$ из C_2 , произошедших в течение произвольного отрезка времени $\Delta\tau$. $M(\Delta\tau)$ является оценкой математического ожидания $\xi(\Delta\tau)$. Обозначим через $Q(\Delta\tau)$ оценку среднеквадратичного отклонения $\xi(\Delta\tau)$. Если нет зависимости между землетрясениями с $M \geq M_1$ из C_1 и землетрясениями с $M \geq M_2$ из C_2 , то

$$\mu(\Delta\tau) \approx (\xi_1(\Delta\tau) + \xi_2(\Delta\tau) + \dots + \xi_p(\Delta\tau))/p,$$

где $\xi_i(\Delta\tau)$ ($i = 1, 2, \dots, p$) – случайные величины с тем же распределением, что и $\xi(\Delta\tau)$, $p = \text{ENTIRE}(\eta(\Delta\tau)/\Delta\tau)$. За оценку среднеквадратичного отклонения $q(\Delta\tau)$ случайной величины $\mu(\Delta\tau)$ принимаем

$$q(\Delta\tau) = Q(\Delta\tau)/\sqrt{P}.$$

Значение $q(\Delta\tau)$ используется в качестве меры отклонения $\mu(\Delta\tau)$ от $M(\Delta\tau)$. Если $\mu(\Delta\tau) - M(\Delta\tau) > 3q(\Delta\tau)$, то можно говорить о статистической значимости того, что $\mu(\Delta\tau)$ превосходит $M(\Delta\tau)$.

Пусть при изучении удаленного взаимодействия искусственных событий, полученных в модели, было обнаружено, что землетрясения с $M \geq M_2$, произошедшие на разломе F_2 (каталог C_2), бывают чаще, чем обычно после землетрясений с $M \geq M_1$, происходящих на разломе F_1 (каталог C_1). Тогда в качестве дополнительного теста существования удаленного взаимодействия может быть выполнен следующий эксперимент. Повышаем порог B у разлома F_1 , чтобы на нем не возникало землетрясений (запираем разлом), и повторяем моделирование. Обозначим через C'_2 новый каталог землетрясений, произошедших на разломе F_2 . Если теперь с помощью процедуры, описанной выше, не будет получен результат, что землетрясения с $M \geq M_2$ из C'_2 происходят чаще, чем обычно после моментов, когда происходили землетрясения с $M \geq M_1$ из C_1 , то это означает, что возникновение землетрясений с $M \geq M_1$ на разломе F_1 влияет на моменты времени, когда происходят землетрясения с $M \geq M_2$ на разломе F_2 .

3. Результаты

В результате численного моделирования землетрясения возникают на шести сегментах разломов: 1, 3, 6–9 (эти сегменты помечены на рис. 1 жирными линиями).

Анализ землетрясений с $M \geq M_2 = 6.6$, которые произошли на разломе F_2 , содержащем сегменты 7 и 8, и землетрясений с $M \geq M_1 = 6.0$, которые произошли на сегменте 9 (F_1), показывает, что землетрясения на разломе F_2 (202 события на полном интервале моделирования) происходят чаще после землетрясений на разломе F_1 (138 событий на полном интервале моделирования), чем в среднем по полному интервалу моделирования. Графики функций $\mu(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau)$ и $M(\Delta\tau) + q(\Delta\tau)$ показаны на рис. 2, а. График функции $\lambda(\Delta\tau)$ приведен на рис. 2, б, соответствующее значение $\Lambda = 0.101$.

