

УДК 550.341

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ И СЕЙСМИЧНОСТИ ДЛЯ РЕГИОНА БЛИЖНЕГО ВОСТОКА

П.О. Соболев, А.А. Соловьев, И.М. Ротвайн

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

В статье приводятся результаты моделирования геодинамики центральной части Альпийско-Гималайского пояса. В модели исследуемый регион рассматривается в виде системы абсолютно жестких блоков, геометрия которой определяется в соответствии с тектонической структурой региона. Блоки образуют слой между двумя горизонтальными плоскостями. Движения и деформации происходят как в плоскостях разломов, разделяющих блоки и ограничивающих структуру, так и в нижней плоскости, отделяющей блоки от подстилающей среды. Взаимодействие блоков друг с другом и с подстилающей средой является вязко-упругим. Землетрясения возникают в плоскостях разломов, когда для какой-либо их части отношение упругого напряжения к давлению превосходит некоторый заданный порог. Полученные в результате моделирования искусственные каталоги отражают ряд свойств реальной сейсмичности региона Ближнего Востока, что указывает на возможность использования процедуры моделирования для решения задач геодинамики, в частности для уточнения направлений и скоростей относительных движений блоков.

MODELING OF LITHOSPHERE DYNAMICS AND SEISMICITY FOR THE MIDDLE EAST REGION

P.O. Sobolev, A.A. Soloviev, and I.M. Rotwain

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

The results of modeling of geodynamics for the central part of the Alpine-Himalyan belt (Tethys) are presented. In the model the region under study is considered as a system of absolutely rigid blocks the geometry of which is defined in accordance with the tectonic structure of the region. The blocks form a layer between two horizontal planes. Movements and deformation take place in fault planes separating the blocks and bounding the structure, and in the bottom plane separating the blocks from the underlying medium. The interaction of the blocks with one another and with the underlying medium is viscoelastic. Earthquakes occur on fault planes when the ratio of elastic stress to pressure surpasses a certain level for some part of the fault plane. The synthetic catalogs obtained as a result of the modeling reflect

a number of properties of real seismicity of the Middle East suggesting that the modeling procedure can be used to solve some geodynamic problems, in particular, revising of directions and the velocities of relative movements of blocks.

ВВЕДЕНИЕ

Регион Ближнего Востока является одним из полигонов, на котором можно исследовать многие актуальные вопросы современной геологии. Своеобразие его определяется сочетанием контрастных геодинамических режимов с достаточно сложным геологическим строением. Район характеризуется высокой сейсмической активностью, причем ее распределение по площади крайне неравномерно. Основываясь главным образом на расположении эпицентров землетрясений и исходя из геологических данных, Мак-Кензи [1], Новрузи [2] и Веставэй [3] определили геометрию плит и микроплит для этого региона. Их результаты хорошо согласуются между собой и с работами других авторов. Однако до сегодняшнего дня нет единого мнения о направлениях и величинах скоростей относительных перемещений плит. Созданное в Международном институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики (МИТП) РАН математическое обеспечение, позволяющее моделировать динамику блоковой структуры литосферы [4], открывает новые возможности для исследования связи сейсмичности и геодинамики.

Настоящая статья является результатом работы в этом направлении и продолжением работы Д.В. Рундквиста и И.М. Ротвайн [5]. Работа преследует две цели: 1) уточнение границ и динамики литосферных плит, 2) апробация методики моделирования для сложного по строению региона и решение ряда методических вопросов.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Принципы построения блоковых моделей динамики литосферы приведены в работах [6, 7]. В [4] дано подробное описание модели, которая использовалась в настоящей работе.

Исследуемый регион рассматривается в модели в виде системы блоков, образующих слой толщиной H между двумя горизонтальными плоскостями. Границы блоков составляются из отрезков разломов, каждый из которых представляет собой сечение этого слоя плоскостью, наклоненной к горизонтальной плоскости под произвольным углом.

Блоки предполагаются абсолютно жесткими, так что все перемещения происходят только в плоскостях разломов. Горизонтальная компонента перемещения блока определяется вектором сдвига (x, y) и углом поворота относительно геометрического центра соответствующего блоку многоугольника на нижней плоскости (подошве блока). Предполагается, что перемещения блоков происходят в результате действия на них упругих сил, возникающих из-за смещения блока относительно подстилающей среды как в нижней плоскости, так и в плоскостях разломов, ограничивающих блок, из-за смещения соседних блоков относительно друг друга. Смещения блоков предполагаются бесконечно малыми по отношению к их геометрическим размерам. В плоскостях разломов и на подошвах блоков возникают неупругие смещения, скорость роста которых определяется величиной упругой

силы. В каждый момент времени вектор сдвига и угол определяются из условия равенства нулю сил, действующих на блок, и суммарного момента этих сил.

В случае граничного разлома один из блоков, разделяемых разломом, является внешним блоком, зависимость от времени его вектора сдвига и угла поворота задается. Углы поворота для внешних блоков определяются относительно начала координат. Движение внешних блоков вместе с движением подстилающей среды являются причиной смещения внутренних блоков.

Обозначим через f величину упругой силы, действующей на единицу площади разлома (вектор лежит в плоскости разлома). Ее плотность в некоторой точке плоскости разлома определяется из формулы

$$\mathbf{f}_f = K(\Delta \mathbf{r} - \Delta \omega),$$

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

Изменения вектора неупругого смещения описывается уравнением

$$\frac{d\Delta \omega}{dt} = V \mathbf{f}_f$$

(где V – постоянный коэффициент), а взаимодействие между блоком и подстилающей средой уравнениями

$$\mathbf{f}_u = K_u(\Delta \mathbf{r} - \Delta \mathbf{u}), \quad \frac{d\Delta \mathbf{u}}{dt} = V_u \mathbf{f}_u,$$

где $\mathbf{f}_u$ – плотность горизонтальной упругой силы, $\Delta \mathbf{r}$ – вектор полного горизонтального смещения между блоком и подстилающей средой, $\Delta \mathbf{u}$ – вектор горизонтального неупругого смещения, K_u и V_u – постоянные коэффициенты.

Для каждого разлома задаются значения трех порогов $B > H_f \geq H_s$. Момент возникновения землетрясения определяется соотношением

$$\varkappa = \frac{f}{P \pm p_0} \geq B,$$

где постоянная P имеет одно и то же значение для всех разломов и интерпретируется как разность между литостатическим и гидростатическим давлениями, p_0 – величина силы реакции, нормальной к плоскости разлома, знак "минус" означает растяжение в направлении, перпендикулярном плоскости разлома, знак "плюс" – сжатие.

