

УДК 550.341

## СВОЙСТВА ПОТОКА СЕЙСМИЧНОСТИ ПРОСТЕЙШИХ ТИПОВ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ. БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ И РЕАЛЬНОСТЬ

Т.В. Гарьянова, И.М. Ротвайн

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

В результате моделирования динамики взаимодействующих блоков простейших типов тектонических движений, таких как сдвиг, взброс, сброс и сдвиг со взбросом, получены синтетические каталоги землетрясений, позволившие исследовать основные характеристики потока землетрясений для каждого отдельного типа движения. Выявлена зависимость этих характеристик от линейных размеров моделируемой структуры и ее раздробленности. Проведен сравнительный анализ модельной и реальной сейсмичности рассмотренных типов тектонических движений, подтвердивший адекватность применяемой модели.

## THE PROPERTIES OF SEISMICITY FOR THE SIMPLEST TYPE TECTONIC MOVEMENT. THE BLOCK MODEL AND REALITY

T.V. Garianova, and I.M. Rotwain

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

Block models for the faults with simple types of tectonic motion (strike-slip, normal fault, thrust and thrust with strike-slip) were developed. Synthetic catalogs generated for them allowed us to study general features of seismic flow for every type of the faults. It was obtained that these features depend on the type of motion, on the length of the fault structure and on the fault segmentation. The comparison of the model results with the real seismicity confirms the adequacy of the model.

### ВВЕДЕНИЕ

В понимании процессов, происходящих в земной коре, существенную роль играет численное моделирование этих процессов. Каталоги землетрясений, отражающие реальную сейсмичность, доступны для очень непродолжительного, в геологических масштабах, периода времени и, следовательно, не дают достаточно данных для достоверного изучения сейсмического режима и его изменения во времени.

В результате численного моделирования можно получить каталоги практически любой продолжительности, что открывает дополнительные возможности в такого рода исследованиях.

Помимо этого, реальная сейсмичность обусловлена сложным поведением существенно нелинейной, иерархической системы взаимодействующих тектонических разломов. На ее поведение влияет множество факторов, таких как: проникновение флюидов, коррозия, петрохимические процессы, фазовые переходы в условиях высокого давления и др. [1]. В этих условиях невозможно выделить и изучить влияние какого-либо изолированного фактора или свойства сейсмичности, присущие конкретному типу тектонического движения, в то время как численное моделирование предоставляет возможность для решения таких задач.

В частности, различиям в углах наклонов графиков повторяемости для различных тектонических структур посвящены работы многих исследователей [2–6]. Однако остается неясным, определяются ли эти различия собственно типом тектонических движений или всем комплексом сейсмо-тектонических факторов.

В работе [7] показано существенное влияние типа тектонического движения на характеристики очага землетрясения (размер очага и средняя скорость испарывания), что позволяет предположить влияние типа движения и на характеристики сейсмического потока в целом. В работе [8] различные типы тектонического движения моделировались в лабораторных условиях на образцах, но свойства сейсмического потока при этом не исследовались. В работе [9] исследовалась зависимость основных характеристик потока землетрясений от раздробленности моделируемой структуры и типа движений: вращательного или поступательного. Было показано, что эта зависимость существенным образом определяется именно типом заданных в модели движений.

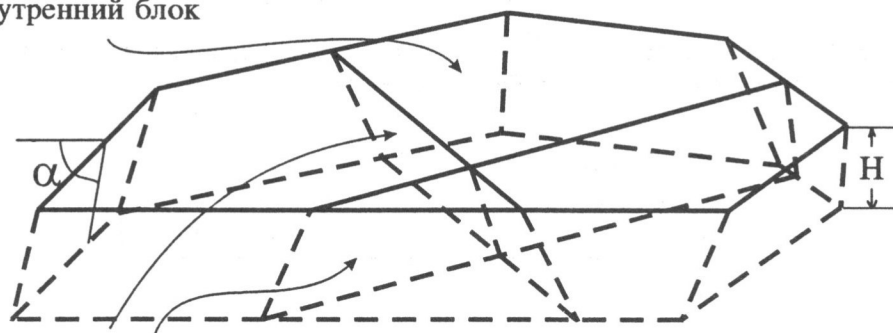
В данной работе авторы поставили перед собой задачу, используя блоковую модель динамики литосферы [10], исследовать основные характеристики сейсмичности, свойственные простейшим типам движения (таким как сдвиг, взброс, сброс, и сдвиг со взбросом), и изучить влияние на них размеров моделируемой структуры и ее раздробленности.

