

Применение параллельных технологий к моделированию глобальной сейсмичности*

В.Л. Розенберг, Л.А. Мельникова

Рассматривается задача моделирования динамических процессов, происходящих в литосфере. Приводится обзор разработанных авторами модификаций сферической блоковой модели, при этом основное внимание уделяется модификации, учитывающей неоднородность земной коры. Обсуждаются некоторые аспекты подхода к программной реализации численных алгоритмов с применением параллельных технологий. Анализируется так называемая масштабируемость параллельного алгоритма с целью его оптимизации. Описываются результаты вычислительных экспериментов с аппроксимацией глобальной системы тектонических плит.

1. Введение

Задача изучения землетрясений на основе статистического и феноменологического анализа существующих каталогов таких событий достаточно сложна, поскольку надежные данные наблюдений покрывают относительно небольшой временной интервал (сто лет и меньше) по сравнению с продолжительностью геотектонических процессов, влияющих на сейсмическую активность. Поэтому моделирование сейсмичности, т.е. пространственно-временных последовательностей землетрясений в различных регионах, а также процессов, происходящих в земной коре, играет важную роль в исследовании характера реального сейсмического потока, выявлении или подтверждении закономерностей, предшествующих сильным толчкам (так называемых «предвестников») и, следовательно, является ключевым аспектом изучения сейсмического риска [1, 2]. Основным результатом моделирования сейсмичности литосферы является искусственный каталог землетрясений, в котором каждое событие характеризуется моментом времени, координатами эпицентра, глубиной, магнитудой и, в некоторых моделях, учитывающих геологическое строение региона, интенсивностью. Моделирование динамики земной коры предполагает получение поля скоростей движения точек на разных глубинах, действующих сил, обусловленных ими смещений, а также характера взаимодействия структурных элементов.

Отметим важные свойства литосферы, как сложной диссипативной системы, которые должны быть учтены при моделировании. Прежде всего, это наличие взаимодействия процессов различной природы и двух временных шкал. Здесь имеется в виду тот факт, что два главных механизма, включенных в сеймотектонический процесс, именно, тектоническое нагружение с характеристической скоростью в несколько см/год и перераспределение упругого напряжения с характеристической скоростью в несколько км/сек должны рассматриваться в стандартной временной шкале как, соответственно, равномерное движение и мгновенный сброс напряжения. Далее, при моделировании следует принимать во внимание иерархическую блоковую или, возможно, «фрактальную» структуру литосферы, а также универсальность некоторых ее свойств, проявляющуюся как на региональном, так и на глобальном уровнях. Таким образом, идеальная модель призвана воспроизводить как тектонические движущие силы и движения земной коры, так и аккумуляцию напряжения и его сброс в форме землетрясения.

Существует множество различных подходов к моделированию процессов, происходящих в литосфере (см., например, работу [1] и библиографию к ней); тем не менее, среди них их можно выделить два основных направления. Первое, традиционное, направление опирается на детальное исследование одного специфического тектонического разлома или, нередко, одного конкретного сильного землетрясения с целью воспроизведения определенных пре- и/или постсейсмических явлений (характерных для данного разлома или события). Модели второго на-

* Работа выполнена в рамках Программы научно-исследовательских работ Президиума РАН «Интеллектуальные информационные технологии, математическое моделирование, системный анализ и автоматизация», для первого автора также при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-01-00378) и Уралосибирского междисциплинарного проекта.

правления, предложенные относительно недавно, трактуют сеймотектонический процесс гораздо более абстрактно; основной задачей моделирования является получение универсальных свойств сейсмичности, обнаруженных эмпирическим путем (прежде всего, степенного закона распределения «размера» событий, именно, закона повторяемости Гутенберга–Рихтера, кластеризации, миграции событий, сейсмического цикла и т. д.). Представляется, однако, что адекватная модель, разрабатываемая в рамках второго направления, должна не только отражать некоторые общие свойства нелинейных систем, но и учитывать геометрию взаимодействующих тектонических разломов. Блочные модели динамики и сейсмичности литосферы [2, 3] разрабатывались с учетом обоих требований. Подход к моделированию опирается на представление тектонических плит в виде системы абсолютно жестких блоков, находящейся в состоянии квазистатического равновесия; при этом модельное событие представляет собой резкий сброс напряжений, возникающих на разломах, разделяющих блоки, под действием внешних сил. Плоская блоковая модель [2, 3], в которой структура ограничена двумя горизонтальными плоскостями, является наиболее изученной; на ее основе построены аппроксимации реальных сейсмических регионов. Однако, при попытке моделирования динамики глобальных тектонических плит обнаруживаются существенные неточности, для преодоления которых введена сферическая геометрия. Настоящая работа, продолжающая исследования [4–6], фактически представляет собой обзор разработанных модификаций сферической блоковой модели и обсуждение некоторых результатов вычислительных экспериментов.

