

УДК 550.341

**СФЕРИЧЕСКАЯ БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ:  
ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ И СЕЙСМИЧНОСТИ  
ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПЛИТ****Л.А. МЕЛЬНИКОВА, В.Л. РОЗЕНБЕРГ**Институт математики и механики  
Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург**П.О. СОБОЛЕВ, А.А. СОЛОВЬЕВ**Международный институт теории прогноза землетрясений  
и математической геофизики Российской академии наук, Москва

Сферическая блоковая модель используется для изучения динамики и сейсмичности глобальной системы тектонических плит посредством численного моделирования. Приводится краткая характеристика модели, особое внимание уделяется специфическим особенностям сферической модификации. Рассматриваются две блоковые структуры: в первой наиболее крупные плиты выделяются в качестве граничных блоков, вторая является замкнутой сферической структурой без граничных блоков. Результаты вычислительных экспериментов включают пространственное распределение сильнейших модельных событий, информацию о смещениях плит и о характере их взаимодействия вдоль границ. В полученных модельных каталогах землетрясений обнаружены некоторые черты реальной сейсмичности. Модельные графики повторяемости "почти линейны". Проведен анализ результатов численного моделирования с целью изучения зависимости свойств модельной сейсмичности от параметров модели. Установлено, что динамика глобальной системы тектонических плит точнее моделируется блоковой структурой без граничных блоков по сравнению со структурой, где некоторые блоки выделяются в качестве граничных.

**SPHERICAL BLOCK MODEL:  
STUDYING DYNAMICS AND SEISMICITY OF  
THE GLOBAL SYSTEM OF TECTONIC PLATES****L.A. MELNIKOVA, V.L. ROZENBERG**Institute of Mathematics and Mechanics,  
Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg**P.O. SOBOLEV, A.A. SOLOVIEV**International Institute of Earthquake Prediction Theory  
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow

The spherical block model is used to study dynamics and seismicity of the global system of tectonic plates by means of numerical simulation. A brief description of the model with the emphasis on specific features of the spherical modification is presented. Two block structures are considered: the first is characterized by specifying the largest plates as boundary blocks, whereas the second is the closed spherical structure without boundary blocks. Results of numerical experiments include the spatial distribution of the strongest

model earthquakes, the qualitative information on displacements of plates, and on the nature of their interaction along boundaries. Synthetic earthquake catalogs reveal some patterns of observed seismicity. Model frequency-magnitude plots are nearly linear. Analysis of results of numerical simulation shows dependence of synthetic seismic properties on model parameters. The dynamics of the global system of tectonic plates is more accurately modeled by means of the closed block structure than with the structure for that boundary blocks are specified.

## Введение

Задача изучения сейсмичности на основе статистического анализа существующих каталогов землетрясений достаточно сложна, поскольку надежные данные наблюдений покрывают относительно небольшой временной интервал по сравнению с продолжительностью геотектонических процессов, влияющих на сейсмическую активность. Поэтому моделирование сейсмичности, т.е. серий событий, играет важную роль в исследовании характера реального сейсмического потока и выявлении или подтверждении закономерностей, предшествующих сильным толчкам [1, 2]. Информация о таких закономерностях может использоваться, в частности, при изучении различных аспектов сейсмического риска [3]. Очевидно, что модель должна быть адекватной в смысле воспроизведения свойств, обнаруженных эмпирическим путем (закон повторяемости Гутенберга–Рихтера, миграция событий, сейсмический цикл и т. д.). Только в этом случае возможно использование искусственного каталога, являющегося результатом численного моделирования, для получения тех или иных оценок реальных характеристик потока землетрясений. Задача тестирования модели и сравнения результатов моделирования с реальными данными представляет самостоятельный интерес.

Данная работа продолжает исследования [4, 5], где подробно описаны подходы к построению сферической модификации блоковой модели и результаты моделирования динамики относительно небольшой системы тектонических плит. Напомним, что в существующих блоковых моделях сейсмоактивный регион представляется в виде системы абсолютно жестких блоков, образующих слой фиксированной глубины между двумя горизонтальными плоскостями или концентрическими сферами. Границы блоков состоят из сегментов тектонических разломов, которые считаются бесконечно тонкими. Система блоков движется под действием внешних сил. Движение может описываться как тремя параметрами (так называемая двумерная модель), так и шестью (трехмерная модель). Предполагается, что в каждый момент времени система находится в состоянии квазистатического равновесия. Поскольку блоки являются абсолютно жесткими, все деформации имеют место на разломах и подошвах блоков. Взаимодействие между блоками полагается

вязко-упругим (нормальное состояние) до тех пор, пока отношение напряжения к давлению не превышает значение заданного порога. Если в какой-то момент времени на части разлома достигается критическое значение, то, в соответствии с законом сухого трения, происходит сброс напряжения, и эта ситуация интерпретируется как землетрясение. Считается, что те части разлома, в которых произошли землетрясения, находятся в состоянии крипа. Такое состояние отличается от нормального более быстрым ростом неупругих смещений и продолжается до тех пор, пока напряжение не уменьшится до определенного уровня. Результатом процесса моделирования является искусственный каталог землетрясений. Детальное описание основных принципов построения блоковых моделей динамики литосферы приведено в [1, 6, 7].

Наиболее изученной является двумерная плоская блоковая модель, на основе которой созданы модели, аппроксимирующие динамику литосферных блоков реальных сейсмоактивных регионов [2, 8, 9]. Модель применялась для исследования зависимости свойств сейсмического потока от геометрии разломов и задаваемых движений [10, 11]. В трехмерной плоской модели [12] учитывается вертикальная компонента смещений с помощью введения трех дополнительных степеней свободы. Поскольку посредством плоских блоковых моделей невозможно моделировать движение системы глобальных тектонических плит, была введена сферическая геометрия [4, 5]. Очевидно, сферическая модификация применима к изучению движения системы именно глобальных тектонических плит, поскольку в случае отдельно взятого сейсмоактивного региона, из-за относительной малости его размеров, влияние сферичности поверхности незначительно.

В настоящей статье, являющейся фактически продолжением работы [4], приводятся результаты моделирования динамики и сейсмичности глобальной системы тектонических плит Земли и обсуждаются направления дальнейших исследований.

## 1. Модель

Опишем основные конструкции и идеи подхода, используемого для построения сферической модификации блоковой модели.

### 1.1. Геометрия блоковой структуры, движение блоков

*Блоковая структура* является ограниченной и односвязной частью шарового слоя глубиной  $H$ , заключенного между двумя концентрическими сферами, одна из которых (внешняя) интерпретируется как поверхность Земли, другая (внутренняя) – как нижняя граница упругой

литосферы. Разделение структуры на блоки определяется пересекающимися этот слой *разломами*, каждый из которых представляет собой коническую поверхность, характеризующуюся тем, что, во-первых, линией разлома на поверхности Земли является направленная дуга большого круга, и, во-вторых, плоскость, касательная к поверхности разлома в точке упомянутой линии, наклонена к поверхности Земли под углом  $\alpha$ . При таком определении разлома значение угла  $\alpha$  (будем называть его *углом наклона* разлома и измерять слева от линии разлома) одно и то же для всех точек линии разлома на поверхности Земли. Тогда геометрия блоковой структуры описывается системой линий пересечения разломов с внешней сферой, ограничивающей слой, и указанием углов наклона разломов. Общие точки двух разломов на внешней и внутренней сферах называются *вершинами*. Участки разломов, ограниченные соответствующими парами соседних вершин, называются *сегментами*. Пересечения блока с ограничивающими сферами представляют собой сферические многоугольники, при этом пересечение с внутренней сферой называется *подошвой*. Предполагается, что вне блоковой структуры находятся *граничные блоки*, примыкающие к внешним сегментам.

Блоки считаются абсолютно жесткими, все их смещения – бесконечно малыми по сравнению с линейными размерами. Поэтому геометрия блоковой структуры не меняется в процессе моделирования, и структура не движется как единое целое. Гравитационными силами можно пренебречь, так как они слабо зависят от смещений блоков, а блоковая структура в начальный момент времени находится в состоянии квазистатического равновесия.

