



<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-2-0208>

THE PROBABILITY OF STRONG ($M \geq 7.5$) EARTHQUAKES IN FAULT ZONES OF CENTRAL ASIA (TECTONOPHYSICAL ANALYSIS)

E. A. Gorbunova, S. I. Sherman

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: Based on the data on seismically active faults of Central Asia, the authors apply the Gutenberg-Richter law to study regularities of seismicity in large seismically active fault zones. Cumulative recurrence plots are constructed for earthquakes recorded only in the areas of active dynamic influence of the specified faults. Special attention is paid to changes in slope angles of the recurrence plots at the transition to the area of strong magnitudes. It is noted that the right-side end of the plot (i.e. distribution tail) becomes steeper or less steep relative to the main distribution for small magnitudes. The degree of non-linearity and the forms of the recurrence plot tail are used to rank the faults of Central Asia by potential relative seismic hazard. It is shown that the highest seismic hazard is associated with the faults that control earthquakes with magnitudes $M \geq 7.5$, which recurrence plots show a trend to decrease the slope angle of the regression line in the area of strong magnitudes. It is highly probable that such earthquakes may reoccur in the fault zones in the next 50–100 years.

Key words: fault; Gutenberg-Richter law; strong earthquake; seismic hazard; Central Asia

Recommended by V.S. Imaev

For citation: Gorbunova E.A., Sherman S.I. 2016. The probability of strong ($M \geq 7.5$) earthquakes in fault zones of Central Asia (tectonophysical analysis). *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (2), 303–314. doi: 10.5800/GT-2016-7-2-0208.

Для цитирования: Горбунова Е.А., Шерман С.И. Вероятность сильных ($M \geq 7.5$) землетрясений в зонах разломов Центральной Азии (тектонофизический анализ) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 2. С. 303–314. doi:10.5800/GT-2016-7-2-0208.

ВЕРОЯТНОСТЬ СИЛЬНЫХ ($M \geq 7.5$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ (ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ)

Е. А. Горбунова, С. И. Шерман

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: На примере сейсмоактивных разломов Центральной Азии сделана попытка исследования закономерностей развития сейсмического процесса в зонах крупных сейсмоактивных разломов с применением общепринятого закона Гутенберга-Рихтера. При этом для построения кумулятивных графиков повторяемости используются землетрясения, зафиксированные только в областях активного динамического влияния конкретных разрывных структур. Особое внимание уделяется изменению угла наклона графика повторяемости при переходе в область сильных магнитуд. Отмечено, что правое окончание графика (иначе хвост распределения) становится круче или положе относительно основного распределения по малым магнитудам. Сте-

пень нелинейности и форма поведения хвоста графика повторяемости используются для ранжирования разломов Центральной Азии по степени вероятной относительной сейсмической опасности. Показано, что наиболее высокой сейсмической опасностью обладают разломы, контролирующие землетрясения с магнитудами $M \geq 7.5$ и имеющие графики повторяемости с тенденцией к уменьшению угла наклона линии регрессии в области сильных магнитуд. Вероятность повторения землетрясений такой силы в зонах этих разломов в ближайшие 50–100 лет высока.

Ключевые слова: разлом; закон Гутенберга-Рихтера; сильное землетрясение; сейсмическая опасность; Центральная Азия

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогноза землетрясений стоит перед многими учеными мира, и она остается по-прежнему актуальной, несмотря на существующие сегодня методы оценки сейсмической опасности и многочисленные предсказания возможных реализаций сейсмических событий. Особые трудности возникают при попытках разработки методов прогноза сильных, катастрофических землетрясений с $M \geq 7.5$. В первую очередь сложности связаны с тем, что сейсмические события такой силы происходят сравнительно редко в сейсмических зонах Земли. Одним из определяющих структурных факторов контроля очагов сильных землетрясений являются крупные разломы разных морфолого-генетических групп. Данный факт породил представление о так называемых сейсмоактивных разломах, среди которых можно выделить «опасные» разломы, при активизации которых возникают сильные землетрясения. Особенно опасны разломы с короткопериодной активизацией [Kuzmin, 2004; Kuzmin, Zhukov, 2004]. В работах [Sherman et al., 2005b; Sherman, 2014] были представлены методы и алгоритмы для выделения активных в реальном времени разломов на базе разрабатываемой авторским коллективом тектонофизической концепции сейсмического процесса [Sherman, 2014]. При этом интервал времени исходных сейсмологических материалов может исчисляться даже годами, что оказывается очень важным при исследованиях в инструментальный период наблюдений землетрясений, обычно не превышающий последние 50–100 лет.

По принятому признаку короткопериодной активизации в работе [Sherman et al., 2015] была выделена группа глубинных межблоковых разломов Центральной Азии (рис. 1), которые контролируют все произошедшие за исторический и инструментальный периоды наблюдений сильные, катастрофические землетрясения с $M \geq 7.5$. Показано, что рекуррентное время сильных землетрясений в целом для территории Центральной Азии составляет

примерно 25 лет. Однако при переходе к отдельным разрывным структурам становится ясно, что сильные события в областях их динамического влияния происходят гораздо реже, примерно раз в 100–250 лет, как это показано в монографии В.Г. Трифонова и А.С. Караханяна [Trifonov, Karakhanyan, 2004] для территории западной части Центральной Азии. Этот период достаточно большой, чтобы его использовать при статистической оценке опасности сейсмоактивных разломов и выяснении закономерностей сильных сейсмических событий. Известные приемы и методы исследования закономерностей реализации сильных землетрясений с $M \geq 8$ вызвали необходимость использовать в первую очередь разломы и области их динамического влияния – основные геологические структуры, контролирующие сильные землетрясения в континентальной литосфере Центральной Азии. Для оценки опасности возникновения сильных сейсмических событий предлагается использовать график повторяемости землетрясений в приложении к областям динамического влияния отдельных разломов [Sherman et al., 1983]. Такой переход от целого региона к отдельным дизъюнктивным структурам позволяет конкретизировать общепринятые графики повторяемости и выявить особенности их представления в применении к разломам Центральной Азии, контролирующим сильные землетрясения с $M \geq 7.5$.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ ВОПРОСЫ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Закон повторяемости землетрясений, описывающий сейсмический режим в границах определенной площади (или объема), показывает распределение зафиксированного за определенный интервал времени числа землетрясений N по их магнитуде M и выражается в виде широкоизвестного уравнения Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944]:

$$\lg N = a - bM, \quad (1)$$

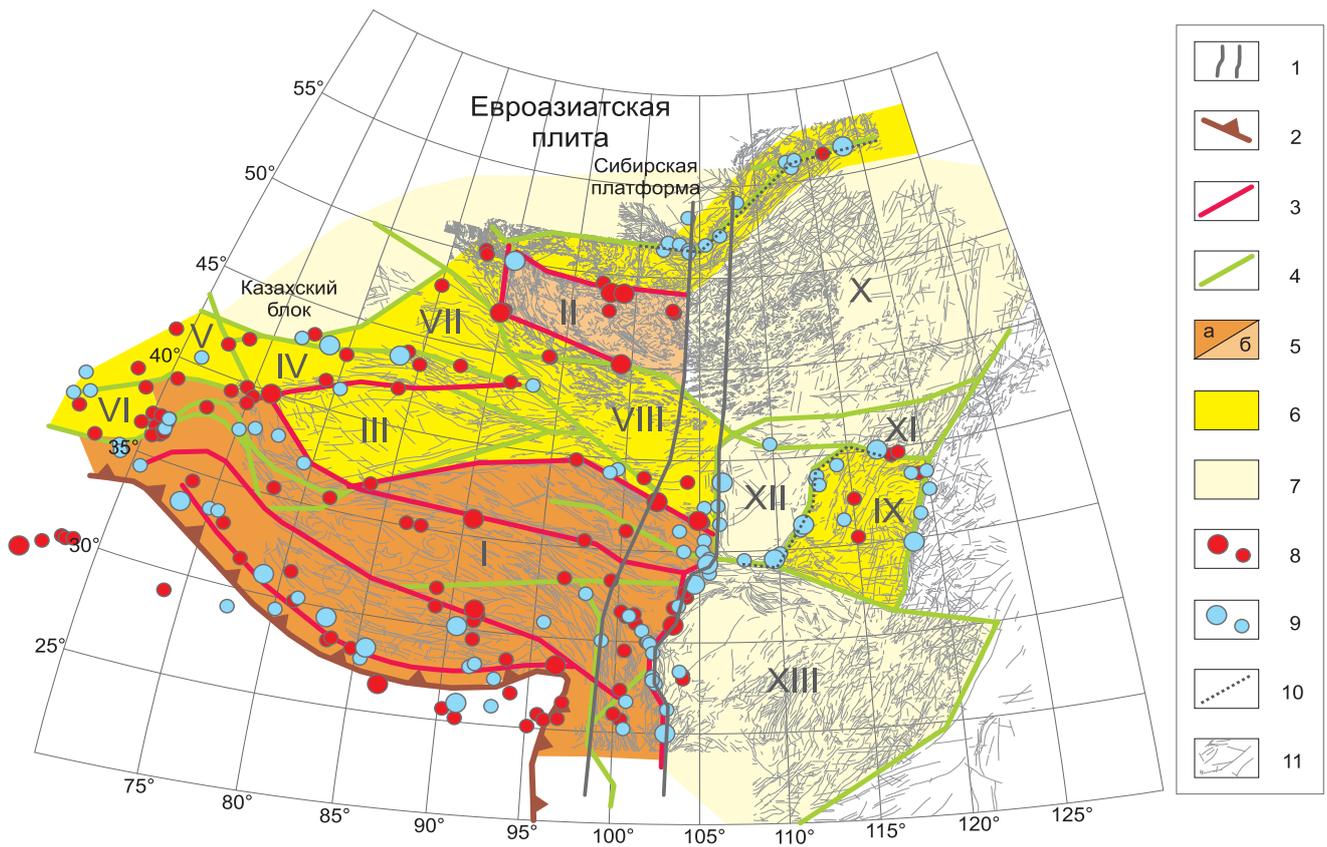


Рис. 1. Карта блоковых структур и активных разломов Центральной Азии, контролирующей сильные современные и исторические землетрясения с $M \geq 8$ и $8 > M \geq 7$.

1 – глобальная трансрегиональная пограничная структура; 2 – Гималайский надвиг; 3 – активные разломы, в области динамического влияния которых входят сейсмические события с $M \geq 8$, произошедшие после 1900 г.; 4 – активные разломы, в области динамического влияния которых входят сейсмические события с $8 > M \geq 7$, произошедшие после 1900 г.; 5a – активные блоки литосферы с утолщенной земной корой (>40 км) и квазивязким течением материала; 5б – активные блоки литосферы с высокoамплитудными смещениями по пограничным разломам; 6 – активные блоки с разломами, контролирующими сейсмические события с $8 > M \geq 7$; 7 – блоки с редкой рассеянной сейсмичностью; 8 – эпицентры землетрясений с $M \geq 8$ и $8 > M \geq 7$ соответственно, произошедшие в последнее столетие (1900–2014 гг.); 9 – эпицентры землетрясений с $M \geq 8$ и $8 > M \geq 7$ соответственно, произошедшие в предшествовавшее столетие (1800–1899 гг.); 10 – оси зон растяжения и растяжения со сдвигом земной коры (рифтовые системы Байкальская и Фэн-Вэй); 11 – локальные разломы. Римскими цифрами обозначены блоки: I – Тибетский, II – Гобийский, III – Таримский, IV – Тянь-Шаньский, V – Туранский, VI – Таджикский, VII – Джунгарский, VIII – Алаксанский (Alaxan), IX – Восточноордосский, X – западная часть Амурского блока, XI – Северо-Китайский блок, XII – Ордосский блок, XIII – Южно-Китайский блок.

Fig. 1. Map of Central Asia showing block structures and active faults that controlled strong recent and historical earthquakes ($M \geq 8$; $8 > M \geq 7$).

1 – global transregional boundary structure; 2 – Himalayan thrust; 3 – active faults ($M \geq 8$ seismic events in the areas of their dynamic influence after 1900); 4 – active faults ($8 > M \geq 7$ seismic events after 1900); 5a – active blocks of the lithosphere with thickened crust (>40 km) and quasi-viscous flow of the material; 5b – active blocks of the lithosphere with high-amplitude displacements along the boundary faults; 6 – active blocks with faults that control $8 > M \geq 7$ seismic events; 7 – blocks with rare scattered seismic events; 8 – earthquake epicenters ($M \geq 8$ and $8 > M \geq 7$, respectively) in the period from 1900 to 2014; 9 – earthquake epicenters ($M \geq 8$ and $8 > M \geq 7$, respectively) in the period from 1800 to 1899; 10 – axes of zones of crustal stretching and stretching with strike-slip (Baikal and Feng Wei rift systems); 11 – local faults. Blocks: I – Tibetan, II – Gobi, III – Tarim, IV – Tien-Shan, V – Turan, VI – Tajik, VII – Jungar, VIII – Alaxan, IX – East Ordoss, X – Amur (western part), XI – North China, XII – Ordoss, XIII – South China.

где a – логарифм количества N при расчетном $M=0$, b показывает относительное изменение магнитуды в зависимости от общего количества событий в заданной площади и закономерностей их усиления

до известного максимального значения за оговоренный интервал времени.

Из уравнения (1) видно, что число землетрясений нелинейно убывает с повышением магнитуды.