Существует весьма широкий круг моделей сейсмического процесса, обзор которых можно найти в [11]. Выбор конкретной модели зависит от цели решаемой задачи. Для исследования свойств сейсмичности различных типов тектонического движения наиболее подходящей, по-видимому, является блоковая модель. Она была успешно применена для моделирования структур нескольких сейсмоактивных регионов [12–14]. Было показано, что в случае моделирования структур с реальной геометрией сейсмоактивного региона, синтетический каталог землетрясений отражает основные свойства реальной сейсмичности.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Подробное описание используемой версии блоковой модели дано в [12]. Кратко напомним его. Сейсмический регион рассматривается в виде бесконечного горизонтального слоя толщиной  $H$ , ниже которого находится подстилающая среда. Этот слой разбит на блоки плоскими разломами, имеющими произвольный наклон относительно горизонтальной плоскости (рис. 1). Блоки делятся на *внутренние*

Внутренний блок



Плоскость разлома

Рис. 1. Схема блоковой модели динамики литосферы

(ограниченные со всех сторон разломами), которые моделируют интересующий нас регион, и *внешние* (не ограниченные с некоторых сторон). Все блоки вязкоупруго взаимодействуют с подстилающей средой и друг с другом. В качестве граничных условий задаются скорости поступательного и вращательного движений внешних блоков и подстилающей среды под каждым внутренним блоком. Эти движения определяют внешние силы, под воздействием которых перемещаются внутренние блоки. Блоки предполагаются абсолютно жесткими, а все перемещения происходят в плоскостях разломов. Отношение упругих сил, возникающих на границе между блоками, к силе реакции обозначим через  $\kappa$ . Когда  $\kappa$  превышает заданный порог  $B$ , происходит проскальзывание, которое интерпретируется как землетрясение. Величина магнитуды землетрясения зависит от суммарной площади элементарных участков, на которых  $\kappa$  одновременно превысило порог  $B$ . После возникновения землетрясения на том участке разлома, где оно произошло, коэффициент вязкости увеличивается, что моделирует переход данного участка в состояние крипа (скольжения). В результате напряжение на этом участке разлома уменьшается, и когда  $\kappa$  становится меньше некоторого порога  $Hs$  ( $Hs < B$ ), то данный участок разлома переходит в обычное состояние (залечивается). Коэффициенты упругости ( $K$ ), вязкости в нормальном состоянии ( $V$ ) и вязкости в состоянии крипа ( $Vs$ ) являются параметрами модели и задаются на границе с подстилающей средой под каждым блоком и между блоками. Пороги  $B$  и  $Hs$  имеют смысл коэффициентов трения между блоками. Они также являются параметрами модели и задаются для каждого разлома.

Изменяя значения параметров модели, можно ввести иерархию разломов в рассматриваемой структуре [12]. Принцип этого изменения основывается на предположении, что разломы большего ранга представляют собой более раздробленные и, соответственно, менее упругие и более вязкие зоны с пониженным трением, т.е. имеют меньшие значения параметров  $K$ ,  $B$  и  $Hs$  и большие значения  $V$  и  $Vs$ .

Другой возможный способ введения иерархии – разбиение структуры на блоки разного размера. Оба способа введения иерархии использованы в приведенных ниже исследованиях.

## МОДЕЛИ ПРОСТЕЙШИХ ТИПОВ ДВИЖЕНИЯ

Блочные модели простейших типов тектонических движений: взброса, сброса, сдвига и взброса со сдвигом изображены на рис. 2.

