

УДК 550.343.6

## ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНА ГУТЕНБЕРГА–РИХТЕРА В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И РИСКА

© 2024 г. К. В. Крушельницкий<sup>1, \*</sup>, П. Н. Шебалин<sup>1,2</sup>,  
И. А. Воробьева<sup>1,2</sup>, О. В. Селюцкая<sup>1</sup>, А. О. Антипова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГБУН Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: kirillkrush@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

Закон Гутенберга–Рихтера устанавливает лог-линейное соотношение между количеством землетрясений, которые произошли в некотором пространственно-временном объеме и их магнитудой. Это свойство подобия предположительно отражает фрактальную структуру системы разломов, в которой формируются очаги землетрясений. В задачах оценки сейсмической опасности и риска закон Гутенберга–Рихтера играет ключевую роль. Он позволяет оценивать средний период повторяемости сильных землетрясений по частоте повторения более слабых. Из-за того, что сильнейшие землетрясения происходят редко, с интервалом в несколько сот и более лет, прямая оценка их повторяемости невозможна. По косвенным геологическим и палеосейсмическим оценкам часто кажется, что сильные землетрясения на отдельных разломах происходят чаще, чем ожидается в соответствии с законом Гутенберга–Рихтера. Такие оценки лежат в основе гипотезы, так называемых, характеристических землетрясений. Часто эта гипотеза дополнительно подтверждается видом магнитудно-частотных распределений для отдельных разломов, построенных по данным современных каталогов землетрясений. Вместе с тем, важным фактором, влияющим на вид магнитудно-частотного распределения, является выбор пространственной области, в которой строится это распределение. В данной работе исследуется влияние этого фактора и определяются условия, при которых закон Гутенберга–Рихтера применим для оценки повторяемости сильных землетрясений.

*Ключевые слова:* закон Гутенберга–Рихтера, лог-линейное соотношение, гипотеза характеристических землетрясений.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050058>, EDN: EJZGGD

### ВВЕДЕНИЕ

Лог-линейная зависимость числа землетрясений от магнитуды или степенная зависимость от сейсмического момента и энергии землетрясений, по общепринятому мнению, является отражением самоподобной структуры системы разломов, в которой землетрясения происходят [Садовский, Писаренко, 1991; Голицын, 2001; Hirata, 1989; Okubo, Aki, 1992; Turcotte, 1997]. Исследование фрактальной структуры узких областей вдоль крупных разломов и магнитудно-частотного распределения (МЧР) в таких областях, очевидно, предопределяет преобладание сильных землетрясений и относительно низкой фрактальной размерности по сравнению с вариантом рассмотрения широких зон разломов.

Тем не менее, до сих пор в задачах оценки сейсмической опасности часто применяется модель характеристических землетрясений [Schwartz, Coppersmith, 1984; Wesnowsky 1999; Ishibe, Shimazaki, 2012], предполагающая более частое проявление сильнейших для данной структуры землетрясений, чем ожидается в соответствии с законом Гутенберга–Рихтера. Обоснованность характеристической модели уже давно обсуждается, но статистические тесты до сих пор не позволяют сделать вывод о поведении отдельных разломов даже в случае визуально ярких отклонений графика повторяемости от лог-линейного вида [Mulargia, Gasperini, 1995; Kagan et al., 2012; Page, Felzer, 2015; Stirling, Zuniga, 2017].

Характеристическая модель появилась для объяснения повторяемости сильнейших

землетрясений Калифорнии [Schwartz, Coppersmith, 1984], где практически не наблюдались землетрясения с магнитудой в диапазоне от 6 до 6.5, тогда как землетрясений с магнитудой большей 6.5 произошло относительно много. Объяснение было найдено с помощью геологических и палеосейсмических данных. По полученным оценкам частоты повторения сильных землетрясений на отдельных разломах в Калифорнии и затем в Японии было показано, что они значительно превышают оценки, полученные путем экстраполяции лог-линейного магнитудно-частотного распределения в область больших магнитуд [Schwartz, Coppersmith, 1984; Wesnowsky, 1994; Ishibe, Shimazaki, 2012]. Фактически аргументы сторонников характеристической модели сводятся к замкнутому кругу: сначала предполагается что модель верна, затем она используется для отдельных субрегионов с целью расчета ожидаемой повторяемости, и после обнаружения, что полученная повторяемость сильно больше по сравнению с рассчитанной по закону Гутенберга–Рихтера, делается вывод, что модель характеристических землетрясений верна [Kagan et al., 2012].

В характеристической модели оценка повторяемости сильных землетрясений оценивается локально без учета возможного взаимодействия разломов или их сегментов, а магнитуды сильнейших землетрясений устанавливаются по размерам этих разломов. При этом не учитывается то, что несколько сегментов могут сформировать очаг одного большого землетрясения и, таким образом, с одной стороны, возможна недооценка ожидаемой магнитуды сильного землетрясения, как это произошло для землетрясений 2004 г. на Суматре и землетрясения 2011 г. вблизи Японии [Stein et al., 2012], а с другой, к дублированию одного и того же события на двух соседних сегментах. Кроме того, оценки магнитуды по размерам разломов могут оказаться завышенными, если в процессе землетрясения подвижка произошла лишь по части сегмента. Это, в частности, объясняет значительный разрыв на графиках повторяемости между инструментально зарегистрированными максимальными магнитудами и магнитудой характеристических землетрясений. Такая модель не учитывает тот факт, что лишь часть упругой энергии, накапливаемой в результате деформации литосферы, выделяется в виде землетрясений, из-за чего оценка повторяемости сильных землетрясений на основе геодезических и геологических данных может быть завышенной.

Приведенные аргументы заставляют самых жестких критиков считать использование характеристической модели наряду с моделью сейсмического цикла [Федотов, 1965; Mogi, 1968; Sykes, 1971] недопустимыми парадигмами в задачах оценки сейсмической опасности, поскольку они фактически не поддаются проверке, при этом отсутствие альтернативных парадигм не может являться основанием для их использования [Geller et al., 2015].

При использовании закона Гутенберга–Рихтера в задачах оценки сейсмической опасности необходимо также учитывать, что разбиение данных на малые выборки может приводить к сильному искажению результатов и неверным выводам [Howell, 1985]. Это не всегда учитывается, например, в линеаменно–доменно–фокальных моделях (ЛДФ) [Уломов, Шумилина, 1999; Ulomov, 1999]. Такие модели включают большое количество вытянутых узких областей небольшой площади – линеаментов, для которых параметры закона Гутенберга–Рихтера оцениваются независимо, либо принимается характеристическая модель. Важно также отметить, что часто сильные землетрясения (в особенности самые разрушительные) приводят к сбросу напряжений в системе разломов на больших площадях, что не позволяет каждый разлом рассматривать независимо от других. Например, могут возникать сильные афтершоки на соседних разломах, которые при таком подходе будут учитываться как независимые землетрясения, что приведет к общему завышению сейсмической опасности.

Из общих соображений очевидно, что размеры области, в которой производится анализ МЧР, должны быть много большими, чем линейные размеры очага землетрясения максимально наблюдаемой магнитуды. При этом возникает вопрос, можно ли учитывать лишь линейные размеры в узкой пространственной области или необходимо рассматривать область, ширина которой также больше линейных размеров очага. В частности, это требование отсутствует в моделях типа ЛДФ [Ulomov, 1999], лежащих в основе многих национальных карт сейсмического районирования [Gerstenberger et al., 2020]. В этих моделях выделяются узкие области линеаментов, для которых затем определяются параметры закона Гутенберга–Рихтера. Сейсмическая опасность обычно рассчитывается для точек земной поверхности на регулярной сетке в виде оценок вероятности превышения степени воздействия (выраженной в баллах макросейсмической шкалы или величине пикового ускорения грунта). Оценки параметров закона Гутенберга–Рихтера используются для оценки

повторяемости землетрясений разной магнитуды в разных точках пространства и затем перехода к оценкам повторяемости воздействий землетрясений разной степени (сотрясаемости [Ризниченко, 1965]) с учетом затухания сейсмических волн с расстоянием от очага. Такой переход осуществляется либо непосредственно с помощью формул Корнелла [Cornell, 1968], либо с помощью формирования синтетического каталога землетрясений.