При этом чем меньше параметр b , тем выше доля сильных землетрясений по отношению к слабым. При представлении числа землетрясений N по их магнитуде M в виде графика $\lg N(M)$ коэффициент b есть не что иное, как угол наклона к оси абсцисс линии регрессии. Однако многие ученые отмечают, что в области сильных магнитуд линейная модель (1) графика повторяемости нарушается [Purcaru, 1975; Båth, 1981; Wesnousky et al., 1983, 1984; Davison, Scholz, 1985; Riznichenko, 1985; Zhalkovsky, 1988; Pacheco et al., 1992; Vostrikov, 1994; Stirling et al., 1996; Ulomov, 1999; Ulomov, Shumilina, 1999; Gusev, Shumilina, 2004; Pisarenko, Rodkin, 2004; Rodkin et al., 2014; и мн. др.] – он становится положе или круче. Фактическая сила и/или частота возникновения сильных событий оказывается значительно больше или меньше по отношению к слабым событиям. В одних случаях уравнение (1) «недооценивает» силу и частоту возникновения крупных событий – когда фактическая сила и/или количество событий оказываются вне линии регрессии $\lg N(M)$, то есть выше ее относительного «устойчивого» уровня на графике. Такие варианты изменения графика повторяемости можно увидеть на примере фактических материалов по землетрясениям Алеутской зоны субдукции [Davison, Scholz, 1985], в работе [Page et al., 2011] на примере сейсмичности в зоне разломов Южной Калифорнии и в работе, посвященной исследованию повторяемости сильных сейсмических событий Камчатки [Gusev, Shumilina, 2004]. В иных случаях линия регрессии графика повторяемости, напротив, «предсказывает» более высокую силу и частоту сильных землетрясений, при этом фактическое распределение сильных землетрясений при увеличении магнитуды отдалается всё ниже от линии регрессии. Такие графики можно увидеть на примере сейсмичности Анатолийского разлома [Båth, 1981], а также в работе [Pisarenko, Rodkin, 2004], где помимо сейсмического процесса рассматривается ряд других природных закономерностей, иллюстрирующих распределение с «тяжелыми хвостами» – окончаниями регрессионных прямых на интервале редких событий.

В целом можно заключить, что уравнение (1) не всегда адекватно отражает распределение сильных событий и частоту их возникновения по отношению к более слабым. При переходе в область сильных магнитуд угол наклона графика повторяемости меняется. Различие в поведении хвостов графиков повторяемости дает основание предполагать наличие физического фактора, оказывающего влияние на характер распределения сильных событий. В работе [Rodkin et al., 2014] на примере отдельных регионов Юго-Восточной Азии показано, что для континентальных областей графики характеризуются хвостами, имеющими четкий изгиб

книзу без признаков реализации экстремально сильных событий. На графиках землетрясений зон субдукции, напротив, выявляется ряд характеристических событий (землетрясений с магнитудой, близкой к максимально возможной), «выползающих» хвост распределения. Однако авторы особо отмечают, что, согласно теории экстремальных значений, с последующим увеличением магнитуды график повторяемости вновь приобретает окончательный загиб книзу. Различие в поведении хвостов графиков повторяемости авторы цитируемой работы объясняют, с одной стороны, повышенной сейсмической активностью в зонах субдукции, а с другой – возможным наличием в области очагов сильных событий дополнительных механизмов развития неустойчивости, в частности повышенной активностью флюидного режима. В работе [Sherman et al., 2003] показано, что изменение физики очага разрушения (землетрясения) происходит на границе магнитуд $M=5.5-6.5$. Похожие значения были получены в работах [Pacheco et al., 1992; Papadopoulos et al., 1993; Ulomov, 1999], в которых авторы отмечают, что изменение линейности графиков происходит на уровне магнитуд $M=5.5-6.5$. Более того, при исследовании редких сильных землетрясений возникают дополнительно осложняющие обстоятельства, когда угол изменения крутизны линии регрессии появляется дважды. Во втором случае – перед появлением сильнейших событий. Изменения углов наклона графиков повторяемости могут свидетельствовать о резком видоизменении физического состояния окружающей среды и, скорее всего, отражают изменения в механизме реализации очагов землетрясений – собственно механизм очага. При значениях $M \geq 5.5-6.5$ практически все землетрясения контролируются зонами разломов со значительной сдвиговой компонентой. Важнейшее значение приобретает амплитуда смещения, величина которой зависит от прочности сцепления блоков, наличия флюидов, квазипластического состояния среды в межблоковом контакте и относительного уменьшения прочности контакта при увеличении длины разломов. Следовательно, нарушение линейности графиков и получаемые сложные окончания распределений значений $\lg N(M)$ отражают вариации квазивязкой характеристики среды при формировании очагов и реализации в них напряжений [Pshenikov, 1965; Kuznetsova, 1974; Vostrikov, 1994; Sherman, 2014; Sherman et al., 2015]. Наиболее «рациональное» снятие напряжений происходит путем увеличения амплитуды подвижки, что, в свою очередь, увеличивает сейсмический момент и его конечный результат – магнитуду землетрясений.

Формы хвостов в графиках повторяемости и их устойчивость в течение фиксируемого нами вре-

мени вызывают особый интерес, поскольку исследование их закономерностей в реализации катастрофических событий оказывается очень важным при разработке прогноза опасных землетрясений [Pisarenko, Rodkin, 2004; Rodkin et al., 2014].

3. АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Существующие методики построения графиков повторяемости базируются на исследовании сейсмического процесса в отдельных сейсмических зонах и на больших площадях, в то время как реализация катастрофических сейсмических событий связана в первую очередь с активизацией крупных разломов на этих площадях. Отсюда традиционные подходы к исследованию процессов возникновения и механизмов реализации сильных сейсмических событий требуют определенных изменений. В настоящей работе на примере материалов Центральной Азии сделана попытка исследования закономерностей развития сейсмического процесса в зонах крупных активных разломов с использованием общепринятого закона Гутенберга-Рихтера. При этом для построения графиков повторяемости использовались землетрясения, зафиксированные только в областях активного динамического влияния конкретных разрывных структур. Безусловно, при таком подходе расчетные параметры b отличаются от общепринятых значений для тех же площадей, характерных для региона в целом, но в то же время точно соответствуют областям динамического влияния конкретных разломов, что позволяет осуществлять их сравнительный анализ по прогнозной сейсмической опасности. Под сейсмической опасностью в данном случае понимается возможность возникновения землетрясений с $M \geq 7.5$ в областях динамического влияния разломов в ближайшее столетие. При этом необходимо учитывать, что наклон линии регрессии с учетом областей динамического влияния в целом будет меньше. При выборе метода построения графика повторяемости предпочтение было отдано кумулятивному графику, поскольку они лишены недостатков, свойственных интервальным построениям (в частности, возможного влияния на значение параметра b шага и интервала разбиения магнитудной шкалы). На рисунке 2 показан пример кумулятивного графика. По оси абсцисс откладываются магнитуды M землетрясений, при этом шаг принимается соответствующим 0.1 единицы магнитуды. Далее, начиная с минимальной представительной магнитуды M_0 , производится подсчет количества землетрясений с магнитудой $M \geq M_0$, затем с $M \geq (M_0 + 0.1)$, затем с $M \geq (M_0 + 0.2)$ и т.д. до максимальной зафиксированной магнитуды. Полученный де-