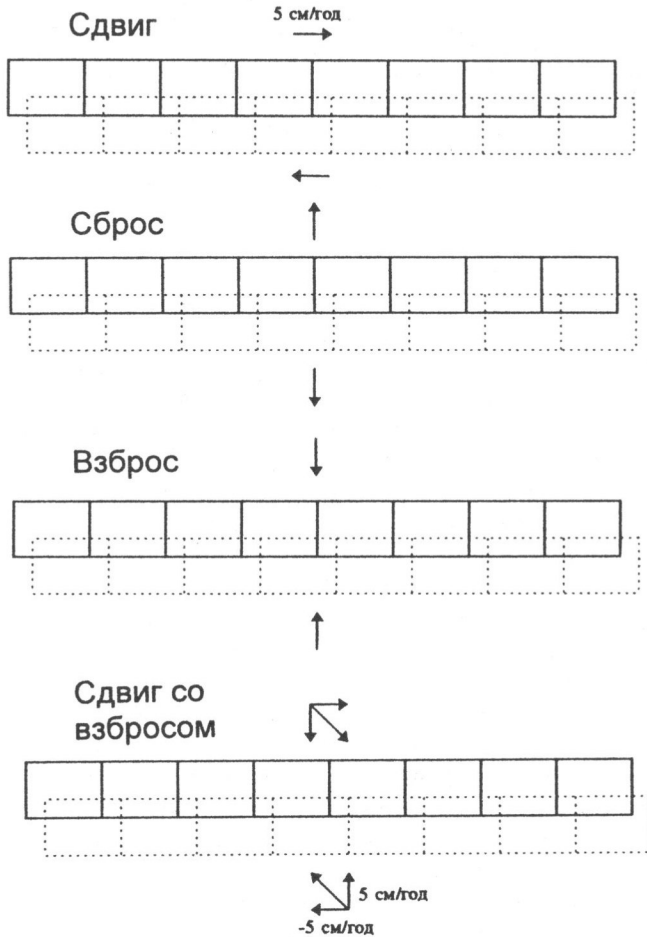


Рис. 2. Блочная модель простейших типов тектонических движений  
Стрелками показано направление движений, скорость движений  
одна и та же и соответствует 5см/год

Заметим, что сдвиговые движения по разлому могут возникнуть как за счет поступательного движения бортов разлома, так и за счет поворота одного из блоков, границей которого является данный разлом. Первый вариант движения можно наблюдать только в поперечных разломах срединно-океанических хребтов [15]. Примером второго варианта движения может служить разлом Сан-Андреас, сдвиг по которому возникает за счет вращения Тихоокеанской плиты. В данной работе сдвиг реализован за счет поступательного движения бортов разлома (рис. 2).

В рассматриваемой модели движение внешних блоков задается только в горизонтальной плоскости. Поэтому сбросовые и взбросовые движения достигаются за счет смещения блоков вдоль наклонных плоскостей разломов.

Для всех типов движения моделировалась линейная структура конечной толщины 5 км и с углами наклона плоскостей разломов  $\alpha = 80^\circ$  относительно горизонтальной плоскости. Внешние блоки двигались в соответствии с моделируемым типом движения, как указано стрелками на рис. 2. Там же дана скорость этих движений. Подстилающая среда не двигалась относительно блоков. Общими для всех структур были следующие параметры модели:

– толщина слоя  $H = 20$  км, что примерно соответствует средней толщине земной коры;

– шаг дискретизации по пространству  $\epsilon = 2$  км; этот параметр определяет минимальную магнитуду создаваемого каталога, точность определения магнитуды и координат модельного землетрясения;

– длительность каталога  $T = 50$  единиц безразмерного времени;

– шаг дискретизации по времени  $\tau = 0.001$  единицы безразмерного времени; такое значение параметра обеспечивает достаточную подробность модельного каталога по времени при разумном времени вычислений.