2. Различные модификации сферической блоковой модели

В сферической модели динамики и сейсмичности литосферы 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 бесконечно тонкими разломами, каждый из которых представляет собой коническую поверхность, наклоненную под определенным углом к внешней сфере. 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 нижней (для блока) сферой называется подошвой. Предполагается, что вне блоковой структуры могут находиться граничные блоки, примыкающие к внешним сегментам. Другая возможность состоит в рассмотрении блоковой структуры, замкнутой на сфере. 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 и блоковая структура в начальный момент времени находится в состоянии квазистатического равновесия. Блоки (в том числе и граничные) имеют шесть степеней свободы. Смещение каждого блока состоит из поступательной и вращательной компонент. Предполагается, что законы движения граничных блоков и подстилающей среды известны, при этом движение описывается как вращение на сфере, т.е. задаются положение оси вращения и угловая скорость.

Разработано несколько модификаций модели, зависящих от способа трактовки глубины сферического слоя. В первой модификации модели (без глубины), считалось, что все характеристики точек структуры определяются только их координатами и не зависят от глубины сферического слоя, поскольку данная глубина значительно меньше линейных размеров блоков. Главное преимущество модификации состоит в значительной экономии времени счета при моделировании, что может быть существенно при большом количестве запусков в эксперименте по вариации того или иного параметра; основной недостаток — формальный учет углов наклона разломов, фактически определяющих характер сейсмичности. Появившаяся позже модификация с постоянной глубиной использовала предположение об однородности литосферы по глубине (все блоки имели одну и ту же глубину H , а свойства всех частей блока (разлома) были одинаковыми). Модификация, разрабатываемая в настоящее время, предусматривает возмож-

ность задания различных глубин (в пределах H) для разных блоков и учета зависимости вязкоупругих свойств разлома от его глубины. Отметим, что по существу это является первой попыткой учета неоднородности литосферы (например, различий в строении континентальной и океанической коры и уменьшения вязкости коры с глубиной) в блоковых моделях.

Поскольку блоки являются абсолютно жесткими, все деформации имеют место на разломах и подошвах блоков; силы возникают на подошвах из-за смещения блоков относительно подстилающей среды и на поверхностях ограничивающих их разломов из-за смещений соседних блоков или их подстилающей среды. Приведем формулы для определения упругой силы (f_t, f_l, f_n) , действующей на единицу площади разлома:

$$f_t = K_t(\Delta_t - \delta_t), \quad f_l = K_l(\Delta_l - \delta_l), \quad f_n = K_n(\Delta_n - \delta_n). \quad (1)$$

Здесь (t, l, n) — система координат, связанная с точкой приложения силы (оси t, l лежат в плоскости, касательной к поверхности разлома, ось n ей перпендикулярна); $\Delta_t, \Delta_l, \Delta_n$ — компоненты относительного смещения в системе (t, l, n) (а) соседних блоков в случае, если точка принадлежит части разлома, разделяющей блоки, и (б) блока и подстилающей среды соседнего блока в случае, если точка принадлежит части разлома, отделяющей блок от подстилающей среды соседнего блока; $\delta_t, \delta_l, \delta_n$ — соответствующие неупругие смещения, зависимость от времени которых описывается уравнениями

$$\frac{d\delta_t}{dt} = W_t f_t, \quad \frac{d\delta_l}{dt} = W_l f_l, \quad \frac{d\delta_n}{dt} = W_n f_n. \quad (2)$$

Коэффициенты K_t, K_l, K_n (1), характеризующие упругие свойства разлома, и коэффициенты W_t, W_l, W_n (2), характеризующие вязкие свойства разлома, могут быть различными для разных разломов и, кроме того, могут изменяться в зависимости от глубины.

Аналогично выглядят формулы для вычисления сил и неупругих смещений на подошвах блоков. Смещения любого внутреннего блока и углы его поворотов находятся из условия равенства нулю суммы всех сил, действующих на блок, и суммарного момента этих сил. Это условие обеспечивает состояние квазистатического равновесия системы и одновременно является условием минимума энергии. Поскольку в рассматриваемой модели зависимость сил от смещений и поворотов блоков является линейной, то система уравнений для определения этих величин также линейна и имеет вид

$$Aw = b. \quad (3)$$

Компонентами неизвестного вектора $w = (w_1, w_2, \dots, w_{6n})$ являются смещения и углы поворота внутренних блоков (n — число таких блоков). Элементы матрицы A (размерности $6n \times 6n$) не зависят от времени и могут быть вычислены один раз в начале процесса. Для подсчета различных криволинейных интегралов выполняется дискретизация (разбиение на ячейки) сферической поверхности подошв блоков и сегментов разломов, при этом предполагается, что значения сил и неупругих смещений совпадают для всех точек ячейки. Система (3) решается в дискретные моменты времени t_i .

