

УДК 550.34.013.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ РЕГИОНА АЛТАЙ–САЯНЫ–ПРИБАЙКАЛЬЕ

© 2021 г. Член-корреспондент РАН А. А. Соловьев^{1,*}, А. И. Горшков¹

Поступило 27.08.2021 г.
После доработки 09.09.2021 г.
Принято к публикации 09.09.2021 г.

Выполнено численное моделирование динамики блоковой структуры региона Алтай–Саяны–Прибайкалье и возникающей при этом сейсмичности. Положения эпицентров землетрясений, полученных в модели, попадают в окрестности всех произошедших в регионе землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ и практически всех землетрясений с $M \geq 5.0$. Графики Гутенберга–Рихтера для модельной и реальной сейсмичности имеют близкие наклоны. Сейсмичность, полученная в модели, дает аргументы в пользу достоверности ранее полученных результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в рассматриваемом регионе и может быть использована для оценки сейсмической опасности.

Ключевые слова: сейсмичность, численное моделирование, динамика блоковой структуры, регион Алтай–Саяны–Прибайкалье

DOI: 10.31857/S2686739721120136

С использованием методики моделирования динамики блоковых структур и сейсмичности ([1–5] и др.) выполнено численное моделирование для региона Алтай–Саяны–Прибайкалье. Блоковая структура представляется в виде слоя толщины H между двумя параллельными горизонтальными плоскостями. Ее разделение на блоки построено на основе приведенной на рис. 1 схемы морфоструктурного районирования региона [6]. Структура состоит из 14 блоков, которые ограничены линеаменами только первого и второго рангов (рис. 2). Подробное описание методики моделирования динамики блоковых структур приведено в [5]. Одним из ее основных принципов является предположение о том, что блоки разделены узкими ослабленными и менее консолидированными зонами разломов, по сравнению с которыми на характерных временах сейсмотектонического процесса (порядка нескольких тысяч лет) блоки могут считаться абсолютно жесткими. Землетрясения в модели возникают в зонах разломов. Целью моделирования являлось получение путем подбора параметров модели пространственного распределения эпицентров модельных землетрясений, которое согласуется с

положениями эпицентров землетрясений, произошедших в регионе. В этом случае модельная сейсмичность может дать дополнительные аргументы в пользу достоверности результата распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе [6], а каталоги землетрясений, полученных в модели, могут быть использованы для оценки сейсмической опасности [7].

Смещения блоков структуры происходят вследствие движений границ структуры и подстилающей ее среды, которые задаются. В результате смещений блоков относительно подстилающей среды и смещений блоков относительно друг друга вдоль разломов на подошвах блоков и в плоскостях разломов возникают упругие силы. Упругая энергия, которая накапливается в зонах разломов, высвобождается через неупругие смещения и землетрясения. Величина плотности (на единицу площади) упругой силы в точке пропорциональна разности смещения блока относительно подстилающей среды или относительного смещения блоков 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 подошве блока