Для изучения влияния раздробленности структуры на характеристики ее сейсмичности для каждого типа тектонического движения модельные каталоги были созданы для следующих трех вариантов структуры (рис. 3):

1) нераздробленная структура;

2) равномерно раздробленная структура с иерархией разломов, которая задана через различие в значениях коэффициентов  $K$ ,  $V$ ,  $V_s$  и порогов  $B$  и  $H_s$ ; значения этих величин приведены в табл. 1 для разломов разных рангов;

3) неравномерно раздробленная структура с иерархией внутренних блоков, которая задана через их линейные размеры; все разломы имели равные ранги.

В каждом из перечисленных выше вариантов были рассмотрены линейные структуры трех размеров: 100, 500 и 1000 км.

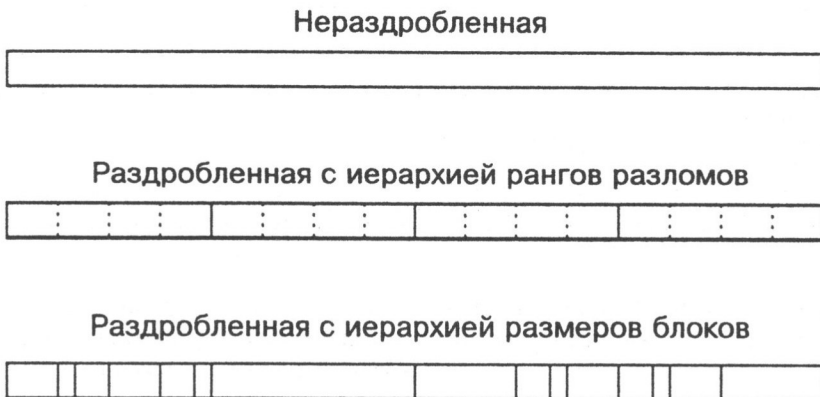


Рис. 3. Три вида дробления структуры

ТАБЛИЦА 1. Значения параметров для разломов трех рангов

Ранг разлома	Коэффициент упругости, $K$	Коэффициент вязкости		Пороги	
		в нормальном состоянии, $V$	в состоянии крипа, $V_s$	$B$	$H_s$
I	1.0	0.05	50	0.05	0.035
II	2.0	0.03	25	0.1	0.07
III	4.0	0.02	13	0.2	0.14

Примечание. За основу взяты величины из [6,7]

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве основных характеристик модельной сейсмичности естественно рассматривать параметры закона Гутенберга–Рихтера [16]:

$$\log N = -bM + a$$

и максимальную, реализовавшуюся в модели, магнитуду.

Остановимся сначала на зависимости характеристик потока модельных землетрясений от типа движения. Для этого сравним углы наклона графиков повторяемости для 4-х типов моделируемых движений (табл. 2). Величины углов были определены по методике, описанной в [17, 18].

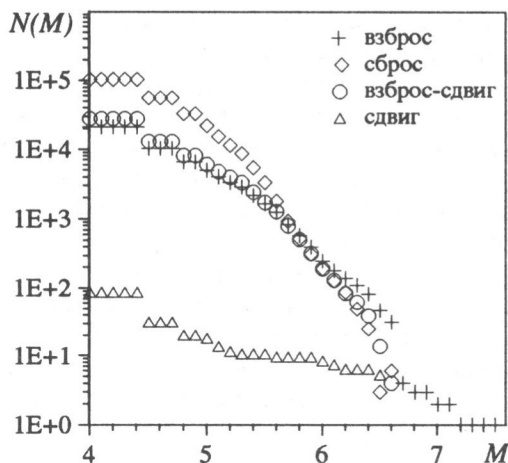
ТАБЛИЦА 2. Зависимость параметра  $b$  закона Гутенберга–Рихтера от типа моделируемого движения при трех способах дробления структуры

Способ дробления структуры	$b \pm \Delta b$			
	Взброс	Сброс	Сдвиг	Взброс-сдвиг
Нераздробленная	$1.0 \pm 0.2$	$1.25 \pm 0.05$	$0.4 \pm 0.3$	$1.0 \pm 0.1$
Раздробленная с иерархией рангов разломов	$1.15 \pm 0.025$	$1.29 \pm 0.01$	$0.6 \pm 0.2$	$1.08 \pm 0.02$
Раздробленная с иерархией размеров блоков	$1.12 \pm 0.04$	$1.31 \pm 0.03$	$0.6 \pm 0.3$	$1.04 \pm 0.02$

Примечание. Ошибка вычисления  $b$  дана для 95%-го доверительного интервала.