При вычислении компонент силы, действующей на разломе, определяется отношение напряжения к давлению:

$$\kappa = \frac{\sqrt{f_t^2 + f_l^2}}{P - f_n}. \quad (4)$$

Здесь P — параметр, который может интерпретироваться как разность между литостатическим и гидростатическим давлением. Взаимодействие между блоками (между блоком и сосед-

ней подстилающей средой) полагается вязкоупругим (нормальное состояние) до тех пор, пока величина κ (4) на части разлома, разделяющего элементы структуры, не превышает значение заданного порога. Если в какой-то момент времени достигается критическое значение (величины допустимых порогов задаются априори и могут быть различными для разных разломов), то, в соответствии с законом сухого трения, происходит сброс напряжения посредством изменения значений неупругих смещений δ_t , δ_l , δ_n , 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. Основным результатом процесса моделирования является искусственный каталог землетрясений. Принадлежащие одному разлому ячейки, в которых произошло землетрясение в момент времени t_i , объединяются в одно событие, параметры которого: (а) время — t_i ; (б) географические координаты эпицентра и глубина — взвешенные суммы координат и глубин ячеек; (в) магнитуда (энергетическая характеристика землетрясения) — величина, вычисленная по известной в сейсмологии формуле [7]

$$M = 0.981g S + 4.07, \quad (5)$$

где S — сумма площадей ячеек (в км²). Кроме того, в каждый момент времени модель позволяет получить картину мгновенной кинематики блоков и информацию о характере их взаимодействия вдоль границ.

Детальное описание основных принципов построения блоковых моделей динамики литосферы можно найти, например, в [2, 3].

3. Распараллеливание: ключевые моменты и эффективность

Сферическая блоковая модель, являющаяся достаточно ресурсоемкой при расчетах на последовательных ЭВМ, допускает эффективное применение параллельных технологий, что обуславливает ориентацию вычислительных модулей на многопроцессорную технику. При распараллеливании по стандартной схеме «мастер-рабочий» [5, 8] используется библиотека MPI, при этом единый загрузочный модуль запускается на всех процессорах. Блок-схема основной вычислительной процедуры представлена на Рис. 1. Приведем необходимые пояснения. В начале своей работы программа назначает один из процессоров мастером. Затем загружается информация о блоковой структуре, выполняются предварительные вычисления (например, считается матрица A системы (3)). На каждом шаге дискретного времени наиболее трудоемкой процедурой является определение значений сил и неупругих смещений во всех ячейках структуры. Поскольку эти вычисления могут быть проведены независимо друг от друга, их необходимо равномерно разделить между процессорами. Именно распределение ячеек на равные порции по процессорам и организация оптимального обмена информацией между процессорами являются ключевыми моментами описываемого алгоритма распараллеливания. Остановимся на них более подробно.

В рассматриваемой задаче естественным способом хранения основных данных по сегментам (координаты ячеек, силы, смещения) является организация двумерных массивов вида $ff[i, j]$, где i — номер ячейки поверхностной дискретизации сегмента в глобальной нумерации по всем сегментам структуры, j — номер слоя при дискретизации соответствующего сегмента по глубине (такой способ обеспечивает совместимость данных для всех модификаций модели). Распределение ячеек дискретизации сегментов по процессорам выполняется без нарушения целостности слоя, как показано на Рис. 2. Динамическое распределение памяти под двумерные массивы на каждом процессоре осуществляется путем отведения памяти под массив (его длина равна количеству поверхностных ячеек, попавших на процессор) указателей на одномерные массивы переменной длины, отвечающие за дискретизацию по глубине.

Обмен информацией реализован по схеме, отраженной на Рис. 1, где операции, выполняемые только мастером, помечены символом «М», только рабочими — символом «W» (остальные операции выполняются на всех процессорах). На каждом шаге мастер вычисляет новые значе-

ния смещений блоков, граничных блоков и подстилающей среды (что требует незначительного времени из-за малой размерности системы (3)), после чего рассылает их на рабочие процессоры. Пересчитанные значения сил, неупругих смещений и вектора b возвращаются мастеру, происходит переход к следующему шагу. Отметим, что при реализации межпроцессорных пересылок используются как коллективные обмены (например, при рассылке мастером решения системы (3)), так и обмены типа «точка-точка» (например, при передаче мастеру информации о модельных событиях).