Начальные значения смещений и поворотов внутренних блоков и неупругих смещений на разломах задаются таким образом, чтобы всюду было выполнено соотношение $\varkappa < B$. Если в какой-то момент времени на каком-либо разломе значение отношения достигает или превосходит значение порога B для соответствующего разлома, это интерпретируется как землетрясение. В таком случае вычисляются новые значения неупругих смещений так, чтобы для нового значения $\varkappa$ было справедливо равенство $\varkappa = H_f$. После землетрясения соответствующая часть разлома находится в состоянии крипа: для нее скорость роста неупругих смещений больше, чем в обычном состоянии при той же величине упругой силы, что достигается заменой параметра V на V_s . Состояние крипа прекращается, когда наступает момент времени, в который $\varkappa \leq H_s$.

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ ЛИТОСФЕРЫ РЕГИОНА БЛИЖНЕГО ВОСТОКА

В геологическом отношении большая часть территории Ближнего Востока является частью Альпийского складчатого пояса. Согласно концепции тектоники плит, строение этого региона определяется мозаикой микроплит, возникших при сближении Африканской и Евразийской плит в мезозое–кайнозое, в ходе которого произошло закрытие океана Тетис. Морган (см. [8]) выделил пять плит (Африканская, Аравийская, Персидская, Индийская, Евразийская); Новрузи [2], основываясь на распределении эпицентров землетрясений, их фокальных механизмах и геологических данных, обосновал выделение восьми плит для территории Ближнего Востока, а также оценил их относительные движения. Аравийская и Нубийская плиты (рис. 1) до эоцена развивались как единая структура (северо-восточная окраина Африканского континента). Начавшийся в конце эоцена рифтогенез привел к расколу континента и образованию Красноморского и Аденоского рифтов, которые в миоцене еще были внутриконтинентальными [8]. Образование океанической земной коры в рифтах связывается со второй стадией растяжения в неогене, в настоящее время в обоих рифтах продолжается спрединг, притом скорость увеличивается от $0.75 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$ в северной части Красного моря до $2.25 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$ в Аденомском заливе, т.е. Аравийская плита поворачивается относительно Нубийской против часовой стрелки [9]. Оба рифта являются сейсмически активными зонами, особенно вблизи точки тройного сочленения Нубийской, Аравийской и Сомалийской плит. Аденоский рифт на востоке переходит в срединно-океанический хребет Карлсберг, смещаясь вдоль крупного трансформного разлома Оуэн. Продолжением Красноморского рифта на север является Суэцкий рифт, который также испытывает растяжение, но имеет в основании континентальную кору. Северо-западной границей Аравийской плиты является Левантский разлом (разлом Мертвого моря). На основании сведений о геологическом строении региона и данных о механизме очагов землетрясений это – левый сдвиг с несколькими участками сдвига-раздвигового типа. С севера Аравийская плита ограничена зоной Тавр, которая к востоку переходит в складчатую зону Загрос. Таким образом, Аравийская плита окружена активными сейсмическими зонами, притом на ее юго-западной и северо-восточной окраинах режимы прямо противоположны. Район Красного моря характеризуется поднятием, активным вулканизмом и растяжением, сейсмическая активность здесь относительно невелика. В зоне Загрос происходит сжатие. Фокальные механизмы, геологические и геофизические данные показывают, что здесь происходит надвиг Иранской плиты на Аравийскую по системе разломов, полого падающих на северо-восток. Главный надвиг Загроса с реликтами офиолитов, по-видимому, является северной окраиной Гондваны, которая столкнулась с Евразией в палеогене, после чего произошел переход от режима субдукции к режиму коллизии. Именно с этой зоной связана максимальная сейсмическая активность.

Геологическое строение Аравийской и Нубийской плит как бы симметрично относительно Красноморского рифта: по обеим сторонам находятся поднятия (Аравийский и Нубийский щиты), которые переходят в платформу. Центральные части плит слабо сейсмичны, единичные землетрясения связаны с дугообразными разломами северо-восточного простирания.

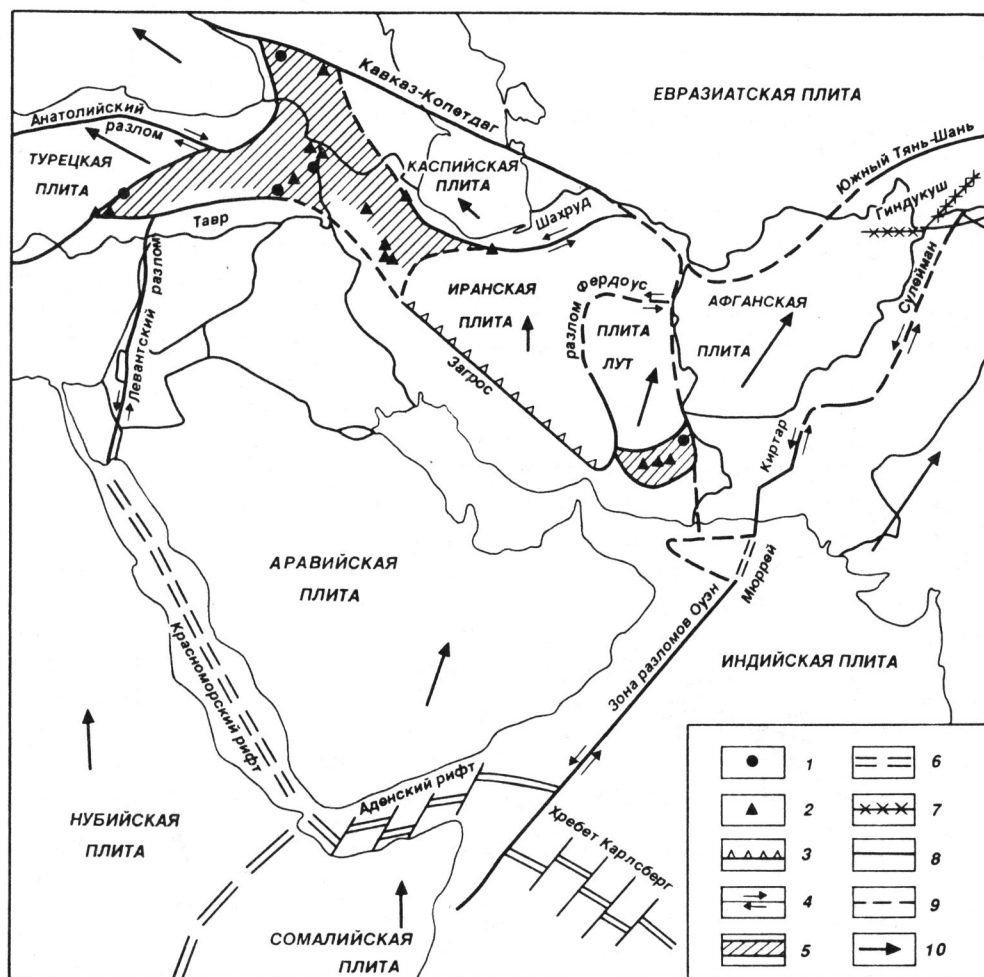


Рис. 1. Геодинамическая модель региона Ближнего Востока (по [2])