Все вершины на внешней сфере задаются географическими координатами (широтой  $\varphi$  и долготой  $\psi$ ) в сферической системе координат, связанной с центром Земли (такая система будет называться “система-О”). В сферической модификации, опирающейся на трехмерную модель, блоки (в том числе и граничные) имеют шесть степеней свободы. Смещение каждого блока состоит из поступательной и вращательной компонент. Поступательная компонента описывается вектором сдвига  $(x, y, z)$ . Вращательная компонента определяется тремя углами поворота  $\gamma, \beta, \lambda$  относительно неподвижной прямоугольной системы координат  $(X, Y, Z)$  с началом в центре масс блока, точке  $C$  с координатами  $(\varphi_C, \psi_C, R_C)$ , с осью  $X$ , направленной по параллели, с осью  $Y$ , направленной по меридиану, и с осью  $Z$ , направленной вдоль радиуса Земли от центра (такая система будет называться “система-С”). Предположим, что прямоугольная система координат  $(X_1, Y_1, Z_1)$  жестко связана с центром масс блока, т. е. при отсутствии смещений блока она совпадает с неподвижной системой  $(X, Y, Z)$ , в которой рассматрива-

ются все движения блока. Схема вращения блока и соответствующей системы  $(X_1, Y_1, Z_1)$  относительно  $(X, Y, Z)$  представлена на рис. 1.

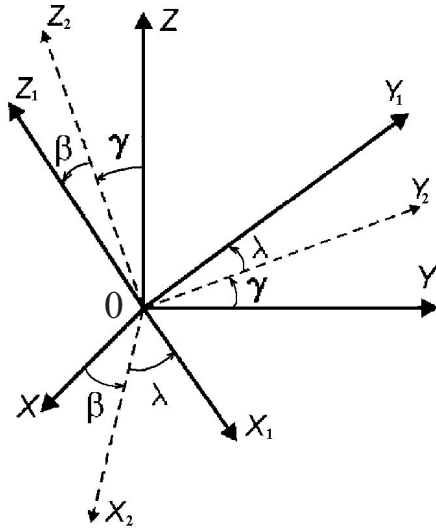


Рис. 1. Определение углов поворота  $\gamma, \beta, \lambda$

Угол  $\gamma$  определяется как угол поворота осей  $Y$  и  $Z$  вокруг оси  $X$ , обеспечивающий выполнение следующего условия: если  $Z_2$  есть линия пересечения плоскостей  $XOZ_1$  и  $YOZ$ , то ось  $Z$  отображается на  $Z_2$ , при этом  $Y \rightarrow Y_2$ . Угол  $\beta$  есть угол поворота осей  $X$  и  $Z_2$  вокруг оси  $Y_2$ , при котором  $Z_2$  переходит в  $Z_1$  (что возможно, так как  $Z_1$  принадлежит плоскости  $XOZ_2$ ), при этом  $X \rightarrow X_2$ . Угол  $\lambda$  определяется как такой угол поворота осей  $X_2$  и  $Y_2$  вокруг оси  $Z_1$ , при котором  $X_2 \rightarrow X_1$ ,  $Y_2 \rightarrow Y_1$ .

Согласно такому определению углов поворота, формулы для смещения  $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$  в некоторой точке сферы с географическими координатами  $(\varphi, \psi)$ , принадлежащей блоку, имеют в системе-С вид:

$$\Delta_x = x - \hat{Y}\lambda + \hat{Z}\beta, \quad \Delta_y = y + \hat{X}\lambda - \hat{Z}\gamma, \quad \Delta_z = z - \hat{X}\beta + \hat{Y}\gamma, \quad (1)$$

где  $(x, y, z)$  – сдвиг блока,  $(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z})$  – координаты вектора, идущего из центра масс блока в точку  $(\varphi, \psi)$  в системе-С, углы поворота  $(\gamma, \beta, \lambda)$  считаются малыми.

Отметим, что в данной модификации блоки могут покидать сферическую оболочку (они имеют шесть степеней свободы) и, стало быть, иметь ненулевую вертикальную компоненту смещения. В модели используется безразмерное время, единице которого при интерпретации результатов присваивается выбранное реальное значение (например, один год).

### 1.2. Вязко-упругое взаимодействие между блоками, уравнения квазистатического равновесия

В каждый момент времени компоненты вектора сдвига и углы поворота блока определяются из условия равенства нулю суммы всех сил, действующих на блок, и суммарного момента этих сил. Силы возникают на внутренней сфере из-за смещения блоков относительно подстилающей среды и на поверхностях ограничивающих их разломов из-за смещений соседних блоков. Предполагается, что законы движения граничных блоков и подстилающей среды известны. Движение описывается как вращение на сфере, т.е. задаются положение оси вращения и угловая скорость.

Поскольку глубина сферического слоя значительно меньше размеров блоковой структуры, будем считать, что при вычислении числовых характеристик взаимодействия блоков по разломам возможно ограничиться точками, принадлежащими линии разлома на поверхности Земли (т.е. предполагается, что все характеристики определяются только координатами  $(\varphi, \psi)$  и не зависят от  $R$ ).

Рассмотрим точку с координатами  $(\varphi, \psi)$ , принадлежащую участку некоторого разлома, который разделяет блоки с номерами  $i$  и  $j$  (блок  $i$  слева от разлома, блок  $j$  – справа). Обозначим через  $\vec{e}_t$  единичный вектор, касательный к линии разлома в этой точке и направленный по направлению разлома. Пусть этот вектор имеет координаты  $\vec{e}_t = (e_1, e_2, 0)$  в прямоугольной системе координат с центром в точке  $(\varphi, \psi)$  и осями, введенными по аналогии с осями системы-С (такая система будет называться “система-Р”). Определим вектор  $\vec{e}_l = (-e_2 \cos \alpha, e_1 \cos \alpha, -\sin \alpha)$ , который лежит в плоскости, касательной к поверхности разлома в данной точке, и перпендикулярен вектору  $\vec{e}_t$  (здесь  $\alpha$  – угол наклона разлома к поверхности Земли). Введем также вектор  $\vec{e}_n = (-e_2 \sin \alpha, e_1 \sin \alpha, -\cos \alpha)$ , который перпендикулярен упомянутой плоскости. Правая тройка  $(\vec{e}_t, \vec{e}_l, \vec{e}_n)$  образует прямоугольную систему координат с центром в точке  $(\varphi, \psi)$  – “систему-Т”. Оказывается, с помощью введенных двух систем координат достаточно просто записываются соотношения для нахождения смещений и упругих сил. Пусть  $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$  – вектор относительного смещения блоков в точке  $(\varphi, \psi)$  в системе-Р. Компоненты смещения в плоскости, касательной к поверхности разлома в данной точке, и в направлении, перпендикулярном к ней (т.е. в системе-Т), связаны с  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$  следующими соотношениями:

$$\Delta_t = \Delta_x e_1 + \Delta_y e_2, \quad \Delta_l = -\Delta_x e_2 \cos \alpha + \Delta_y e_1 \cos \alpha - \Delta_z \sin \alpha,$$

$$\Delta_n = -\Delta_x e_2 \sin \alpha + \Delta_y e_1 \sin \alpha + \Delta_z \cos \alpha.$$

Упругая сила  $(f_t, f_l, f_n)$ , действующая на единицу площади разлома, определяется из формул

$$f_t = K_t(\Delta_t - \delta_t), \quad f_l = K_l(\Delta_l - \delta_l), \quad f_n = K_n(\Delta_n - \delta_n). \quad (2)$$

Здесь  $\delta_t, \delta_l, \delta_n$  – соответствующие неупругие смещения, зависимость от времени которых описывается уравнениями

$$\frac{d\delta_t}{dt} = W_t f_t, \quad \frac{d\delta_l}{dt} = W_l f_l, \quad \frac{d\delta_n}{dt} = W_n f_n. \quad (3)$$

Коэффициенты  $K_t, K_l, K_n, W_t, W_l$  и  $W_n$  в (2) и (3) могут быть различными для разных разломов. Теперь необходимо вычислить компоненты относительного смещения  $\Delta_x, \Delta_y$  и  $\Delta_z$ , используя формулы (1). Имеем

$$\Delta_x = \Delta_x^i - \Delta_x^j, \quad \Delta_y = \Delta_y^i - \Delta_y^j, \quad \Delta_z = \Delta_z^i - \Delta_z^j, \quad (4)$$

где  $(\Delta_x^i, \Delta_y^i, \Delta_z^i)$  и  $(\Delta_x^j, \Delta_y^j, \Delta_z^j)$  – векторы смещения точки  $(\varphi, \psi)$  в системе-Р как точки блоков  $i$  и  $j$ , соответственно. Теперь, чтобы получить компоненты этих векторов, следует найденные согласно (1) смещения блоков  $i$  и  $j$  в системе-С умножить на матрицу перехода от системы-С, соответствующей блоку, к системе-Р. (Ввиду громоздкости выкладок эти вычисления в настоящей статье опущены. Отметим, что таким способом могут быть найдены смещения для точек как на любом разломе, так и на подошве блока.)