Как видно из табл. 2, наибольший угол наклона графика повторяемости характерен для движения, моделирующего сброс, и минимальный – для движения, моделирующего сдвиг. Заметим, что при одинаковых параметрах модели интенсивность сейсмического потока для сдвига существенно меньше, чем для других типов движения. Это хорошо видно из рис. 4, где приведены графики повторяемости для случая равномерно раздробленной структуры с иерархией рангов разломов.

Рис. 4. Куммулятивные графики повторяемости для 4-х типов тектонического движения в случае раздробленной структуры с иерархией рангов разломов



Заметим, что величины углов наклона графиков повторяемости для каждого конкретного типа движения остаются практически теми же при изменении способа введения иерархии блоков в раздробленных структурах. Однако они отличаются в случае нераздробленной и раздробленной структур. Впрочем, это может быть следствием большой ошибки (табл. 2) в определении угла наклона графика повторяемости для нераздробленной структуры.

Зависимость максимальной магнитуды, реализовавшейся в модели, от линейного размера моделируемой структуры при трех способах дробления представлена в табл. 3. Для сравнения, во 2-м столбце приведена теоретическая максимальная магнитуда. Ее величина равна произведению максимального линейного размера внутреннего блока на глубину слоя. В случае нераздробленной структуры это соответствует площади всей структуры. При других способах дробления она, естественно, меньше.

ТАБЛИЦА 3. Зависимость максимальной магнитуды от длины моделируемой структуры при трех типах дробления

Длина структуры, $L$ , км	$M_{\max}$ теоретическая	$M_{\max}$ фактическая			
		Взброс	Сброс	Взброс-сдвиг	Сдвиг ( $M_1-M_2$ )
Нераздробленная структура					
100	7.16	6.85	6.77	6.74	7.10-7.10
500	7.85	7.82	7.55	7.85	7.80-7.80
1000	8.15	8.15	7.85	8.15	8.15-8.15
Раздробленная структура с иерархией рангов разломов					
100	5.98	5.85	5.98	5.80	5.0-5.4
500	6.67	6.67	6.58	6.67	5.2-7.5
1000	6.97	6.97	6.86	6.97	5.9-8.1
Раздробленная структура с иерархией размеров внутренних блоков					
100	5.98	5.85	5.98	5.80	5.0-5.4
500	6.67	6.67	6.58	6.67	5.2-7.5
1000	6.97	6.97	6.86	6.97	5.9-8.1

В модели сдвига для обоих случаев раздробленной структуры приведены два значения максимальной магнитуды:  $M_1$  соответствует значению максимальной магнитуды, до которого график повторяемости допускает линейную экстраполяцию, а  $M_2$  – фактически реализовавшаяся максимальная магнитуда. Для других типов движения и для сдвига в случае нераздробленной структуры эти величины совпадают. Заметное различие между  $M_1$  и  $M_2$  для сдвига аналогично наличию характеристических землетрясений, наблюдаемых в реальной сейсмичности. Это явление, по мнению авторов, заслуживает отдельного подробного исследования, выходящего за рамки этой работы.

Из табл. 3 видно, что максимальная магнитуда, фактически реализовавшаяся в модельном потоке землетрясений (за исключением сдвига), очень близка к теоретической и, следовательно, определяется, в основном, степенью раздробленности структуры и линейными размерами блоков, ее составляющих.

### СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНОЙ И РЕАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Как было показано выше (см. табл. 2) углы наклона графиков повторяемости для разных типов тектонических движений в модели существенно различаются; так, для сдвига эта величина равна 0.6, для сброса она составляет 1.3. Для двух других типов движения имеют место промежуточные значения углов наклона: 1.15 для взброса и 1.1 для взброса-сдвига.