1 – активные вулканы, 2 – четвертичные вулканы, 3 – надвиг, 4 – сдвиги, 5 – вулканиды, 6 – зоны спрединга, 7 – сейсмически активная зона с глубиной гипоцентров 100–200 км, 8 – границы плит, 9 – предполагаемые границы плит, 10 – направление и относительная скорость движения микроплит

Границы других плит, проведенные в основном по сейсмическим данным, также находят отчетливое отражение в геологии. Стабильный массив Лут ограничен крупными меридиональными разломами: на севере – разломом Фердоус, а южная граница проводится по комплексу четвертичных основных вулканитов, свидетельствующих о глубинном разломе и локальном растяжении этого участка земной коры. Афганская плита отделяется от Индийской зоной разломов Киртар–Сулейман (левый сдвиг). Для Каспийской плиты характерна слабая сейсмичность, возможно, это связано с отсутствием гранитного слоя и повышенным тепловым потоком. Северной границей Альпийской складчатой области является зона глубинных разломов Кавказ–Копетдаг, для которой характерен механизм сжатия.

На основании этих данных, а также результатов работы [5] была построена схема блокового строения региона (рис. 2), которая и использовалась для моделиро-

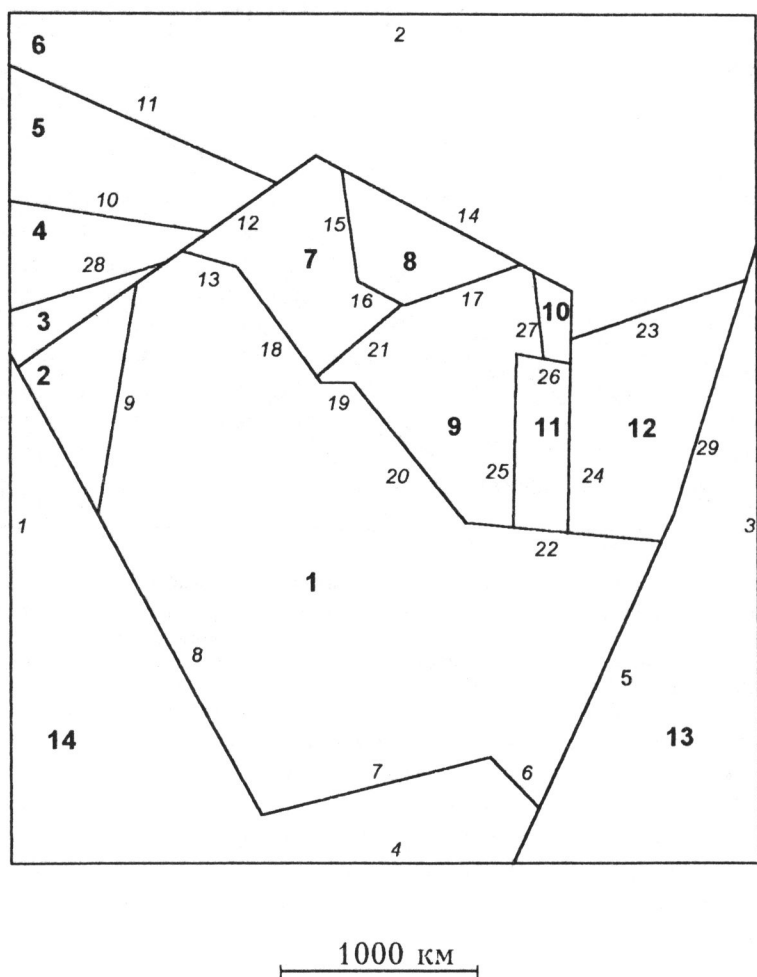


Рис. 2. Блоковая модель региона Ближнего Востока (верхняя плоскость)
Жирным шрифтом даны номера блоков, курсивом – номера разломов

вания. Отметим, что в модели границы блоков были спрямлены и сильно схематизированы, однако все основные структурные элементы на этой схеме отражены. Модель состоит из 14 блоков, разделенных 29 разломами, толщина слоя $H = 40$ км, данные о параметрах разломов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Значения параметров для разломов

Номера разломов	K , бар/см	V , см/бар	V_s , см/бар	B	H_f	H_s
1 – 4	0.00	0.05	200	0.10	0.085	0.07
5 – 9	0.01	1.00	4000	0.10	0.085	0.07
10 – 29	1.00	0.05	200	0.10	0.085	0.07

Угловая скорость поворота подстилающей среды относительно геометрического центра подошвы блока $W = -0.01(10^{-6}$ рад) для блока 1, $W = 0$ для остальных блоков. Для всех блоков $K_u = 1.00$, $V_u = 0.05$. Повышенные значения параметров V и V_s и пониженные значения K для разломов южной окраины Аравийской плиты (N 5–9) выбраны с целью отразить иерархию разломов – это разломы первого порядка, разделяющие крупнейшие структуры литосферы. Большинство разломов имеет почти вертикальное падение (85°), только разломы, соответствующие зонам Загрос и Копетдаг, наклонены под углом 30° . Для того чтобы отразить движение блоков литосферы, для каждого блока задавались величины линейной скорости подстилающей среды (рис. 3, табл. 2). Параметры моделей подбирались, при этом главным критерием оценки результатов служило сходство распределения эпицентров модельных и реальных землетрясений.

ТАБЛИЦА 2. Скорости поступательного движения подстилающей среды под блоками

Номер блока	Модель 1		Модель 2		Модель 3	
	V_x	V_y	V_x	V_y	V_x	V_y
1	5	25	5	25	5	25
2	-5	0	-5	0	-5	0
3	-5	0	-5	0	-5	0
4	-5	0	-5	0	-5	0
5	-5	0	-5	0	-5	0
6	0	-15	5	0	0	-15
7	5	0	5	5	-5	-5
8	5	0	10	10	-10	-10
9	10	0	10	10	-5	-5
10	10	0	10	10	-10	-10
11	10	0	15	15	-5	-5
12	15	0	15	15	-10	-10
13	20	0	15	0	-10	-10
14	-5	-25	-5	-25	-5	-25

Примечание. V_x и V_y – горизонтальные составляющие вектора скорости, см, по оси X и Y соответственно.