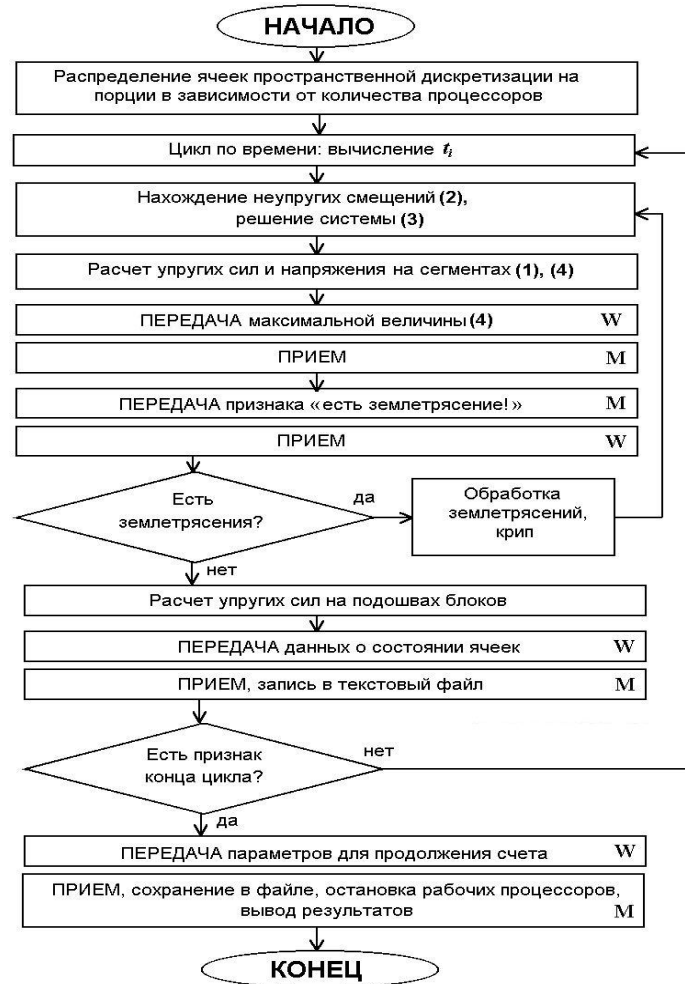


Рис. 1. Схема основной вычислительной процедуры

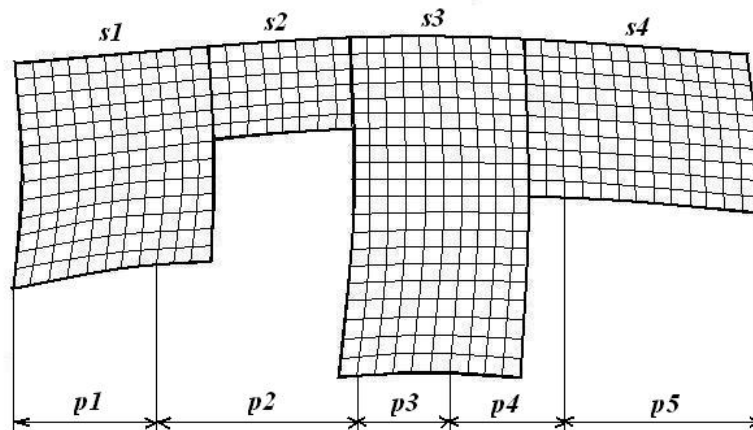


Рис. 2. Распределение ячеек дискретизации сегментов ($s1-s4$) по процессорам ($p1-p5$)

При обработке ситуации, трактуемой как землетрясение, схема несколько усложняется, поскольку в этом случае мастер опрашивает все рабочие процессоры до тех пор, пока существуют ячейки сегментов, находящиеся в критическом состоянии; после чего мастер получает информацию о происшедших событиях и записывает ее в файл специальной структуры. При такой организации время вычислительной работы на каждом рабочем процессоре оказывается значительно больше времени обмена данными с мастером, и за счет этого достигается довольно высокая полезная загрузка отдельного процессора.

Моделирование проводилось на вычислительных комплексах МВС-1000/64 (ИММ УрО РАН, г. Екатеринбург) и на МВС-50К (Межведомственный Суперкомпьютерный Центр, г. Москва). Дополнительно на МВС-50К были проведены эксперименты по изучению зависимости времени решения задачи от числа процессоров. Был выбран наиболее «времяемкий» вариант из просчитанных (с большим числом модельных землетрясений) и рассмотрено 100 итераций по времени (типовой расчетный вариант содержит 20000 шагов). Результаты тестирования представлены в таблице 1. Анализировались следующие величины: ускорение $S_p = T_1/T_p$ и эффективность $E_p = S_p / p$; здесь T_p — время выполнения программы на многопроцессорной машине для p процессоров, T_1 — время работы последовательного алгоритма.

Таблица 1. Время счета, ускорение и эффективность для разного числа процессоров.

p	T_p (сек)	S_p	E_p
1	9988.42	—	—
2	4994.29	2.00	1.00
4	2680.78	3.73	0.93
8	1317.04	7.58	0.95
16	686.95	14.54	0.91
32	366.08	27.28	0.85
64	197.80	50.50	0.84

Из таблицы следует, что эффективность распараллеливания достаточно высока, причем она, уменьшаясь с ростом числа задействованных процессоров, не падает ниже разумного уровня. Представляется, что резервом для улучшения эффективности является оптимизации передачи/записи информации о модельных землетрясениях.

Перейдем к теоретическому анализу эффективности параллельного алгоритма. Отметим, что способность такого алгоритма эффективно использовать процессоры при повышении сложности вычислений является важной характеристикой выполняемых расчетов. Параллельный алгоритм называется масштабируемым (scalable), если при росте числа процессоров он обеспечивает увеличение ускорения при сохранении постоянного уровня эффективности использования процессоров (например, вследствие увеличения размерности задачи) [9].