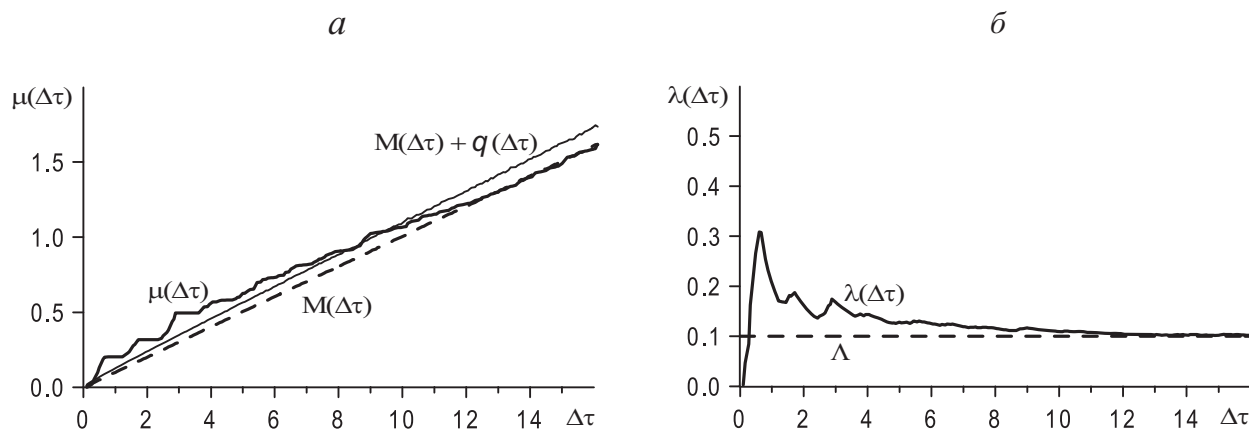


Рис. 2. Функции $\mu(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau) + q(\Delta\tau)$ (а) и $\lambda(\Delta\tau)$ (б), полученные, когда в качестве C_1 взят каталог сегмента 9 и $M_1 = 6.0$, а в качестве C_2 – каталог сегментов 7 и 8 и $M_2 = 6.6$

Видно, что на интервале $0.5 < \Delta\tau < 7.0$ разность между $\mu(\Delta\tau)$ и $M(\Delta\tau)$ ощутимо превосходит $q(\Delta\tau)$. Например, $\mu(3.0) = 0.495$, $M(3.0) = 0.303$ и $q(3.0) = 0.047$. Следовательно, разность $\mu(3.0) - M(3.0) = 0.192$ превосходит $q(3.0)$ более чем в 4 раза.

Возникает вопрос, не является ли обнаруженное явление отражением совместной группировки сильных землетрясений, происходящих на сегментах 7, 8 и 9. Для ответа на этот вопрос было проверено, происходят ли землетрясения с $M \geq 6.0$ на сегменте 9 чаще после землетрясений с $M \geq 6.6$ на сегментах 7 и 8, чем обычно, т.е. по сравнению с анализом, результаты которого приведены на рис. 2, мы поменяли местами последовательности моментов землетрясений на разломах F_1 и F_2 . Полученные функции $\mu(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau) + q(\Delta\tau)$, $\lambda(\Delta\tau)$ и значение $\Lambda = 0.069$ показаны на рис. 3. В этом случае на интервале $0.5 < \Delta\tau < 7.0$ функция $\mu(\Delta\tau)$ не только не превосходит $M(\Delta\tau)$, но даже меньше, чем функция $M(\Delta\tau) - q(\Delta\tau)$, кото-

рая также показана на рис.3. Например, $\mu(3.0) = 0.094$, $M(3.0) = 0.208$ и $q(3.0) = 0.033$, т.е. $M(3.0) - \mu(3.0) = 0.114$ превосходит $q(3.0)$ более чем в 3 раза. Это позволяет говорить даже о наличии “отрицательного” влияния, т.е. о том, что землетрясения с $M \geq 6.0$ на сегменте 9 происходят реже, чем обычно после землетрясений с $M \geq 6.6$ на сегментах 7 и 8.