Любая модель отражает лишь часть свойств моделируемого явления, и выбор модели зависит от целей ее использования. Модели магнитудно-частотного распределения используются для вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО). Модель характеристического землетрясения лишь усложняет проведение вероятностных оценок. Поэтому, не ставя задачу доказать, что эта модель неверна, целью нашей работы мы определяем нахождение условий, при которых выполняется закон Гутенберга–Рихтера, и тем самым использование модели характеристического землетрясения становится ненужным. Поскольку в очень больших областях закон Гутенберга–Рихтера выполняется, очевидно, что такие условия существуют и для сравнительно небольших областей. Мы ставим перед собой две задачи нахождения таких условий:

- 1) определить, во сколько раз рассматриваемая область должна быть больше размера очага сильнейшего в анализируемой последовательности землетрясения;
- 2) определить, насколько широкой должна быть область вдоль активных разломов.

### МАГНИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ОЧАГОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для решения первой задачи – определения размеров рассматриваемой области, в которой не нарушается закон Гутенберга–Рихтера, относительно размеров очага сильнейшего в этой области землетрясения – мы рассматриваем МЧР в концентрических кругах с центрами в эпицентрах сильнейших землетрясений в трех областях: 1) мир в целом, 2000–2020 гг. (области очагов землетрясений с  $M \geq 8$ –33 землетрясения); 2) Калифорния, 1979–2023 гг. ( $M \geq 7$ –5 землетрясений); 3) Япония, 2000–2020 гг. ( $M \geq 7$ –8 землетрясений;  $M \geq 6$ –75 землетрясений;  $M \geq 5$ –501 землетрясение). Для мира в целом и Калифорнии был использован каталог ANSS [Advanced..., 2023], для Японии – каталог Японского Метеорологического

Агентства (JMA) [The Seismological..., 2023]. Каталог ANSS был выбран, поскольку в его последних версиях, по утверждению авторов, практически решена проблема неоднородности определений магнитуды в разные периоды времени и в разных регионах. В частности, эта проблема решена для объединения каталогов землетрясений южной и северной Калифорнии, ранее составлявшимися по разным методикам в Калифорнийском технологическом университете и университете Беркли. Для сильных землетрясений в каталоге ANSS используется моментная магнитуда. Каталог JMA выбран, так как для островной части Японии представительная магнитуда в каталоге очень низка и составляет 1.0 [Shebalin et al., 2022].

Были построены магнитудно-частотные распределения всех землетрясений за рассматриваемый период в кругах увеличивающегося радиуса:  $R = 0.5L$ ,  $R = 1L$ ,  $R = 2L$ ,  $R = 3L$  и  $R = 5L$ , где  $L$  – линейный размер очага землетрясения, вычисляемый по формуле  $L = 10^{-2.44+0.59M}$  км [Wells, Coppersmith, 1994]. Отметим, что в приведенном соотношении подразумевается моментная магнитуда  $M_w$ . Для сильных землетрясений в каталоге ANSS представлен именно этот тип магнитуды. Также возможны другие варианты расчета линейного размера, но в данной работе это не является принципиальным, поскольку в задачу входят лишь грубые оценки. Для анализа использовались эпицентры в объединении кругов. Тем самым был исключен повторный подсчет событий в пересекающихся областях. Для сильнейших землетрясений мира, помимо этого, были рассмотрены также прямоугольные области, выделенные вручную по облакам афтершоков, произошедших в первые сутки после землетрясения. Распределения были построены в двух вариантах: дифференциальном (подсчитывалось число событий в интервалах магнитуды шириной 0.1) и интегральном (подсчитывалось число событий с магнитудой выше данного значения). Хорошо известно, что оба типа графиков при соблюдении закона Гутенберга–Рихтера имеют в логарифмическом по оси ординат масштабе прямолинейный вид. Но разные отклонения от закона Гутенберга–Рихтера лучше видны в разных вариантах и, как правило, два варианта хорошо дополняют друг друга [Vorobieva et al., 2013].

В качестве критерия невыполнения закона Гутенберга–Рихтера принято значимое отклонение магнитудно-частотного распределения (МЧР) от лог-линейной формы. Для оценки

значимости отклонения мы принимаем Пуассоновскую модель распределения числа событий в каждом интервале магнитуды. В этом случае дисперсия распределения равна ожидаемому числу событий данной магнитуды. Это соотношение верно как для дифференциальной, так и для кумулятивной формы закона Гутенберга–Рихтера. С целью упрощения расчетов, в качестве критерия значимого отклонения МЧР от логлинейной формы при значении магнитуды  $M_1$  мы принимаем отклонение более чем на величину  $\sqrt{\lambda}$  (корень из дисперсии) наблюдаемого числа событий с  $M \geq M_1$  от оценки  $\lambda = \int_{M_1}^{9.2} 10^{a-bM_1}$  этого числа с параметрами, оцененными по методу Бендер [Bender, 1983].

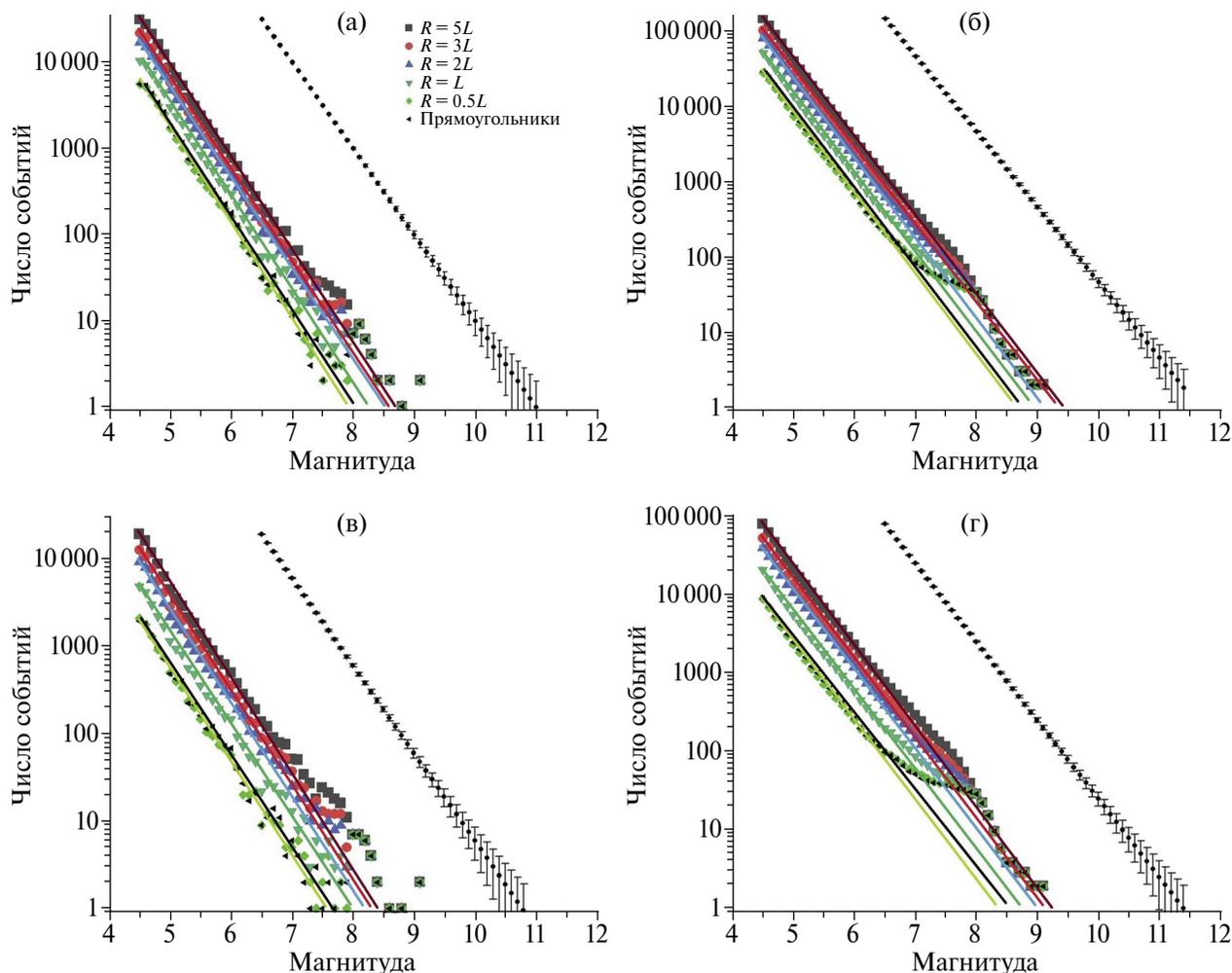
Результаты анализа для областей вблизи землетрясений с  $M \geq 8$  по миру приведены на рис. 1. Область характеристических магнитуд ярко выделяется для прямоугольных областей и кругов радиуса  $0.5L$ : на дифференциальном графике (рис. 1а) виден явный избыток числа событий с  $M \geq 7.5$ , с максимальным отклонением интегрального графика повторяемости от аппроксимирующей прямой при  $M \approx 8$ , а на кумулятивном графике наблюдается сильное выполаживание при  $M \geq 6.5$ . С ростом  $R$  “избыток” сильных землетрясений уменьшается, и при  $R \geq 3L$  практически исчезает. Это можно интерпретировать следующим образом: мы рассматриваем только области недавно произошедших землетрясений, и МЧР строится по очень короткому интервалу времени относительно периода повторяемости сильнейших землетрясений, поэтому кажущийся избыток событий магнитуды 8 и выше, вызван просто неслучайным, предопределенным выбором рассматриваемых областей (напомним, рассматриваются области эпицентров уже состоявшихся землетрясений с  $M \geq 8$ ). Тот факт, что характеристические землетрясения исчезают при значениях  $R \geq 3L$  (диаметр области больше  $6L$ ), мы интерпретируем как то, что закон Гутенберга–Рихтера можно считать выполняющимся при размерах рассматриваемой области, приблизительно пяти-шестикратно превышающих размер очага самого сильного землетрясения.