Возникает вопрос, какие углы наклонов графиков повторяемости наблюдаются в сейсмоактивных регионах с аналогичным типом тектонических движений. При выборе сейсмоактивных регионов мы основывались на результатах работы [15], где показано, что, сдвиговые землетрясения происходят на трансформных участках срединно-океанических хребтов, а сбросовые – на рифтовых участках. Чередование этих участков наиболее отчетливо выражено в центральной части Срединно-Атлантического хребта (рис. 5). Заметим, что на трансформных участках, границы которых выделены на рис. 5, сдвиговые движения вдоль разлома возникают именно за счет поступательного движения бортов разлома, как и в предложенной здесь модели сдвига. Остальные землетрясения, принадлежащие рифтовым участкам центральной части Срединно-Атлантического хребта, являются сбросовыми. Кроме того, была рассмотрена южная часть Срединно-Атлантического хребта ( $5-30^\circ$  S), практически все землетрясения которой являются также сбросовыми. Для сравнения с модельными взбросовыми землетрясениями были рассмотрены поверхностные (с глубиной  $\leq 60$  км) субдукционные землетрясения в районе Курило-Камчатской дуги ( $40-60^\circ$  N,  $140-165^\circ$  E) и Анд ( $20-50^\circ$  S,  $60-80^\circ$  W). Выбор именно этих регионов обусловлен сходством их горизонтальных тектонических движений с движениями в модели взброса.

Для всех перечисленных выше регионов использовался каталог землетрясений NEIC [19]. Значения параметра  $b$  закона Гутенберга–Рихтера для всех типов движения приведены в табл. 4. Они практически совпадают со значениями параметра  $b$  для синтетических каталогов соответствующих типов движения (см. табл. 2).

Отметим, что сейсмическая активность трансформных участков Срединно-Атлантического хребта с преобладанием сдвиговых землетрясений относительно низкая, что полностью соответствует результатам моделирования.