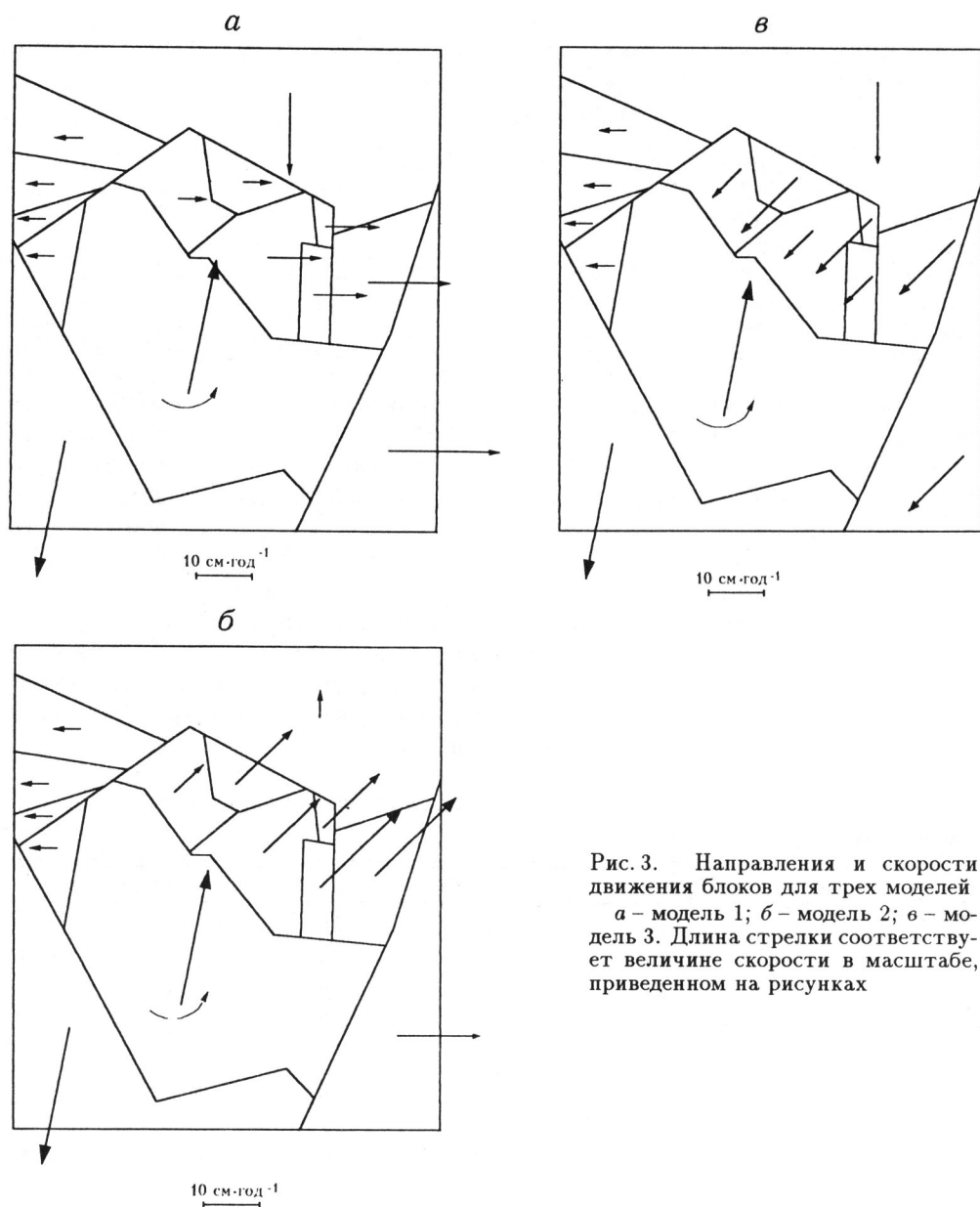


Рис. 3. Направления и скорости движения блоков для трех моделей
 а – модель 1; б – модель 2; в – модель 3. Длина стрелки соответствует величине скорости в масштабе, приведенном на рисунках

Здесь рассмотрены три варианта модели, отражающие изменения динамики в зависимости от относительных движений блоков. Они различаются только направлением и величиной скорости движения блоков северо-восточной части региона, поскольку динамика именно этих блоков вызывает наибольшие споры. Геометрия блоков и величины параметров модели одинаковы. Первая модель отражает относительное растяжение в широтном направлении, вторая – растяжение в северо-восточном направлении и третья – интенсивное сжатие. При нулевых начальных

условиях во всех вариантах длительность моделирования составляла 100 единиц безразмерного времени, шаги дискретизации пространства и времени были приняты соответственно 40 км и 0.001.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате моделирования получены искусственные каталоги землетрясений, которые анализировались теми же методами, что и реальные. При создании искусственных каталогов 1 единица безразмерного времени интерпретировалась как 1 год. Полученные каталоги различаются как общим числом землетрясений, так и их пространственным распределением. За 100 условных лет больше всего землетрясений (27 274) произошло в модели 1 (широтное растяжение), для модели 2 число землетрясений равно 18 300, для модели 3 (сжатие) оно меньше всего (13 917).

Магнитуда землетрясений искусственных каталогов вычислялась по формуле (см. [10])

$$M = (\lg S + 4.01)/1.02,$$

где S – суммарная площадь, км², на которой величина ε превзошла порог B . В полученных каталогах магнитуда варьирует от 6 до 8.5 и явно завышена относительно реальных значений. Для того чтобы распределение магнитуд приблизить к реальному, было выполнено преобразование магнитуд по формуле

$$M' = 3.15M - 18.10,$$

где M – исходная магнитуда.

Коэффициенты в этой формуле выбраны из условия наилучшего приближения линейного участка графика повторяемости искусственного каталога для модели 1 аналогичным графиком для реального каталога. В качестве реального каталога была использована выборка из каталога NEIC [11] с 1964 по 1994 г. для территории, ограниченной координатами 12–44°N и 30–75°E. Рассматривались землетрясения с фокальной глубиной, не превышающей 40 км, что соответствует глубине слоя, заданной при моделировании. Каждому землетрясению приписывалась магнитуда, максимальная из приведенных в каталоге NEIC.

Графики повторяемости для реального и трех искусственных каталогов приведены на рис. 4. Видно, что наибольшие отличия искусственных каталогов от реального возникают в области больших магнитуд ($M \geq 6.5$): для реального каталога график повторяемости линеен, а для всех искусственных – имеет выпуклую форму, отражающую недостаток сильных землетрясений. Величина тангенса угла наклона графика повторяемости для интервала магнитуд 4.5 – 6.5 составила 1.14 для модели 1, 0.98 для модели 2 и 1.28 для модели 3. Для реального каталога эта величина равна 1.10.

Дальнейший анализ результатов моделирования удобнее вести в терминах энергии, связь которой с магнитудой выражается формулой [12]

$$\log E = 12.24 + 1.44M \quad (E - \text{энергия, эрг}).$$

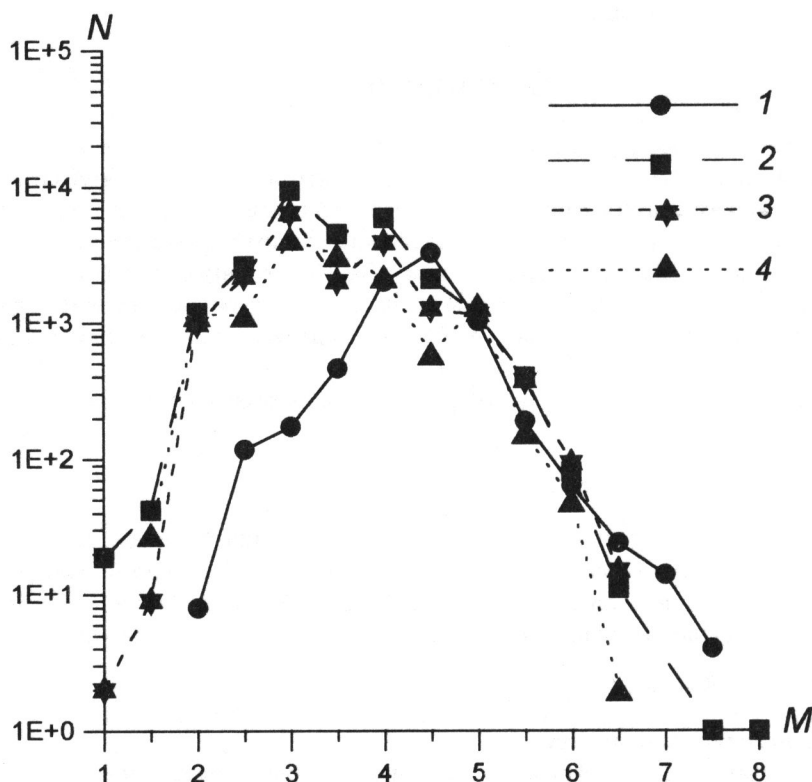


Рис. 4. Графики повторяемости для реального и модельных каталогов
 1 – реальный каталог; 2 – модель 1; 3 – модель 2; 4 – модель 3; M – магнитуда; N – число событий

Распределение выделившейся энергии во времени для трех моделей показано на рис. 5. Максимальное количество энергии выделилось при широтном растяжении (модель 1), минимальное – при сжатии (модель 3), что, очевидно, связано с большими величинами деформации при растяжении. Отметим, что для моделей 2 и 3 намечается определенная периодичность максимумов выделения энергии: 10–12 лет для модели 3 и 28–30 лет для модели 2. Распределение энергии для данного региона за период около 30 лет, полученное на основе реальных данных, отличается большей контрастностью, что связано с наличием землетрясений, имеющих $M > 7.5$ (рис. 6); повышение сейсмичности намечается через 11–12 лет. Заметим, что время в реальном и искусственных каталогах трудно сопоставимо. С одной стороны, сейсмическая энергия всего региона, выделившаяся за 30 лет, лишь в 2 раза меньше аналогичной величины для каталога модели 1 за 100 лет (100 единиц безразмерного времени). С другой стороны, скорости движения блоков в несколько раз завышены относительно реальных значений. Это необходимо иметь в виду при интерпретации полученных результатов.

Пространственное распределение эпицентров землетрясений с $M \geq 4.5$ для искусственных каталогов показано на рис. 7. Следует отметить, что в силу больших размеров региона в этих распределениях имеются значительные искажения, связанные с тем, что в модели не учитывается сферичность Земли. Искажения особенно велики в областях, соответствующих разломам зоны Лут (разломы N 24, 25) и Киртар–Сулейман (разлом 29). Существование эпицентров, локализованных вне разломов, объясняется тем, что в модели координаты землетрясения вычисляются как взвешенная сумма координат тех частей разломов, на которых величина δ одновременно превзошла порог B .

Учитывая перечисленные выше обстоятельства, можно сделать вывод, что практически все сейсмические зоны, полученные в результате моделирования, соответствуют реальным (рис. 7, 8). Исключение составляет сложная зона Южный Тянь-Шань – Гиндукуш, которая практически не отражена в моделях.

Сравнивая пространственное распределение сейсмичности, полученное в разных моделях, можно сказать, что наибольшие отличия наблюдаются на разломах Загроса (N 13, 18–20, 22) и разломах, ограничивающих плиту Лут (N 24, 25).

В моделях 1, 2 (растяжение) максимально активными являются разломы, ограничивающие массив Лут, и линия Кипр–Кавказ; в модели 3 (сжатие) наиболее сейсмически активной оказывается зона Загрос (см. рис. 7). В реальной сейсмичности активными являются как южная ветвь структуры Загрос и разломы Кипр–Кавказ, так и разломы, ограничивающие массив Лут. Таким образом, для разных участков прослеживаются черты всех моделей – с элементами растяжения и сжатия. Наконец, отдельные сейсмические зоны, существующие в реальности, не отражены ни в одной из моделей (разлом Мертвого моря). По-видимому, в дальнейшем можно добиться большего сходства моделей с реальностью, изменив параметры модели и скорости движения блоков. Однако уже сейчас несомненно общее сходство реальных и модельных сейсмических зон, что подтверждает правильность выделения блоков и определения их относительных перемещений.

Еще одна интересная возможность для анализа динамики системы блоков, реализованная в модели, заключается в исследовании "миграции" землетрясений, т.е. временной последовательности землетрясений в определенной части разлома. Для всех сегментов такая миграция существует на начальной стадии моделирования. На рис. 9 указано направление миграции эпицентров вдоль активных разломов. Основное отличие состоит в различном направлении миграции в зоне Загрос: с юго-востока на северо-запад для модели 3 и в обратном направлении для модели 2, в случае модели 1 миграция для северной и южной ветвей Загроса направлена в разные стороны. Конечно, в реальности обнаружить миграцию гораздо сложнее, но в некоторых случаях можно проследить тенденцию направленного смещения землетрясений по разлому. Одним из примеров такого рода является Анатолийский разлом [13]. Та же тенденция смещения землетрясений с юго-востока на северо-запад прослеживается в некоторые периоды и для зоны Загрос.

Таким образом, проведенные исследования в целом показали перспективность использования моделирования динамики литосферы для решения задач геодинамики. Несмотря на схематичность и предельное упрощение, модель отражает многие важные черты реальной динамики. Искусственные каталоги, получаемые в результате моделирования, могут отражать определенные свойства сейсмического

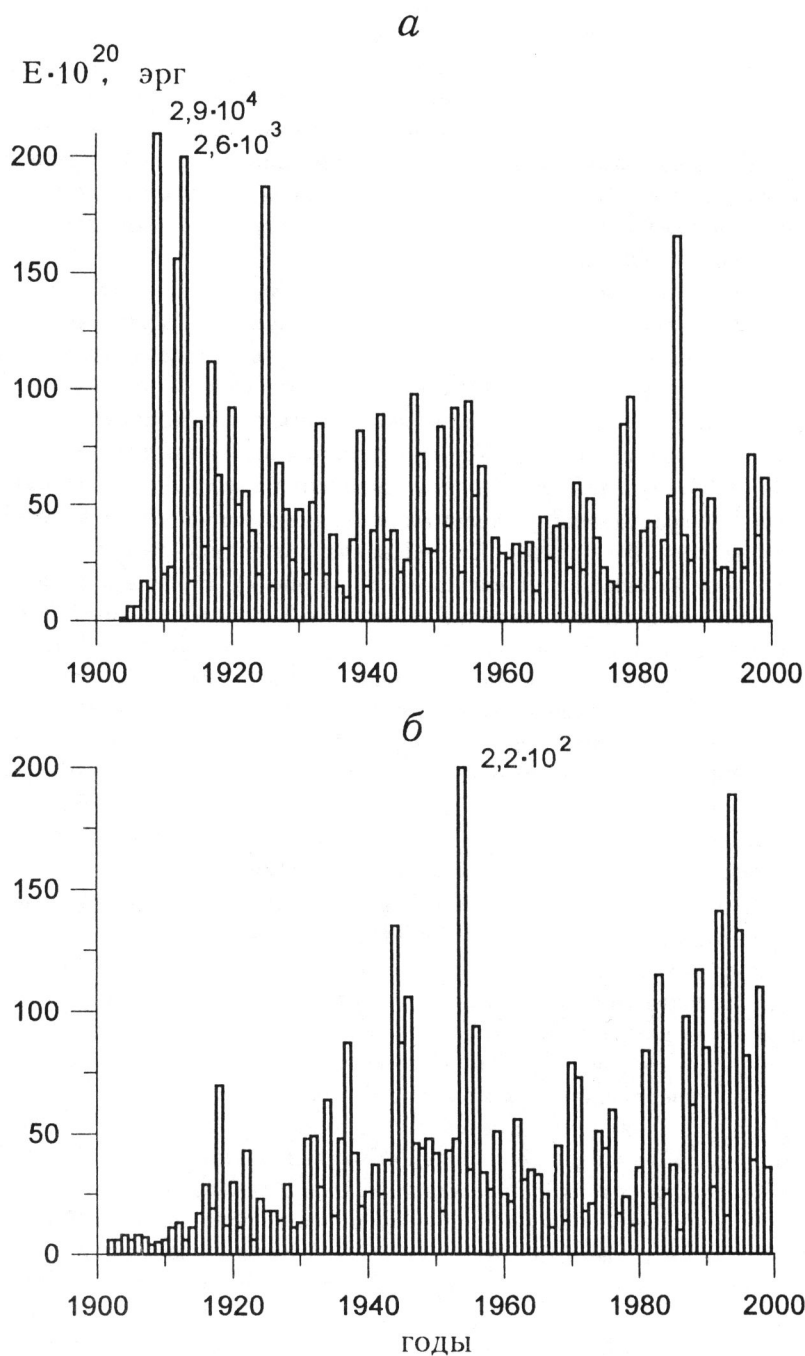


Рис. 5. Распределение во времени энергии для трех моделей
a – модель 1; *б* – модель 2; *в* – модель 3

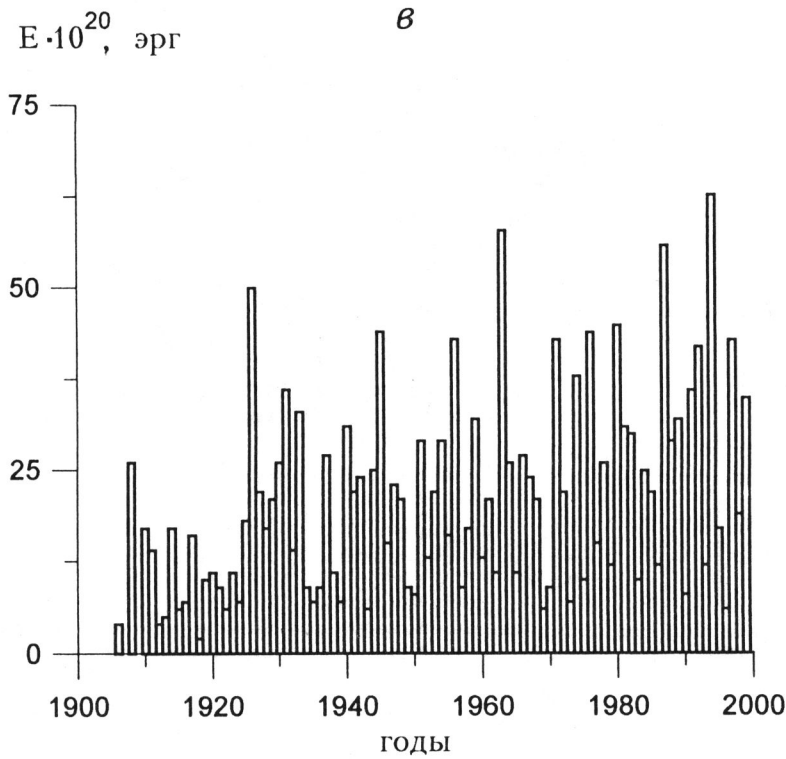


Рис. 5 (окончание)

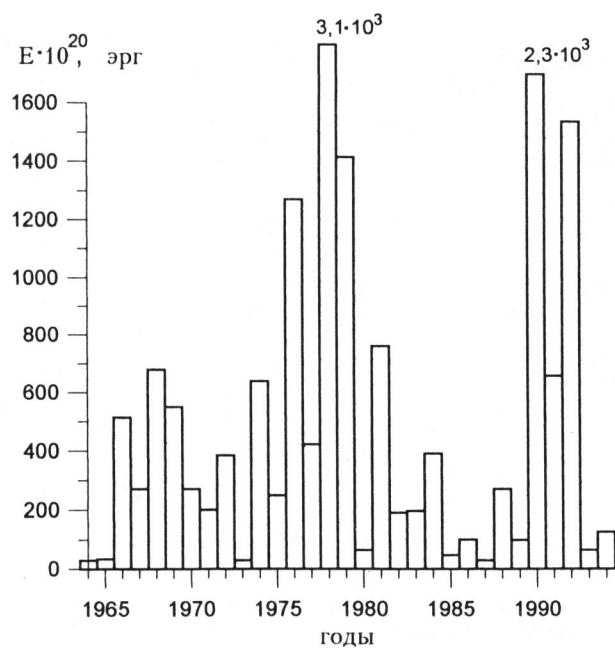


Рис. 6. Распределение во времени энергии для реального каталога

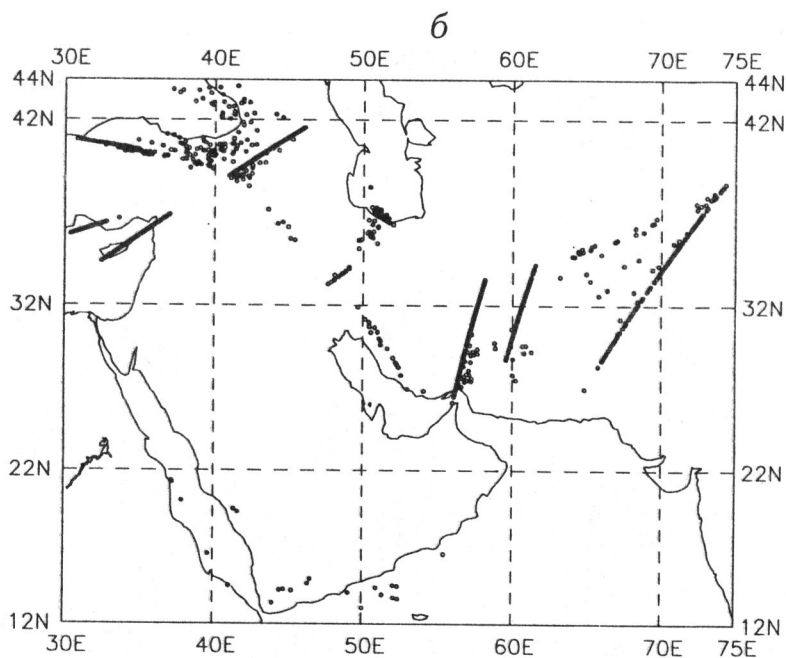
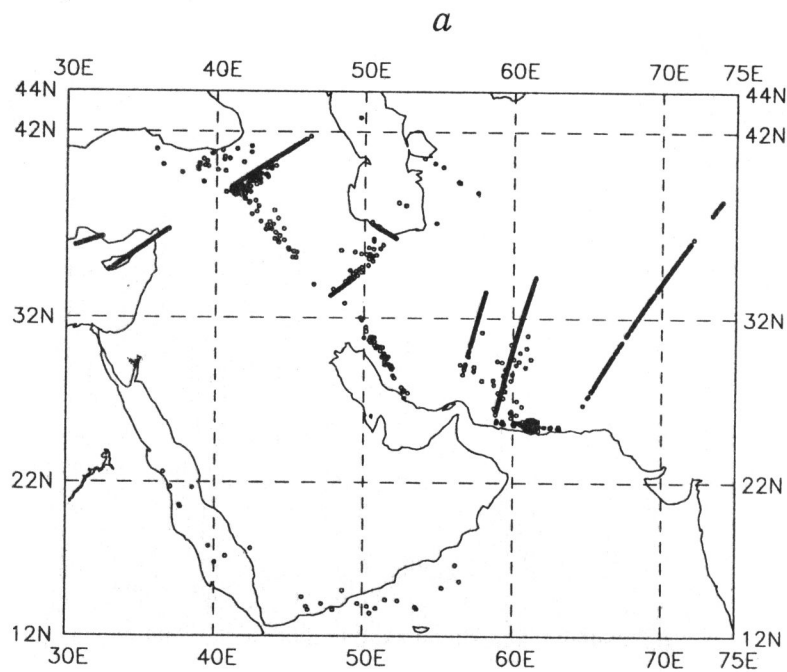


Рис. 7. Эпицентры модельных землетрясений $M \geq 4.5$ (маленькие кружки) и с $M \geq 7$ (большие кружки)

a – модель 1; *б* – модель 2; *в* – модель 3

б

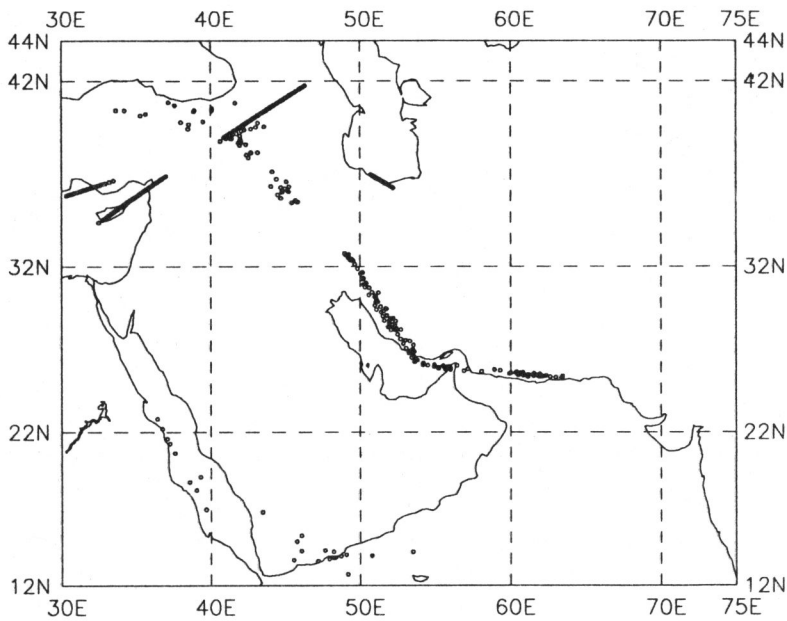


Рис. 7 (окончание)

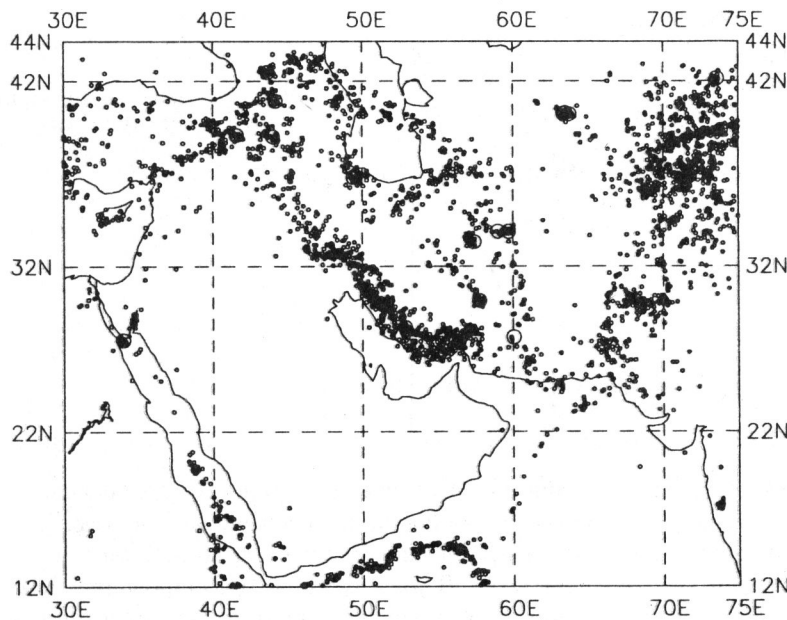


Рис. 8. Эпицентры землетрясений региона Ближнего Востока с 1964 по 1994 г. (по [11]) с $M \geq 4.5$ (маленькие кружки) и $M \geq 7$ (большие кружки)

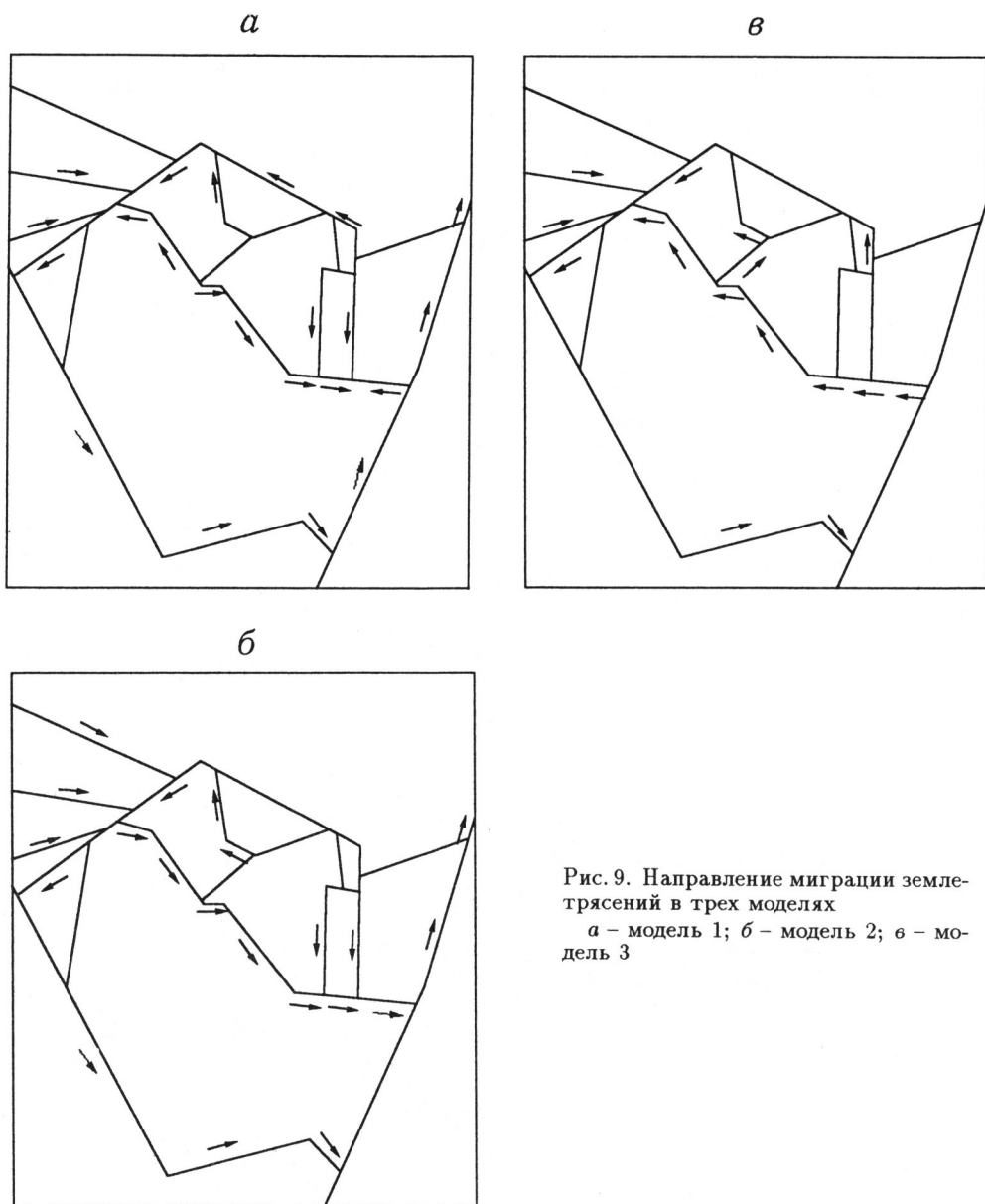


Рис. 9. Направление миграции землетрясений в трех моделях

а – модель 1; б – модель 2; в – модель 3

процесса и его распределения во времени и пространстве. Для региона Ближнего Востока подтверждено разбиение на блоки, предложенное в работах [2, 3], и в первом приближении картина распределения землетрясений по модельным разломам соответствует действительности. В ряде случаев моделирование может помочь найти закономерности распределения землетрясений в пространстве и времени.

Дополнительные возможности откроются, если в модели можно будет учитывать трехмерные движения блоков. Моделирование отдельных локальных геоло-

логических структур (элементарных геологических обстановок) и использование моделирования в комплексе с данными, полученными структурной геологией, геофизикой и геохимией, позволит проверить и уточнить районирование территории по геологическим признакам.

Благодарности. Авторы выражают благодарность академику Д.В. Рундквисту, который предложил идею этой работы и оказал большую помощь при ее выполнении, и академику В.И. Кейлис-Бороку за обсуждение статьи. Работа выполнена при поддержке ИНТАС (гранты INTAS 93-457 и INTAS 94-232) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 94-05-16599).

ЛИТЕРАТУРА

1. *McKenzie D.P., Davies D.* Plate tectonics of the Red Sea and East Africa // *Nature*. 1970. Vol.226, N 18. P.243-248.
2. *Nowroozi A.A.* Focal mechanism of earthquakes in Persia, Turkey, West Pakistan and Afghanistan and plate tectonics of the Middle East // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1972. Vol.62, N 3. P.823-850.
3. *Westaway R.* Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean // *J. Geophys. Res.* 1994. Vol.99, B 6. P.12071-12090.
4. *Габриэлов А.М., Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Интерпретация блоковой структуры региона посредством блоковой модели динамики литосферы // Математическое моделирование сеймотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. Вып.1. М.: МИТП РАН. 1993. С.11-19.
5. *Рундквист Д.В., Ротвайн И.М.* Современная геодинамика и сейсмичность Малой Азии // Теоретические проблемы геодинамики и сейсмологии. М.: Наука, 1994. С.201-244. (Вычисл. сейсмология; Вып.27).
6. *Габриэлов А.М., Кейлис-Борок В.И., Левшина Т.А., Шапошников В.А.* Блоковая модель динамики литосферы // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С.168-178. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).
7. *Габриэлов А.М., Левшина Т.А., Ротвайн И.М.* Блоковая модель динамики литосферы и прогноз землетрясений // Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных. М.: Наука, 1989. С.46-55. (Вычисл. сейсмология; Вып.22).
8. *Hempton M.R.* Constraints on Arabian plate motions and extensional history of the Red Sea // *Tectonics*. 1987. Vol.6, N 6. P.687-705.
9. *Joffe S., Garfunkel Z.* Plate kinematics of the circum Red Sea-evaluation // *Tectonophysics*. 1987. Vol.141, N 1. P.5-22.
10. *Utsu T., Seki A.* A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock // *J. Seism. Soc. Japan*. 1954. Vol.7. P.233-240.
11. Global Hypocenters Data Base CD-ROM 1993. NEIC/USGS. II Denver, CO.
12. *Duda S.J.* Secular seismic energy release in the circum-pacific belt // *Tectonophysics*. 1966. Vol.2, N 5. P.409-452.
13. *Dewey J.W.* Seismicity of Northern Anatolia // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1976. Vol.66. P.843-868.