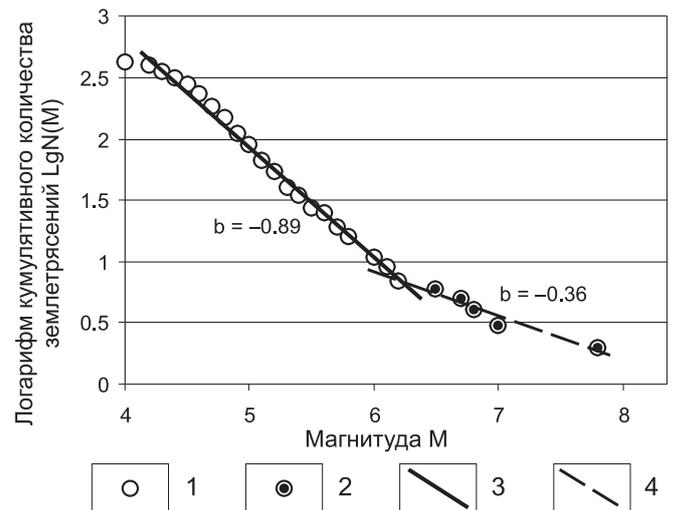


Рис. 2. Пример построения кумулятивного графика повторяемости землетрясений и деления его на основную совокупность значений $\lg N(M)$ с ярко выраженным последовательным линейным распределением (1) с линией регрессии (3) и хвост распределения (2) с линией регрессии (4). Цифры у прямых – угловой коэффициент уравнения линии регрессии.

Fig. 2. Example of a cumulative earthquake recurrence plot, and its division into the main set of values $\lg N(M)$ with clearly sequential linear distribution (1) from regression line (3) and the distribution tail (2) with regression line (4). Numbers on the lines show the slope coefficient of the regression line equation.

сятичный логарифм количества событий $\lg N(M_n)$ соответствующего магнитудного уровня откладывается на оси ординат. Анализ изменения угла наклона графика повторяемости предлагается проводить путем выделения на графиках совокупности значений $\lg N(M_n)$ с ярко выраженным последовательным линейным распределением (рис. 2). Значения, не вошедшие в основную совокупность и располагающиеся в области сильных магнитуд, рассматривались как хвост распределения (рис. 2). Если для основного распределения и для хвоста отдельно построить свои линии регрессии с уравнением типа (1), то угловой коэффициент b полученных линий регрессий будет отличаться. Рассмотрим формы хвостов по результатам анализа фактического материала сильных землетрясений Центральной Азии за два последних столетия и возможности их использования для долгосрочного прогноза.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По предложенной методике для каждого отдельного разлома Центральной Азии (см. рис. 1) по

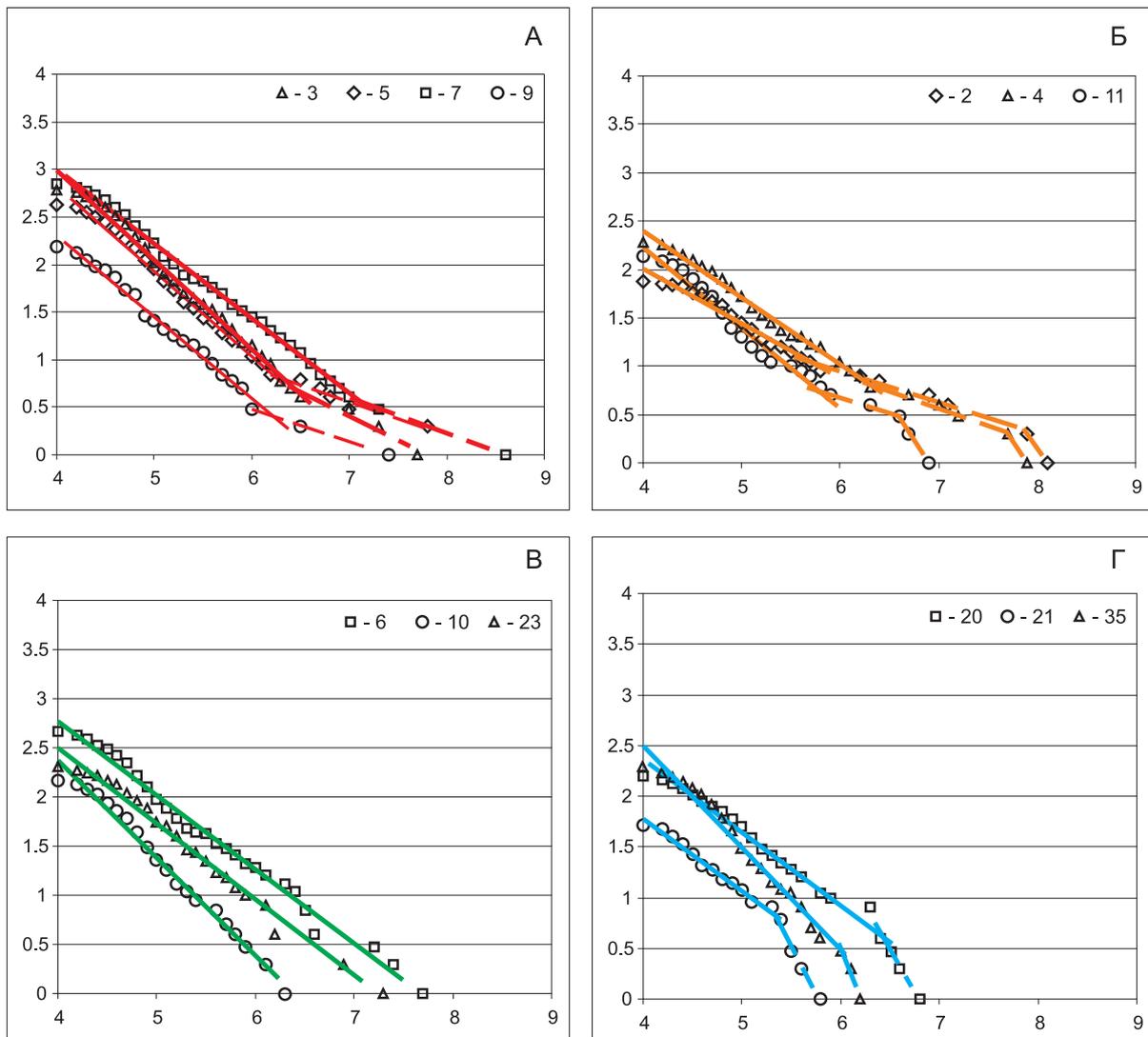


Рис. 3. Примеры разных типов графиков повторяемости землетрясений, зафиксированных в областях активного динамического влияния разломов Центральной Азии. А, Б, В, Г – соответственно первый, второй, третий, четвертый тип графиков повторяемости. Номера на графиках соответствуют номерам разломов в таблице.