В системе координат, связанной с точкой подошвы  $(\varphi, \psi)$ , т. е. в системе-Р, упругая сила  $(f_x^u, f_y^u, f_z^u)$ , действующая на единицу площади, имеет вид

$$f_x^u = K_u(\Delta_x^u - \delta_x^u), \quad f_y^u = K_u(\Delta_y^u - \delta_y^u), \quad f_z^u = K_u^n \Delta_z^u, \quad (5)$$

где  $\delta_x^u, \delta_y^u$  – соответствующие неупругие смещения, зависимость от времени которых описывается уравнениями

$$\frac{d\delta_x^u}{dt} = W_u f_x^u, \quad \frac{d\delta_y^u}{dt} = W_u f_y^u, \quad (6)$$

причем предполагается, что неупругое смещение в вертикальном направлении (в направлении оси  $z$  системы-Р) отсутствует. Коэффициенты  $K_u, K_u^n$  и  $W_u$  в (5) и (6) могут быть различными для разных блоков. Вектор  $(\Delta_x^u, \Delta_y^u, \Delta_z^u)$  относительного смещения блока и подстилающей среды в точке  $(\varphi, \psi)$ , взятый в системе-Р, находится, согласно (1) и (4), по аналогии со случаем определения смещения точки разлома.

Как сказано выше, смещения блоков и углы их поворотов находятся из условия равенства нулю суммы действующих на блок сил и суммарного их момента, которые выписываются в соответствующей блоку

системе-С. Это условие обеспечивает состояние квазистатического равновесия системы и одновременно является условием минимума энергии.

Отметим, что зависимость сил и моментов от смещений и поворотов блоков является линейной, поэтому система уравнений для определения этих величин также линейна. Она может быть получена в соответствии с формулами для определения сил

$$\mathbf{A}\mathbf{w} = \mathbf{b}. \quad (7)$$

Здесь компонентами неизвестного вектора  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_{6n})$  являются смещения и углы поворота внутренних блоков ( $n$  – число таких блоков), т.е.  $w_{6m-5} = x_m$ ,  $w_{6m-4} = y_m$ ,  $w_{6m-3} = z_m$ ,  $w_{6m-2} = \gamma_m$ ,  $w_{6m-1} = \beta_m$ ,  $w_{6m} = \lambda_m$  ( $m = 1, 2, \dots, n$ ). Элементы матрицы  $\mathbf{A}$  ( $6n \times 6n$ ) и вектора  $\mathbf{b}$  ( $6n$ ) определяются из формул, которые выводятся из (1)–(6) с пересчетом в систему-С сил и моментов. (В настоящей статье эти формулы опущены для краткости изложения.)

### 1.3. Дискретизация

В вычислительных целях осуществляется дискретизация по времени путем введения шага  $\Delta t$  и дискретных моментов времени  $t_i = t_0 + i\Delta t$  ( $i = 1, 2, \dots$ ), в которые рассматривается состояние блоковой структуры. Переход структуры от состояния в момент времени  $t_i$  к состоянию в момент  $t_{i+1}$  происходит по следующей схеме:

- а) определяются новые значения неупругих смещений из уравнений (3) и (6);
- б) вычисляются векторы сдвига и углы поворота для граничных блоков и подстилающей среды в момент  $t_{i+1}$ ;
- в) определяются компоненты вектора  $\mathbf{b}$  в системе (7), после чего она используется для расчета смещений и углов поворота внутренних блоков.

Отметим, что поскольку элементы матрицы  $\mathbf{A}$  в (7) не зависят от времени, она может быть вычислена один раз в начале процесса. Для вычисления различных криволинейных интегралов выполняется дискретизация (разбиение на ячейки) сферической поверхности подошв блоков, а также дуг сегментов разломов, при этом предполагается, что значения сил и неупругих смещений совпадают для всех точек ячейки. Напомним, что (по допущению) дискретизация сегментов по глубине не делается – мы полагаем, что при вычислениях на разломе можно использовать характеристики ячейки, принадлежащей линии разлома на поверхности Земли.



#### 1.4. Землетрясение и крип

При вычислении компонент силы, действующей на разломе, определяется также отношение

$$\varkappa = \frac{\sqrt{f_t^2 + f_l^2}}{P - f_n}, \quad (8)$$

где  $P$  – параметр, который может интерпретироваться как разность между литостатическим и гидростатическим давлением. Для каждого разлома задаются значения трех порогов  $B > H_f \geq H_s$ . Предполагается, что начальные условия таковы, что неравенство  $\varkappa < B$  выполняется во всех ячейках структуры. Если в момент времени  $t_i$  в какой-либо ячейке значение отношения  $\varkappa$  достигает или превосходит значение порога  $B$  для соответствующего разлома, это интерпретируется как землетрясение. В такой ситуации во всех ячейках, в которых  $\varkappa \geq B$  (таких ячеек может быть несколько), происходит сброс напряжения посредством изменения значений неупругих смещений  $\delta_t, \delta_l, \delta_n$  по формулам

$$\delta_t^e = \delta_t + \gamma^e \xi_t f_t, \quad \delta_l^e = \delta_l + \gamma^e f_l, \quad \delta_n^e = \delta_n + \gamma^e \xi_n f_n, \quad (9)$$

где  $\delta_t, \delta_l, \delta_n, f_t, f_l, f_n$  – “старые” значения неупругих смещений и компонент вектора силы, действующей на единицу площади. Коэффициенты  $\xi_t = K_l/K_t$  ( $\xi_t = 0$  при  $K_t = 0$ ) и  $\xi_n = K_l/K_n$  ( $\xi_n = 0$  при  $K_n = 0$ ) отражают предположение, что одно и то же значение упругой силы приводит к различным скоростям изменения различных неупругих смещений. Коэффициент  $\gamma^e$  задается формулой

$$\gamma^e = \frac{\sqrt{f_t^2 + f_l^2} - H_f(P - f_n)}{K_l \sqrt{f_t^2 + f_l^2} + K_n H_f \xi_n f_n}, \quad (10)$$

при этом для “новой” величины  $\varkappa$  справедливо равенство  $\varkappa = H_f$ , что следует из (2), (8)–(10). Здесь необходимо отметить следующие моменты. Новые значения упругих сил, вычисленные по формулам (2) и (9), должны иметь те же знаки, что и значения в момент перед землетрясением. Поэтому случаи, когда (а)  $(1 - K_n \xi_n \gamma^e) < 0$  (и  $f_n$  меняет знак) и (б)  $(1 - K_l \gamma^e) < 0$  (и  $f_l, f_t$  меняют знаки; доказывается, что это возможно только при  $f_n < 0$ ) следует рассматривать отдельно. В обоих случаях полагаем

$$\delta_n^e = \Delta_n, \quad \gamma^e = \frac{\sqrt{f_t^2 + f_l^2} - H_f P}{K_l \sqrt{f_t^2 + f_l^2}}.$$

После описанных выше пересчетов находится правая часть системы уравнений (7) – вектор  $\mathbf{b}$ , затем определяются векторы сдвига и углы поворота блоков. Если вновь в какой-либо ячейке  $\varkappa \geq B$ , то вся процедура повторяется. Когда во всех ячейках на разломах  $\varkappa < B$ , вычисления продолжаются по обычной схеме. При этом считается, что ячейки, в которых произошли землетрясения, находятся в состоянии крипа. Это означает, что для них в уравнениях (3) для вычисления значений неупругих смещений используются параметры  $W_t^s$  ( $W_t^s > W_t$ ),  $W_l^s$  ( $W_l^s > W_l$ ), и  $W_n^s$  ( $W_n^s > W_n$ ) до тех пор, пока  $\varkappa > H_s$ , после чего ячейка возвращается в нормальное состояние с использованием коэффициентов  $W_t, W_l, W_n$ .