Рассмотрим идеализированную модель, учитывающую различные характеристики функционирования алгоритма. Оценим время счета одного шага дискретного времени как время, необходимое для вычисления сил и смещений во всех ячейках пространственной дискретизации подошв блоков и сегментов разломов (затраты на остальные расчеты, включая решение системы (3), пренебрежимо малы):

$$t_{calc} = t_{sg} N_{sg} + t_{bl} N_{bl},$$

где t_{sg} и t_{bl} — средние времена вычислений в одной ячейке дискретизации сегмента разлома и подошвы блока; N_{sg} и N_{bl} — количества ячеек на сегментах и подошвах, соответственно. Фактически последние два параметра определяют размерность задачи для фиксированной блоковой структуры. Чтобы оценить время, необходимое для обмена информацией на каждом шаге, введем время t_{msg} , требующееся для отправки/получения сообщения длиной в L слов:

$$t_{msg} = t_s + t_w L,$$

где t_s — время инициализации обмена, t_w — время передачи одного слова (оба параметра являются характеристиками машины). В данном алгоритме $L = d_1 n_{bl} + d_2$ (n_{bl} — количество блоков в структуре, константы d_1 и d_2 могут быть выписаны явно). Следовательно, время обмена в случае запуска программы на p процессорах (мастер и $p-1$ рабочих), с учетом процедур отправки/получения, можно определить следующим образом:

$$t_{exch} = 2(p-1)(t_s + t_w(d_1 n_{bl} + d_2)).$$

Время работы последовательного алгоритма T_1 и время выполнения программы на p процессорах T_p могут быть найдены по формулам:

$$T_1 = t_{calc} = t_{sg} N_{sg} + t_{bl} N_{bl},$$

$$T_p = t_{calc} / p + t_{exch} = (t_{sg} N_{sg} + t_{bl} N_{bl}) / p + 2(p-1)(t_s + t_w(d_1 n_{bl} + d_2)).$$

Отсюда вычисляем эффективность:

$$E_p = T_1 / T_p p = \frac{t_{sg} N_{sg} + t_{bl} N_{bl}}{t_{sg} N_{sg} + t_{bl} N_{bl} + 2p(p-1)(t_s + t_w(d_1 n_{bl} + d_2))}.$$

Таким образом, эффективность уменьшается с ростом p , t_s , t_w и n_{bl} ; увеличивается с ростом t_{sg} , t_{bl} , N_{sg} и N_{bl} . Для получения примерно постоянной эффективности необходимо добиться выполнения соотношения $T_1 \approx E_p T_p p$, т.е.

$$t_{sg} N_{sg} + t_{bl} N_{bl} \approx E_p (t_{sg} N_{sg} + t_{bl} N_{bl} + 2p(p-1)(t_s + t_w(d_1 n_{bl} + d_2))).$$

Чтобы сделать данное соотношение нечувствительным к росту p , следует выбрать зависимость между размерностью решаемой задачи и числом процессоров в виде $N_{sg} = c_1 p(p-1)$ и $N_{bl} = c_2 p(p-1)$, где c_1 , c_2 — некоторые константы (приведенные соотношения можно считать функцией изоэффективности задачи). Получаем условие, при выполнении которого с ростом числа процессоров эффективность остается постоянной:

$$c_1 t_{sg} + c_2 t_{bl} \approx E_p (c_1 t_{sg} + c_2 t_{bl} + 2t_s + 2t_w(d_1 n_{bl} + d_2)).$$

Отсюда (при $E_p < 1$) можно найти подходящие значения коэффициентов c_1 и c_2 . Итак, для фиксированной блочной структуры увеличение количества ячеек на сегментах и подошвах (отметим, что при этом улучшается точность вычислений) пропорционально $p(p-1)$, приводя к увеличению времен счета T_1 и T_p , обеспечивает постоянную эффективность, не зависящую от p , и, следовательно, рост ускорения пропорционально p . С другой стороны, найденные соотношения позволяют по желаемым значениям N_{sg} и N_{bl} определять число процессоров p , на котором теоретически достигается предписанная эффективность E_p .

Дополнительно отметим, что из формулы для вычисления T_p может быть найдено оптимальное число процессоров в смысле минимизации теоретического времени счета при решении задачи с фиксированными значениями всех параметров (в том числе шагов пространственной дискретизации).

4. Некоторые результаты моделирования

Приведем некоторые результаты применения модификации сферической блоковой модели, учитывающей неоднородность литосферы, к исследованию динамики и сейсмичности глобальной системы крупнейших тектонических плит, покрывающих всю поверхность Земли.