Чтобы убедиться, что построенное МЧР не определяется, в основном, афтершоками рассматриваемых сильнейших землетрясений, мы проводим также анализ графиков, построенных по каталогу с исключенными афтершоками (рис. 1в, 1г). Декластеризация каталога выполнена методом Залыпина [Zaliapin et al., 2013] с параметрами, определенными по методике работы [Shebalin et al., 2020]. Форма графиков и закономерность их изменения

сохраняется, несмотря на существенное уменьшение числа событий, при этом общее число событий каждой магнитуды уменьшается в большей степени лишь при  $R \leq L$  и для прямоугольных областей. Это наблюдение в полной мере подтверждает вывод о правомерности закона Гутенберга–Рихтера в областях, размер которых пятикратно превышает размер очага сильнейшего в этой области землетрясения.

Чтобы проверить, сохраняется ли обнаруженное свойство сейсмичности вблизи менее сильных землетрясений, мы рассмотрели области вблизи эпицентров магнитуды 7 и выше в Калифорнии (рис. 2) и Японии (рис. 3а), а также вблизи эпицентров магнитуды 6 и 5 в Японии (рис. 3б и 3в). В Калифорнии также четко выделяется область характеристических землетрясений в районе  $M = 5.5$  при малых  $R$ , которая, так же как в случае с сильными землетрясениями мира, исчезает при  $R = 3L$  и более.

В Японии ( $M \geq 7$ ) наблюдается качественно такая же, хотя и менее ярко выраженная, картина с избытком событий  $M \geq 6$  (рис. 3а, 3г). Таким образом, подтверждается вывод о том закон Гутенберга–Рихтера можно считать выполняющимся в областях, размеры которых примерно пятикратно превышают размер наиболее крупного очага. Для областей эпицентров магнитуд 5 и 6 в Японии характеристические землетрясения не выделяются вообще даже при малых  $R$  (на рисунках не показано). Это может быть вызвано тем, что рассматриваемые области попадают в зоны более сильных землетрясений, поэтому для исследования МЧР вблизи эпицентров  $M \geq 5$  и  $M \geq 6$  исключались зоны радиуса  $R = 3L$  вокруг эпицентров соответственно  $M \geq 6$  и  $M \geq 7$ . При этом значительно сократилось число рассматриваемых землетрясений: с 75 до 8 для  $M \geq 6$  и с 501 до 18 для  $M \geq 5$ . Результаты показаны на рис. 3б, 3в, 3д, 3е. Так же как и в предыдущих случаях, наблюдаются изгибы МЧР в областях соответственно  $M \geq 5$  и  $M \geq 6$ , вызванные предопределенным выбором областей. В целом МЧР для областей вблизи эпицентров с  $M \geq 6$  (рис. 3б, 3д) трудно поддаются интерпретации из-за относительного дефицита событий с магнитудой вблизи значения 5 при всех  $R$ , вызванному, по-видимому, близостью большинства эпицентров  $M \geq 6$  и  $M \geq 7$ . Для землетрясений с  $M \geq 5$  (рис. 3в, 3е) относительный избыток числа событий большой магнитуды ( $M \geq 6$ ) исчезает при  $R = 3L$ . Таким образом, утверждение о том, что закон Гутенберга–Рихтера выполняется в областях с, как минимум, пятикратным линейным размером по сравнению с линейным размером сильнейшего в этой области землетрясения, подтверждается и для средних магнитуд таких землетрясений.

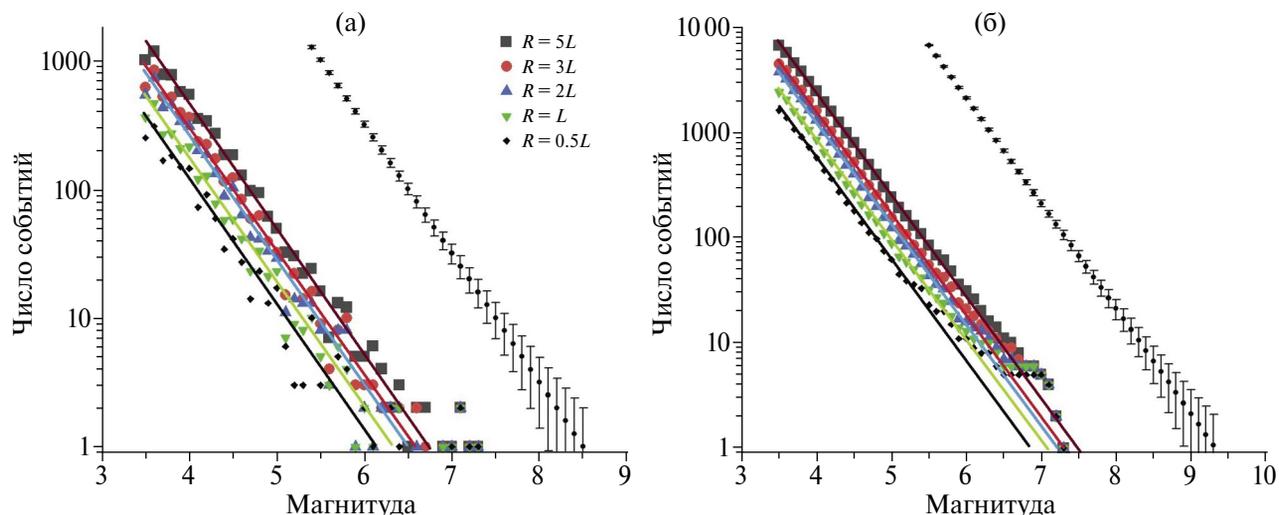


**Рис. 1.** Магнитудно-частотные распределения вблизи эпицентров землетрясений мира с  $M \geq 8$ : (а), (в) – дифференциальные распределения; (б), (г) – интегральные распределения; (а), (б) – по всем землетрясениям; (в), (г) – афтершоки удалены. Разные символы соответствуют разным размерам рассматриваемой области (указаны на легенде; см. текст). Справа от основных графиков показаны доверительные интервалы как функция числа событий (см. текст).

### МАГНИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВДОЛЬ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ

Использование в моделях типа ЛДФ [Uotou, 1999] протяженных структур для формирования синтетического каталога землетрясений предполагает выполнение в таких структурах закона Гутенберга–Рихтера. В предыдущем разделе было показано, что размер области, в которой выполняется закон Гутенберга–Рихтера должен быть, как минимум, в 5 раз больше размера очага сильнейшего землетрясения. При этом рассматривались линейные размеры, то есть максимальные размеры по длине, а вопрос о минимальной ширине остается открытым. Если ориентация очагов сильных землетрясений не predetermined, то, конечно, минимальная

ширина рассматриваемой области также должна, как минимум, в 5 раз превышать линейный размер очага сильнейшего землетрясения. Рассмотрим случаи, когда разломы, на которых происходят сильные землетрясения, хорошо изучены. Особый интерес представляют субвертикальные разломы, поскольку положение эпицентров землетрясений на таких разломах не сдвигается при изменении глубины очагов. Широко известным примером таких разломов является система разломов Сан-Андреас в Калифорнии [Scholz, 2000; Zoback et al., 1987; 2011]. Аналогично работе [Shebalin, Narteau, 2017] здесь мы рассматриваем субвертикальные разломы Сан-Андреас, Маакама, Хайвард, Барлетт, Калаверас, Элсинор, Лагуна Салата, Сан Хасинто, Империял и Ландерс, для которых характерны



**Рис. 2.** Магнитудно-частотные распределения вблизи эпицентров землетрясений Калифорнии с  $M \geq 7$ : (а) – дифференциальное распределение; (б) – интегральное распределение. Разные символы соответствуют разным размерам рассматриваемой области (указаны на легенде; см. текст). Справа от основных графиков показаны доверительные интервалы как функция числа событий (см. текст).