Принадлежащие одному разлому ячейки, в которых произошло землетрясение в момент времени  $t_i$ , объединяются в одно событие, параметрами которого являются:

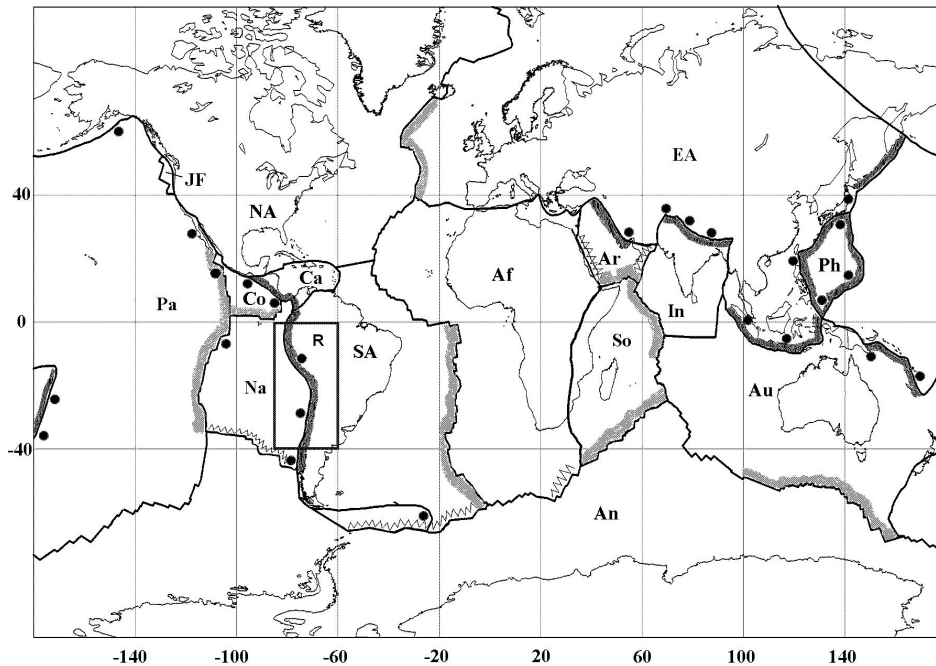
- а) время –  $t_i$ ;
- б) географические координаты эпицентра – взвешенная сумма координат ячеек, в которых произошло землетрясение, с использованием в качестве весов площадей ячеек, деленных на их сумму;
- в) магнитуда – величина, вычисленная по формуле [13],

$$M = 0.98 \lg S + 3.93, \quad (11)$$

где  $S$  – сумма площадей ячеек, вовлеченных в землетрясение. Глубина землетрясения в рассматриваемой модификации сферической модели не определяется, а для вычисления площадей ячеек используются глубина сферического слоя и угол наклона соответствующего разлома.

## 2. Глобальная система тектонических плит: структура с граничными блоками

Численное моделирование динамики глобальной системы тектонических плит было начато с варианта, в котором самые крупные блоки рассматривались как граничные. Структура включала следующие плиты: в качестве внутренних – Южно-Американскую, Наска, Кокос, Карибскую, Африканскую, Аравийскую, Сомалийскую, Индийскую, Филиппинскую и Австралийскую; в качестве граничных – Северо-Американскую, Евразийскую, Антарктическую и Тихоокеанскую (см. рис. 2). Таким образом, структура содержала 10 блоков, 141 вершину, 150 разломов (и сегментов) и 4 граничных блока. Углы наклона разломов на границах плит с явно выраженной субдукцией (например, Южно-Американской – Наска) были равны  $50^\circ$ , все прочие разломы имели наклон  $90^\circ$ .



**Рис. 2.** Результаты моделирования характера межплитового взаимодействия и пространственное распределение сильнейших землетрясений: светлая штриховка – дивергентные границы плит, темная – конвергентные границы плит, зубчатая – трансформные границы плит; кружки – эпицентры модельных событий, происходящих на границах; жирные линии – границы плит, буквой R отмечен регион, используемый в дальнейшем. Здесь и в таблицах, приведенных ниже, используются следующие обозначения плит: Na – Наска, SA – Южно-Американская, Co – Кокос, Ca – Карибская, NA – Северо-Американская, Pa – Тихоокеанская, Af – Африканская, An – Антарктическая, EA – Евразийская, Ar – Аравийская, In – Индийская, So – Сомалийская, Ph – Филиппинская, Au – Австралийская, JF – Хуан де Фука.

Дискретизация определялась следующими значениями параметров: шаг по времени – 0.01, шаг по пространству – 3 км (для сегментов) и  $0.5^\circ$  (для подошв блоков). Подошва самого крупного блока была разделена на 25 000 ячеек, самый длинный сегмент – на 1000 ячеек. Значения коэффициентов в формулах для вычисления сил и неупругих смещений (1)–(6) были заданы в соответствии с опытом предыдущих исследований двумерной плоской блоковой модели (см., например, [2, 6]) с учетом специфики сферической модели. Во всех экспериментах, описанных ниже, использовались следующие значения коэффициентов, определяющих взаимодействие блоков и подстилающей среды:  $K_u = 10$ ,  $K_u^n = 20$ ,  $W_u = 0.1$ . В то же время коэффициенты для разломов варьировались с целью воспроизведения в модели некоторых свойств реальной сейсмичности. Параметры движения подстилающей среды и граничных блоков взяты из модели HS2-NUVEL-1 [14], дополнительно введена только Сомалийская плита [15].

Цель первого вычислительного эксперимента – анализ зависимости динамики структуры и количества модельных событий от характера движения граничных блоков (значения параметров приведены в табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Структура с граничными блоками:  
параметры и результаты моделирования

| Вариант | Параметры разломов  | Интервал моделирования (безразмерное время) | Граничные блоки с ненулевыми скоростями | Число модельных событий |
|---------|---|---|---|-------------------------|
| 0       | $K_t = K_l = K_n = 0.01,$<br>$W_t = W_l = W_n = 0.01$   | 20  | NA, EA, An, Pa                          | 38 740                  |
| 1       |   |   | EA, An, Pa                              | 34 486                  |
| 2       |   |   | NA, An, Pa                              | 46 013                  |
| 3       |   |   | NA, EA, Pa                              | 39 866                  |
| 4       |   |   | NA, EA, An                              | 35 270                  |
| 5       | Для разломов на границах плит Af/SA, Na/Pa, Co/Pa, а также юг, восток и север плиты So:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.001,$<br>$W_t = W_l = W_n = 0.1.$<br>Для прочих разломов:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.01,$<br>$W_t = W_l = W_n = 0.01.$ | 200   | NA, EA, An, Pa                          | 714 364                 |

Варианты 0–4 просчитаны с заданными для различных граничных блоков ненулевыми скоростями движения. Подстилающая среда во всех вариантах считалась неподвижной, таким образом, движение системы определялось только поведением граничных блоков. Для получения модельных землетрясений на относительно небольшом интервале вычислений были существенно снижены все пороги для стресса (8) на сегментах. Получены следующие результаты: самая большая активность достигнута в варианте 2, самая малая – в вариантах 1 и 4. Тенденция сохраняется при продолжении счета. Результат, на наш взгляд, находится в соответствии с качественными рассуждениями о возникающих напряжениях на основе известных данных о движении плит [14], хотя строгое обоснование требует дополнительных расчетов и выкладок.

Для получения информации о характере взаимодействия плит, о наиболее активных сейсмических границах и пространственном распределении сильнейших событий был просчитан вариант 5 до 200 единиц безразмерного времени, при этом подстилающая среда двигалась в соответствии с моделью HS2-NUVEL-1. В начальные данные были внесены следующие изменения: для *крупных* разломов (разделяющих *крупные структуры*) коэффициенты  $K_t$ ,  $K_l$ ,  $K_n$  уменьшены в 10 раз,  $W_t$ ,  $W_l$ ,  $W_n$  увеличены в 10 раз (см. табл. 1), исходя из того [6], что:

(1) одна и та же величина относительного смещения соседних блоков, за вычетом неупругого смещения, должна вызывать на крупных разломах меньшую силу (что достигается уменьшением  $K_t$ ,  $K_l$  и  $K_n$ ),

(2) скорость роста неупругого смещения при одном и том же значении силы должна быть больше для крупных разломов, представляющих собой более раздробленные и, соответственно, менее упругие и более вязкие зоны, чем разломы, разделяющие мелкие структуры (что достигается увеличением коэффициентов  $W_t$ ,  $W_l$ ,  $W_n$ ).