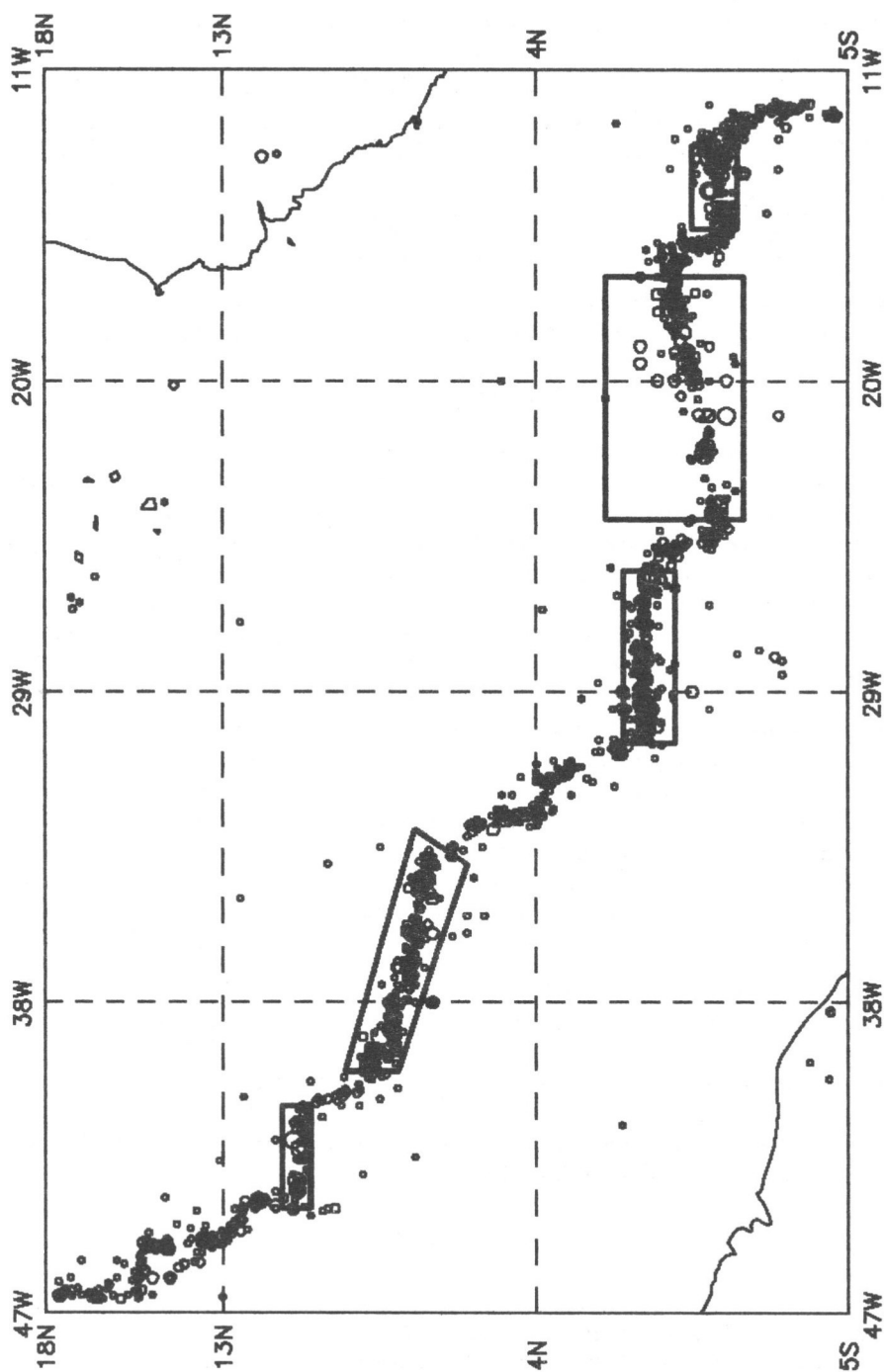


Рис. 5. Карта эпицентров центральной части Срединно-Атлантического хребта по каталогу NEIC [12]. Сплошной линией выделены границы трансформных участков с преобладанием сдвиговых землетрясений

ТАБЛИЦА 4. Зависимость параметра  $b$  закона Гутенберга–Рихтера от типа тектонического движения для реальной сейсмичности

Регион	Тип движения	$b \pm \Delta b$
Центральная часть Срединно-Атлантического хребта	Сдвиг	$0.87 \pm 0.09$
	Сброс	$1.46 \pm 0.17$
Южная часть Срединно-Атлантического хребта	Сброс	$1.4 \pm 0.1$
Курилы–Камчатка	Взброс	$1.16 \pm 0.04$
Анды	Взброс	$1.17 \pm 0.08$

Примечание. Ошибка вычисления  $b$  дана для 95%-го доверительного интервала.

### ВЫВОДЫ

Результаты моделирования и сравнительного анализа основных характеристик реальной и синтетической сейсмичности в структурах с простейшими типами тектонических движений позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Тип тектонического движения оказывает основное влияние на параметры закона сейсмичности – закона Гутенберга–Рихтера.

2. Слабая сейсмическая активность и малые углы наклона графика повторяемости (меньше 1) характерны для регионов с преобладанием сдвиговых движений, возникающих за счет поступательного движения бортов разломов.

3. Наибольшие углы наклона графика повторяемости (больше 1) характерны для регионов раздвига (сбросы), где горизонтальные движения плит происходят практически перпендикулярно направлению разломов.

4. Углы наклона графика повторяемости, близкие к 1, характерны для регионов сжатия (взбросы), где горизонтальные движения плит также происходят практически перпендикулярно направлению разломов.

Результаты проведенного исследования еще раз подтвердили, что использованная здесь блоковая модель динамики литосферы позволяет отразить некоторые основные характеристики реальной сейсмичности.