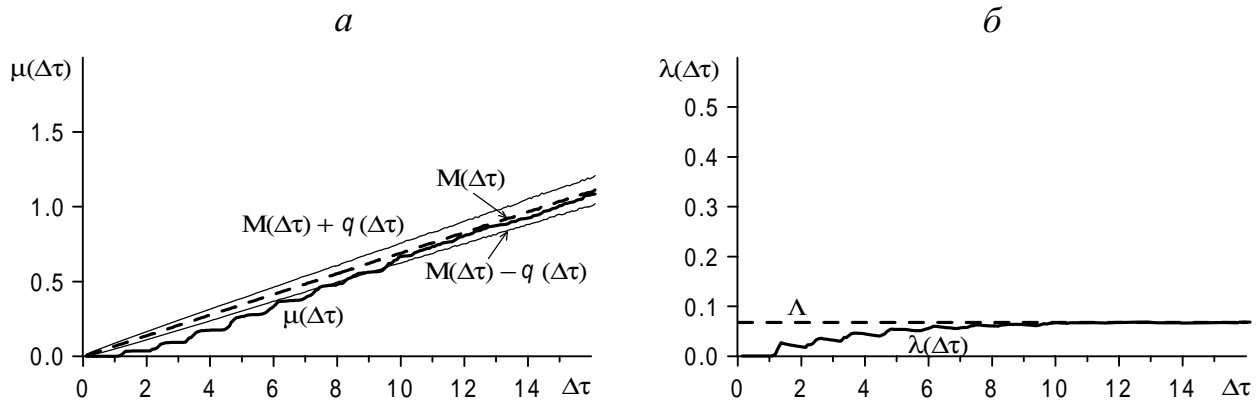


Рис. 3. Функции $\mu(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau) + q(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau) - q(\Delta\tau)$ (а) и $\lambda(\Delta\tau)$ (б), полученные, когда в качестве C_1 взят каталог сегментов 7 и 8 и $M_2 = 6.6$, а в качестве C_2 – каталог сегмента 9 и $M_1 = 6.0$.

Моделирование было повторено с увеличенным значением порога $B = 10$ для разлома, содержащего сегмент 9, т.е. этот разлом был заперт. Каталог землетрясений на сегментах 7 и 8, полученный в этом варианте моделирования (150 событий), анализировался как C_2 и сравнивался с каталогом C_1 землетрясений на сегменте 9, который был получен в исходном варианте моделирования, когда разлом, содержащий сегмент 9, не был заперт. Магнитудные пороги оставались теми же, что и ранее: $M_1 = 6.0$ и $M_2 = 6.6$. Полученные функции $\mu(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau) + q(\Delta\tau)$ и $\lambda(\Delta\tau)$, а также значение $\Lambda = 0.075$ показаны на рис.4. Видно, что $\mu(\Delta\tau)$ теперь не превосходит $M(\Delta\tau)$.

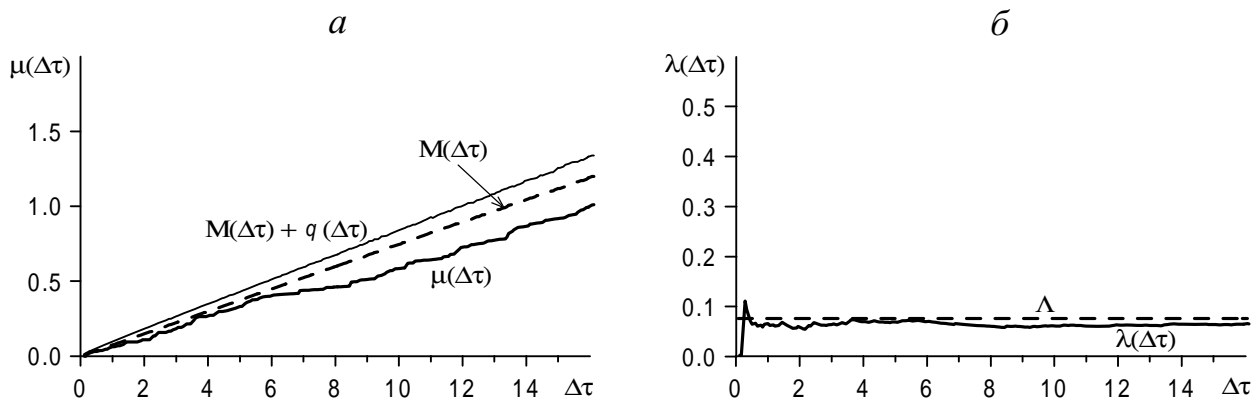


Рис. 4. Функции $\mu(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau) + q(\Delta\tau)$ (а) и $\lambda(\Delta\tau)$ (б), полученные, когда в качестве C_1 взят каталог незапертого сегмента 9 из исходного варианта, и $M_1 = 6.0$, а в качестве C_2 – каталог сегментов 7 и 8, полученный в результате моделирования при запертном сегменте 9, и $M_2 = 6.6$.

На рис. 5, а, б для исходного варианта моделирования с незапертым разломом, содержащим сегмент 9, показаны моменты землетрясений с $M \geq 6.0$ на сегменте 9 и землетрясений с $M \geq 6.6$ на сегментах 7 и 8. Моменты землетрясений с $M \geq 6.6$ на сегментах 7 и 8, полученных в варианте моделирования, когда сегмент 9 был заперт, показаны на рис. 5, в. Из сравнения рис. 5, б и 5, в видно, что в варианте, когда сегмент 9 заперт, моменты землетрясений с $M \geq 6.6$ на сегментах 7 и 8 меняются по сравнению с вариантом, когда сегмент 9 не заперт.

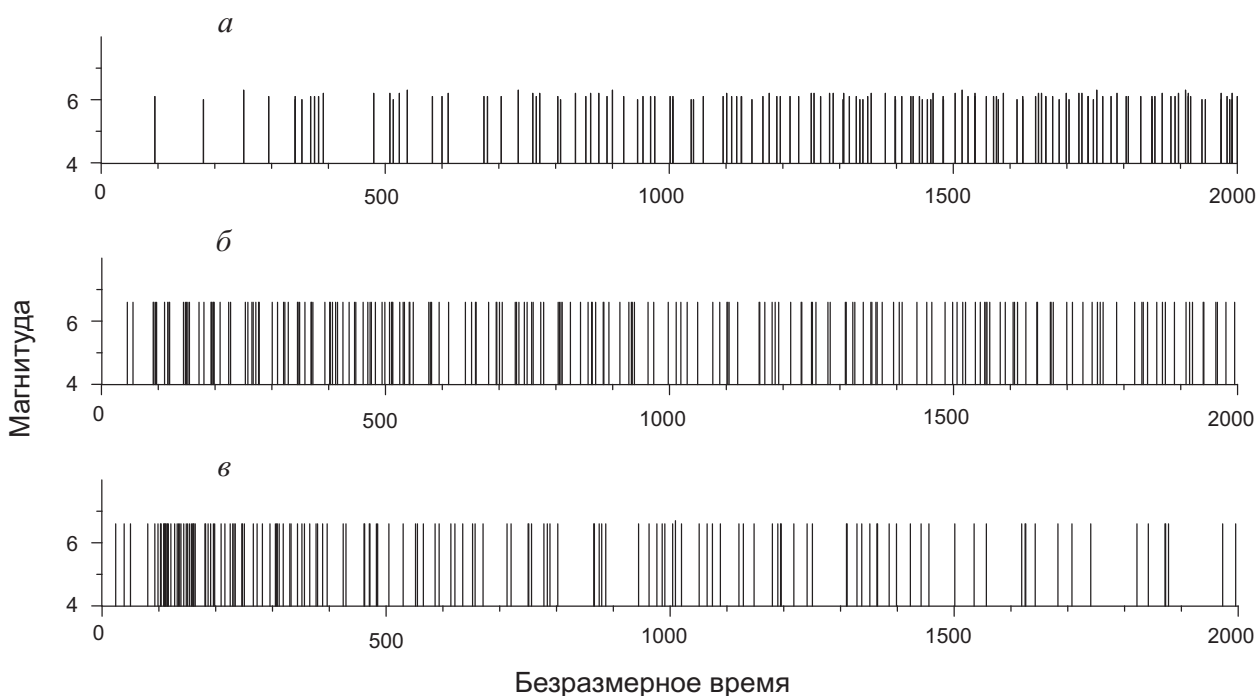


Рис. 5. Моменты сильнейших землетрясений на сегменте 9 (а) и на сегментах 7 и 8 при незапертом (б) и запертом (в) сегменте 9, высота вертикальной линии соответствует магнитуде землетрясения

Два рассмотренных разлома для анализируемой модели – наиболее очевидный пример удаленного взаимодействия между искусственными землетрясениями. Другой пример обнаружен при анализе каталогов искусственных землетрясений на сегменте 1 (в качестве C_1) и сегменте 6 (в качестве C_2) с пороговыми магнитудами $M_1 = 5.8$ (112 событий) и $M_2 = 5.5$ (144 события), соответственно. Полученные функции $\mu(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau) + q(\Delta\tau)$ и $\lambda(\Delta\tau)$ и значение $\Lambda = 0.073$ показаны на рис. 6.

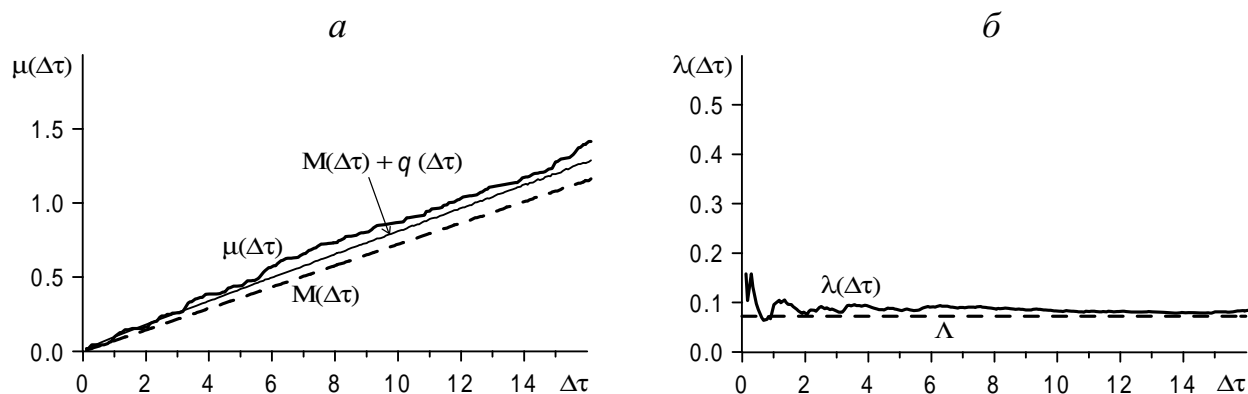


Рис. 6. Функции $\mu(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau)$, $M(\Delta\tau) + q(\Delta\tau)$ (а) и $\lambda(\Delta\tau)$ (б), полученные, когда в качестве C_1 взят каталог сегмента 1 и $M_1 = 5.8$, а в качестве C_2 – каталог сегмента 6 и $M_2 = 5.5$

Видно, что при $\Delta\tau \geq 3.5$ функция $\mu(\Delta\tau)$ превосходит $M(\Delta\tau)$. Например, $\mu(6.5) = 0.627$, $M(6.5) = 0.471$ и $q(6.5) = 0.068$, т.е. разность $\mu(6.5) - M(6.5) = 0.156$ превосходит $q(6.5)$ более чем в 2 раза.

Удаленное взаимодействие не наблюдается, когда анализируются другие пары разломов рассматриваемой структуры.

Заключение

Результаты, полученные для рассмотренной простой блоковой структуры, дают некоторые аргументы в пользу того, что удаленное взаимодействие между искусственными землетрясениями существует в модели динамики литосферных блоков. Его наличие или отсутствие зависит при заданных в модели движениях от взаимного расположения рассматриваемых разломов. В то же время, как показано в [25], следует относиться с определенной долей осторожности к результатам, полученным с помощью анализа, подобного приведенному выше. Поэтому предполагается выполнить дополнительное детальное исследование этого вопроса. В дальнейшем также планируется рассмотреть блоковые модели конкретных сейсмоактивных регионов, где удаленное взаимодействие между землетрясениями было обнаружено при анализе сейсмических наблюдений. Если искусственная сейсмичность, полученная в модели, будет адекватно отражать сейсмичность, наблюдаемую в регионе, то искусственный каталог землетрясений, покрывающий длительный период, может быть использован для изучения удаленного взаимодействия между реальными землетрясениями в этом регионе.

Авторы выражают благодарность В.М.Герцику и Г.М.Молчану за ряд полезных замечаний и предложений.

Работа выполнена при поддержке Национального научного фонда США (субконтракт с факультетом геологических наук Корнельского университета в рамках гранта EAR-9804859, который осуществляется через Фонд гражданских научных исследований США для независимых государств бывшего Советского Союза), Международного научно-технического центра (проект N 1293) и НАТО SfP 972266.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Benioff H.* Global strain accumulation and release as related by great earthquakes // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1951. Vol.62. P.331–338.
2. *Duda S.J.* Secular seismic energy release in the circum Pacific belt // *Tectonophysics.* 1965. Vol.2, N 5. P.409–452.
3. *Keilis-Borok V.I., Malinovskaya L.N.* On regularity in the occurrence of strong earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1964. Vol.69. P.3019–3024.
4. *Кейлис-Борок В.И., Кособокоев В.Г., Ротвайн И.М.* Алгоритмы долгосрочного прогноза // Долгосрочный прогноз землетрясений (методические указания) / Под ред. М.А. Садовского. М.: ИФЗ АН СССР, 1986. С.11–29.
5. *Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Kossobokov V., Rotwain I.M.* Intermediate-term prediction in advance of the Loma Prieta earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 1990. Vol.17, N9. P.1461–1464.
6. *Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Rotwain I.M., Allen C.R.* Intermediate-term prediction of times of occurrence of strong earthquakes in California and Nevada // *Nature.* 1988. Vol.335. P.690–694.
7. *Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Premonitory activation of earthquake flow: Algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol.61, N 1/2. P.73–83.
8. *Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Times of increased probability of strong earthquakes ($M=7.5$) diagnosed by algorithm M8 in Japan and adjacent territories // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol.95. P.12413–12422.
9. *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 Planet. Inter.* 1990. Vol.61, N 1/2. P.57–72.
10. *Prozorov A.G.* On the long range interaction among strong seismic events. Major Puzzling Problems or Paradoxes in Contemporary Geophysics: IUGG-U3 Abstracts. Vienna, 1991. P.29.
11. *Prozorov A.G.* Long range interaction of strong seismic events as a feature of intermittent character of plate dynamics. Spring Meeting, May 24–28, 1993. Baltimore: AGU. Mineral. Soc. Amer., Geochemical Society. 1993. P.318.
12. *Прозоров А.Г.* Алгоритм прогноза землетрясений для региона Памира и Тянь-Шаня по комбинации удаленных афтершоков и затиший // Компьютерный анализ геофизических полей. М.: Наука, 1990. С.75–84. (Вычисл. сейсмология; Вып.23).
13. *Прозоров А.Г.* Новый критерий проверки статистической значимости удаленного взаимодействия сильных землетрясений // Математическое моделирование сейсмотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. Вып.1. М.: МИТП РАН, 1993. С.69–73.

14. *Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Press F., Ranzman I.Ya., Rotwain I.M., Sadovsky A.M.* Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1976. Vol.11. P.227–283.
15. *Press F., Allen C.* Patterns of seismic release in the southern California region // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol.100, N B4. P.6421–6430.
16. *Габриэлов А.М., Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Интерпретация блоковой структуры региона посредством блоковой модели динамики литосферы // *Математическое моделирование сейсмотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений.* Вып.1. М.: МИТП РАН, 1993. С.11–19.
17. *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.* М.: Наука, 1996. С.110–130. (Вычисл. сейсмология; Вып.28).
18. *Gorshkov A.I., Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M., Soloviev A.A., Vorobieva I.A.* On dynamics of seismicity simulated by the models of block-and-faults systems // *Ann. di Geofis.* 1997. Vol.XL, N 5. P.1217–1232.
19. *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. Seismol.* 1997. Vol.1, N 2. P.151–160.
20. *Rundquist D.V., Soloviev A.A.* Numerical modeling of block structure dynamics: an arc subduction zone // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. Vol.111, N 3/4. P.241–252.
21. *Soloviev A.A., Vorobieva I.A., Panza G.F.* Modelling of block-structure dynamics: Parametric study for Vrancea // *Pure and Appl. Geophys.* 1999. Vol.156, N 3. P.395–420.
22. *Габриэлов А.М., Кейлис-Борок В.И., Левшина Т.А., Шапошников В.А.* Блоковая модель динамики литосферы // *Математические методы в сейсмологии и геодинамике.* М.: Наука, 1986. С.168–178. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).
23. *Gabrielov A.M., Levshina T.A., Rotwain I.M.* Block model of earthquake sequence // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol.61, N 1/2. P.18–28.
24. *Utsu T., Seki A.* A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock // *J. Seismol. Soc. Japan.* 1954. N 7. P.233–240.
25. *Молчан Г.М., Дмитриева О.Е.* О последствии сейсмических событий на малых временах и больших расстояниях // *ДАН.* 1992. Т.325, N 1. С.56–59.