Было исследовано поведение граничных точек, принадлежащих границам плит, для которых четко определяется один из трех типов (дивергентные, конвергентные, трансформные). Рассмотрены такие характерные зоны [16], как, например, границы плит Южно-Американская/Наска, Тихоокеанская/Наска, Южно-Американская/Африканская, Индийская/Евразийская, вокруг Филиппин и т.д. С помощью двух смещений граничной точки в связанной с ней системе координат (как точки “правого” и “левого” блоков) вычислялось ее относительное смещение. По относительным смещениям граничных точек установлен качественный характер взаимодействия между плитами вдоль их границ, именно – определены модельные дивергентные (зоны растяжения), конвергентные (зоны сжатия) и трансформные (зоны скольжения) границы плит. Кроме того, получено пространственное распределение сильнейших модельных событий. Вся эта информация представлена на рис. 2.

Обнаружено принципиальное сходство в расположении упомянутых зон при сравнении модельных и реальных данных (см., например, [17]). Был проведен сравнительный анализ искусственного и реального каталога, извлеченного из глобального каталога NEIC [18] и включающего события с магнитудой не менее 5.0 за период времени 01.01.1900 – 31.12.1998 без ограничений по глубине и площади. Изучение пространственного распределения эпицентров модельных событий позволяет сделать вывод о наиболее активных сейсмических границах в модели. Это границы плит Наска/Южно-Американская, Кокос/Карибская, Индийская/Евразийская, в районе Калифорнии, Аравийская/Евразийская, юго-восток, восток, северо-восток и особенно север Австралийской плиты, вокруг Филиппин и другие. Сейсмическая активность крайне низка на таких границах, как юг Тихоокеанской плиты, плит Наска/Тихоокеанская, восток Африканской плиты и плит Индийская/Австралийская, Южно-Американская/Африканская.

Напомним, что отсутствие дискретизации по глубине и некоторые другие упрощения, принятые в сферической блоковой модели [4, 5] не дают возможности делать какие-либо выводы об аппроксимации реального сейсмического потока модельным в конкретной точке или в от-

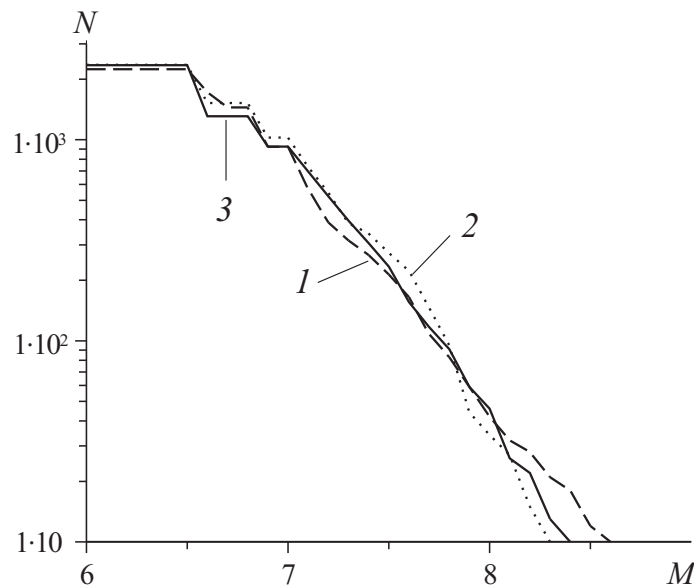
носителем небольшого региона. Однако соответствие, существующее между полученными сейсмически активными и “спокойными” регионами и реальными, является позитивным фактом, свидетельствующим в пользу адекватности модели.

### **3. Глобальная система тектонических плит: структура без граничных блоков**

Рассмотрим замкнутую блоковую структуру, покрывающую всю поверхность Земли. Она не имеет внешних границ, поэтому для нее не определяются граничные блоки (и, стало быть, законы их движения). Следует отметить, что возможность рассмотрения структуры без граничных блоков является характерной особенностью сферической модели (по сравнению с плоскими модификациями). Моделирование динамики такой структуры требует гораздо больше памяти и времени работы процессора, чем вариант, описанный в предыдущем разделе, поскольку блоки, бывшие граничными, также теперь дискретизируются. Для проведения вычислительных экспериментов с такой структурой были модифицированы параллельные программы [19, 20]. Опишем некоторые результаты моделирования.

Замкнутая структура включает все плиты (упомянутые в разд. 2) в качестве внутренних и граничных блоков и, дополнительно, плиту Хуан де Фука (см. рис. 2). Таким образом, в структуре имеется 15 блоков, 186 вершин и 199 разломов (и сегментов). В первом расчетном варианте все коэффициенты и шаги дискретизации определялись так же, как в варианте 5 из предыдущего раздела (при этом подошва самого крупного блока – Тихоокеанская плита – была разделена на 90 000 ячеек). Движение подстилающей среды определялось как вращение на сфере согласно модели HS2-NUVEL-1 [14]. Вычислительные эксперименты, с одной стороны, продемонстрировали идентичность результатов моделирования для одних и тех же регионов, рассматриваемых как часть различных (с граничными блоками и без них) блоковых структур (одна из иллюстраций такого рода приведена на рис. 3); с другой стороны – обнаружили некоторые новые свойства, нуждающиеся в дополнительном анализе (например, различие в вертикальных компонентах движений блоков – так в зоне субдукции плит Наска/Южно-Американская и других вертикальная составляющая во втором варианте значительно ближе к ожидаемой).

С помощью относительных смещений граничных точек проанализирован качественный характер взаимодействия между плитами. Получены модельные землетрясения. Оказалось, что типы сейсмических границ и распределение сильнейших событий полностью соответствуют



**Рис. 3.** Графики повторяемости, построенные по трем модельным каталогам для сферического «прямоугольного» региона,  $\psi = 85^\circ\text{--}60^\circ\text{W}$  и  $\varphi = 40^\circ\text{--}0^\circ\text{S}$  (отмечен буквой «R» на рис. 2; выбор объясняется тем, что данный регион входит во все блоковые структуры, к которым применялась сферическая модель). Цифры у кривых: 1 – для структуры из 4-х внутренних блоков (Южно-Американский регион, блоки SA, Na, Co, Ca на рис. 2, результаты моделирования описаны в [4]), 2 – для структуры из 10 блоков (вариант 5 из разд. 2), 3 – для структуры из 15 блоков (без граничных);  $N$  – аккумулярованное число землетрясений,  $M$  – магнитуда

варианту 5 (разд. 2) (фактически результаты моделирования, приведенные на рис. 2, совпадают для структур с граничными блоками и без них). Таким образом, величины, полученные при моделировании структуры с граничными блоками и обнаружившие сходство с реальными, удалось повторить и для структуры без граничных блоков. В то же время, некоторые параметры (например, вертикальная составляющая движения блоков, количественные характеристики движений) существенно ближе к реальным во втором случае, что, скорее всего, объясняется тем, что при выделении граничных блоков их движения не моделируются (считаются известными), при этом разделяющие их сегменты фактически исключаются из рассмотрения (землетрясения на них не происходят). В результате было принято решение продолжать вычислительные эксперименты только с системой тектонических плит без выделения граничных блоков.

Было проведено две серии вычислительных экспериментов с целью выяснения зависимости параметров соотношения Гутенберга–Рихтера для сейсмичности в глобальном масштабе и интенсивности сейсмического потока (1) от значений коэффициентов в формулах для вычисле-

ния сил и неупругих смещений и (2) от величины шага дискретизации по сегментам, существенным образом определяющего диапазон изменения магнитуды модельных событий.

В первой серии экспериментов рассмотрены варианты, в которых изменялись коэффициенты, а шаги дискретизации для сегментов и подошв блоков были постоянными (табл. 2, варианты 1.1–1.4).

Вторая серия экспериментов содержит варианты с различными шагами дискретизации для сегментов (табл. 2, варианты 2.1–2.3).