Авторы признательны доктору физ.-мат. наук А.А. Соловьеву, доктору физ.-мат. наук Г.М. Молчану и П.О. Соболеву за постоянные консультации и внимание к этой работе.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-05-65710), ИНТАС (грант INTAS 94-232) и Департамента геологических наук Корнельского Университета в рамках проекта Национального научного фонда США (EAR-9423818).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Keilis-Borok V.I. Introduction: non-linear systems in the problem of earthquake prediction // Phys. Earth and Planet. Int. 1990. Vol.61. P. 1-7.
2. Кронрод Т.Л. Параметры сейсмичности для основных высокосейсмичных районов мира // Логические и вычислительные методы в сейсмологии. (Вычисл. сейсмология. Вып. 17). М.: Наука, 1984. С. 36-58.

3. *Fransis T.* Seismicity of mid-oceanic ridges and its relation to properties of the upper mantle and crust // *Nature*. 1968. Vol. 220, N 5170. P. 855-901.
4. *Гинсарь В.Н.* Геоструктурные закономерности вариаций сейсмического и теплового поля в Атлантическом океане. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат.наук / Киев, 1987. С.14-17.
5. *Друмя А.В., Гинсарь В.Н., Шумила В.И.* Вариации наклона графика повторяемости землетрясений – характеристики сейсмического режима и типа геодинамических процессов // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1990. N 6. С. 5-13.
6. *Молчан Г.М., Кронрод Т.Л., Дмитриева О.Е., Некрасова А.К.* Многомасштабная модель сейсмичности в задачах сейсмического риска: Италия // *Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. (Вычисл. сейсмология. Вып. 28)*. М.: Наука, 1996. С.193-224.
7. *Копничев Ю.Ф., Шпилькер Г.Л.* Пространственно-временные характеристики очагов сильных землетрясений с различными типами подвижек // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1980. N 9. С. 3-11.
8. *Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов. Новосибирск: СоАН, 1983. 123 с.
9. *Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M., Soloviev A.A.* Numerical modeling of block structure dynamics: dependence of a synthetic earthquake flow on the structure separateness and boundary movements // *J. of Seismol.* 1997. N 1. P. 151-160.
10. *Габриэлов А.М., Кейлис-Борок В.И., Левшина Т.А., Шапошников В.А.* Блоковая модель динамики литосферы // *Математические методы в сейсмологии и геодинамике. (Вычисл. сейсмология. Вып. 19)*. М.: Наука, 1986. С. 168-178.
11. *Gabrielov A.M., Newman W.I.* Seismicity modeling and earthquake prediction: a review // *Nonlinear dynamics and predictability of geophysical phenomena*. Wash.: AGU, 1994. P. 7-14.
12. *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.
13. *Panza G.F., Soloviev A.A., Vorobieva I.A.* Numerical modelling of block-structure dynamics: application to the Vrancea region // *PAGEOPH*. 1997. Vol.149. P. 233-240. .
14. *Соболев П.О., Соловьев А.А., Ротвайн И.М.* Моделирование динамики литосферы и сейсмичности для региона Ближнего Востока // *Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. (Вычисл. сейсмология. Вып. 28)*. М.: Наука, 1996. С. 131-147.
15. *Рундквист Д.В., Соболев П.О.* Зависимость сейсмичности срединно-океанических хребтов от скорости спрединга и соотношения длин рифтовых и трансформных участков // *ДАН*. 1996. Т. 350, N 6. С. 807-811.
16. *Gutenberg B., Richter C.F.* Seismicity of the Earth and associated phenomenon. 2nd ed. Princeton University. 1954. 310 p.
17. *Молчан Г.М., Подгаецкая В.М.* Параметры глобальной сейсмичности, I // *Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. (Вычисл. сейсмология. Вып. 6)*. М.: Наука, 1973. С. 44-66.
18. *Канторович Л.В., Молчан Г.М., Вилькович Е.В., Кейлис-Борок В.И.* Статистические вопросы оценки поверхностных эффектов, связанных с сейсмичностью // *Алгоритмы интерпретации сейсмических данных. (Вычисл. сейсмология. Вып. 5)*. М.: Наука, 1971. С. 80-128.
19. NEIC Global hypocenters data base 1900–1997.