Fig. 3. Examples of different types of earthquake recurrence plots for seismic events recorded in the areas of active dynamic influence of faults in Central Asia. А, Б, В, and Г – recurrence plot types 1, 2, 3, and 4. Numbers on the plots correspond to the fault numbers in Table.

событиям, зафиксированным в областях их активного динамического влияния, строились кумулятивные графики повторяемости землетрясений. Ширина областей активного динамического влияния (ОАДВ) разломов принималась равной 50 км в каждую сторону от оси линии разрыва. Для анализа использовались землетрясения из каталога NEIC [National Earthquake..., 2016] с магнитудой $M \geq 4$ за период времени 1900–2014 гг. Каждый график повторяемости землетрясений, произошедших в области влияния конкретного разрыва, был оценен с точки зрения наличия и формы хвоста распределения. Оказалось, что в характере поведения хвоста распределения относительно распределения об-

щей совокупности значений $\lg N(M)$ можно выделить четыре типа (рис. 3). Первый тип графиков повторяемости (рис. 3, А) характеризуется уменьшением угла наклона линии регрессии относительно основной совокупности значений $\lg N(M)$ при переходе в область сильных магнитуд (таблица). При этом изменение линейности графиков повторяемости наблюдается на уровне магнитуды $M = 6.3 \pm 0.6$. В первую группу вошли разломы, контролирующие сильные сейсмические события с магнитудой $M \approx 8$ и выше. Таким образом, для разломов с данным типом графиков характерны крупные землетрясения с $M \geq 8$, их сила непропорционально высока относительно теоретических значе-

Ранжирование разломов и контролируемых ими землетрясений по типам графиков повторяемости
Ranking of faults and earthquakes controlled by faults on the basis of recurrence plots

| Тип графика повторяемости землетрясений | Номер разлома | Название или местоположение разлома | Магнитуда максимального землетрясения, зафиксированного в области динамического влияния разлома | Тангенс угла наклона основной совокупности значений LgN(M) графика повторяемости землетрясений | Тангенс угла наклона хвоста распределения графика повторяемости землетрясений | Магнитудное значение соответствующее точке изменения угла наклона графика повторяемости | |
|---|---|--|---|--|---|---|-----|
| 1 | 7 | Гималайский | 8.6 | 0.78 | 0.37 | 7.1 | |
| | 17 | Веньчунь | 8.3 | 0.76 | 0.18 | 5.8 | |
| | 1 | Хангайский | 8.3 | 0.48 | 0.10 | 6.4 | |
| | 14 | Разлом северного ограничения Алаканского блока | 8.1 | 0.56 | 0.25 | 7.0 | |
| | 8 | MinShan-Longmen | 7.9 | 1.19 | 0.38 | 6.0 | |
| | 5 | Куньлунь | 7.8 | 0.89 | 0.36 | 6.2 | |
| | 3 | Южный Тянь-Шань | 7.7 | 0.94 | 0.49 | 6.5 | |
| | 9 | Северо-восточный сегмент Байкальской сейсмической зоны | 7.4 | 0.86 | 0.34 | 6.2 | |
| | 36 | Разлом западного ограничения Джунгарского блока | 6.8 | 0.91 | 0.51 | 5.3 | |
| | 2 | 2 | Гоби-Алтайский | 8.1 | 0.57 | 0.32 | 5.7 |
| | | 4 | Алтын Таг – Хайян-Кайлайн | 7.9 | 0.69 | 0.35 | 6.3 |
| | | 13 | Разлом южного ограничения Алаканского блока | 7.9 | 0.66 | 0.32 | 5.4 |
| | | 15 | Северный Тянь-Шань | 7.8 | 0.82 | 0.46 | 5.8 |
| | | 18 | Yin Shan – Yan Shan – Bohai | 7.5 | 0.69 | 0.28 | 6 |
| 19 | | Разлом восточного ограничения Таджикского блока | 7.2 | 0.97 | 0.5 | 5.6 | |
| 37 | | Anninghe-Xiaojiang | 7.1 | 0.95 | 0.41 | 5.1 | |
| 22 | | Тан-Лу | 7 | 0.74 | 0.15 | 5.8 | |
| 11 | | Юго-западный сегмент Байкальской сейсмической зоны | 6.9 | 0.83 | 0.31 | 5.8 | |
| 3 | | 6 | Каракорумский | 7.7 | 0.75 | – | – |
| | 30 | Ферганский | 7.5 | 0.73 | – | – | |
| | 23 | Разлом центральной части Тибетского плато | 7.3 | 0.77 | – | – | |
| | 10 | Центральный сегмент Байкальской сейсмической зоны | 6.3 | 0.99 | – | – | |
| | 31 | Karakax | 7.8 | 0.86 | 1.87 | 6.9 | |
| | 34 | Gissal-Kokshal | 7.5 | 0.82 | 2.39 | 7.4 | |
| | 32 | Разлом центральной части Таджикского блока | 7.5 | 0.92 | 6.02 | 6.9 | |
| | 26 | Разлом юго-восточного ограничения Тибетского плато | 6.9 | 0.79 | 1.51 | 5.8 | |
| | 20 | West Qinling-Delingha – Qinling-Dabie | 6.8 | 0.72 | 1.73 | 5.9 | |
| | 21 | Fenhe-Weihe | 5.8 | 0.71 | 1.88 | 5.3 | |
| 35 | Разлом южного ограничения Таджикского блока | 6.2 | 1.01 | 2.4 | 6.0 | | |