Рассматриваемая структура включает 15 плит (Рис. 3), для которых используются следующие обозначения: N — Наска, SA — Южноамериканская, Co — Кокос, Ca — Карибская, NA — Североамериканская, P — Тихоокеанская, Af — Африканская, An — Антарктическая, E — Евразийская, Ag — Аравийская, I — Индийская, S — Сомалийская, Ph — Филиппинская, Au — Австралийская, F — Хуан де Фука. Движение подстилающей среды определяется как вращение на сфере согласно модели HS2-NUVEL1 [10]. Модельные глубины плит выбираются с учетом распределения по глубине реальных землетрясений.

Было исследовано поведение точек, принадлежащих границам плит, для которых четко определяется один из трех типов (дивергентные, конвергентные, трансформные). Рассмотрены такие характерные зоны, как, например, границы Южная Америка/Наска, Тихий Океан/Наска, Южная Америка/Африка, Индия/Евразия, 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, тем самым устанавливался характер взаимодействия между плитами и типы границ (см. Рис. 3), в принципе соответствующие реальным [11].

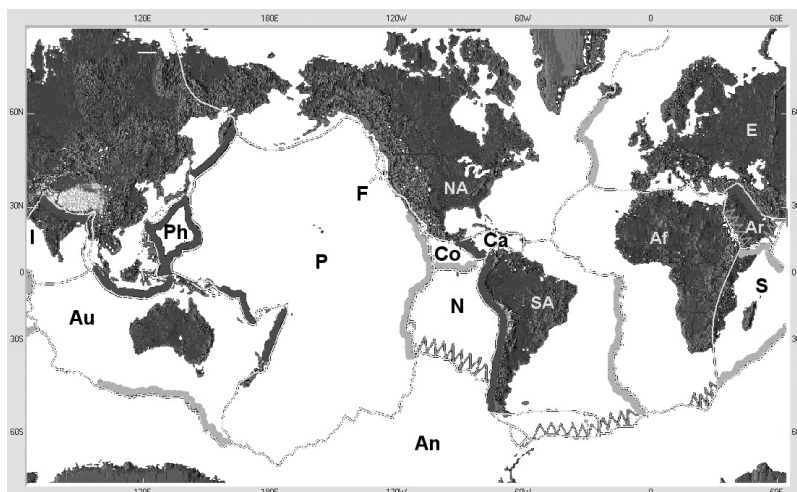


Рис. 3. Глобальная система тектонических плит и результаты моделирования характера межплитовых границ: дивергентные границы плит (растяжение, светлая штриховка), конвергентные границы плит (сжатие, темная штриховка), трансформные границы плит (скольжение, зубчатая штриховка)

В качестве основного параметра, определяющего качество моделирования, рассматривается пространственное распределение сильнейших событий. Был проведен сравнительный анализ искусственного каталога землетрясений, который создавался с использованием формулы (5), и реального, извлеченного из глобального каталога NEIC [12] и включающего события с магнитудой не менее 7.5 за период времени с 01.01.1900 по 30.06.2009 без ограничений по глубине и местоположению, см. Рис. 4.

Полученные искусственные каталоги землетрясений (на Рис. 5 приведен «лучший» из них в смысле соответствия реальному) обнаружили ряд черт, присущих реальной сейсмичности, например: (а) наличие двух основных сейсмических поясов, Тихоокеанского и Средиземноморско-Трансазиатского, где происходит большая часть сильных событий; (б) увеличение сейсмической активности вблизи точек, где сходятся три и более плит. Установлено соответствие сейсмически активных (границы Кокос/Карибы, Индия/Евразия, Наска/Южная Америка, район Калифорнии, Аравия/Евразия, юго-восток, восток, северо-восток и особенно север Австралийской плиты, вокруг Филиппин) и «спокойных» (юг Тихоокеанской плиты, Наска/Тихий Океан, восток и юго-запад Африки, Индия/Австралия, Северная Америка/Евразия) регионов реальным, что следует считать позитивным фактом.

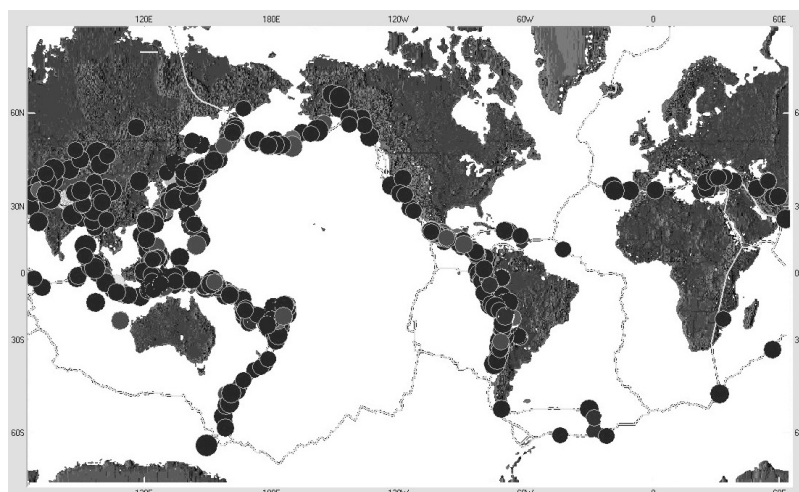


Рис. 4. Зарегистрированная сейсмичность: эпицентры сильнейших землетрясений с магнитудой не менее 7.5, каталог NEIC

