

УДК 550.34

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ И СЕЙСМИЧНОСТИ ЗАПАДНЫХ АЛЬП

И.А. Воробьева, А.И. Горшков, А.А. Соловьев

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

Моделирование блоковой динамики и сейсмичности Западных Альп выполнено на основе морфоструктурной схемы изучаемой территории, отражающей реальную геометрию разломов и блокового строения региона. При моделировании регион рассматривается как система абсолютно жестких блоков, разделенных бесконечно тонкими плоскостями разломов. Задается вязко-упругое взаимодействие блоков между собой и с подстилающей средой. Смещения и повороты блоков в каждый момент времени вычисляются таким образом, чтобы вся система блоков находилась в состоянии квазистатического равновесия. Когда в какой-либо части разлома отношение напряжения к давлению превосходит заданный порог, возникает разрыв, который рассматривается в модели как землетрясение. В результате моделирования получено восемь искусственных каталогов землетрясений Западных Альп. Пространственное распределение искусственных землетрясений отражает ряд особенностей в распределении реальной сейсмичности. Выявлено сходство графиков повторяемости, построенных для искусственной и реальной сейсмичности. Обнаружена концентрация искусственных землетрясений в местах, где в соответствии с инструментальными каталогами землетрясений отсутствуют сильные события, но которые были ранее идентифицированы с помощью алгоритмов распознавания образов как высокосейсмичные.

MODELLING OF THE BLOCK STRUCTURE DYNAMICS AND SEISMICITY OF THE WESTERN ALPS

I.A. Vorobieva, A.I. Gorshkov, and A.A. Soloviev

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

Modeling of the block structure dynamics and seismicity is made on the basis of morphostructural scheme of the territory under study, which reflects the real geometry of faults and block structure of the region. The region is modeled as a system of absolutely rigid blocks separated by infinitely thin plane faults. The interaction of the blocks along the fault planes and with the underlying medium is viscous-elastic. Translations and rotations of blocks are calculated in such a way that the system is in the state of quasistatic equilibrium. When for some part of fault plane the ratio of stress to pressure exceeds a certain level a rupture occurs, which is interpreted as an earthquake in the model. Eight synthetic catalogs of earthquakes

for Western Alps are generated as a result of the numerical simulation. The space distribution of epicenters of the synthetic earthquakes reflects some features of the observed seismicity distribution. There is a similarity in the frequency-of-occurrence relations for the synthetic and observed seismicity. The concentration of the synthetic events is found in the places where no large earthquakes are reported in the catalogs, but which were previously identified as seismically active by pattern recognition algorithms.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение сейсмичности и особенно ее вариаций во времени на основе каталогов наблюдаемых землетрясений затруднено из-за крайне короткой истории инструментальных наблюдений по сравнению со временем действия тектонических факторов, обуславливающих сейсмичность в том или ином регионе. Например, современная морфоструктура Западных Альп и поле региональных тектонических напряжений сформировались в середине плейстоцена (около 1,5 млн лет тому назад) [1], в то время как период инструментальных наблюдений в этом регионе фактически не превышает 60 лет. В такой ситуации представляется целесообразным использовать методику моделирования динамики блоковых структур и сейсмичности, позволяющую получать искусственные каталоги землетрясений, которые покрывают существенно более длительные интервалы времени.

В настоящей работе продолжены исследования по моделированию динамики блоковой структуры Западных Альп, результаты которых частично представлены в работах [2, 3]. Моделирование проведено на основе схемы морфоструктурного районирования Западных Альп, составленной ранее для решения задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [4-6]. Морфоструктурное районирование [6-8] базировалось на представлении о том, что литосфера представляет собой иерархическую систему блоков разного порядка, начиная с естественной кусковатости горных пород и заканчивая литосферными плитами планетарного масштаба [9,10].

При моделировании предполагалось, что сейсмоактивный регион состоит из системы блоков, разделенных узкими, ослабленными и менее консолидированными (по сравнению с блоками) зонами разломов. В ходе сеймотектонического процесса землетрясения возникают в этих зонах.

Методика моделирования, используемая в данной работе, применялась для изучения сейсмичности и геодинамики регионов Вранча [11] и Ближнего Востока [12]. В обоих случаях обнаружено определенное сходство свойств наблюдаемой и модельной сейсмичности. Это свидетельствует о том, что используемая модель отражает связь сейсмичности с отдельными особенностями геодинамики региона.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование было выполнено в соответствии с моделью динамики блоковой структуры, которая подробно описана в работах [11,13,14]. Методика моделирования основана на следующих основных предположениях.

Часть литосферы, соответствующая сейсмоактивному региону, представляется как слой толщины H между двумя параллельными горизонтальными плоскостями. Этот слой разделен на блоки плоскостями разломов. Блоки предполагаются

абсолютно жесткими, так что все деформации возникают только в плоскостях разломов и на подошвах блоков, которые отделяют их от подстилающей среды.

Взаимодействие между блоками и подстилающей средой предполагается вязкоупругим. Смещения блоков возникают вследствие заданных движений внешних границ структуры и подстилающей среды.

Величина плотности (на единицу площади) упругой силы в рассматриваемой точке пропорциональна разности смещения блока относительно подстилающей среды, или относительного смещения блоков в плоскости разделяющего их разлома и неупругого смещения в этой точке. Скорость роста неупругого смещения пропорциональна величине плотности упругой силы. Соответственно,

$$\mathbf{f} = K(\Delta\mathbf{r} - \mathbf{d}), \quad \frac{d\mathbf{d}}{dt} = W\mathbf{f}, \quad (1)$$

где \mathbf{f} – вектор плотности упругой силы в рассматриваемой точке, принадлежащей нижней плоскости или плоскости разлома, $\Delta\mathbf{r}$ – вектор смещения блока относительно подстилающей среды в нижней плоскости или вектор относительного смещения блоков в плоскости разделяющего их разлома, \mathbf{d} – вектор неупругого смещения.

В каждый момент времени определяющие горизонтальные смещения блоков, векторы сдвига и углы поворота вычисляются из условия равенства нулю суммы сил, действующих на каждый из блоков и равенства нулю суммарного момента этих сил, т.е. из условия квазистатического равновесия структуры. Все смещения предполагаются бесконечно малыми по отношению к геометрическим размерам блоков, что позволяет не учитывать изменение геометрии структуры при моделировании.