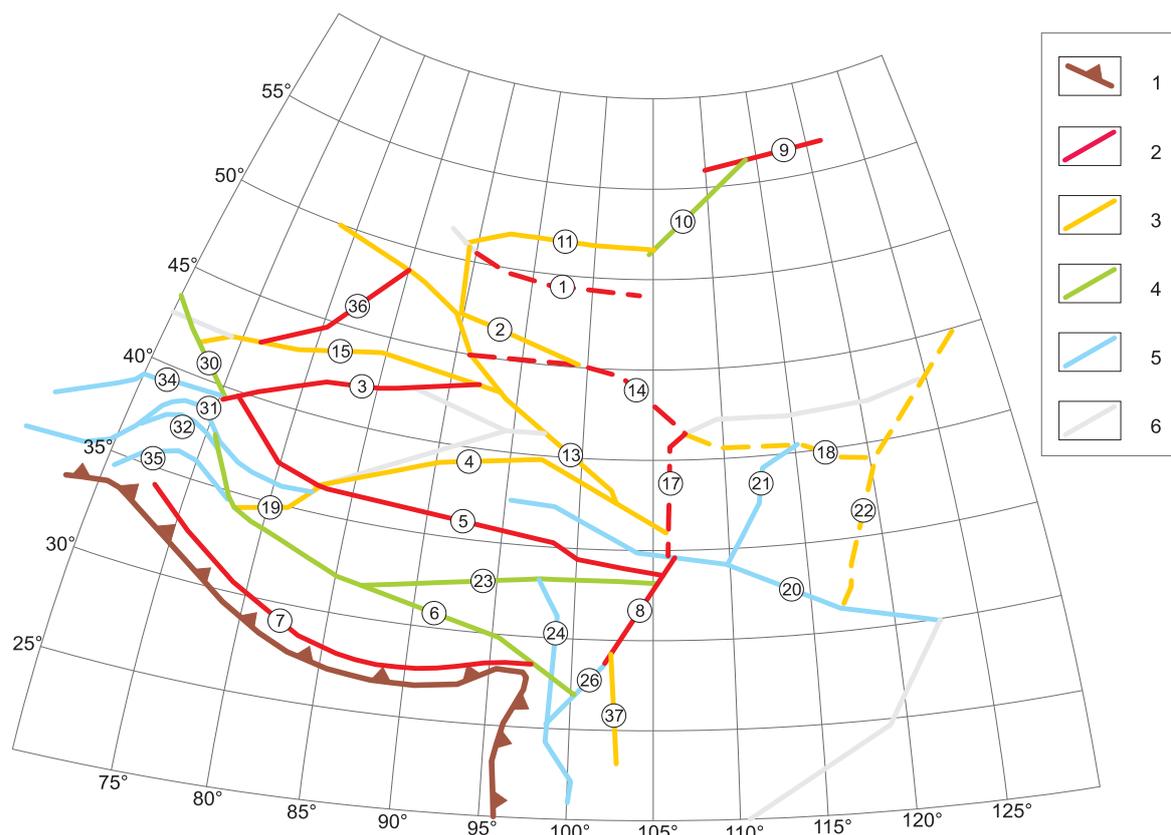


Рис. 4. Карта относительной сейсмической опасности разломов Центральной Азии. 1 – южная надвиговая граница Гималайского сейсмического пояса; 2–5 – соответственно разломы с первым, вторым, третьим и четвертым типом графиков повторяемости, пунктиром показаны разломы с недостаточной математической обеспеченностью; 6 – разломы, исключенные из анализа в связи с недостаточным количеством данных. Номера разломов соответствуют номерам в таблице.

Fig. 4. Map of Central Asia showing relative seismic hazard of faults. 1 – southern thrust bordering the Himalayan seismic belt; 2–5 – faults with recurrence plot types 1, 2, 3, and 4, respectively (dashed lines show faults with insufficient mathematical coverage); 6 – faults excluded from the analysis due to insufficient data. Fault numbers correspond to the numbers in Table.

ний, ожидаемых из распределения слабых событий. При этом повтор аналогичного по силе сейсмического события весьма вероятен, поскольку прочностные связи в области смещения крыльев весьма ослаблены. Следовательно, разломы, имеющие первый тип хвостов распределения графиков повторяемости, можно считать весьма опасными. В их число входят разломы Южного Тянь-Шаня (рис. 4), Гималайский разлом, разлом Куньлунь и субмеридиональные разломы (Веньчуань, MinShan-Longmen), проходящие примерно по 105° в.д. (см. рис. 1).

Графики второго типа (см. рис. 3, Б) схожи с графиками первого. Так же, как и на графиках первого типа, при переходе в область сильных магнитуд угол наклона становится положе. Изменение линейности происходит на уровне магнитуды

$M=5.7 \pm 0.3$. Хвост распределения графиков повторяемости второго типа на уровне магнитуды $M=7.3 \pm 0.5$ претерпевает еще одно изменение и угол наклона с пологого меняется вновь на более крутой. Однако, несмотря на последний изгиб, уровень сильных событий по-прежнему остается выше, чем следовало бы ожидать исходя из распределения более слабых землетрясений. Подобное «двойное» изменение с условным возвратом в классическую линию регрессии графиков повторяемости свидетельствует о неустойчивости прочностных связей между блоками и вероятной способности их к залечиванию. Для графиков второго типа характерны землетрясения с магнитудой $M \approx 7.5-7.9$ (за исключением Гоби-Алтайского землетрясения с $M=8.1$). Более слабые характерные землетрясения в сравнении с первой группой разломов в совокупности

с выполаживанием хвостов графиков повторяемости позволяют отнести разломы второй группы к сейсмически опасным. Вторая группа представлена разломами, протягивающимися вдоль северной границы Тибетского плато, Северного Тянь-Шаня, а также Гоби-Алтайским разломом и юго-западным сегментом Байкальской сейсмической зоны.

На графиках повторяемости третьего типа изменение наклона выражено слабо или отсутствует вовсе, угол наклона сохраняется на любом магнитудном уровне (см. рис. 3, В). Разломы с графиками данного типа на территории Центральной Азии встречаются редко. Среди них локальную совокупность образуют только Каракорумский разлом и оперяющий его субширотный разлом (рис. 4). В областях динамического влияния разломов с третьим типом графиков повторяемости регистрировались события с магнитудой 7.3–7.7 (за исключением центрального сегмента Байкальской сейсмической зоны, сейсмическая активность которого в целом ниже, чем у других разломов данной группы). Сила характерных для данной группы разломов землетрясений по-прежнему позволяет нам считать разломы опасными, однако за счет пропорционального соотношения долей слабых и сильных событий третья группа является более «предсказуемой» по сравнению с первой и второй группой разломов, но менее опасной по событиям с $M \geq 8$.

Для графиков четвертого типа хвост распределения изгибается книзу (см. рис. 3, Г). Изменение линейности наблюдается на уровне магнитуды $M = 6.1 \pm 0.6$, что в целом близко к значениям, полученным для графиков первого и второго типа. Однако в отличие от графиков первого и второго типа в областях влияния разломов данной группы фиксируются события с магнитудами, не превышающими $M = 7.5$. Следовательно, разломы данной группы характеризуются более слабой сейсмической активностью по сравнению с разломами двух первых групп. Доля сильных событий несколько снижена по отношению к доле слабых. Более низкие значения магнитуды фактических землетрясений в совокупности с изменением угла наклона графика повторяемости книзу позволяют считать разломы данной группы неопасными по возникновению событий с $M \geq 8$. Графики четвертого типа характерны преимущественно для разломов Таджикского и Туранского блоков, а также для разломов восточной части Центральной Азии и представлены единичными разломами на юго-восточной границе Тибетского плато (рис. 4).

В целом можно заключить, что весьма опасные и опасные разломы (с графиками повторяемости первого и второго типа соответственно), контролируемые сильные землетрясения с $M \geq 7.5$, локализируются преимущественно в границах Тибетского

плато, Тянь-Шаня и Алтае-Монгольского сейсмического пояса. Область их распространения соотносится с описанным в работах [Gatinsky et al., 2011; Atlas..., 2013] «треугольником», стороны которого оконтуривают границы высокой сейсмической активности Центральной Азии и включают в себя крупные катастрофические землетрясения исследуемого региона. Восточная граница распространения весьма опасных и опасных разломов проходит по 105° в.д. и соответствует глобальной субмеридиональной трансрегиональной структуре [Komarov et al., 1978; Sherman et al., 2005a, 2015; Logan, 2012]. На западе намечается граница на 77° в.д., которая отделяет разломы с графиками первого и второго типа от разломов Памира, которые согласно принятой методике можно считать неопасными. Для разломов с графиками повторяемости первого и второго типа характерны сдвиговые смещения с высокими амплитудами. Вмещающая их среда испытывает субмеридиональное сжатие в сочетании со сдвиговыми напряжениями. При этом наблюдаемое на графиках повторяемости выполаживание хвоста свидетельствует о снижении вязкости среды.

Анализ поведения хвостов графиков повторяемости, отражающих характер изменения сейсмического процесса в областях динамического влияния разломов, позволяет нам провести долгосрочный прогноз на ближайшие 50 лет. Учитывая тот факт, что статистика сильных сейсмических событий является недостаточной, а точность оценки магнитуд исторических землетрясений ниже инструментальных, долгосрочный прогноз реализации катастрофических землетрясений следует считать вероятностным. В зонах разломов с графиками повторяемости первого типа в ближайшие 50 лет весьма вероятны землетрясения с магнитудой $M \geq 7.5$, в областях динамического влияния разломов с графиками второго типа возможны катастрофические землетрясения с магнитудой $M \geq 7.5$. Для разломов с графиками третьего типа события с магнитудой $M \geq 7.5$ не предсказываются. И, наконец, в разломах с графиками четвертого типа мала вероятность возникновения сильных землетрясений. На составленной карте разломов Центральной Азии (рис. 4) отражена относительная степень их сейсмической опасности и дан долгосрочный прогноз сильных ($M \geq 7.5$) землетрясений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере Центральной Азии проанализированы возможности использования графиков повторяемости землетрясений для исследования закономерностей пространственно-временной лока-

лизации сильных землетрясений в областях динамического влияния сейсмоактивных разломов. Использование только областей динамического влияния сейсмоактивных разломов для расчетов графиков повторяемости по накопительной системе позволило установить их характерные типы линейности для крупных сейсмоактивных разломов Центральной Азии, контролируемых в текущем столетии сильные события с $M \geq 7.5$. Прямолинейная форма графиков повторяемости землетрясений искривляется в правой части, образуя разные по форме хвосты распределения. Построенная по слабым событиям регрессия не отражает фактического распределения сильных землетрясений: сила и количество крупных землетрясений могут быть больше или меньше, чем того следовало бы ожидать, исходя из распределения только слабых событий. Нарушение линейности графиков повторяемости наблюдается на уровне магнитуды $M=5.5-6.5$, а иногда и на более высоких магнитудах. На данных магнитудных границах, вероятно, происходят изменения физики очага разрушения (землетрясения) [Sherman et al., 2003, 2015]. Все фиксируемые сильные землетрясения контролируются только областями динамического влияния крупных разломов. При $M \geq 6$ важнейшее значение приобретает амплитуда смещения, величина которой

зависит от прочности сцепления блоков, которая, в свою очередь, определяет квазивязкость трещиноватой среды. Отсюда, получаемые сложные окончания линий регрессии на графиках повторяемости землетрясений отражают реологическое состояние и течение сейсмического процесса в конкретных длительно развивающихся разломах. Этот процесс отражается на графиках повторяемости Гутенберга-Рихтера типами (формами) хвостов распределения событий. Тип хвоста позволил ранжировать крупные разломы Центральной Азии по степени их сейсмической опасности и провести долгосрочный прогноз вероятности возникновения сильных ($M \geq 7.5$) землетрясений в областях динамического влияния выделенных дизъюнктивов.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность д.ф.-м.н. М.В. Родкину за проявленный интерес к работе, ценные советы и полезные замечания, учтенные в представляемой статье. Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 15-55-53023 ГФЕН – Российско-Китайский совместный проект) и соответствуют отдельному заданию плана НИР лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Atlas of Seismotectonics in Central Asia*, 2013. Beijing, 129 p.
- Båth M., 1981. Earthquake recurrence of a particular type. *Pure and Applied Geophysics* 119 (5), 1063–1076. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00878970>.
- Davison Jr. F.C., Scholz C.H., 1985. Frequency-moment distribution of earthquakes in the Aleutian arc: a test of the characteristic earthquake model. *Bulletin of the Seismological Society of America* 75 (5), 1349–1361.
- Gatinsky Yu.G., Vladova G.L., Prokhorova T.V., Rundkvist D.V., 2011. Geodynamics of Central Asia and prediction of catastrophic earthquakes. *Prostranstvo i Vremya (Space and Time)* (3), 124–134 (in Russian) [Гатинский Ю.Г., Владова Г.Л., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Геодинамика Центральной Азии и прогноз катастрофических землетрясений // *Пространство и время*. 2011. № 3. С. 124–134].
- Gusev A.A., Shumilina L.S., 2004. Recurrence of Kamchatka strong earthquakes on a scale of moment magnitudes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 40 (3), 206–215.
- Gutenberg B., Richter C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 34 (4), 185–188.
- Ioganson L.I., 2012. 105 deg E.I. Zone — New Type of the Geodynamic Boundaries? *Prostranstvo i Vremya (Space and Time)* 1 (1), 1–7 (in Russian) [Иогансон Л.И. Зона 105 градуса в.д. – новый тип геодинамических границ? // *Пространство и время*. 2012. Т. 1. № 1. С. 1–7]. Available from: <http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t1v1/1106.php> (last accessed June 7, 2016).
- Komarov Yu.V., Belichenko V.G., Misharina L.A., Petrov P.A., 1978. The Verkhoyano-Birmanskaya junction zone of Central and East-Asian structures (VEBIRS zone). In: VEBIRS Trans-Asian Continental Zone. East Siberian Division of the Siberian Branch, USSR Acad. Sci., Irkutsk, p. 5–24 (in Russian) [Комаров Ю.В., Беличенко В.Г., Мишарина Л.А., Петров П.А. Верхояно-Бирманская зона сочленения центрально- и восточноазиатских структур (зона ВЕБИРС) // Трансазиатская континентальная зона ВЕБИРС (оперативная информация). Иркутск: Восточно-Сибирский филиал СО АН СССР, 1978. С. 5–24].
- Kuzmin Yu.O., 2004. Recent Geodynamics of Fault Zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 40 (10), 868–882.
- Kuzmin Yu.O., Zhukov V.S., 2004. Recent geodynamics and variations of physical properties of rocks. Publishing House of the Moscow State Mining University, Moscow, 262 p. (in Russian) [Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная

- геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. 262 с.].
- Kuznetsova K.I., 1974. Features of earthquake recurrence curves and behavior of rock masses. In: Regional studies of seismic regime. Shtinnitsa, Kishinev, p. 100–108 (in Russian) [Кузнецова К.И. Особенности графика повторяемости землетрясений и поведение горных масс // Региональные исследования сейсмического режима. Кишинев: Штинница, 1974. С. 100–108].
- National Earthquake Information Center (NEIC), 2016. Available from: <http://earthquake.usgs.gov/> (last accessed June 7, 2016).
- Pacheco J.F., Scholz C.H., Sykes L.R., 1992. Changes in frequency–size relationship from small to large earthquakes. *Nature* 355 (6355), 71–73. <http://dx.doi.org/10.1038/355071a0>.
- Page M.T., Alderson D., Doyle J., 2011. The magnitude distribution of earthquakes near Southern California faults. *Journal of Geophysical Research* 116 (B12), B12309. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JB007933>.
- Papadopoulos G.A., Skafida H.G., Vassiliou I.T., 1993. Nonlinearity of the magnitude-frequency relation in the Hellenic Arc-Trench System and the characteristic earthquake model. *Journal of Geophysical Research* 98 (B10), 17737–17744. <http://dx.doi.org/10.1029/93JB00559>.
- Pisarenko V.F., Rodkin M.V., 2004. Heavy-tailed Distributions in Disaster Analysis. Computational seismology, vol. 38. GEOS, Moscow, 240 p. (in Russian) [Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределение с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф. Вычислительная сейсмология. Вып. 38. М.: ГЕОС, 2004. 242 с.].
- Pshennikov K.V., 1965. The Mechanism of Occurrence of Aftershocks and Nonelastic Properties of the Earth's Crust. Nauka, Moscow, 86 p. (in Russian) [Пшенников К.В. Механизм возникновения афтершоков и неупругие свойства земной коры. М.: Наука, 1965. 86 с.].
- Purcaru G., 1975. A new magnitude-frequency relation for earthquakes and a classification of relation types. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 42 (1), 61–79. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb00850.x>.
- Riznichenko Yu.V., 1985. Problems of Seismology. Selected Works. Nauka, Moscow, 408 p. (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука, 1985. 408 с.].
- Rodkin M.V., Pisarenko V.F., Ngo Thi Lu, Rukavishnikova T.A., 2014. On potential representations of the distribution law of rare strongest earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (4), 893–904 (in Russian) [Родкин М.В., Писаренко В.Ф., Лы Н., Рукавишников Т.А. О возможных реализациях закона распределения редких сильнейших землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 893–904]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0161>.
- Sherman S.I., 2014. Seismic Process and the Forecast of Earthquakes: Tectonophysical Conception. Academic Publishing House “Geo”, Novosibirsk, 359 p. (in Russian) [Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. 359 с.].
- Sherman S.I., Berzhinsky Yu.A., Pavlenov V.A., Aptikaev F.F., 2003. Regional Scales of Seismic Intensity. New Scale Applied to Pribaikalie. Publishing House of SB RAS, Department “Geo”, Novosibirsk, 189 p. (in Russian) [Шерман С.И., Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Аптикаев Ф.Ф. Региональные шкалы сейсмической интенсивности. Опыт создания шкалы для Прибайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 189 с.].
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., 1983. Areas of Dynamic Influence of Faults (Modelling Results). Nauka, Novosibirsk, 110 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука. СО АН СССР, 1983. 110 с.].
- Sherman S.I., Ma Jin, Gorbunova E.A., 2015. Recent strong earthquakes in Central Asia: regular tectonophysical features of locations in the structure and geodynamics of the lithosphere. Part 1. Main geodynamic factors predetermining locations of strong earthquakes in the structure of the lithosphere in Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 409–436. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0188>.
- Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Cheremnykh A.V., 2005a. Fault-block tectonics of Central Asia: experience of tectonophysical analysis. In: K.G. Levi, S.I. Sherman (Eds.), Top problems of recent geodynamics of Central Asia. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk. P. 135–165 (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В. Разломно-блоковая тектоника Центральной Азии: опыт тектонофизического анализа // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Ред. К.Г. Леви, С.И. Шерман. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2005. С. 135–165].
- Sherman S.I., Sorokin A.P., Savitskii V.A., 2005b. New methods for the classification of seismoactive lithospheric faults based on the index of seismicity. *Doklady Earth Sciences* 401A (3), 413–416.
- Stirling M.W., Wesnousky S.G., Shimazaki K., 1996. Fault trace complexity, cumulative slip, and the shape of the magnitude-frequency distribution for strike-slip faults: a global survey. *Geophysical Journal International* 124 (3), 833–868. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb05641.x>.
- Trifonov V.G., Karakhanyan A.S., 2004. Geodynamics and History of Civilizations. Nauka, Moscow, 668 p. (in Russian) [Трифонов В.Г., Караханян А.С. Геодинамика и история цивилизаций. М.: Наука, 2004. 668 с.].
- Ulovov V.I., 1999. Seismogeodynamics and seismic zoning of North Eurasia. *Vulkanologiya i Seismologiya (Journal of Volcanology and Seismology)* (4–5), 6–22 (in Russian) [Уловов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 6–22].

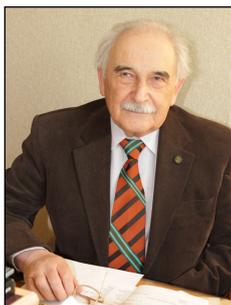
- Ulomov V.I., Shumilina L.S., 1999. Set of General Seismic Zoning Maps of the Russian Federation – OSR-97. Scale 1:8000000. Explanatory Note and a List of Cities and Towns Located in Regions of Seismic Hazard. UIPE, Moscow, 57 p. (in Russian) [Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.].
- Vostrikov G.A., 1994. Relationship Between Recurrence Plot Parameters, Seismic Flow and Earthquake Source. GIN RAS, Moscow, 292 p. (in Russian) [Востриков Г.А. Связь параметров графика повторяемости, сейсмического течения и очага землетрясения. М.: ГИН РАН, 1994. 292 с.].
- Wesnousky S.G., Scholz C.H., Shimazaki K., Matsuda T., 1983. Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting. *Journal of Geophysical Research* 88 (B11), 9331–9340. <http://dx.doi.org/10.1029/JB088iB11p09331>.
- Wesnousky S.G., Scholz C.H., Shimazaki K., Matsuda T., 1984. Integration of geological and seismological data for the analysis of seismic hazard: A case study of Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America* 74 (2), 687–708.
- Zhalkovsky N.D., 1988. Earthquake recurrence law and some of its consequences. Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Acad. Sci., Novosibirsk, 29 p. (in Russian) [Жалковский Н.Д. Закон повторяемости землетрясений и некоторые его следствия. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1988. 29 с.].



Горбунова Екатерина Алексеевна, канд. геол.-мин. наук, м.н.с.

Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
✉ e-mail: smallwizard@mail.ru

Gorbunova, Ekaterina A., Candidate of Geology and Mineralogy, Junior Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
✉ e-mail: smallwizard@mail.ru



Шерман Семен Ийнович, академик Российской академии естественных наук,
докт. геол.-мин. наук, профессор, г.н.с.

Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел.: (3952)428261; e-mail: ssherman@crust.irk.ru

Sherman, Semen I., Academician of the Russian Academy of Natural Sciences,
Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Chief Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: (3952)428261; e-mail: ssherman@crust.irk.ru