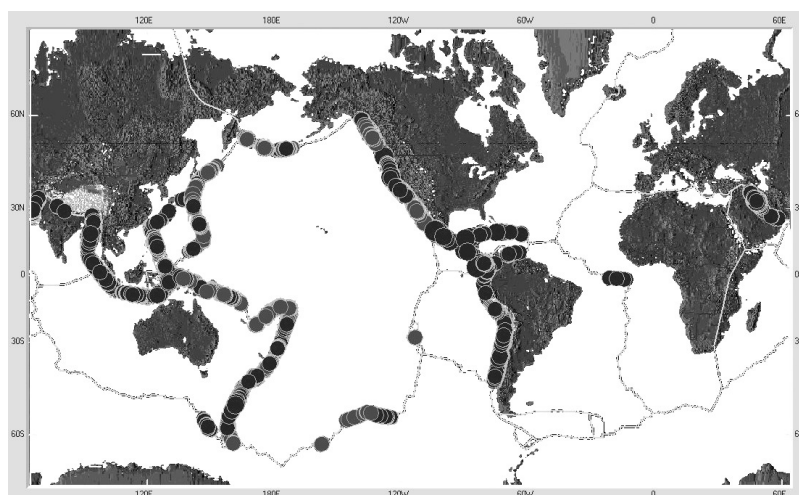


Рис. 5. Эпицентры сильнейших модельных событий с магнитудой не менее 7.5, модификация с переменной глубиной

Отметим, что заметное сходство в расположении эпицентров сильнейших землетрясений в модельной и реальной сейсмичности наблюдается уже в вариантах, полученных посредством модификации без глубины [4]. Для модификации с переменной глубиной дополнительным соответствием реальной сейсмичности является, в частности, появление мощных землетрясений на известных своей сейсмической активностью границах Южная Америка/Наска и Индия/Евразия (см. Рис. 5). Улучшение модельного распределения эпицентров происходит не по причине подбора параметров разломов (которые во всех экспериментах постоянны), а вследствие усовершенствования самой модели.

Анализ параметров закона Гутенберга–Рихтера (характеризующего зависимость количества землетрясений от магнитуды, Рис. 6) выявил не вполне удовлетворительные результаты. В частности, углы наклона графиков повторяемости в модельных вариантах больше реального, а сами графики линейны только в диапазоне средних магнитуд (в то время как график для зарегистрированной глобальной сейсмичности близок к линейному с угловым коэффициентом, равным 1). Для сглаживания различий в угловых коэффициентах следует увеличить число модельных событий вне области средних магнитуд; в этих целях предполагается провести дополнительные серии вычислительных экспериментов.

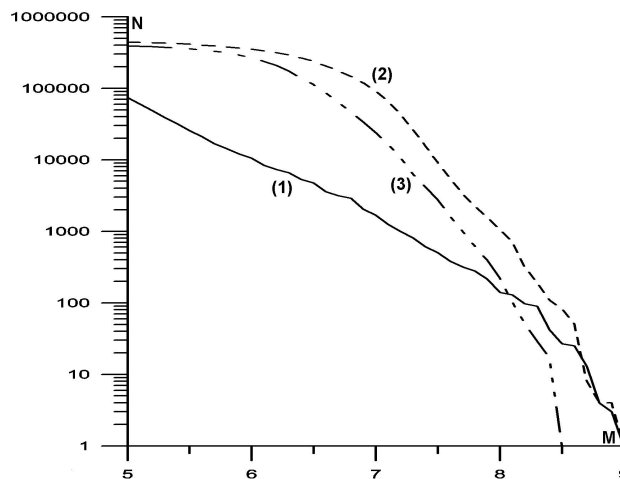


Рис. 6. Графики повторяемости, построенные по реальному (1) и двум модельным (2), (3) каталогам; *N* — аккумулярованное число землетрясений, *M* — магнитуда

Изучались и другие характеристики качества моделирования: распределение событий по глубине, параметры сейсмического цикла, скорости смещения граничных точек и др. В результате анализа была скорректирована «классическая» аппроксимация глобальной системы тектонических плит, именно были дополнительно введены 5 блоков, представляющие собой искусственные геологические структуры. Предполагается, что это позволит получить модельные события на больших глубинах в регионах, где зарегистрирована сейсмичность такого рода, тем самым увеличить количество сильных землетрясений в модели и исправить угол наклона графика повторяемости. Новая аппроксимация (Рис. 7) включает 20 блоков (дополнительные с номерами 16–20), 213 вершин и 231 разлом.