ТАБЛИЦА 2. Структура, замкнутая на сфере: параметры

| Вариант | Дискретизация  | Параметры разломов  | Интервал моделирования |
|---------|--|---|------------------------|
| 1.1     | Шаг по времени 0.01.<br>Шаг по пространству:<br>для сегментов 10 км,<br>для подошв блоков 0.5° | $K_t = K_l = K_n = 0.03,$<br>$W_t = W_l = W_n = 0.01$   | 200                    |
| 1.2     |  | Для разломов, формирующих границы плит Af/SA, Na/Pa, Co/Pa; юг, восток и север плиты So:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.001,$<br>$W_t = W_l = W_n = 0.1.$<br>Для прочих разломов:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.01,$<br>$W_t = W_l = W_n = 0.01.$                  |                        |
| 1.3     |  | Для разломов, формирующих границы плит Af/SA, Na/Pa, Co/Pa, EA/NA; юг, восток и север плиты So; юг плиты Pa:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.001,$<br>$W_t = W_l = W_n = 5.$<br>Для прочих разломов:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.01,$<br>$W_t = W_l = W_n = 0.1.$ |                        |
| 1.4     |  | Для разломов, формирующих границы плит NA/SA, Af/SA, Na/Pa, Co/Pa, In/Au, EA/NA; юг плиты Pa:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.001,$<br>$W_t = W_l = W_n = 5.$   |                        |
| 2.1     | Шаг по времени 0.01.<br>Шаг по пространству:<br>для сегментов 4 км,<br>для подошв блоков 0.5°  | Для разломов, формирующих границы плит SA/An, Af/An, Af/So, северо-восток плиты Af; юг, восток и север плиты So; юг плиты Au:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.005,$<br>$W_t = W_l = W_n = 1.$   | 100                    |
| 2.2     |  | Для разломов, формирующих границы – север плиты Af и север плиты Au; регион Калифорнии:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.02,$<br>$W_t = W_l = W_n = 0.05.$   |                        |
| 2.3     |  | Для прочих разломов:<br>$K_t = K_l = K_n = 0.01,$<br>$W_t = W_l = W_n = 0.1.$   |                        |



ТАБЛИЦА 3. Структура, замкнутая на сфере:  
результаты моделирования

| Вариант | Число модельных событий | Магнитудный интервал для графика | Угловой коэффициент графика повторяемости | Ошибка аппроксимации |
|---------|-------------------------|----------------------------------|---|----------------------|
| 1.1     | 1 478 070               | –                                | –   | –                    |
| 1.2     | 653 125                 | [6.5, 8.0]                       | 1.485                                     | 0.026                |
| 1.3     | 638 177                 | [6.5, 8.0]                       | 1.450                                     | 0.020                |
| 1.4     | 617 551                 | [6.5, 8.0]                       | 1.388                                     | 0.020                |
| 2.1     | 295 096                 | [6.8, 8.1]                       | 1.424                                     | 0.014                |
| 2.2     | 466 670                 | [6.5, 8.1]                       | 1.400                                     | 0.020                |
| 2.3     | 684 308                 | [5.9, 8.1]                       | 1.295                                     | 0.043                |

*Примечание.* Графики повторяемости аппроксимировались линейной регрессией  $\lg N = a - bM$ , построенной по методу наименьших квадратов. Под ошибкой аппроксимации понимается среднее расстояние между точками графика и построенной прямой

Значения коэффициентов для вычисления сил и неупругих смещений в зависимости от расположения разлома представлены также в табл. 2. Основные численные результаты экспериментов, представленные в табл. 3, указывают на следующие факты.

1. В первой серии экспериментов модельный каталог, полученный в варианте 1.1, содержит аномально большое число событий, землетрясения происходят на всех без исключения сегментах, пространственное распределение эпицентров не соответствует реальному. Очевидна необходимость учета характеристик разломов и разделяемых ими блоков посредством ввода различных значений коэффициентов для различных частей структуры. Изменения значений параметров основаны на реальной сейсмичности: коэффициенты  $K_t$ ,  $K_l$ ,  $K_n$  уменьшались, а коэффициенты  $W_t$ ,  $W_l$ ,  $W_n$  увеличивались для разломов с крайне низким уровнем реальной сейсмичности; обратная зависимость соответствовала активным разломам.

В варианте 1.2 пространственное распределение модельных эпицентров, в принципе, уже соответствует реальному [18], причем в последующих вариантах сходство усиливается. Это позволяет перейти к анализу параметров закона Гутенберга–Рихтера, в частности – угла наклона графика повторяемости, который характеризует соотношение количества сильных и слабых событий.

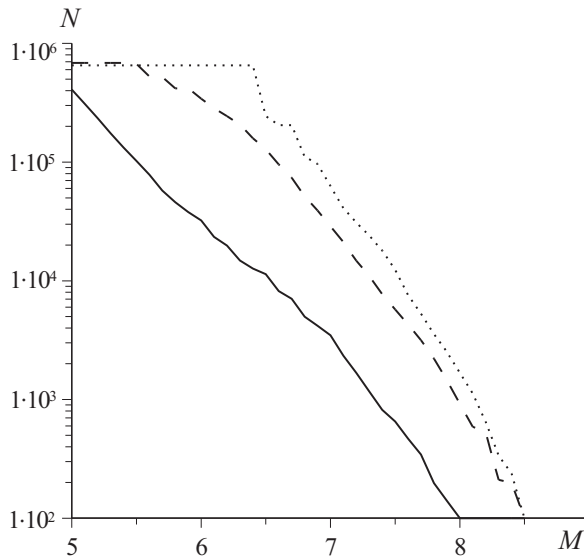
Ввиду совпадения диапазона изменения модельной магнитуды [6.4, 8.6] для всех вариантов первой серии, при построении графика повторяемости использовался один и тот же магнитудный интервал  $M \in [6.5, 8.0]$  и один и тот же шаг по магнитуде  $\Delta M = 0.1$ . Отметим, что угловой ко-

эффицент графика, полученного по реальным данным для глобальной сейсмичности за последние 100 лет, приблизительно равен единице. Таким образом, в вариантах 1.2–1.4 наблюдается некоторое “улучшение” этой характеристики, хотя и незначительное.

2. Во второй серии экспериментов диапазон изменения модельной магнитуды варьировался в зависимости от шага дискретизации для сегментов. В качестве критерия выбора промежутка для исследования рассматривался промежуток максимальной длины, на котором график повторяемости, построенный с шагом по магнитуде  $\Delta M = 0.1$ , “достаточно хорошо” аппроксимировался прямой  $\lg N = a - bM$  по методу наименьших квадратов.

Уменьшение шага пространственной дискретизации для сегментов существенно расширяет диапазон изменения магнитуды модельных событий, а именно – от [6.4, 8.6] при шаге 10 км до [5.4, 8.6] при шаге 1 км. (Это увеличение, очевидно, объясняется зависимостью магнитуды модельного события от площади составляющих его ячеек (11) и уменьшением площади одной ячейки дискретизации при уменьшении шага.) Кроме того, при уменьшении шага дискретизации для сегментов одновременно с расширением диапазона изменения модельной магнитуды увеличивается общее количество событий. Однако существенного изменения количества событий в диапазоне магнитуд, который присутствует во всех полученных модельных каталогах, не наблюдается. Увеличение объясняется прежде всего появлением событий с меньшими магнитудами. Таким образом, изменение шага дискретизации для сегментов может использоваться (в том числе) для регулирования интенсивности потока модельных землетрясений. Важно, что уменьшение шага дискретизации приводит к “более линейному”, в общем диапазоне магнитуд, графику повторяемости и к приближению угла его наклона к реальной величине.

Анализ результатов первой и второй серий вычислительных экспериментов приводит к выводу: изменение значений коэффициентов для нахождения сил и неупругих смещений на разломах с учетом реальных данных и уменьшение шага дискретизации для сегментов “улучшают” свойства модельного потока землетрясений. Наилучшее соответствие между углом наклона модельного графика повторяемости и реального получено в варианте 2.3. На рис. 4 приведены модельные графики повторяемости для вариантов 2.3 и 1.2 (для сравнения) и график для реальной сейсмичности, построенный по выборке из глобального каталога NEIC событий с магнитудой не менее 5.0 за период времени 01.01.1900–31.12.1998 без ограничений по глубине и площади.



**Рис. 4.** Графики повторяемости, построенные по реальному каталогу (сплошная линия) и двум модельным (вариант 1.2 – пунктир, вариант 2.3 – штриховая линия);  $N$  – аккумулярованное число землетрясений,  $M$  – магнитуда

Модельные графики на рис.4 являются “достаточно линейными”, однако в области малых магнитуд они существенно отличаются от графика повторяемости, построенного по реальному каталогу, поэтому число слабых событий в модели необходимо уменьшить. Для этого планируется провести серию экспериментов по изменению параметров движения подстилающей среды для различных блоков, поскольку представляется, что именно эти характеристики должны влиять на соотношение количества слабых и сильных землетрясений. Кроме того, предполагается исследовать зависимость свойств модельного каталога от параметров, “привязывающих” блоки к подстилающей среде.