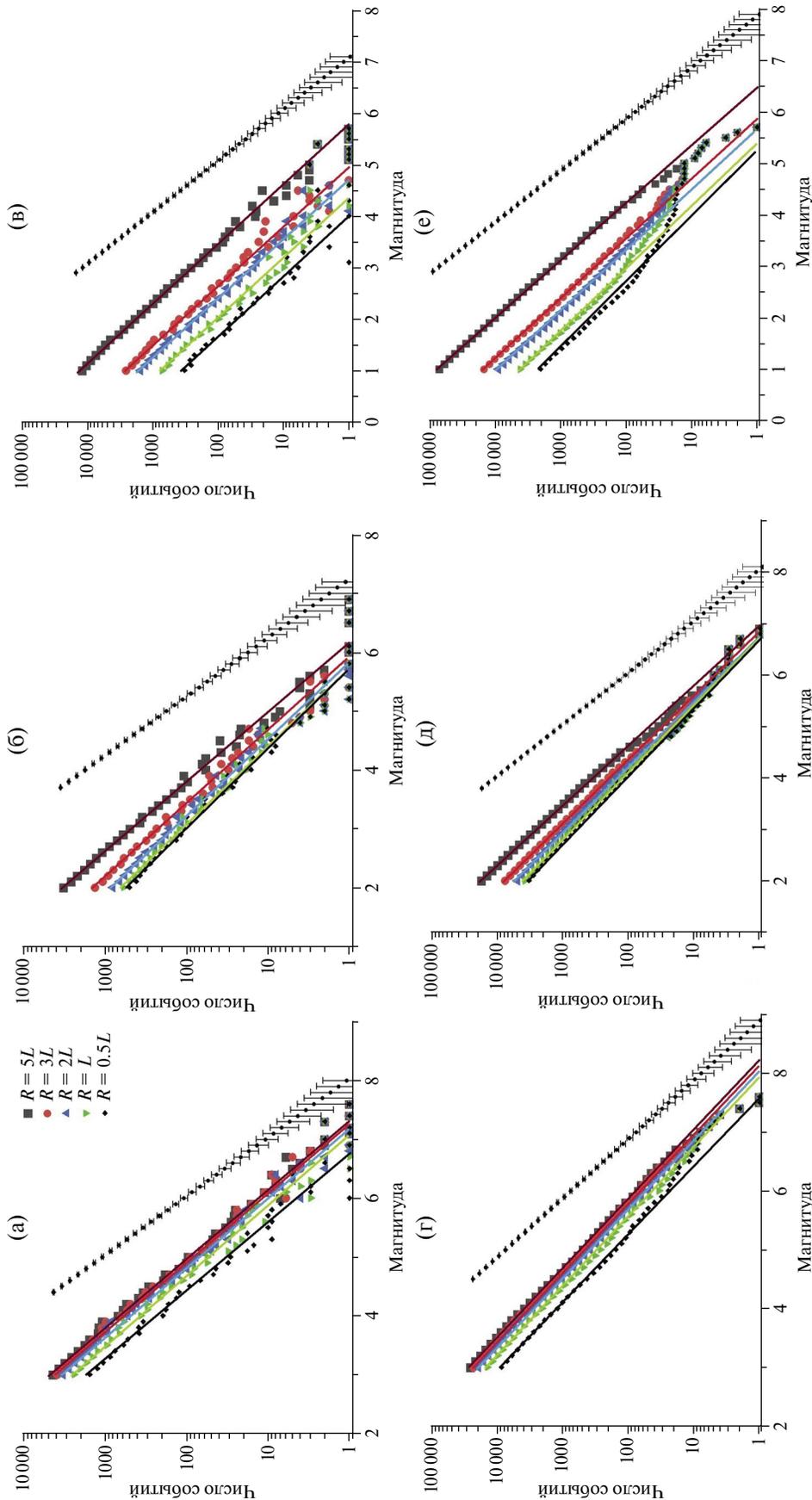
землетрясения сдвигового типа [Field et al., 2014] (рис. 4).

Вдоль каждого из рассматриваемых разломов с каждой из сторон выделены полосы шириной  $l$ . По землетрясениям с эпицентрами в объединении таких полос были построены магнитудно-частотные распределения. Начиная со значения  $l = 0.25$  км, величина  $l$  пошагово удваивалась, вплоть до значения 128 км. Результаты приведены на рис. 5.

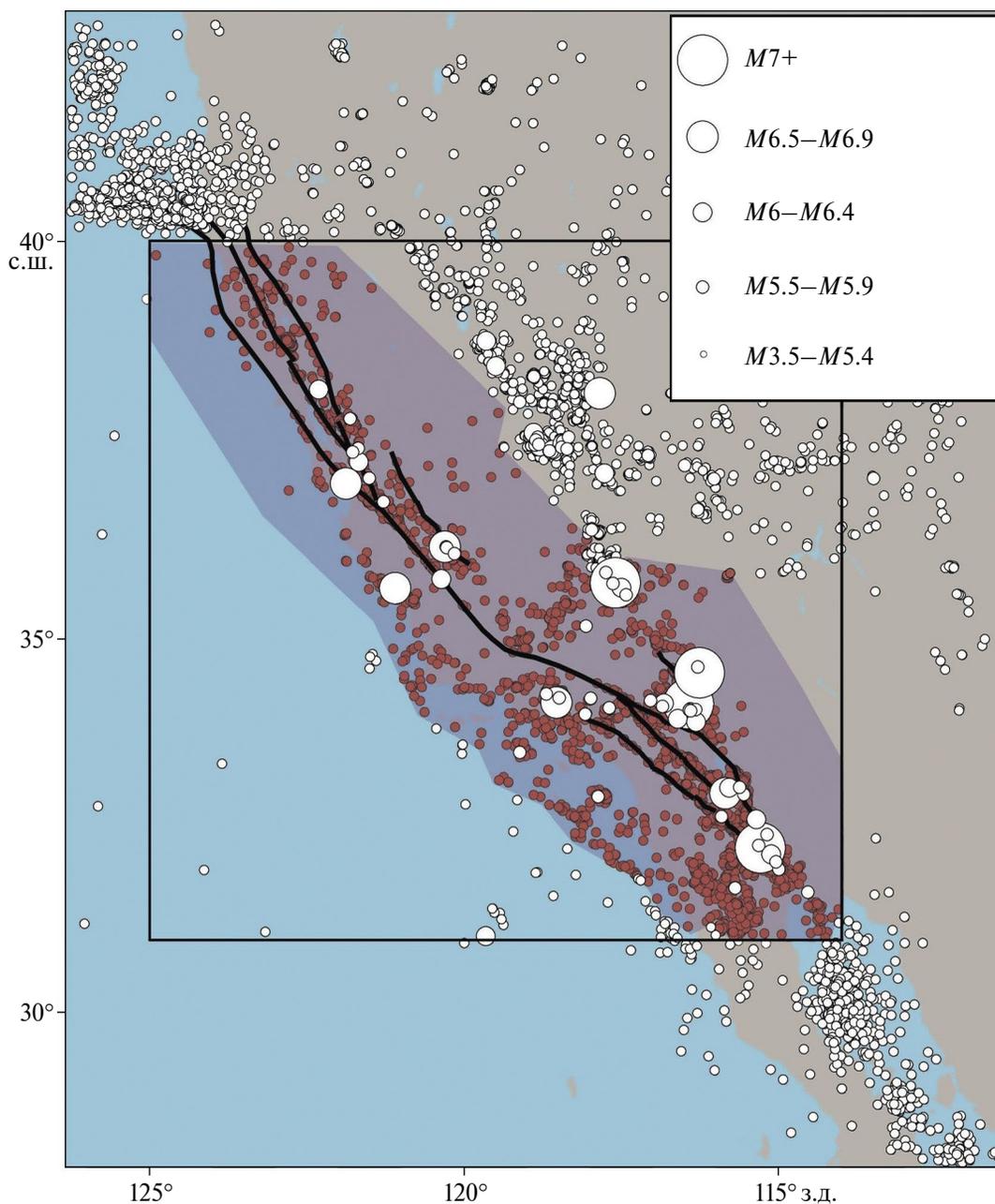
Визуальный анализ графиков показывает, что ширина интервала магнитуд, на котором сохраняется линейная форма МЧР, возрастает с увеличением величины  $l$ . Особо следует выделить тот факт, что даже при  $l = 128$  км наблюдается переход к относительному преобладанию более сильных событий при  $M \geq 5.5$ : МЧР становится более пологим. Можно было бы предположить, что это следствие особенностей шкалы магнитуды, но для всего каталога в пределах рассматриваемой области, включая землетрясения штата Невада, МЧР имеет прямолинейную форму, что опровергает это предположение.