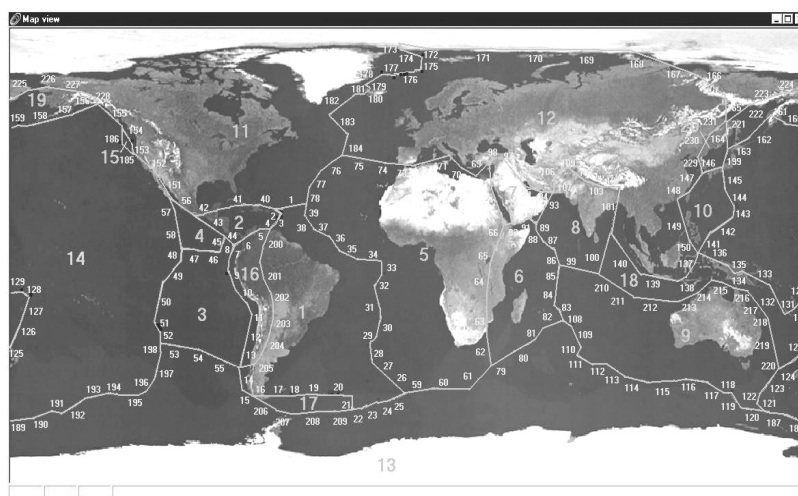


Рис. 7. Новая аппроксимация глобальной системы тектонических плит (приведены номера блоков и разломов)

5. Заключительные замечания

Тщательный количественный анализ реального и модельных распределений представляется на данном этапе преждевременным, поскольку, во-первых, зарегистрированная сейсмичность мала на многих границах плит (ввиду недостаточной длины интервала наблюдения), а во-вторых, диапазон изменения модельной магнитуды довольно узок и не вполне соответствует реальному. Задача приведения магнитудных интервалов в соответствие требует дополнительного анализа в том числе и потому, что такое соответствие может зависеть от конкретного сейсмического региона. Отметим, что упрощения, принятые в сферической блоковой модели, не дают возможности делать какие-либо выводы о качестве аппроксимации реального сейсми-

ческого потока модельным в конкретной точке. Однако, проведенный анализ (в частности, результаты, представленные в настоящей статье) позволяет судить о достаточной степени адекватности модели в смысле воспроизведения важных закономерностей, обнаруженных в зарегистрированной сейсмичности эмпирическим путем. Установлено, что модификация, учитывающая переменную глубину сферического слоя, в целом адекватнее описывает динамику и сейсмичность глобальной системы тектонических плит по сравнению с моделью без глубины, несмотря на то, что глубина слоя гораздо меньше линейных размеров плит и, казалось бы, при моделировании ей можно пренебречь. Полученные данные предполагается использовать как для дальнейшего развития модели (например, для реализации возможности использования результатов моделирования мантийных движений в качестве входа), так и для исследования характера сейсмического потока в конкретных регионах (например, с целью изучения регионального сейсмического риска).

Литература

1. Gabrielov A.M., Newman W.I. Seismicity Modeling and Earthquake Prediction: a Review // *Geophysical monograph* 83, IUGG. –1994. –Vol. 18. –P. 7–13.
2. Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A. (Eds.) *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. –Springer, 2003. –337 p.
3. Габриэлов А.М., Кейлис-Борок В.И., Левшина Т.А., Шапошников В.А. Блоковая модель динамики литосферы // *Математические методы в сейсмологии и геодинамике: Выч. Сейсмология. Вып. 19*. –М.: Наука, 1986. –С. 168–178.
4. Rozenberg V.L., Sobolev P.O., Soloviev A.A., and Melnikova L.A. The Spherical Block Model: Dynamics of the Global System of Tectonic Plates and Seismicity // *Pure appl. geophys.* –2005. –N. 162. –P. 145–164.
5. Розенберг В.Л., Мельникова Л.А. Новая модификация сферической блоковой модели: алгоритмическая и программная реализация на МВС // *Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ-2007): Тр. междунар. конф.* –Челябинск, 2007. –Т. 1. – С.221–226.
6. Розенберг В.Л., Мельникова Л.А. Сферическая блоковая модель динамики и сейсмичности литосферы: модификации, алгоритмы и вычислительные эксперименты // *Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ-2008): Тр. междунар. конф.* –Челябинск, 2008. – С.538.
7. Wells D.L., Coppersmith K.L. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement // *Bull. Seism. Soc. of America*. –1994. –Vol. 84, N. 4. –P. 974–1002.
8. Soloviev A.A., Maksimov V.I., Rozenberg V.L., Ermoliev Y.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.
9. Foster I. *Designing and Building Parallel Programs*: [<http://www.mcs.anl.gov/~itf/dbpp/>], 1995.
10. Gripp A.E., Gordon R.G. Current Plate Velocities relative to the Hotspots Incorporating the NUVEL-1 Global Plate Motion Model // *Geoph. Res. Let.* –1990. –Vol. 17, N. 8. –P. 1109–1112.
11. Mutter J.C. Seismic Images of Plate Boundaries // *Scient. American*. –1986. –Vol. 254. –P. 66–75.
12. *Global Hypocenters Data Base, NEIC/USGS*. –Denver, CO, 2008.