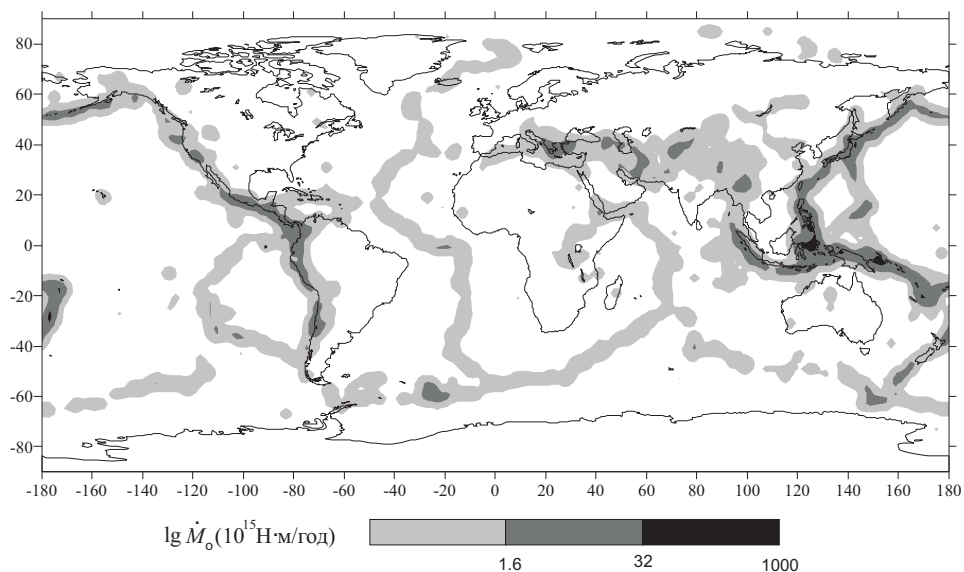
Для варианта 1.4 проведены дополнительные исследования с целью установить соотношение между единицей безразмерного модельного времени и реальным интервалом. Проанализированы относительные скорости смещения характерных точек на границах плит для модельной динамики и модели HS2-NUVEL-1 [14]. Результаты приведены в табл.4. Система координат, в которой рассматривается относительное смещение граничной точки, связана с этой точкой (начало системы координат совпадает с ней, ось  $x$  направлена по касательной к параллели на восток, ось  $y$  – по касательной к меридиану на север). Сегмент разлома, которому принадлежит точка, разделяет блоки I и II, при этом блок I считается неподвижным, а блок II – движущимся относительно блока I. Вектор относительной скорости  $\vec{v}_i$  имеет координаты  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ ,  $i = 1, 2$ , его направление характеризует величина  $\frac{\Delta x_i}{\Delta y_i}$ .

ТАБЛИЦА 4. Скорости относительного смещения граничных точек в модели движения плит HS2-NUVEL-1 (см/год) – вариант 1 и в блоковой модели (см/200 единиц безразмерного времени) – вариант 2

| Координаты точки |                | Блок |    | Вариант 1    |              | Вариант 2    |              | $\frac{\Delta x_1}{\Delta y_1}$ | $\frac{\Delta x_2}{\Delta y_2}$ | $\frac{ \vec{v}_2 }{ \vec{v}_1 }$ |
|------------------|----------------|------|----|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Широта, град.    | Долгота, град. | I    | II | $\Delta x_1$ | $\Delta y_1$ | $\Delta x_2$ | $\Delta y_2$ |                                 |                                 |                                   |
| -21.74           | -71.43         | SA   | N  | 7.8          | 1.8          | 1556         | 373          | 4.33                            | 4.17                            | 199.9                             |
| -9.59            | -13.23         | SA   | Af | 3.2          | 0.7          | 652          | 127          | 4.57                            | 5.13                            | 202.8                             |
| 11.17            | -89.07         | Ca   | Co | 3.75         | 7.01         | 715          | 1230         | 0.53                            | 0.57                            | 179.0                             |
| -18.62           | -112.64        | Pa   | Na | 14.3         | -3.3         | 2975         | -635         | -4.33                           | -4.69                           | 207.3                             |
| 14.16            | 52.57          | So   | Ar | 0.56         | 1.8          | 107          | 307          | 0.31                            | 0.35                            | 172.5                             |
| 28.14            | 84.75          | EA   | In | 1.2          | 4.9          | 217          | 926          | 0.24                            | 0.23                            | 188.5                             |
| -49.86           | 130.57         | An   | Au | 0.86         | 7.26         | 154          | 1397         | 0.12                            | 0.11                            | 192.2                             |
| -7.00            | 149.58         | Pa   | Au | 10.14        | 3.26         | 1997         | 625          | 3.1                             | 3.2                             | 196.4                             |
| 29.09            | 130.54         | EA   | Ph | -4.0         | 3.2          | -822         | 625          | -1.25                           | -1.32                           | 201.6                             |
| 36.92            | -119.91        | NA   | Pa | -2.68        | 3.84         | -536         | 756          | -0.7                            | -0.71                           | 197.9                             |

Ориентируясь на количественные характеристики смещения точек, можно сделать вывод: с большой вероятностью для принятых в модели размерностей переменных и скоростей движения единица безразмерного модельного времени соответствует 1 году. Очевидно, данная гипотеза нуждается в тщательной проверке, прежде всего, посредством дальнейшего сравнительного анализа свойств модельного и реального каталогов. Планируется изучить влияние модельных параметров на величину периода возврата сильных событий в различных регионах, что весьма важно для получения более точных оценок соотношения единиц модельного и реального времени.

Проведен сравнительный анализ распределений скорости выделения суммарного сейсмического момента для реального и модельного каталогов. В данном случае для обобщенной характеристики реальной сейсмичности выбран каталог СМТ [21], более однородный, чем NEIC. Анализировались землетрясения с 1976 по 2000 гг., с глубиной центра момента тензора меньшей или равной 70 км и с плотностью сейсмического момента большей, чем  $10^{17}$  Н×м, что приблизительно соответствует событиям с  $M_s > 5$  (всего такой каталог содержит 9 121 землетрясение). График повторяемости для сейсмического момента достаточно близок к линейному, годовое число событий в целом несколько возрастает в течение 25-летнего интервала. Распределение скорости выделения суммарного сейсмического момента  $M_0$  приведено на рис. 5. Сейсмический момент суммирован по сетке  $2 \times 2$  градуса, прологариф-



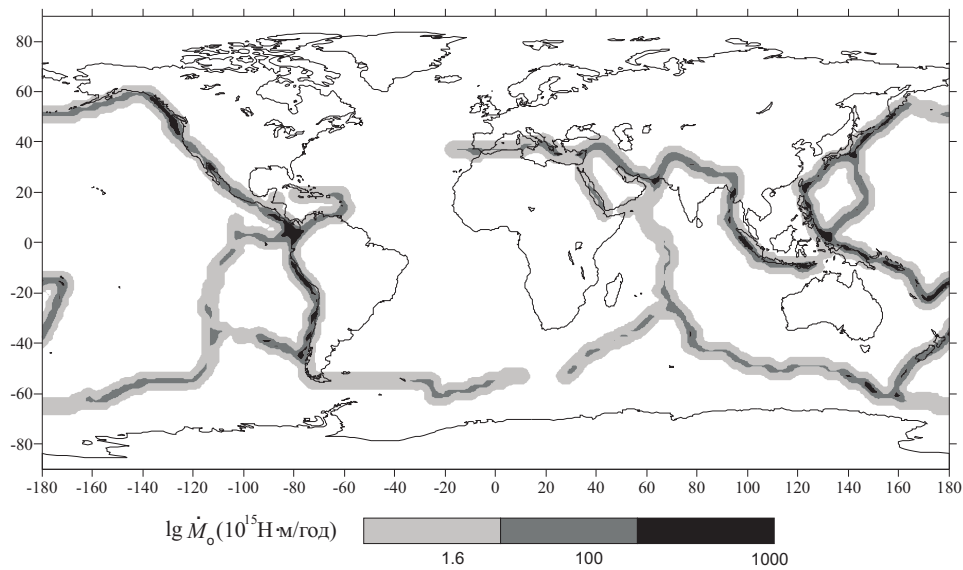
**Рис. 5.** Распределение скорости выделения суммарного сейсмического момента для каталога СМТ (1976–2000 гг.)

мирован и сглажен с использованием скользящего окна с размером ячейки  $6 \times 6$  градусов и с взвешенными относительно расстояния значениями.

Отчетливо выделяется Тихоокеанский пояс, особенно его западная и восточная экваториальные части. Альпийско-Гималайский складчатый пояс характеризуется широкой зоной рассеянной сейсмичности. Другие границы (особенно дивергентные) часто намечены прерывистыми зонами повышенной скорости выделения сейсмического момента.

Для сопоставления этих данных с результатами моделирования аналогичная величина была сосчитана для модельного каталога (вариант 2.1, 100 единиц безразмерного времени, 295 096 событий) на основании пересчета магнитуды в сейсмический момент по формуле (см. [22])  $\lg M_0 = 1.5M_s + 9.14$ , где  $M_0$  – сейсмический момент землетрясения,  $M_s$  – его магнитуда. Затем распределение скорости выделения суммарного сейсмического момента рассчитывалось так же, как и в случае реального каталога (рис. 6).

Модельный каталог характеризуется гораздо более выдержанным распределением момента вдоль границы, что, естественно, объясняется намного более однородными условиями на границах плит в модели. Отсутствие землетрясений в “океанических рифтовых зонах” модели связано с подбором параметров. Количественное сравнение распределения сейсмичности в обоих каталогах возможно, но (на наш взгляд) на дан-



**Рис. 6.** Распределение скорости выделения суммарного сейсмического момента для модельного каталога (100 модельных лет)

ной стадии вряд ли целесообразно в силу следующих причин. Во-первых, на многих участках границ плит реальная сейсмичность достаточно слабая. Во-вторых, диапазон изменения модельной магнитуды  $M \in [6.4, 8.6]$  весьма узок, при этом она сильно завышена по отношению к реальной (главным образом ввиду того, что модельные землетрясения покрывают всю глубину зоны разлома). Минимальное значение модельной магнитуды определяется площадью одной ячейки и, очевидно, является минимально возможным при данном шаге дискретизации. Вероятно, это значение должно соответствовать небольшой реальной величине, причем в каждом сейсмическом регионе может “работать” свое правило перевода. Это тема отдельного исследования, пока же можно сделать вывод о том, что величина суммарного сейсмического момента для модельного каталога значительно выше, чем для каталога СМТ, причем разница достигает нескольких порядков.

Тем не менее, описанная модель отражает важнейшие закономерности распределения глобальной сейсмичности: отчетливо выделяются два крупных сейсмических пояса, где локализована основная часть сильных землетрясений, приуроченных к зонам субдукции, и протяженные, но менее выраженные в сейсмичности, срединно-океанические хребты. Также места повышенной сейсмической активности в обоих случаях часто соответствуют тройным сочленениям границ плит.

## Заключение

В настоящей работе приведено краткое описание сферической модификации блоковой модели и представлены результаты расчетов движения глобальной системы тектонических плит. Получена информация качественного характера о смещениях плит и характере их взаимодействия на границах. Созданы искусственные каталоги землетрясений, в которых прослеживается наличие некоторых “реальных” закономерностей. Модельные графики повторяемости близки к линейным. Анализ проведенных расчетов позволил выявить некоторые зависимости свойств модельной сейсмичности от параметров модели (значения коэффициентов в формулах для вычисления сил и смещений, величины шага пространственной дискретизации) и наметить пути дальнейших исследований, в частности, с целью приведения в соответствие диапазонов изменения модельной и реальной магнитуд. Вычислительные эксперименты показали, что динамика глобальной системы тектонических плит точнее моделируется при помощи блоковой структуры без граничных блоков по сравнению со структурой, в которой некоторые блоки выделяются в качестве граничных. Отметим, что возможность рассмотрения замкнутой структуры на сфере является характерной особенностью сферической модели, которая и была введена для исследования динамики систем крупноразмерных плит. На основе изучения относительных скоростей смещения характерных точек на границах плит для модельной динамики и модели HS2-NUVEL-1 были сделаны предварительные выводы о соотношении между единицей безразмерного времени и реальным интервалом, которые нуждаются в дополнительном анализе.

Работа выполнена в рамках программ фундаментальных исследований Президиума РАН (N 13 “Изменения окружающей среды и климата, природные катастрофы” и N 21 “Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологии GRID”, а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 01-07-90210 РФФИ и 03-01-00474 РФФИ для первых двух авторов и проект 02-05-6482 РФФИ для третьего автора); грантов Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ (НШ 1846.2003.1 для второго автора и НШ1269.2003.5 для четвертого автора) и Международного научно-технического центра (проект N 1538 МНТЦ для третьего и четвертого авторов).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Габриэлов А. М., Кейлис-Борок В. И., Левшина Т. А., Шапошников В. А. Блоковая модель динамики литосферы // Математические методы в сейсмологии и геодинимике. М.: Наука, 1986. С.168–178. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).
2. Soloviev A. A., Ismail-Zadeh A. T. Models of dynamics of block-and-fault systems // Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction / Eds. Keilis-Borok V. I., Soloviev A. A. Berlin- Heidelberg: Springer, 2003. P.71–139.
3. Ermoliev Yu. M., Ermolieva T. Yu., MacDonald G. et al. A system approach to management of catastrophic risks // Eur. J. Oper. Res. 2000. N.122. P.452–460.
4. Мельникова Л. А., Розенберг В. Л., Соболев П. О., Соловьев А. А. Численное моделирование динамики системы тектонических плит: сферическая модификация блоковой модели // Проблемы динамики и сейсмичности Земли. М.: ГЕОС, 2000. С.138–153. (Вычисл. сейсмология; Вып.31).
5. Digas B. V., Melnikova L. A., Rozenberg V. L., Sobolev P. O., Soloviev A. A. Numerical simulation of dynamics of tectonic plates: spherical block model // Sixth Workshop on Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction. Trieste, Italy. 15–27 October 2001. 25 p. (preprint).
6. Габриэлов А. М., Кособоков В. Г., Соловьев А. А. Интерпретация блоковой структуры региона посредством блоковой модели динамики литосферы // Математическое моделирование сейсмотектонических процессов. Вып.1. М.: Наука, 1993. С.11–19.
7. Soloviev A. A., Maksimov V. I. Block models of lithosphere dynamics and seismicity // Interim Report IR-01-067. IASA. Laxenburg: Austria. 2001. 47 p.
8. Соболев П. О., Соловьев А. А., Ротвайн И. М. Моделирование динамики литосферы и сейсмичности для региона Ближнего Востока // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. М.: Наука, 1996. С.131–147. (Вычисл. сейсмология; Вып.28).
9. Panza G. F., Soloviev A. A., Vorobieva I. A. Numerical modelling of block-structure dynamics: applications to the Vrancea region // PAGEOPH. 1997. Vol.149. P.313–336.
10. Keilis-Borok V. I., Rotwain I. M., Soloviev A. A. Numerical modelling of block structure dynamics: dependence of a synthetic earthquake flow on the structure separateness and boundary movements // J. of Seismology. 1997. Vol.1. P.151–160.
11. Rundquist D. V., Soloviev A. A. Numerical modeling of block structure dynamics: an arc subduction zone // Phys. Earth Planet. Inter. 1999. Vol.111 (3-4). P.241–252.
12. Rozenberg V. L., Soloviev A. A. Considering 3D movements of blocks in the model of block structure dynamics // Fourth Workshop on Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction. Trieste, Italy. 6–24 October 1997. 26 p. (preprint).
13. Utsu T., Seki A. A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock // J. Seismol. Soc. Japan. 1954. Vol.7. P.233–240.
14. Gripp A. E., Gordon R. G. Current plate velocities relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model // Geophys. Res. Lett. 1990. Vol.17, N.8. P.1109–1112.
15. Jestin F. P., Huchon P. J. M. Gaulier The Somalia plate and the East African Rift system: present-day kinematics // Geophys. J. Inter. 1994. Vol.116. P.637–654.
16. Mutter J. C. Seismic images of plate boundaries // Scientific American. New York. 1986. 199 p.
17. <http://www.extremescience.com/PlateTectonicsmap.htm>.
18. Global Hypocenters Data Base CD-ROM NEIC/USGS. Denver: CO, 2000.



19. *Мельникова Л.А., Розенберг В.Л.* Параллельная реализация сферической модификации блоковой модели // Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений. Вып.3. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1999. С.186–200.
20. *Soloviev A.A., Maksimov V.I., Rozenberg V.L., Ermoliev Yu.M.* Block models of lithosphere dynamics: approach and algorithms // Lecture Notes in Computer Science 2328. Volume on Parallel Processing and Applied Mathematics. Berlin–Heidelberg: Springer, 2001. P.572–579.
21. *Centroid-Moment Tensor Catalog* Harvard University, 2002 (<http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>).
22. *Ekstrom G., Dziewonski A.* Evidence of bias in estimations of earthquake size // Nature. 1988. Vol.332. P.319–323.