Для реализации численного моделирования выполняется пространственная дискретизация: поверхности (плоскости разломов и подошвы блоков), на которых действуют силы, разбиваются на ячейки, имеющие форму трапеций, с линейными размерами, не превосходящими постоянную ε , значение которой задается. Предполагается, что вектор неупругого смещения \mathbf{d} , координаты X, Y и векторы плотности сил одинаковы во всех точках одной ячейки.

В случае, когда на некотором участке плоскости разлома отношение касательного напряжения к давлению превосходит заданный порог, возникает разрыв, который приводит к перераспределению напряжений в системе и, как следствие, может вызвать разрывы на других участках плоскости того же или другого разлома. В модели такой сброс напряжений интерпретируется как землетрясение, и результатом численного моделирования является искусственный каталог землетрясений.

Обозначим через f и p величины действующих на единицу площади плоскости разлома упругой силы, вектор которой лежит в плоскости разлома, и силы реакции, нормальной к плоскости разлома. Момент возникновения землетрясения определяется значением отношения

$$\kappa = f/(P \pm p), \quad (2)$$

где постоянная P имеет одно и то же значение для всех разломов и может быть интерпретирована как разность между литостатическим и гидростатическим давлением в земной коре. В случае растяжения в перпендикулярном плоскости разлома направлении, в знаменателе (2) стоит знак “–”, в случае сжатия – знак “+”. Для

каждого разлома задаются значения трех порогов: $B > H_f \geq H_s$. Начальные значения смещений и поворотов блоков и неупругих смещений на разломах задаются таким образом, чтобы везде было выполнено соотношение $\kappa < B$. Если в какой-то момент времени на каком-либо разломе (в одной или нескольких ячейках) значение отношения κ достигает или превосходит значение порога B для соответствующего разлома, то вычисляются новые значения неупругих смещений так, чтобы для нового значения κ было справедливо равенство $\kappa = H_f$. Затем определяются новые положения блоков из условия квазистатического равновесия. Если после этого значение κ превосходит порог B для какой-либо ячейки или ячеек, процесс пересчета неупругих смещений и определения новых положений блоков повторяется. Это интерпретируется как землетрясение. В качестве координат эпицентра и глубины очага землетрясения вычисляются взвешенные суммы координат и глубин ячеек, для которых значение κ превосходило порог B , с весами, пропорциональными площадям ячеек. Магнитуда землетрясения M вычисляется по формуле

$$M = 0,98 \lg S + 3,93, \quad (3)$$

где S – сумма площадей (в км²) ячеек, образующих землетрясение, а значения коэффициентов выбраны в соответствии с [15].

После землетрясения соответствующие ячейки разломов находятся в состоянии крипа. Это означает, что для них скорость роста неупругих смещений больше, чем в обычном состоянии при той же величине плотности упругой силы, т.е. в (1) вместо постоянной W используется постоянная W_s ($W_s > W$). Состояние крипа прекращается, когда наступает момент времени, в который $\kappa \leq H_s$.

БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ ЛИТОСФЕРЫ ЗАПАДНЫХ АЛЬП

Западные Альпы входят в состав подвижного Средиземноморского сейсмического пояса, развивающегося в условиях сильнейшего сжатия. Современное поле региональных тектонических напряжений создается взаимодействием Апеннинской плиты с Евроазиатской. Движение Апеннинской плиты в целом обусловлено продвижением Африканской плиты в северном направлении, в результате чего Апеннинская плита оказывает давление на горный пояс Альп по всему его фронту. Непосредственно в зоне взаимодействия с Западными Альпами Апеннинская плита давит на них в близширотном направлении с востока на запад [16]. Скорости движения плит невелики. Так, скорость дрейфа Африканской плиты, наиболее активной из перечисленных, по оценкам [17] не превышает 1 см/год, при этом ее поступательное движение затухает в субдукционных зонах Средиземноморья. Соответственно, скорость Апеннинской плиты значительно ниже, а Евроазиатская плита считается стационарной.

Блоковая модель Западных Альп, исследуемая в данной работе, базируется на результатах морфоструктурного районирования этой территории, проведенного ранее для выявления мест повышенной тектонической активности – дизъюнктивных узлов и решения на этой основе задачи распознавания мест возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 5,0$ [4-6].

Морфоструктурное районирование позволяет изучать современное блоковое строение земной коры путем совместного анализа геоморфологических, геологических и спутниковых данных [6-8]. При районировании Западных Альп [4] было

выделено три категории морфоструктур: блоки трех иерархических уровней, ограничивающие их активные зоны (линеаменты), тоже трех рангов, и места пересечения линеаментов (дизъюнктивные узлы). Было установлено, что эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 5,0$ приурочены к дизъюнктивным узлам, что позволило с помощью алгоритмов распознавания определить те узлы, где возможны землетрясения с $M \geq 5,0$ [5,6]. Распознавание было проведено с использованием геолого-геоморфологических и гравитационных характеристик мест пересечения линеаментов без учета каких-либо геодинамических факторов. Поэтому представляет интерес проверить, как соотносятся высокосейсмичные зоны, определенные посредством распознавания, с пространственным распределением землетрясений, получаемых в модели.

Для моделирования динамики блоковой структуры и сейсмичности Западных Альп была использована мозаика блоков, образуемая линеаменами только первого и второго рангов, установленными в результате морфоструктурного районирования (рис. 1). Линеаменты первого ранга соответствуют региональным тектоническим разломам, отделяющим горно-складчатое сооружение Западных Альп от прилегающих платформенных областей и глубоководной впадины Лигурийского моря. Линеаменты второго ранга делят горную страну на восемь мегаблоков, которые отличаются друг от друга уровнем высот рельефа, ориентацией горных хребтов и геологическим строением. Мегаблоки существенно различаются по геометрической форме и линейным размерам. Их длина вдоль простирания горной цепи изменяется от 50 до 150 км, а ширина от 40–50 до 75–100 км.

Линеаменты второго ранга, в зависимости от их ориентации относительно простирания горной цепи, разделены на продольные и поперечные.

Продольные линеаменты соответствуют крупным тектоническим разломам. Зона линеамента 1-1 (Бриансонский разлом) разделяет Внешние Альпы (мегаблоки А, Г, Е) и Внутренние Альпы (мегаблоки Б, Д, Ж), сложенные гельветским и пеннинским комплексами пород, соответственно. Вдоль разлома происходит продвижение Внутренних Альп на Внешние Альпы, вызываемое давлением Апеннинской плиты, что привело к образованию глубинного надвига в кристаллическом фундаменте с углом наклона 35° – 45° [18]. Линеамент 2-2 соответствует продолжению Бриансонского разлома в Западных Альпах. Согласно результатам сейсмопрофилирования, падение плоскости разлома в этой части Альп субвертикально [16]. Линеамент 3-3 представляет собой западную часть Инсубрийского разлома. Плоскость разлома имеет небольшой наклон к северу [16].

Поперечные линеаменты 4-4, 5-5, 6-6, 7-7 и 8-8 установлены при морфоструктурном районировании. В отличие от продольных, они не связаны с зонами крупных протяженных разломов. Исключение составляет линеамент 6-6, соответствующий ожному ответвлению Инсубрийского разлома. Поперечные линеаменты трассируются по комплексу прерывистых форм, вытянутых в одном направлении: линии разломов и флексур, тектонических уступов, прямолинейных участков речных долин. Эти линеаменты играют существенную роль в морфоструктуре Западных Альп: с ними связаны резкие переломы в простирании горной системы и значительные различия высот и характера рельефа в мегаблоках, разграниченных этими линеаменами. Более детальная характеристика содержится в [4].

На основе результатов морфоструктурного районирования была построена схема блокового строения для проведения моделирования, представленная на рис. 2.

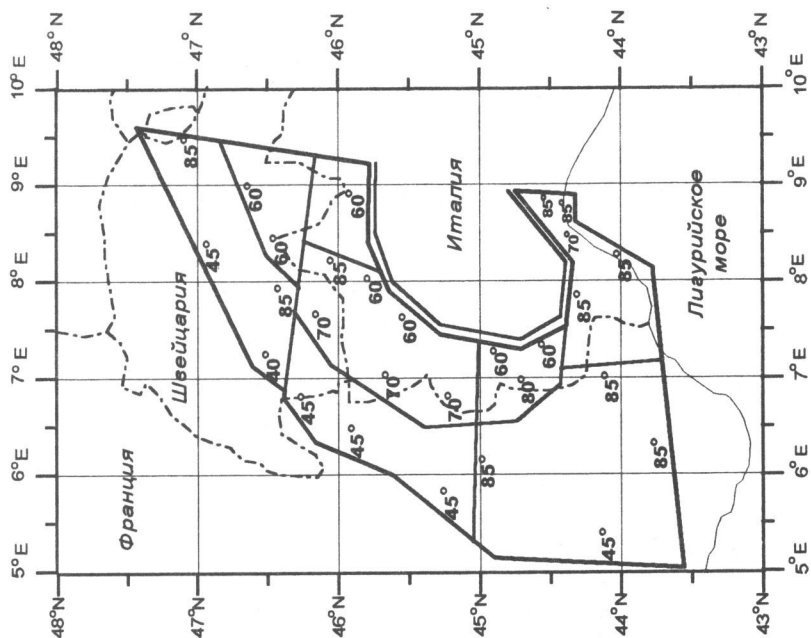


Рис. 2. Блочная структура, для которой выполнено численное моделирование (цифры – значения углов падения плоскостей разломов)

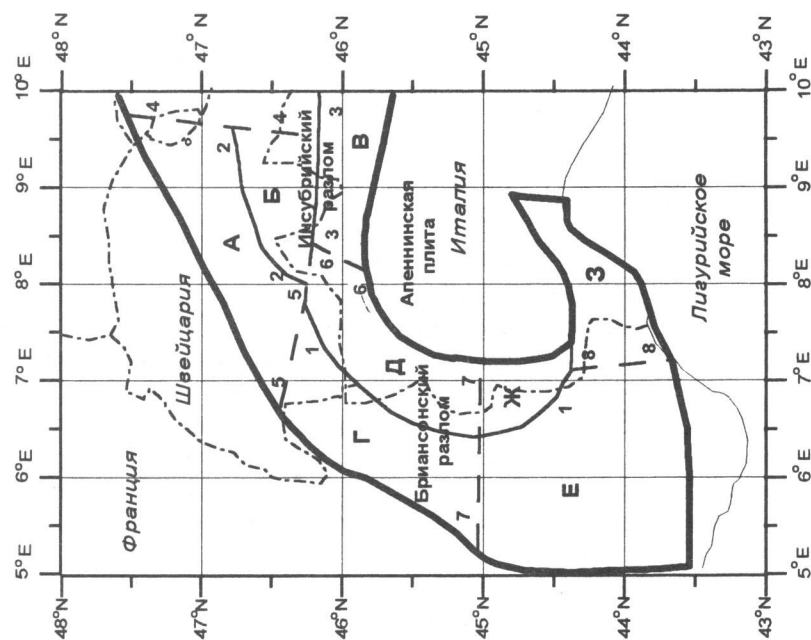


Рис. 1. Упрощенная схема морфоструктурных линейментов Западных Альп.

Жирные линии – линейменты первого ранга, тонкие – линейменты второго ранга: продольные (сплошные линии) и поперечные (штриховые линии). Объяснения цифровых и буквенных обозначений даны в тексте

Границы блоков в этой модели спрямлены, но структура региона отражена адекватно. Модель состоит из 8 блоков, разделенных 28 разломами.

Параметры модели. Исходя из данных о глубине поверхности Мохо, толщина всех блоков была принята равной 30 км; в Западных Альпах она варьирует от 25 до 40 км [19]. Падение большинства разломов (значения углов приведены на рис. 2) задано в соответствии с данными сейсмопрофилирования, упоминавшимися выше.

Поскольку предполагается, что основные напряжения в регионе создаются под давлением Апеннинской плиты, движение при моделировании задавалось только на разломах, отделяющих Западные Альпы на востоке от Апеннинской плиты (эти разломы обозначены на рис. 2 двойной линией). Во всех выполненных расчетах было задано поступательное движение этой части границы со скоростью 10 см за одну единицу безразмерного времени, используемого в модели. Направление этого движения варьировалось в численных экспериментах: угол γ между направленным на север меридианом и вектором скорости движения границы изменялся от 0° до 180° . Остальная часть боковой границы блоковой структуры и подстилающая среда под блоками считались неподвижными.

Для всех разломов были заданы одинаковые значения постоянных, входящих в формулу (1) и определяющих возникновение землетрясений и крипа: $K = 1$ бар/см, $W = 0.05$ см/бар, $B = 0.1$, $H_f = 0.085$, $H_s = 0.07$, $W_s = 10$ см/бар.

На всех подошвах блоков также $K = 1$ бар/см и $W = 0.05$ см/бар. Отметим, что размерность W и W_s определяется тем, что в (1) используется безразмерное время. Значение постоянной P было принято равным 2 Кбар.

В большинстве расчетов значение параметра ϵ , который определяет размеры ячеек, получаемых в результате дискретизации, полагалось равным 5 км. Однако были выполнены расчеты также при $\epsilon = 2, 5$ км и $\epsilon = 1$ км.

Во всех вариантах численное моделирование было проведено на интервале 200 единиц безразмерного времени при нулевых начальных условиях (в начальный момент равны нулю векторы сдвига и углы поворота всех блоков и границы структуры, а также неупругие смещения во всех ячейках).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При моделировании изучалась зависимость сейсмического потока от направления скорости движения восточной границы Западных Альп. Было рассмотрено 8 вариантов направления скорости движения этой границы. Полученные искусственные каталоги землетрясений различаются числом событий, их максимальной магнитудой и пространственным распределением.

Наблюденная сейсмичность. Результаты моделирования сравнивались с данными о сейсмичности Западных Альп, полученными из каталога [20]. На рис. 3,а представлена карта эпицентров всех землетрясений рассматриваемого региона, данные о которых содержатся в этом каталоге. Для сравнения с модельной сейсмичностью были отобраны только землетрясения с $M \geq 4,0$, при этом в качестве магнитуды землетрясения выбиралось максимальное из значений магнитуд, представленных в [20]. Для Западных Альп представительность землетрясений с $M \geq 4,0$ не вызывает сомнений с 1968 г., на рис. 3,б приведена карта эпицентров таких землетрясений, которые произошли с 01.01.1968 до 30.06.1998, т.е. в течение 30,5 лет. Как видно из рис. 3, землетрясения распределены неравномерно.

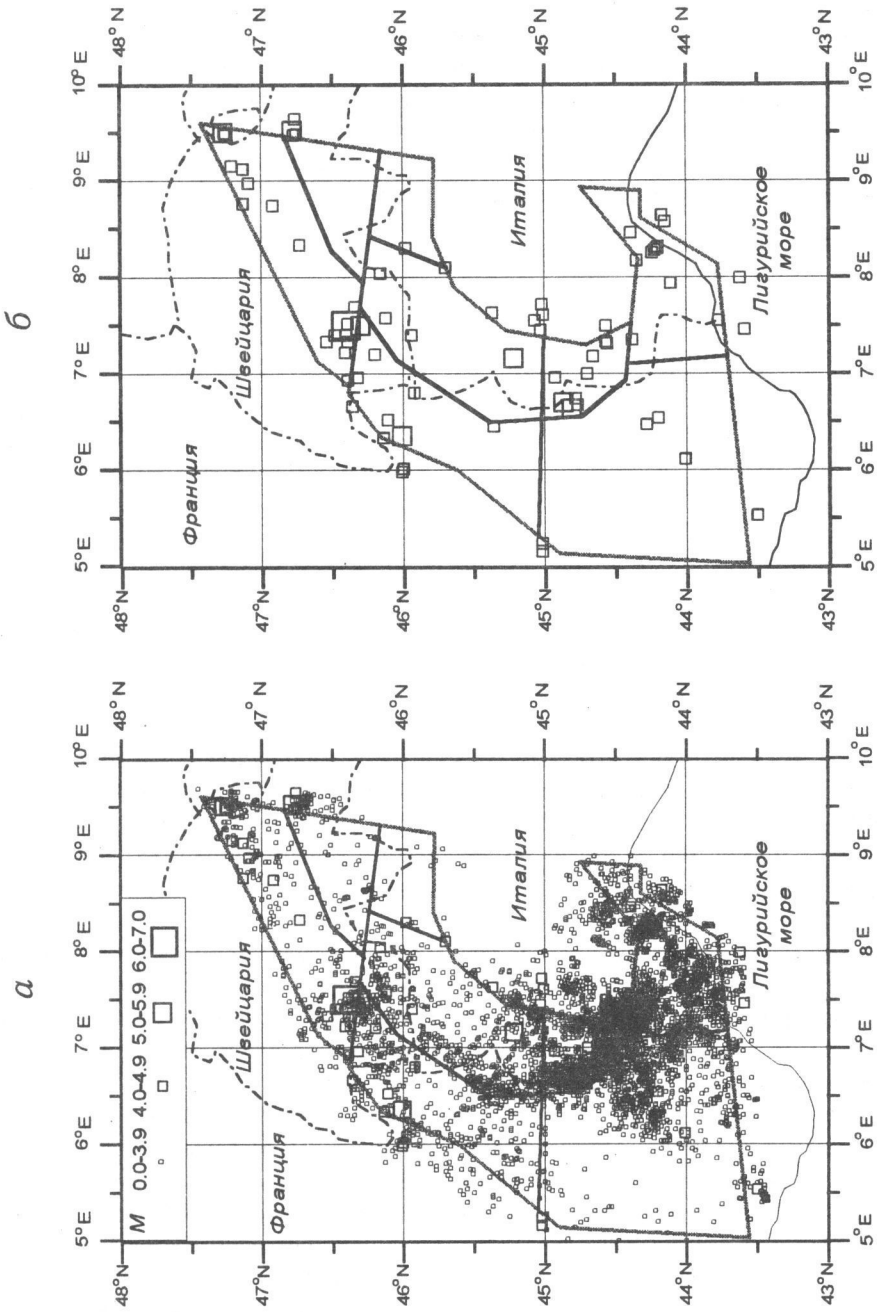


Рис. 3. Сейсмичность Западных Алы (а) и землетрясения с $M \geq 4.0$, которые произошли в 1968-1998 гг. (б)

Большая часть инструментальных эпицентров сконцентрирована в южной части Западных Альп к югу от поперечного линеамента 7-7 (см. рис. 1). Плотные облака эпицентров в этом районе вытянуты вдоль Бриансонского разлома (линеament 1-1) и линеамента первого ранга, отделяющего Западные Альпы от Апеннинской плиты. В северной части Западных Альп сейсмичность носит рассеянный характер. Наблюдается концентрация эпицентров в окрестностях пересечения линеамента 1-1 (Бриансонский разлом) с поперечным линеamentом 5-5.

На рис. 4 показан кумулятивный график повторяемости, построенный для землетрясений, эпицентры которых представлены на рис. 3,б.

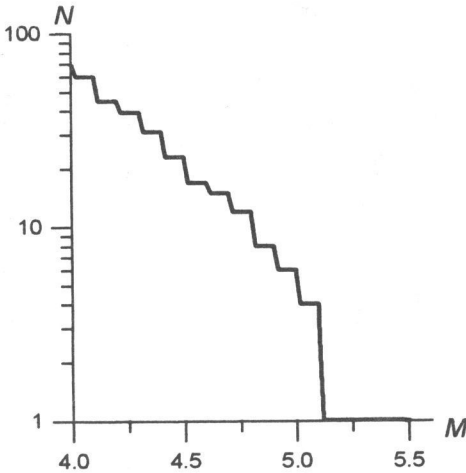


Рис. 4. Кумулятивный график повторяемости наблюдаемой сейсмичности Западных Альп (1968-1998 гг.)

За период инструментальных наблюдений максимальную зарегистрированную магнитуду 6,1 имеет землетрясение 25.01.1946 в Западных Альпах ($\varphi = 46^\circ N$, $\lambda = 7,5^\circ E$). Согласно каталогам, включающим исторические события [21, 22], в изучаемом регионе было более 20 землетрясений с интенсивностью VIII-X баллов. Такая интенсивность может соответствовать землетрясениям с магнитудой порядка 7,0 и даже выше.

Модельная сейсмичность. В численных экспериментах были рассмотрены 8 вариантов расчетов со следующими значениями угла γ между направлением движения части границы структуры, соответствующей разломам, которые отделяют Западные Альпы от Апеннинской плиты (отмечены двойной линией на рис. 2), и направленным на север меридианом: 0° , 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 150° и 180° .

Как было отмечено выше, интервал численного моделирования во всех вариантах составлял 200 единиц безразмерного времени. Чтобы исключить из искусственных каталогов начальный нестабильный период при сравнении с реальной сейсмичностью рассматривали только части искусственных каталогов, полученные на отрезке от 100 до 200 единиц безразмерного времени. На рис. 5 представлены кумулятивные графики повторяемости для всех восьми вариантов. В этих расчетах значение параметра ε , определяющего размеры ячеек, полученных в результате дискретизации, полагалось равным 5 км. Нижний порог магнитуды землетрясений, возникающих в модели, определяется магнитудой землетрясения,

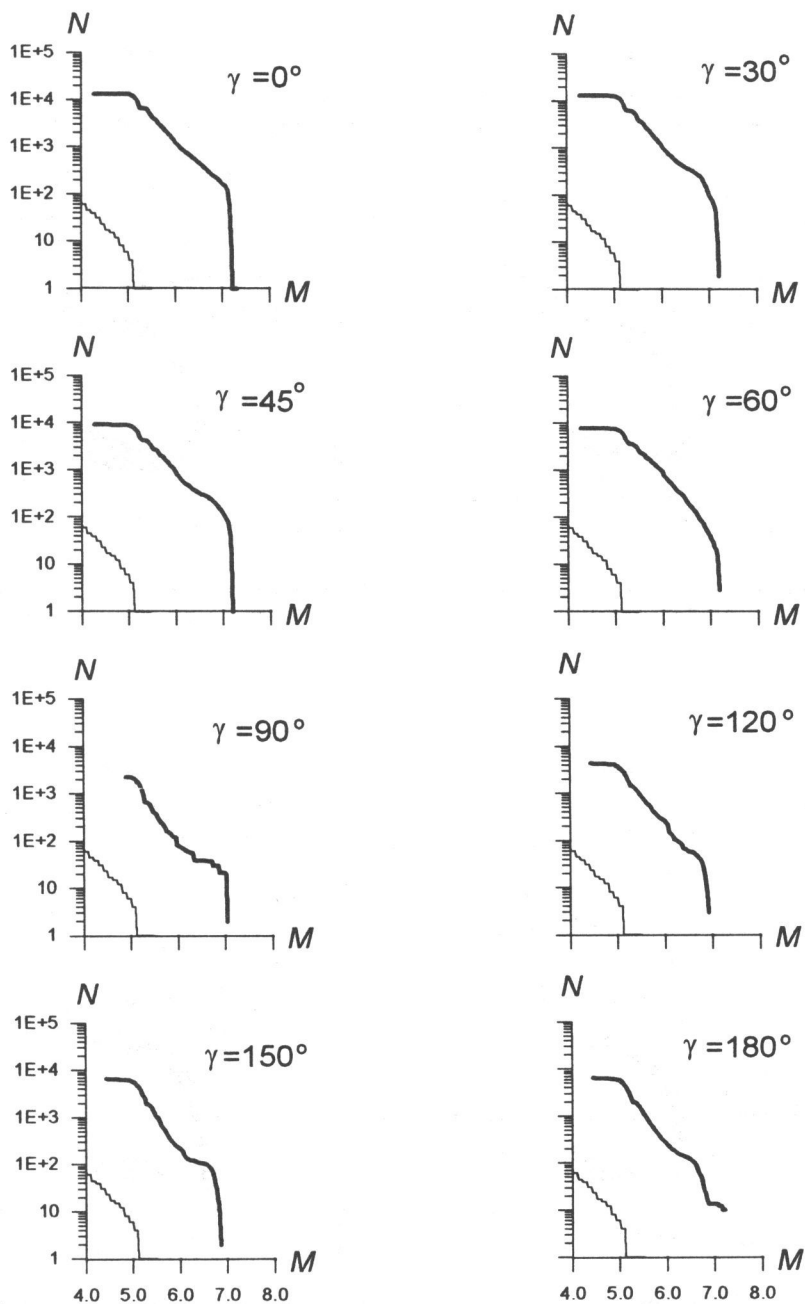


Рис. 5. Кумулятивные графики повторяемости искусственных каталогов землетрясений для восьми вариантов расчета (тонкой линией воспроизведен график повторяемости с рис. 4)

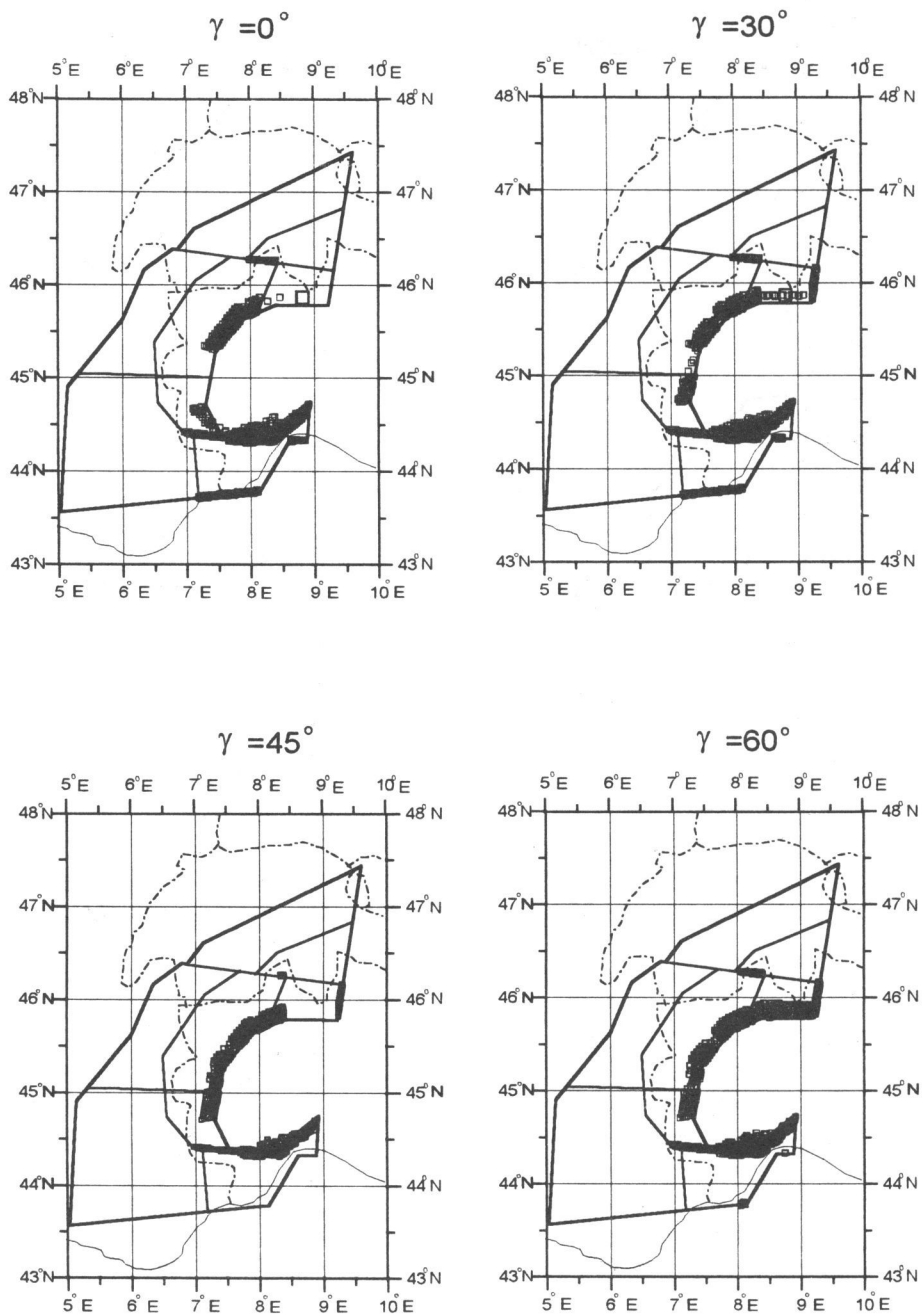


Рис. 6. Пространственные распределения искусственных землетрясений для восьми вариантов расчета

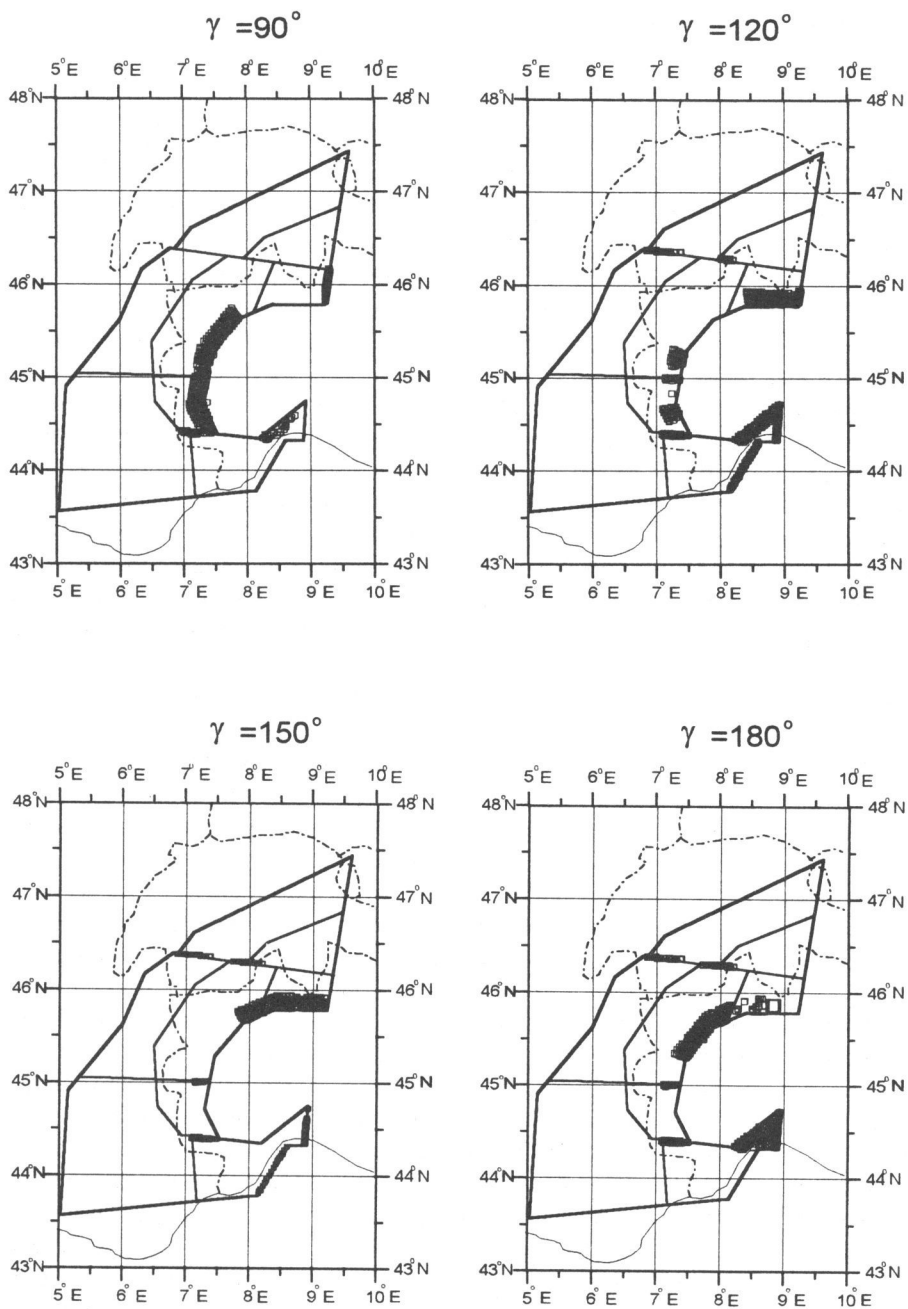


Рис. 6. Окончание

состоящего из одной ячейки, которая, в соответствии с формулой (3) и принятым ограничением (5 км) на линейный размер ячейки, должна быть порядка 5,3. Максимальные значения магнитуды, полученные при моделировании: 6,9–7,2. Общее количество землетрясений уменьшается от варианта 1 ($\gamma = 0^\circ$) к варианту 5 ($\gamma = 90^\circ$), затем возрастает. При этом относительное число сильных землетрясений ($M \geq 6,5$) в искусственных каталогах существенно уменьшается от варианта 1 ($\gamma = 0^\circ$) к варианту 4 ($\gamma = 60^\circ$), несколько возрастает в варианте 5 ($\gamma = 90^\circ$) по сравнению с вариантом 4 и убывает от варианта 5 к варианту 8 ($\gamma = 180^\circ$). На графиках повторяемости в вариантах 5–8 в области максимальных магнитуд происходит существенное уменьшение наклона графика. Это может быть интерпретировано как наличие "характеристических" землетрясений.

Сравнивая графики повторяемости для реальной и искусственной сейсмичности, отметим, что искусственные каталоги содержат существенно больше событий, причем максимальная магнитуда этих событий превосходит магнитуды землетрясений, зарегистрированных в период инструментальных наблюдений. Последнее может быть связано с тем, что, во-первых, формула (3) дает завышенное значение магнитуды и, во-вторых, период, покрытый инструментальными наблюдениями, мал и не включает сильнейшие возможные события в регионе. Различие в числе событий обусловлено тем, что период времени, "покрытый" искусственным каталогом, может быть интерпретирован как сотни, и даже тысячи периодов, "покрытых" инструментальными наблюдениями. Более точная интерпретация периода времени затруднительна, так как она зависит от определения магнитуды в модели (формула (3)).

В качестве критерия для сравнения модельного и реального графиков повторяемости были выбраны их форма и наклон. Наибольшее сходство имеет место для варианта 4, т.е. при угле $\gamma = 60^\circ$. Это направление движения границы согласуется с имеющимися данными о направлении движения Апеннинской плиты.

Пространственное распределение искусственной сейсмичности, полученное в восьми вариантах расчетов, представлено на рис. 6. Видно, что полного согласования модельной сейсмичности с реальной не было достигнуто ни в одном из вариантов. В частности, не удалось воспроизвести сейсмичность в северной части Западных Альп и землетрясения, связанные с зоной Бриансонского разлома (линеамент 1-1 на рис. 1).

Большинство событий, сгенерированных во всех рассмотренных вариантах, расположено на линеаментах первого ранга, отделяющих Западные Альпы от Апеннинской плиты и впадины Лигурийского моря. В вариантах 6, 7 и 8 (рис. 6, $\gamma = 120, 150$ и 180°), т.е. при направлении движения границы в юго-западном и южном направлениях, хорошо воспроизводится сейсмичность в южной части Западных Альп – в зоне поперечного линеамента 5-5. В этих же вариантах наблюдается согласование реальной и модельной сейсмичности вдоль зон линеаментов первого ранга, оконтуривающих мегаблок "З" (см. рис. 1). В вариантах 2, 3 и 4 (рис. 6, $\gamma = 30, 45$ и 60°) при северо-западных направлениях движения границы отмечается согласование модельной сейсмичности с реальной в зоне линеамента первого ранга, ограничивающего мегаблок "Д". При этом следует отметить, что большое количество эпицентров искусственных землетрясений, включая сильнейшие, расположено и на восточном продолжении этого линеамента – границе ме-

габлока "В", где сильные землетрясения пока не наблюдались. Отметим, что при распознавании мест сильных землетрясений в Западных Альпах [5,6] на этом участке линеамента были определены места, потенциально опасные для возникновения землетрясений с $M \geq 5,0$.

Зависимость искусственного каталога землетрясений от дискретизации. Значение параметра ϵ , определяющего размеры ячеек, получаемых в результате дискретизации в перечисленных выше расчетах, полагалось равным 5 км. Для выяснения зависимости результатов от величины ϵ вариант 3 (северо-западное направление движения границы) был повторен при $\epsilon = 2,5$ км и $\epsilon = 1$ км. Кумулятивные графики повторяемости для искусственных каталогов, соответствующих отрезку от 100 до 200 единиц безразмерного времени, приведены на рис. 7. Видно, что уменьшение величины ϵ не приводит к существенному уменьшению числа землетрясений в диапазоне магнитуд, которые присутствуют во всех трех искусственных каталогах. Общее число землетрясений в каталоге увеличивается за счет появления землетрясений с меньшими магнитудами. Наклон графика повторяемости не изменяется при уменьшении ϵ .

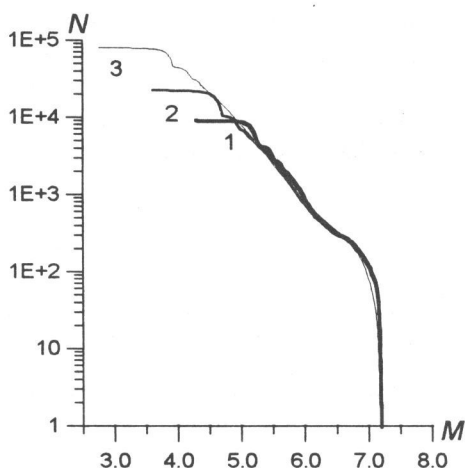


Рис. 7. Кумулятивные графики повторяемости искусственных каталогов землетрясений, полученных в варианте 3 ($\gamma = 45^\circ$) при различной дискретизации: $\epsilon = 5$ км (1), $\epsilon = 2,5$ км (2) и $\epsilon = 1$ км (3)

Отметим, что из формулы (3) следует, что нижний порог магнитуды искусственных землетрясений должен быть порядка 4,7 и 3,9 при $\epsilon = 2,5$ км и $\epsilon = 1$ км, соответственно. Это отражено в графиках повторяемости, приведенных на рис. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного моделирования получено 8 искусственных каталогов землетрясений Западных Альп. Сравнение графиков повторяемости для искусственных и наблюдаемых землетрясений показало, что их сходство максимально, когда задаваемое движение восточной границы блоковой структуры, моделирующей Западные Альпы, близко к оценкам направления движения Апеннинской плиты. Результаты моделирования не противоречат данным макросейсмических

наблюдений о возможности в Западных Альпах землетрясений с магнитудой $M > 7$, что важно для оценки сейсмоопасности этого региона. Пространственное распределение искусственных землетрясений отражает отдельные особенности в распределении реальной сейсмичности. При этом обнаружено наличие модельной сейсмичности в местах (южная и восточная границы мегаблока "В", рис. 1), где отсутствуют реальные события, но которые методами распознавания образов были идентифицированы ранее как высокосейсмичные.

Различия модельной сейсмичности и реальной могут быть объяснены среди прочих причин более сложной, по сравнению с задаваемой в модели, геодинамикой региона. В реальные процессы сейсмогенеза вовлечены и разломы более низких рангов, которые не рассмотрены в модели. Заданное в модели движение части внешней границы блоковой структуры не может полностью отразить все многообразие движения литосферных блоков в рассматриваемом регионе. В дальнейших исследованиях авторы планируют выполнить численные эксперименты, в которых будут заданы ненулевые скорости движений других частей внешней границы и подстилающей среды под блоками.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 97-05-65802), ИНТАС (грант 93-457, продолжение) и Национального научного фонда США (субконтракт с факультетом геологических наук Корнельского университета в рамках гранта EAR-9804859, который осуществляется через Фонд гражданских научных исследований США для независимых государств бывшего Советского Союза).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rebai S., Philip H., Taboada A.* Modern tectonic stress field in the Mediterranean region: evidence for variation in stress directions at different scales // *Geophys. J. Int.* 1992. Vol.110. P.106-140.
2. *Gorshkov A., Soloviev A.* The Western Alps: numerical modelling of block-structure dynamics and seismicity // XXV General Assembly of ESC, September 9-14, 1996. Abstr. Reykjavik. Iceland. 1996. P.66.
3. *Gorshkov A., Keilis-Borok V., Rotwain I., Soloviev A., Vorobieva I.* On dynamics of seismicity simulated by the models of blocks-and-faults systems // *Ann. di Geofis.* 1997. Vol.XL, N 5. P.1217-1232.
4. *Горшков А.И., Ранцман Е.Я.* Морфоструктурные линейменты Западных Альп // *Геоморфология.* 1982. N 4. С.64-72.
5. *Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ламбер С., Ранцман Е.Я., Саллантэн Ж., Сальдано А., Систернас А., Соловьев А.А.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XII. Два подхода к прогнозу мест возможного возникновения сильных землетрясений в Западных Альпах // *Теория и анализ сейсмологической информации.* М.: Наука, 1985. С.139-154. (Вычисл. сейсмология; Вып.18).
6. *Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А.* Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 174 с.
7. *Алексеевская М.А., Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Гельфанд И.М., Ранцман Е.Я.* Морфоструктурное районирование горных стран по формализованным признакам

- // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии. М.: Наука, 1977. С.33-49. (Вычисл. сейсмология; Вып.10).
8. *Ранцман Е.Я.* Места землетрясений и морфоструктура горных стран.. М.: Наука, 1979. 170 с.
 9. *Садовский М.А.* О естественной кусковатости горных пород // ДАН СССР. 1979. Т.247, N 4. С.829-832.
 10. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
 11. *Panza G.F., Soloviev A.A., Vorobieva I.A.* Numerical modelling of block-structure dynamics: application to the Vrancea region // PAGEOPH. 1997. Vol.149. P.313-336.
 12. *Соболев П.О., Соловьев А.А., Ротвайн И.М.* Моделирование литосферы и сейсмичности для региона Ближнего Востока // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. М.: Наука, 1996. С.131-147. (Вычисл. сейсмология; Вып.28).
 13. *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.
 14. *Гасилов В.Л., Прозоров А.Г., Соловьев А.А.* Локальное взаимодействие сейсмических событий искусственного каталога в модели динамики блоковой структуры // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. М.: Наука, 1996. С.110-130. (Вычисл. сейсмология; Вып.28).
 15. *Utsu T., Seki A.* A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock // J. Seism. Soc. Japan. 1954. N 7. P.233-240.
 16. *Rybach L.* The swiss geotraverse from Basel to Chiasso // Schweiz. Mineral. Petrol. Mitt. 1979. V.59, Heft 1/2. P.199-228.
 17. *McKenzie D.P.* Plate tectonics of the Mediterranean region // Nature. 1970. Vol.226. P.239-243.
 18. *Beach A.* Thrust tectonics and crustal shortening in the external French Alps based on a seismic cross-section // Tectonophysics. 1981. V.79, N 1/2. P.T1-T14.
 19. *Menard G.* Relations entre structures profondes et structures superficielles dans le sud-est de la France. Essai d'ulitisation des donnees geophysiques. These de doctorat de specialite. Universite S.M. Grenoble: 1979. 150 p.
 20. Global Hypocenters Data Base CD-ROM. Denver, CO. NEIC/USGS. 1994.
 21. *Caputo M.* Critical study of ENEL catalogue of Italian earthquakes from the year 1000 through 1975 // Rassegna Lavori Pubblici. 1981. N 2. P.3-16.
 22. *Vogt J.* Les treblements de terre en France // B.R.G.M. 1979. N 96. 245 p.