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: soloviev@mitp.ru

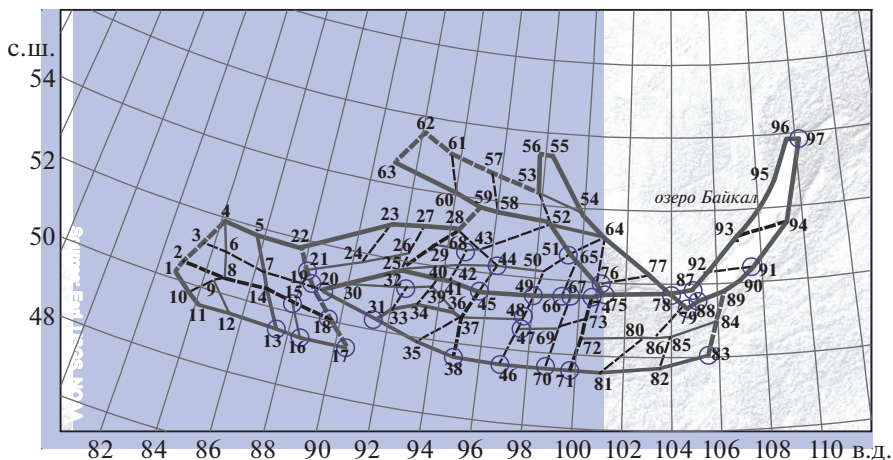


Рис. 1. Морфоструктурная схема региона Алтай–Саяны–Прибайкалье [6]. Сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными линиями – поперечные линеаменты. Жирными линиями показаны линеаменты 1-го ранга, средними линиями – линеаменты 2-го ранга, тонкими линиями – линеаменты 3-го ранга. Кругами отмечены узлы, где в соответствии с результатом распознавания [6] возможны землетрясения с $M \geq 6$.

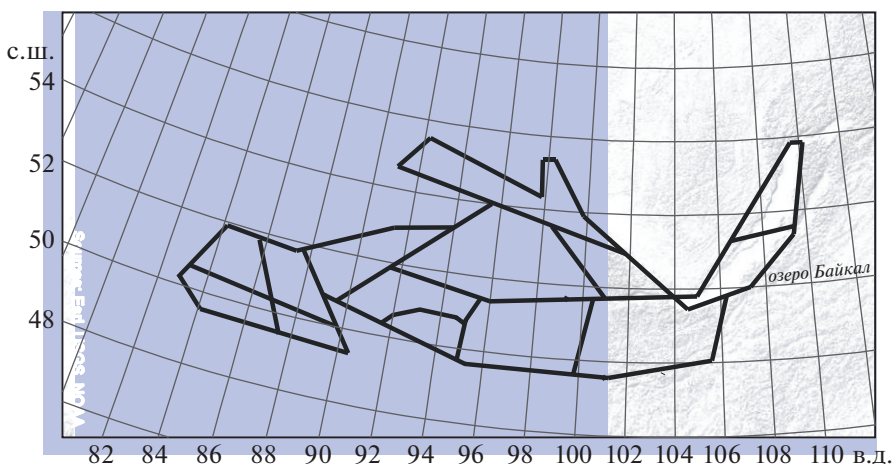


Рис. 2. Конфигурация разломов рассматриваемой блоковой структуры на земной поверхности.

или плоскости разлома, $\Delta \mathbf{r}$ – вектор смещения блока относительно подстилающей среды в нижней плоскости или вектор относительного смещения соседних блоков в плоскости разлома, \mathbf{d} – вектор неупругого смещения. В случае плоскости разлома коэффициент K может быть интерпретирован как модуль сдвига зоны разлома, деленный на ее ширину. Коэффициент W определяет скорость роста неупругих смещений, и при его увеличении большая часть упругой энергии высвобождается через неупругие смещения. Наряду с упругой силой, лежащей в плоскости разлома, действует сила реакции, которая перпендикулярна плоскости разлома.

В каждый момент времени векторы сдвига и углы поворота блоков структуры определяются из условия равенства нулю суммы сил, действующих

на каждый из них, и равенства нулю суммарного момента этих сил, т.е. из условия квазистатического равновесия структуры. При этом рассматриваются только упругие силы, возникающие в плоскостях разломов и на подошвах блоков, т.е. действие всех других сил (гравитации и т.п.) на блоковую структуру исключается из рассмотрения и не учитывается при определении смещений блоков. Все смещения предполагаются бесконечно малыми по отношению к геометрическим размерам блоков, что позволяет не учитывать изменение геометрии структуры в процессе моделирования.

Для выполнения численного моделирования поверхности, на которых действуют силы (плоскости разломов и подошвы блоков), разбиваются на ячейки с линейными размерами, не превосхо-

дшими величину ε , значение которой задается. Предполагается, что вектор неупругого смещения \mathbf{d} , координаты X , Y и векторы плотности сил одинаковы во всех точках одной ячейки. Состояние блоковой структуры рассматривается в дискретные моменты времени $t_i = t_0 + i\Delta t$ ($i = 1, 2, \dots$), где t_0 — начальный момент, а Δt — постоянный шаг.