Чтобы установить зависимость величины  $l$  от предельного значения магнитуды  $M(l)$ , для которого можно считать, что МЧР сохраняет прямолинейную форму в интервале  $[M_c, M(l)]$ , был предложен простой итерационный алгоритм. Для каждого рассмотренного значения  $l$  на интервале магнитуд  $[M_c, M_1]$ , начиная со значения  $M_1 = 3.8$ , оцениваются параметры закона Гутенберга–Рихтера по методу Бендер

[Bender, 1983]. С этими параметрами вычисляется ожидаемое число событий  $\lambda$  с магнитудой  $M \geq (M_1 + 0.1)$  при условии  $M \leq M_{\max}$  (в качестве величины  $M_{\max}$  принимается максимальная наблюдаемая магнитуда). Если вычисленное значение отличается от наблюдаемого на величину  $\sqrt{\lambda}$  или более (см. раздел 2), то принимается  $M(l) = M_1$ . В противном случае итерации продолжаются, значение  $M_1$  увеличивается на 0.1. В результате,  $M_1$  – это минимальное значение магнитуды, при котором значимо нарушается закон Гутенберга–Рихтера. График вычисленных по этому алгоритму значений приведен на рис. 6. Для удобства сравнения с зависимостью линейного размера очага от магнитуды землетрясения [Wells, Coppersmith, 1994] на графике представлена обратная зависимость величины  $l$  от магнитуды  $M(l)$ . Величина  $l$  равна полуширине полосы вдоль разлома, в которой сохраняется прямолинейная форма МЧР вплоть до заданного значения магнитуды. Как следует из графика, для магнитуд менее 5.5 величина  $l$ , меньше чем линейный размер очага землетрясения  $L$ . Для магнитуд 6.0 и более, как следует из графика, величина  $l$  примерно втрое (0.5 в логарифмической шкале) больше  $L$ . С учетом того, что  $l$  – это полуширина полосы вдоль разломов, снова подтверждается тезис о том, что линейная форма МЧР в логарифмическом масштабе (закон Гутенберга–Рихтера) сохраняется в областях с линейным размером как минимум пяти-шестикратно превышающим размер сильнейшего в этой области землетрясения.



**Рис. 3.** Магнитудно-частотные распределения вблизи эпицентров землетрясений Японии: (а), (г) с  $M \geq 6$ , (б), (д) с  $M \geq 7$ ; (в), (е) с  $M \geq 5$ , исключены области внутри кругов радиуса  $R = 3L$  с центрами в эпицентрах землетрясений с  $M \geq 6$ ;  $L$  – линейный размер очага землетрясения данной магнитуды по работе [Wells, Sorretsmith, 1994]; (а)–(в) – дифференциальное распределение; (г)–(е) – интегральное распределение. Разные символы соответствуют разным размерам рассматриваемой области (указаны на легенде; см. текст). Справа от основных графиков показаны доверительные интервалы как функция числа событий  $\lambda$  (см. текст).

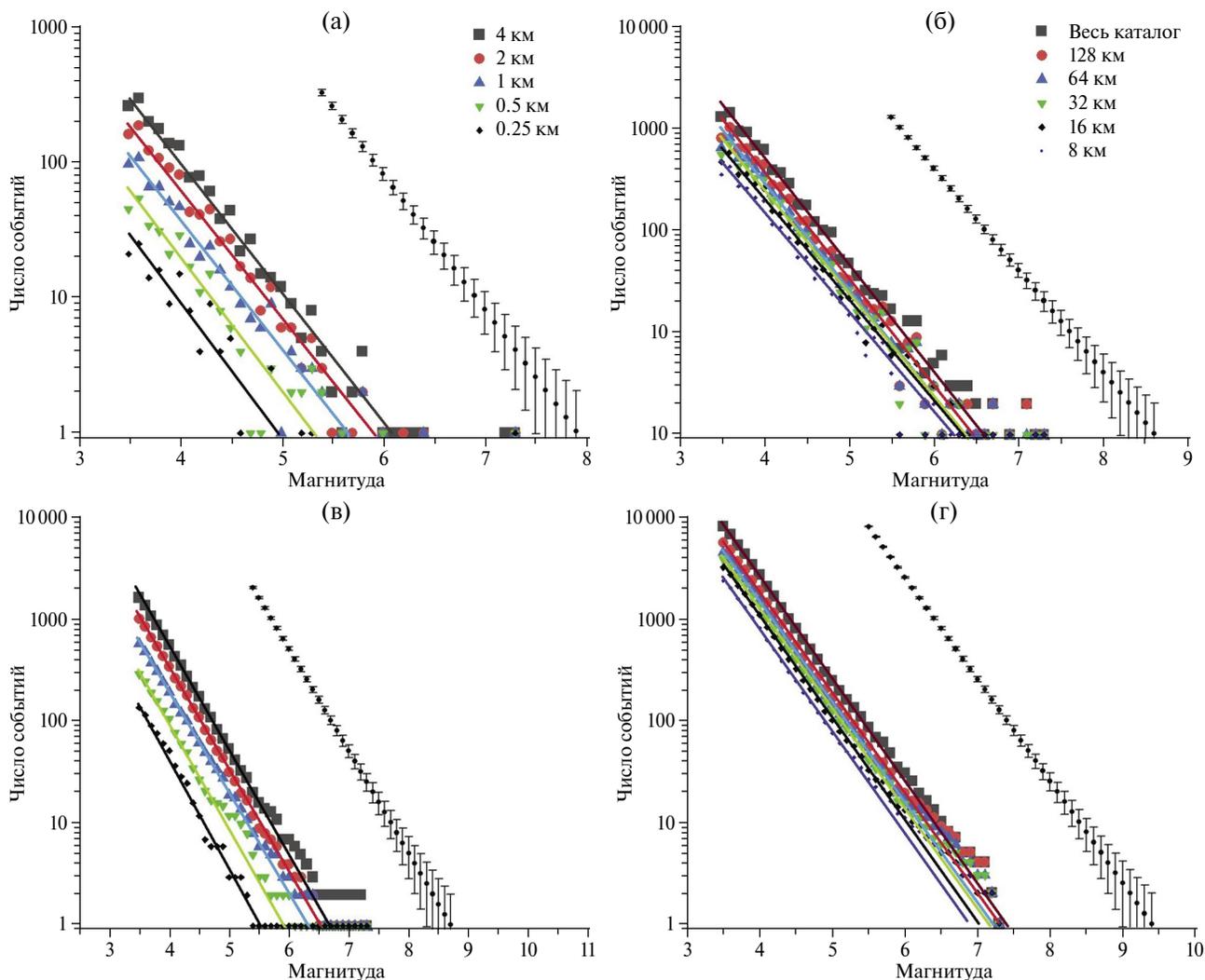


**Рис. 4.** Субвертикальные разломы и землетрясения в Калифорнии в 1979–2023 гг. Линиями обозначены разломы Сан Андреас, Маакама, Хайвард, Барлетт, Калаверас, Элсинор, Лагуна Салада, Сан Хасинто, Империял и Ландерс [Field et al., 2014], кружками – эпицентры землетрясений с  $M \geq 3.5$ . Выделена область объединения полос шириной 128 км с каждой стороны рассматриваемых разломов. Территория ограничена  $31^\circ$ – $40^\circ$  с.ш. и  $125^\circ$ – $114^\circ$  з.д. (показана прямоугольной рамкой). Эпицентры землетрясений с  $3.5 \leq M < 5.5$  внутри заштрихованной области выделены темным цветом.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Главный результат нашего исследования состоит в том, что на фактических данных определены пространственные границы выполнения закона Гутенберга–Рихтера, то есть сохранения прямолинейной формы магнитудно-частотного распределения в логарифмическом масштабе.

Линейный размер рассматриваемой области должен быть, как минимум, в 5 раз больше линейного размера очага сильнейшего в этой области землетрясения. Например, если в каком-то месте известны землетрясения магнитудой 7.5, линейный размер очага которых составляет около 100 км [Wells, Coppersmith, 1994], то для



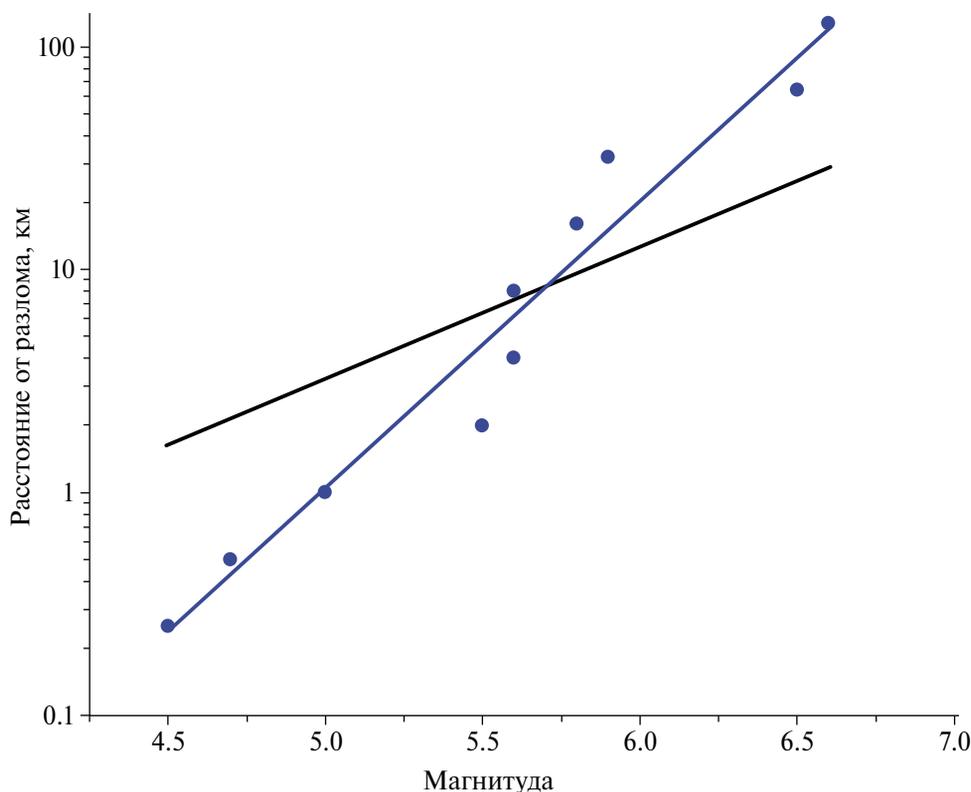
**Рис. 5.** Магнитудно-частотные распределения вблизи субвертикальных разломов Калифорнии: (а), (в) – для землетрясений с эпицентрами на расстояниях до 0.25, 0.5, 1, 2 и 4 км от разломов; (б), (г) – для землетрясений с эпицентрами на расстояниях до 8, 16, 32, 64 и 128 км от разломов и весь каталог в области 31°–40° с.ш., 125°–114° з.д.; (а), (б) – дифференциальное распределение; (в), (г) – интегральное распределение. Разные символы соответствуют разным размерам рассматриваемой области (указаны на легенде; см. текст). Максимальное расстояние  $l = 128$  км – соответствует выделенной цветом области на рис. 4. Справа от основных графиков показаны доверительные интервалы как функция числа событий (см. текст).

корректной оценки повторяемости землетрясений магнитудой 7.5 на основе закона Гутенберга–Рихтера с использованием статистики более слабых землетрясений необходимо рассматривать область размером примерно  $500 \times 500$  км или более. Для магнитуды 8 это уже должна быть область примерно  $1000 \times 1000$  км.

Можно предположить, что наблюдаемые отклонения МЧР от лог-линейного вида вызваны неоднородностью определений или типов магнитуды в разных ее диапазонах. Но мы видим, что в больших пространственных областях (каталог Калифорнии в широких пределах, рис. 5г) закон Гутенберга–Рихтера фактически

выполняется, что говорит об однородности магнитуды или о малом влиянии неоднородности на результаты и выводы.

Магнитуда землетрясений пропорциональна логарифму линейных размеров очага, логарифму энергии, логарифму сейсмического момента землетрясения [Tsuboi, 1956; Kanamori, Anderson, 1975; Wells, Coppersmith, 1994]. Поэтому закон Гутенберга–Рихтера часто интерпретируется как степенное распределение указанных характеристик землетрясений, что часто увязывается с фрактальными свойствами среды, в которой происходят землетрясения [Aki, 1981; King, 1983; Okubo, Aki, 1992; Hirata, 1989].



**Рис. 6.** Зависимость полуширины  $l$  полосы вдоль разломов от значения магнитуды, в которой магнитудно-частотное распределение землетрясений сохраняет прямолинейную форму вплоть до этого значения магнитуды. Точками показаны значения, полученные по алгоритму, описанному в тексте. По точкам проведена линия регрессии  $\lg(l) = 1.3^*M - 6.4$ . Толстой линией показана зависимость линейного размера очага землетрясения от магнитуды по работе [Wells, Coppersmith, 1994].

Очевидно, что если рассматриваемая область сокращается до узкой полосы вдоль какой-либо системы разломов, это “обрезает” фрактальную геометрию среды. При этом фрактальная размерность среды искусственно занижается. Можно привести понятное сравнение с деревом с отрубленными ветвями. Конечно, основной ствол является главной несущей конструкцией дерева, но рост дерева не был бы возможен без фотосинтеза в листьях, растущих, в основном, на мелких ветках. Аналогично, сеймотектонические процессы в сложной системе разломов определяются не только и, возможно, не столько взаимным перемещением бортов крупных разломов. Например, крупные землетрясения в Калифорнии происходят, как правило, не на доминирующем в регионе разломе Сан Андреас, а на его отрогах [Okubo, Aki, 1992]. Яркий пример сильного землетрясения на опереющем разломе — это повторное землетрясение в Турции (Эльбистанское,  $M_w = 7.7$ ), которое произошло через 9 часов после основного землетрясения 06.02.2023 г. (Пазарджыкское,  $M_w = 7.8$ ) [Тихоцкий и др., 2023]. Упругая энергия, накапливаемая в среде

за счет взаимного перемещения литосферных плит и блоков, высвобождается не только на границах плит и крупных блоков, но в гораздо более сложных структурах, которые в целом нельзя характеризовать как линейные. Таким образом, для оценки сейсмической опасности в рамках ВАСО не вполне правомерно отдельно и независимо рассматривать линейные сейсмогенерирующие структуры. Оценка повторяемости сильных землетрясений на отдельных структурах по историческим и палеосейсмологическим данным может оказаться сильно завышенной, поскольку в разные периоды времени более активными могут оказаться разные элементы сложной структуры.

Полученные в данной работе результаты позволяют предположить, что в достаточно больших пространственных объемах повторяемость сильных землетрясений может корректно оцениваться на основе закона Гутенберга–Рихтера, параметры которого определяются по более слабым землетрясениям. Но оценка положения эпицентров будущих сильных землетрясений при этом становится неопределенной.

Определение, в каких именно местах рассматриваемой области их возникновение более вероятно, становится отдельной задачей. Эта задача может решаться как в рамках традиционной ЛДФ-модели, так и в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений [Гвишиани и др., 2020]. В первом случае, при создании синтетического каталога землетрясений необходимо введение региональной нормировки на число событий большой магнитуды, определяемого по региональному МЧР. Во втором случае, когда допустимое пространство возможных эпицентров сильных землетрясений значительно более ограничено, предпочтительным может являться другой подход (см. работу [Shebalin et al., 2024]): время и магнитуда в синтетическом каталоге определяются по региональному МЧР, а местоположение эпицентра сильного землетрясения – в рамках решения задачи распознавания.

Региональные МЧР подчиняются закону Гутенберга–Рихтера до некоторого значения магнитуды  $M_{\max}$ . Пример “загиба” МЧР в области больших магнитуд виден на рис. 5г. Подробный обзор моделей правой части МЧР и статистических методов оценки параметров этих моделей приведен в работе [Pisarenko, Rodkin, 2022]. Такой дефицит числа сильных землетрясений может быть вызван разными причинами, например, асейсмичным сбросом напряжений в результате крипа [Vorobieva et al., 2016]. Для сильнейших землетрясений ( $M \approx 7.7–8$ ) изменение формы МЧР обычно связывают с изменением размерности: очаг у таких больших событий может расти только в длину, так как в ширину есть естественное ограничение шириной зоны сцепления 150–200 км; возможны и другие естественные ограничения допустимых размеров очагов землетрясений [Romanowicz, 1992; Molchan et al., 1997; Ben-Zion, 2008].

Используемые до настоящего времени локальные оценки максимальной возможной магнитуды по размерам сейсмогенерирующих структур, как правило, являются весьма субъективными и, как оказывается, часто ошибочными [Wyss et al., 2012; Шебалин и др., 2022]. Вопрос о преимуществах статистических региональных или морфометрических локальных моделей для оценки максимальной возможной магнитуды остается пока открытым. Любые модели ВАСО в принципе позволяют с помощью метода Монте-Карло оценить, насколько существенное влияние оказывают модели максимальной возможной магнитуды на конечные оценки

сейсмической опасности. Такие исследования, несомненно, целесообразно провести.

Существующие методы ВАСО основаны на предположении стационарности потока сейсмических событий. Из общих соображений очевидно, что чем длиннее период, по которому оцениваются параметры модели сейсмического режима, тем точнее будет прогноз будущей сейсмической опасности. Инструментальные данные о землетрясениях начинаются фактически с XX столетия, но лишь с 80-х годов они становятся достаточно подробными для локальных оценок сейсмического режима. Но и эти данные, охватывающие период около 50 лет, за редким исключением [Ekström et al., 2012], не являются однородными по магнитуде из-за использования разных подходов и разных инструментальных данных для ее определения. Это значительно влияет на оценки параметров сейсмического режима и ограничивает возможности по изучению временных вариаций сейсмического режима. В последние годы проводится большая работа по построению каталогов с магнитудой, приведенной к единой шкале [Di Giacomo et al., 2015; Gvishiani et al., 2022], благодаря которой становятся возможными оценки параметров сейсмического режима в отдельных регионах на интервале  $\sim 50$  лет. Стационарная модель является лишь грубым приближением, поэтому оценки ВАСО, формально рассчитанные на сотни и тысячи лет, в реальности могут предсказывать будущую сейсмическую опасность на более короткий срок. Обычно считается, что прогноз верен примерно на период в 50 лет [Gerstebserger et al., 2020]. Пока это является единственным ограничением по времени применимости закона Гутенберга–Рихтера для целей оценки сейсмической опасности.

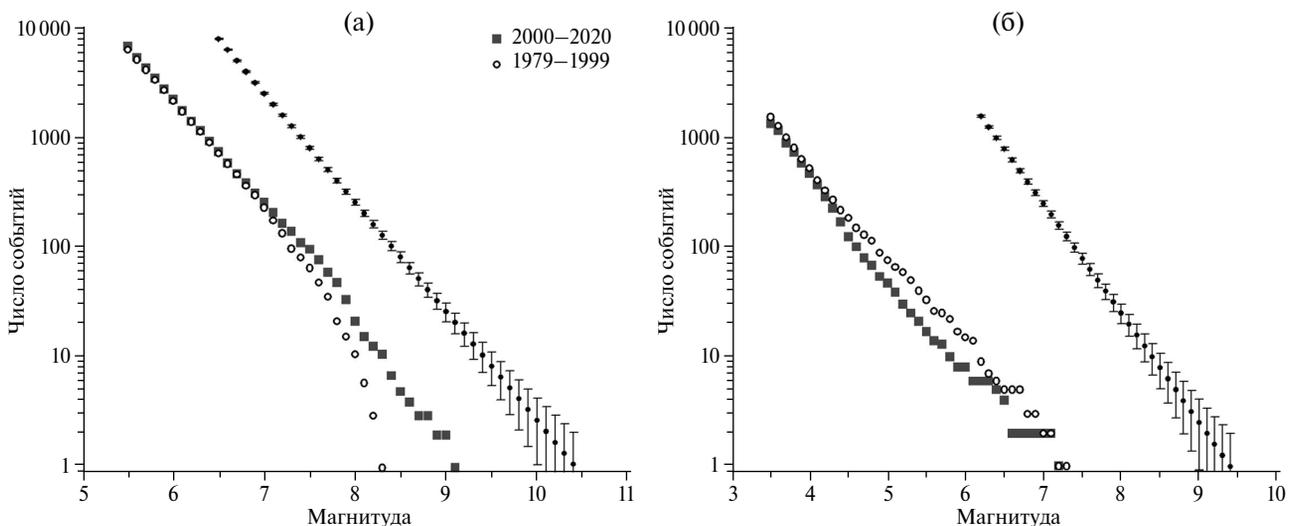
Гипотеза стационарности всегда приводит к предположению, что если сильное землетрясение когда-то произошло в конкретном месте, то землетрясение такой же силы может там повториться в будущем. В результате карты ОСР в новых версиях “краснеют”. Например, на карте ОСР-2015 появились новые обширные “розовые” 8-балльные зоны после Олюторского 21.04.2006 г.,  $M = 7.6$ , в Корякии и Илин-Тасского землетрясений 14.02.2013 г.,  $M = 6.7$ , на севере Якутии [Shebalin et al., 2024]. Но в реальности из-за значительного снятия напряжений как раз в таких местах в течение долгого времени сильные землетрясения не происходят. Возникает вопрос: можно ли по МЧР на основе закона Гутенберга–Рихтера отследить изменение вероятности возникновения сильных землетрясений?

Иными словами, каковы временные границы выполнения закона Гутенберга–Рихтера? Рассматривая МЧР в расширяющихся пространственных областях, мы задались вопросом, а в каких пределах МЧР сохраняет прямолинейный вид при уменьшении рассматриваемого интервала времени? Чтобы использовать максимально однородные данные по магнитуде за большой интервал времени, мы рассмотрели два случая: землетрясения мира по каталогу GCMТ [Ekström et al., 2012] и землетрясения Калифорнии по каталогу ANSS [Advanced..., 2023]. МЧР землетрясений Калифорнии за весь период 1979–2023 гг. в пределах прямоугольной области на рис. 4 показан на рис. 5б, 5г (квадраты). Мы разделили этот период на два отрезка по 2021 г.: 1979–1999 гг. и 2000–2020 гг. Для землетрясений мира были рассмотрены те же два интервала. Афтершоки землетрясений были исключены по методу Заляпина [Zaliapin et al., 2013] с параметрами, определенными по методике работы [Shebalin et al., 2020]. Результаты, представленные на рис. 7, оказались неожиданными. МЧР в обоих случаях очень мало изменились от периода к периоду в области малых магнитуд, тогда как изменения в области больших магнитуд весьма значительны. Для землетрясений мира использовалась магнитуда  $M_w$ , пересчитываемая из скалярного сейсмического момента, который определяется по стандартной методике с 1976 г. [Ekström et al., 2012]. Чтобы убедиться в том, что результаты по Калифорнии не являются следствием неоднородной магнитуды, мы построили МЧР для той же области и тех же интервалов по каталогу GCMТ. Представительной магнитудой

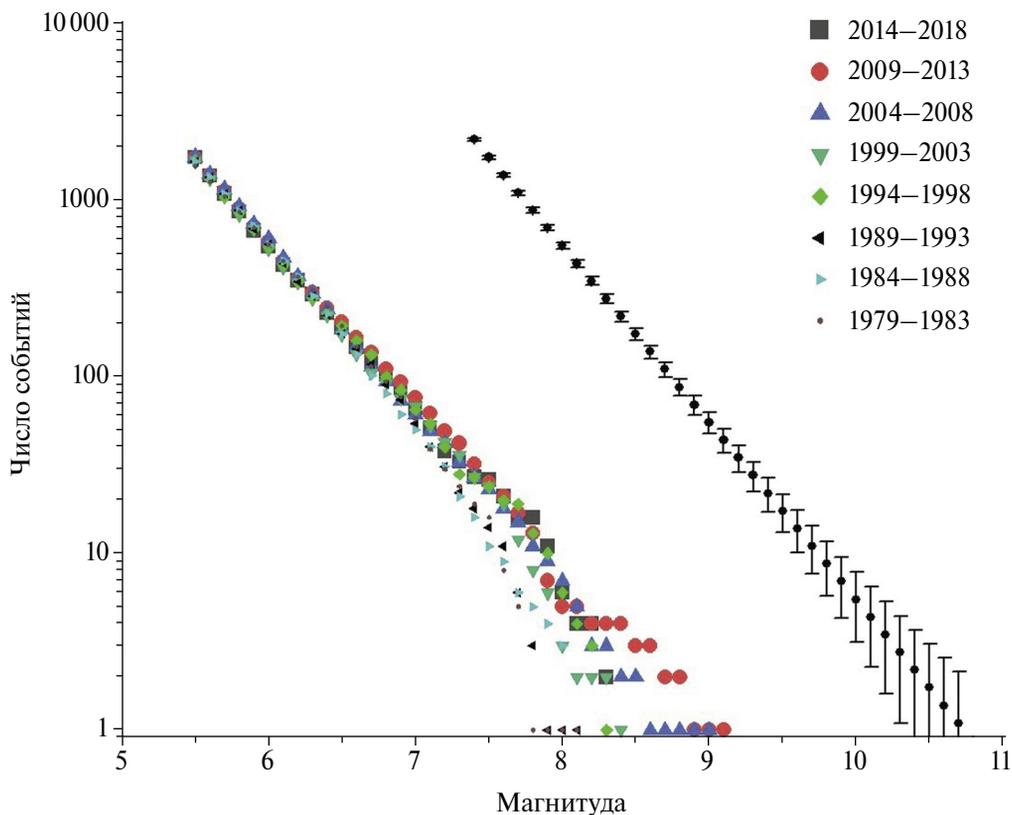
в каталоге за весь период является  $M_c = 5.5$ . Мы убедились, что МЧР при  $M_w > 5.5$  близко совпадает с МЧР по каталогу ANSS.

Таким образом, прямолинейное в широком диапазоне МЧР на интервале 45 лет для Калифорнии на более коротких интервалах теряет это свойство. Наибольшие отличия в числе событий на разных 21-летних интервалах наблюдается в интервале магнитуд 5–6. Отличия МЧР для землетрясений мира еще контрастнее: при  $M > 8.3$  число событий различается, как минимум, на порядок.

Интересно отметить, что линейная форма МЧР на рис. 7 (и мир в целом, и Калифорния) и рис. 5г (все землетрясения Калифорнии) сохраняется при числе землетрясений, большем примерно 200. Пороговые значения магнитуды при этом различны. Это свойство нельзя приписать естественному статистическому увеличению разброса значений при малом числе событий, различия МЧР значимы. Если предположить, что это свойство универсально (это, конечно, требует тщательной проверки; на рис. 8 мы приводим еще одно подтверждение), то оно означает, что вариации частоты землетрясений каждой магнитуды усредняются на интервалах времени, на которых, в соответствии с законом Гутенберга–Рихтера, должно реализоваться примерно 200 землетрясений этой и более высокой магнитуды. Например (см. рис. 7а), МЧР землетрясений мира должно бы было сохранять прямолинейную форму вплоть до значения  $M = 8$ , если бы график строился по однородным данным за 200 лет.



**Рис. 7.** Интегральные магнитудно-частотные распределения землетрясений мира по каталогу GCMТ (а) и Калифорнии по каталогу ANSS (б) за два периода: 1979–1999 гг. (кружки) и 2000–2020 гг. (квадраты). Точками с полосомами ошибок обозначены усредненные МЧР и доверительные интервалы (см. текст).



**Рис. 8.** Интегральные магнитудно-частотные распределения землетрясений мира по каталогу GCMT за 8 периодов по 5 лет. Точками с полосами ошибок обозначены усредненные МЧР и доверительные интервалы (см. текст). МЧР примерно совпадают при  $M < 6.5$ ; число событий  $M \geq 6.5$  для всех интервалов составляет примерно 200.

Для Калифорнии (см. рис. 5г и рис. 7б) по данным за 200 лет линейные свойства МЧР сохранялись бы до значения  $M \approx 6$ , а средняя повторяемость землетрясений с  $M \geq 7$  справедлива для интервалов 2000 лет. Можно предположить, что даже для небольших областей прямолинейная форма МЧР сохраняется в широком диапазоне магнитуды, если увеличить время наблюдений. Но тогда по “правилу 200 событий” рассматриваемый интервал должен охватить время в 200 раз большее, чем средний период повторяемости сильных землетрясений в этой области, составляющий обычно не менее 100 лет.

Полученные оценки означают, что по данным о сейсмическом режиме точно оценить вероятность сильных землетрясений на относительно коротких интервалах ( $\sim 50$  лет) невозможно. Для этого необходимо привлечение дополнительных данных и построение зависящих от времени оценок сейсмической опасности. Например, можно привлекать результаты среднесрочного прогноза землетрясений. Методика построения зависящих от времени моделей сейсмического режима с использованием текущих

среднесрочных прогнозов землетрясений и статистики успехов и неудач этого метода разработана в работах [Shebalin et al., 2012; 2014].

В заключение еще раз повторим основной вывод данной работы. При оценке параметров закона Гутенберга–Рихтера линейный размер рассматриваемой области должен быть как минимум в 5 раз больше линейного размера очага сильнейшего в этой области землетрясения. Это накладывает серьезные ограничения на проведение локальных оценок параметров. Второй вывод, пока предварительный, состоит в том, что повторяемость сильнейших землетрясений в разных пространственных объемах варьирует по времени значительно сильнее, чем в рамках естественного статистического разброса, и чем меньше объем, тем выше неопределенность. Это делает практически любые локальные оценки повторяемости сильнейших землетрясений крайне ненадежными. Вариации интенсивности потока сейсмических событий тем больше, чем больше их магнитуда.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 20-17-00180-П).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзобоев Б.А.* Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // *Физика Земли*. 2020. № 1. С. 5–29. DOI: 10.31857/S0002333720010044
- Голицын Г.С.* Место закона Гутенберга–Рихтера среди других статистических законов природы. Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. М.: ГЕОС. 2001. (Вычислительная сейсмология; Вып. 32). С. 138–161.
- Ризниченко Ю.В.* От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1965. № 11. С. 1–12.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука. 1991. 96 с.
- Тихоцкий С.А., Татевосян Р.Э., Ребецкий Ю.Л., Овсяченко А.Н., Ларьков А.С.* Караманмарашские землетрясения 2023 г. в Турции: сейсмическое движение по сопряженным разломам // *Докл. РАН. Науки о Земле*. 2023. Т. 511. № 2. С. 228–235.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ. 1999. 57 с.
- Федотов С.А.* Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии. Сейсмическое микрорайонирование. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 10. Труды ИФЗ АН СССР. № 36 (203). М.: Наука. 1965. С. 66–93.
- Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Скоркина А.А.* Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // *Докл. РАН. Науки о Земле*. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97.
- Advanced National Seismic System (ANSS) Comprehensive Catalog of Earthquake Events and Products. U.S. Geological Survey, Earthquake Hazards Program. 2023. DOI:10.5066/F7MS3QZH (Accessed November 19, 2023).
- Aki K.* A probabilistic synthesis of precursory phenomena. *Earthquake Prediction: An International Review* / D.W. Simpson, P.G. Richards (eds.). 1981. V. 4. P. 566–574.
- Bender B.* Maximum likelihood estimation of  $b$ -values for magnitude grouped data // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1983. V. 73. P. 831–851.
- Ben-Zion Y.* Collective behavior of earthquakes and faults: Continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes and different dynamic regimes // *Rev. Geophys.* 2008. DOI: 10.1029/2008RG000260
- Cornell C.A.* Engineering seismic risk analysis // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1968. V. 58. Is. 5. P. 1583–1606.
- Field E.H., Arrowsmith R.J., Biasi G.P., Bird P., Dawson T.E., Felzer K.R., Jackson D.D., Johnson K.M., Jordan T.H., Madden C., Michael A.J., Milner K.R., Page M., Parsons T., Powers P.M., Shaw B.E., Thatcher W.R., Weldon R.J., Zeng Y.* Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 3 (UCERF3)—The Time-Independent Model // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2014. V. 104. № 3. P. 1122–1180. DOI:10.1785/0120130164
- Geller R.J., Mulargia, F. Stark P.B.* Why We Need a New Paradigm of Earthquake Occurrence. Subduction Dynamics: From Mantle Flow to Mega Disasters / G. Morra, D.A. Yuen, S.D. King, S.-M. Lee, S. Stein (eds.). 2015. P. 183–191. DOI:10.1002/9781118888865.ch10
- Gerstenberger M.C., Marzocchi W., Allen T., Pagani M., Adams J., Danciu L. et al.* Probabilistic seismic hazard analysis at regional and national scales: State of the art and future challenges // *Reviews of Geophysics*. 2020. V. 58. e2019RG000653. DOI:10.1029/2019RG000653
- