

УДК 550.341

ГРУППИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В БЛОКОВОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ

В.И. Максимов

*Институт математики и механики Уральского отделения
Российской академии наук*

А.А. Соловьев

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

Исследуется возможность группирования землетрясений в искусственном каталоге, возникающем при моделировании динамики блоковой структуры. Полученные результаты показывают, что явление группируемости наблюдается для структуры, состоящей из четырех одинаковых квадратных блоков, при задании достаточно простого движения одной из границ.

CLUSTERING OF EARTHQUAKES IN A BLOCK MODEL OF LITHOSPHERE DYNAMICS

V.I. Maksimov

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

A.A. Soloviev

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

The possibility of clustering of earthquakes in a synthetic catalog arising from modeling of dynamics of a block structure is considered. The results obtained show that the phenomenon of clustering is observed for the structure consisting of four equal square blocks when simple enough movement of one boundary is specified.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение группирования землетрясений и их корреляции во времени на больших расстояниях исключительно важно для понимания динамики сейсмичности и, в частности, для прогноза землетрясений. Поэтому это явление привлекло внимание многих исследователей (см., например, [1–4]). Весьма существенно, обусловлены ли явления группируемости конкретными особенностями тектоники рассматрива-

емого региона или они представляют собой явления, общие для широкого разнообразия неотектонических условий, отражая свойства систем взаимодействующих блоков сейсмически активной литосферы. Опыт моделирования таких систем [5–7] говорит скорее в пользу второго предположения. В статье это иллюстрируется на примере блоковой структуры с весьма простой геометрией.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Процедура моделирования динамики структуры из жестких блоков предложена в работах [5, 6], в [7, 8] содержится подробное описание модели, некоторые свойства которой обсуждаются ниже.

В модели рассматривается слой глубиной H между двумя горизонтальными плоскостями. Этот слой разделен пересекающимися его плоскостями (*разломами*) на блоки, которые предполагаются абсолютно жесткими. Смещения блоков происходят в результате внешних воздействий на структуру, включающих задаваемые движения ее границ и движение подстилающей среды под блоками. Смещения блоков в каждый момент времени определяются из условия квазистатического равновесия, которое состоит в том, что для каждого блока сумма действующих на него сил и суммарный момент этих сил равны нулю. Взаимодействие блоков друг с другом и с подстилающей средой предполагается вязко-упругим, т.е. в плоскостях разломов и на подошвах блоков возникают неупругие смещения.

Землетрясение в модели возникает в случае, когда на части некоторого разлома отношение

$$\varepsilon = \frac{f}{P \pm p_0} \quad (1)$$

превосходит порог B , значения которого могут быть различны для разных разломов. В (1) f – плотность (на единицу площади) величины упругой силы, p_0 – плотность силы реакции, P – постоянная, которая имеет одно и то же значение для всех разломов и интерпретируется как разность между литостатическим и гидростатическим давлениями. В результате землетрясения происходит резкое изменение неупругих смещений так, чтобы величина ε достигла значения порога h_f ($h_f < B$). После землетрясения часть разлома, где оно произошло, находится в состоянии крипа, которое продолжается до тех пор, пока $\varepsilon > h_s$ ($h_s \leq h_f$).

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГРУППИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В МОДЕЛИ

Плотность упругой силы в некоторой точке плоскости разлома определяется из

$$\mathbf{f} = K(\Delta \mathbf{r} - \Delta \mathbf{u}), \quad (2)$$

где K – постоянный коэффициент; $\Delta \mathbf{r}$ – вектор относительного смещения блоков, разделяемых разломом; $\Delta \mathbf{u}$ – вектор неупругого смещения в рассматриваемой точке.

Изменение вектора неупругого смещения описывается уравнением

$$\frac{d\Delta \mathbf{u}}{dt} = V\mathbf{f}, \quad (3)$$

где V – постоянная, которая имеет различные значения в зависимости от того, находится ли соответствующая часть разлома в нормальном состоянии или в состоянии крипа.

Отметим, что в (3) используется безразмерное время.

Предположим, что блоковая структура состоит из двух, разделенных плоскостью разлома блоков, которые движутся таким образом, что вектор их относительного смещения не меняет направления, лежит в плоскости разлома, а его величина меняется с постоянной скоростью. В этом случае, в соответствии с формулами (1)–(3) и приведенными выше определениями землетрясения и крипа, землетрясения должны происходить на всей плоскости разлома в моменты, разделенные равными промежутками времени.

При усложнении характера движения блоков величина ε не будет достигать значения порога B одновременно на всей плоскости разлома. В результате вместо одного землетрясения возникнет группа меньших по размеру землетрясений.

ПРИМЕР ГРУППИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В МОДЕЛИ

В качестве примера рассмотрим результаты моделирования динамики блоковой структуры, приведенной на рис. 1. Структура имеет форму квадрата, ограниченного четырьмя разломами и разделенного двумя разломами на четыре квадратных

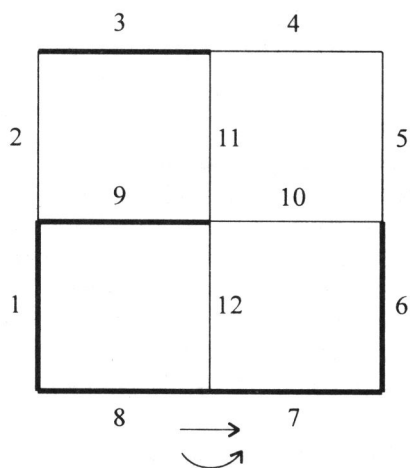


Рис. 1

блока; сторона каждого из блоков равна 50 км. Глубина (толщина) структуры (расстояние между верхней и нижней плоскостями) равна 20 км. Углы наклона к горизонтальной плоскости для всех разломов равны 85° . Граничный блок, примыкающий к нижнему разлому структуры, движется поступательно вдоль разлома в направлении, указанном стрелкой, со скоростью 20 см в единицу безразмерного времени и поворачивается на угол 10^{-6} радиан за единицу безразмерного времени вокруг середины линии разлома на верхней плоскости. Остальные граничные блоки и подстилающая среда под блоками структуры неподвижны. В формуле (1) $P = 2$ кбар. В формуле (2) для всех разломов $K = 10^{-3}$ кбар/см. В формуле (3) для всех разломов постоянная V имеет значение 50 см/кбар в нормальном состоя-

нии и 1000 см/кбар в состоянии крипа. Пороги, определяющие момент землетрясения и продолжительность состояния крипа, для всех разломов имеют следующие значения: $B = 0,1$, $h_f = 0,085$, $h_s = 0,07$.

Отметим, что эта модель существенно отличается от рассмотренного выше случая двух блоков. Это связано, во-первых, с наличием поворота в движении граничного блока, во-вторых, с тем, что блоковая структура состоит из четырех блоков.

Моделирование было выполнено с нулевыми начальными условиями. На рис. 2

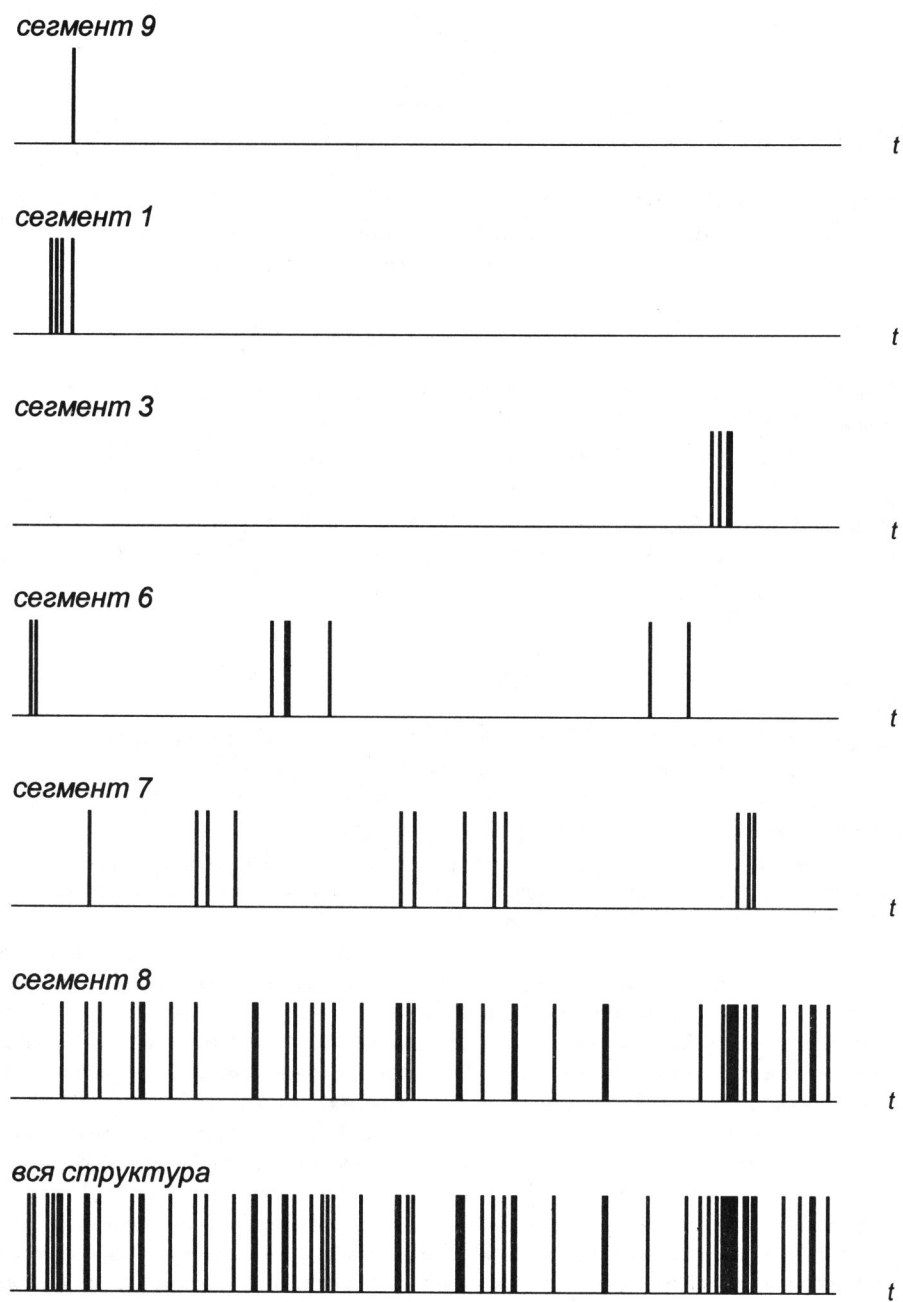


Рис. 2

вертикальными линиями представлены моменты землетрясений за период в 3 единицы безразмерного времени, начинающийся при $t = 480$, отдельно для шести сегментов разломов и для всей структуры в целом. На сегменте 9 за рассматриваемый период произошло всего одно землетрясение. На сегментах 3, 1, 7 и 6 отчетливо проявляется группируемость землетрясений. На сегменте 8, где произошло наибольшее число землетрясений, группируемость выражена слабее: группы землетрясений "размазаны" по оси времени. Аналогично выглядит картина для всей структуры в целом, однако группы землетрясений могут быть выделены.

В другие периоды времени картина группирования землетрясений в модели не отличается существенно от представленной на рис. 1, 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженное в модели свойство группируемости землетрясений позволяет надеяться на возможность использования моделирования в исследованиях группируемости землетрясений для реальных сейсмически активных регионов. В частности, может быть выяснена зависимость степени группируемости от вариаций геометрии блоковой структуры и числовых значений параметров модели.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (грант 008-94).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kagan Y., Knopoff L. Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1978. Vol.55. P.67-86.
2. Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Rotwain I.M. Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes // *Nature.* 1980. Vol.283. P.258-263.
3. Дзиевонский А.М., Прозоров А.Г. Автомодельное определение группирования землетрясений // Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных. М.: Наука, 1984. С.10-21. (Вычисл. сейсмология; Вып. 16).
4. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые проблемы // Современные методы интерпретации сейсмологических данных. М.: Наука, 1991. С.19-50. (Вычисл. сейсмология; Вып. 24).
5. 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).
6. 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).
7. Габриэлов А.М., Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Интерпретация блоковой структуры региона посредством блоковой модели динамики литосферы // Математическое моделирование сеймотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. Вып. 1. М.: МИТП РАН, 1993. С.11-19.
8. Гасилов В.Л., Прозоров А.Г., Соловьев А.А. Локальные взаимодействия сейсмических событий искусственного каталога в модели динамики блоковой структуры // *Наст. сб.*