Момент возникновения землетрясения определяется значением отношения

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

где 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, а постоянная P имеет одно и то же значение для всех разломов и интерпретируется как разность между литостатическим и гидростатическим давлением. В случае растяжения в направлении, перпендикулярном плоскости разлома, в знаменателе (2) стоит “—”, в случае сжатия — “+”. Для каждого разлома задаются значения трех порогов $B > H_f \geq H_s$. Начальные значения смещений и поворотов внутренних блоков и неупругих смещений на разломах задаются таким образом, чтобы везде было выполнено соотношение $k < B$. Если в процессе моделирования величина k на каком-либо разломе (в одной или нескольких ячейках) достигает порога B соответствующего разлома, то возникает разрыв (“землетрясение”). Разрыв означает проскальзывание, в результате которого неупругие смещения в ячейке резко изменяются так, что величина k уменьшается до значения порога H_f , т.е. землетрясение происходит согласно модели сухого трения, а коэффициент B играет роль порога прочности. После пересчета неупругих смещений определяются новые положения блоков из условия квазистатического равновесия. В случае, когда после этого значение k превосходит порог B для какой-либо ячейки или ячеек, процесс пересчета неупругих смещений и определения новых положений блоков повторяется. Ячейки, в которых значение k превосходило порог B , образуют землетрясение. В качестве координат эпицентра и глубины очага землетрясения вычисляются средние взвешенные значения координат и глубин таких ячеек с весами, пропорциональными их площадям. Магнитуда землетрясения M вычисляется по формуле

$$M = 0.98 \lg S + 4.07, \quad (3)$$

где S — сумма площадей (в км²) ячеек, образующих землетрясение, а значения коэффициентов выбраны в соответствии с [8].

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 $k \leq H_s$.

Заданы следующие значения параметров блоковой структуры региона Алтай—Саяны—Прибайкалье: расстояние между верхней и нижней плоскостями, ограничивающими блоковую структуру, т.е. толщина всех блоков структуры, $H = 30$ км, что соответствует толщине земной коры и глубинам землетрясений, зарегистрированных в регионе; параметр P в выражении (2) равен 2 Кбар; дискретизация времени и пространства определяется значениями $\Delta t = 0.001$ и $\varepsilon = 1$ км; значения параметров в выражениях (1) и порогов для величины k , определенной выражением (2), одни и те же для всех разломов: $K = 1$ бар/см, $W = 0.005$ см/бар, $W_s = 0.5$ см/бар, $B = 0.1$, $H_f = 0.085$, $H_s = 0.07$; значения параметров в выражениях (1) одни и те же для всех блоков: $K = 1$ бар/см, $W = 0.01$ см/бар. Отметим, что поскольку безразмерное время используется при моделировании, то перечисленные значения параметров соответствуют одной единице безразмерного времени.

Численное моделирование выполнялось с нулевыми начальными условиями (нулевые смещения границ структуры и подстилающей среды под блоками, а также нулевые неупругие смещения во всех ячейках) в течение 500 единиц безразмерного времени. Несколько сотен численных экспериментов выполнено с моделью. Установлено, что распределение эпицентров модельных землетрясений в наибольшей степени зависит от задаваемых движений границ структуры и подстилающей среды под блоками. Соответственно эти движения варьировались с целью получить эпицентры модельных землетрясений в местах, где известны землетрясения, произошедшие в регионе. Использованный каталог землетрясений региона получен на основе регионального каталога [9] и данных Национального центра информации о землетрясениях (NEIC) США за период 1900—2013 гг. С целью исключить влияние нестационарности начального периода моделирования искусственные каталоги рассматривались на отрезке в 400 единиц безразмерного времени со 100 до 500.

При сравнении положений эпицентров модельных и реальных землетрясений учитывалось то, что землетрясения в модели возникают только в зонах разломов. Поэтому положения эпицентров модельных землетрясений сравнивались с положениями проекций эпицентров реальных землетрясений на ближайшие разломы структуры.

На рис. 3а показаны положения эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$, полученных в численном эксперименте, в котором они присутствуют в окрестностях проекций на ближайшие разломы эпицентров всех реальных землетрясений с $M \geq 6.0$

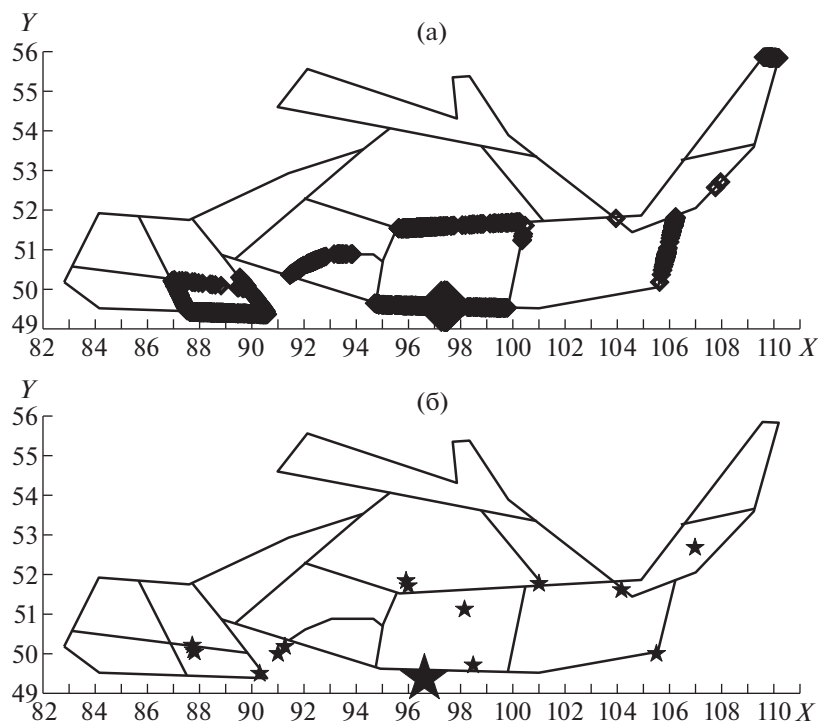


Рис. 3. Положения эпицентров модельных (а) и реальных (б) землетрясений с $M \geq 6$. На горизонтальной оси отложены градусы в.д., на вертикальной оси — градусы с.ш. Эпицентры модельных землетрясений показаны ромбами, а реальных — звездочками. Большие ромбы обозначают эпицентры модельных землетрясений с $M \geq 7.85$. Большая звездочка обозначает эпицентр сильнейшего землетрясения региона с $M = 8.2$.

(рис. 3б). Аналогичное сравнение эпицентров землетрясений с $M \geq 5.0$ показано на рис. 4. В этом случае проекции большинства эпицентров реальных землетрясений на ближайшие разломы имеют в окрестностях эпицентры модельных землетрясений. Максимальная магнитуда (7.88) землетрясений, полученных в модели, меньше, чем максимальная магнитуда (8.2) землетрясений, известных в регионе, но эпицентры сильнейших (с $M \geq 7.85$) модельных землетрясений расположены вблизи эпицентра сильнейшего землетрясения региона (рис. 3).

Из рис. 3 и 4 следует, что распределение эпицентров модельных землетрясений достаточно хорошо воспроизводит положения эпицентров реальных землетрясений. В окрестностях эпицентров всех известных землетрясений с $M \geq 6.0$ и практически всех с $M \geq 5.0$ имеются эпицентры соответствующих модельных землетрясений.

Сравнение положений эпицентров модельных землетрясений с $M \geq 6.0$ (рис. 3а) с полученными в [6] результатами распознавания мест возможного возникновения таких землетрясений (рис. 1) показывает их согласованность. Особо отметим, что модельные землетрясения с $M \geq 6.0$ возникли на северной оконечности оз. Байкал, где такие землетрясения не известны, но по результатам распознавания [6] возможны. В целом результаты

моделирования дают дополнительные аргументы в пользу достоверности результатов распознавания.

На рис. 5 представлены кумулятивные графики Гутенберга–Рихтера для модельной и реальной сейсмичности, наклоны которых близки. Из сравнения кривых, представленных на рис. 5, можно оценить продолжительность периода времени, покрытого искусственным каталогом землетрясений. Рассмотрим, например, события с $M \geq 6.0$. Число таких землетрясений, произошедших в регионе, равно 15, а в модели получено 2045 таких событий. Если предположить, что интенсивности потоков реальных и модельных землетрясений близки, то получаем, что период времени, покрытый искусственным каталогом, в 136 раз длиннее продолжительности реального каталога, которая составляет порядка 110 лет. Следовательно, искусственный каталог соответствует примерно 14 000 годам, а одна единица безразмерного времени — 35 годам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов следует, что численное моделирование динамики блоковой структуры региона Алтай–Саяны–Прибайкалье позволяет получить искусственные каталоги зем-

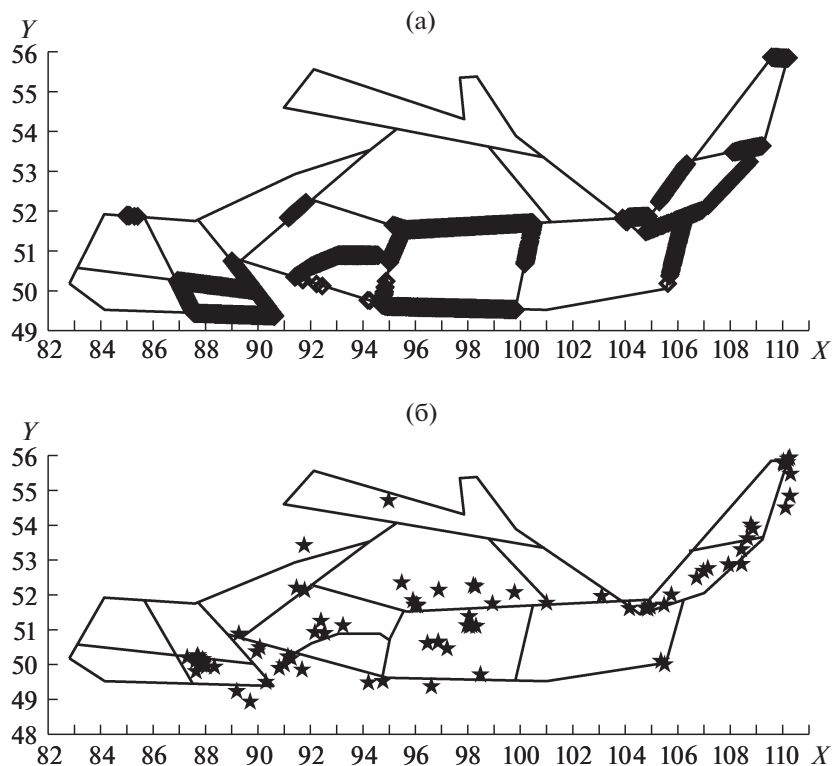


Рис. 4. Положения эпицентров модельных (а) и реальных (б) землетрясений с $M \geq 5$. Обозначения те же, что и на рис. 3.

летрясений, отражающие свойства реальной сейсмичности региона. В данной работе эти каталоги использованы для анализа достоверности полученных в [6] результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. В дальнейшем планируется использовать их для оценки сейсмической опасности рассматриваемой территории с помощью подхода [7], кото-

рый ранее успешно применялся к региону Тибет–Гималаи [7] и Кавказу [10].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00171).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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).
2. Gabrielov A.M., Levshina T.A., Rotwain I.M. Block Model of Earthquake Sequence // Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. V. 61. P. 18–28.
3. Soloviev A., Ismail-Zadeh A. Models of Dynamics of Block-and-fault Systems / Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. P. 71–139.
4. Soloviev A.A., Gorshkov A.I. Modeling the Dynamics of the Block Structure and Seismicity of the Caucasus // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. № 3. P. 321–331. <https://doi.org/10.1134/S1069351317030120>
5. Ismail-Zadeh A., Soloviev A., Sokolov V., Vorobieva I., Muller B., Schilling F. Quantitative Modeling of the

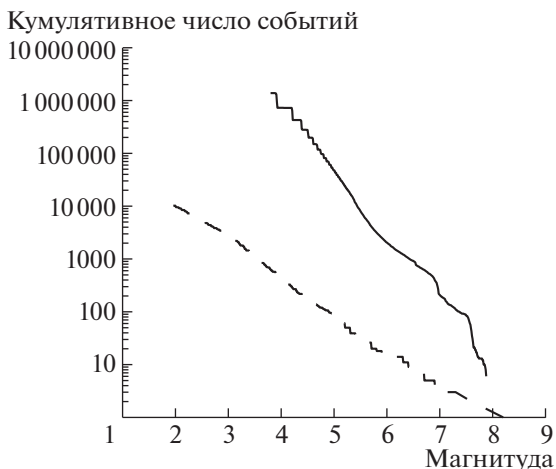


Рис. 5. Кумулятивные графики Гутенберга–Рихтера для модельной (сплошная кривая) и реальной (пунктирная кривая) сейсмичности.

- Lithosphere Dynamics, Earthquakes and Seismic Hazard // *Tectonophysics*. 2018. V. 746. P. 624–647. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.007>
6. Gorshkov A.I., Soloviev A.A. Recognition of Earthquake-prone Areas in the Altai-Sayan-Baikal Region Based on the Morphostructural Zoning // *Russ. J. Earth Sci.* 2021. V. 21. ES1005. <https://doi.org/10.2205/2020ES000751>
 7. Sokolov V., Ismail-Zadeh A. Seismic Hazard from Instrumentally Recorded, Historical and Simulated Earthquakes: Application to the Tibet-Himalayan Region // *Tectonophysics*. 2015. V. 657. P. 187–204. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.004>
 8. Wells D.L., Coppersmith K.J. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1994. V. 84. P. 974–1002.
 9. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V., Khrometskaya Y.A., Gvishiani A.D. New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times through 1977. Boulder, Colorado, USA: World Data Center A for Solid Earth Geophysics, NOAA, National Geophysical Data Center (Report SE-31). 1982. 608 p.
 10. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M.K., Kadirov F., Karapetyan J., Kangarli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Müller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., Soloviev A. Geodynamics, Seismicity and Seismic Hazards of the Caucasus // *Earth Sci. Rev.* 2020, V. 207. 103222. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103222>

MODELING THE SEISMICITY OF THE ALTAI–SAYAN–BAIKAL REGION

Corresponding Member of the RAS A. A. Soloviev^{a, #} and A. I. Gorshkov^a

^a *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: soloviev@mitp.ru*

Numerical modeling of the dynamics of the block structure of the Altai-Sayan-Baikal region and the resulting seismicity has been carried out. The positions of the earthquake epicenters obtained in the model fall in the vicinity of all earthquakes with a magnitude of $M \geq 6.0$ that have occurred in the region and most earthquakes with $M \geq 5.0$. The Gutenberg-Richter plots for model and real seismicity have similar slopes. The seismicity obtained in the model gives arguments in favor of the reliability of the previously obtained results of recognizing the places of possible occurrence of strong earthquakes in the region under consideration and can be used to assess the seismic hazard.

Keywords: seismicity, numerical modeling, block structure dynamics, Altai–Sayan–Baikal region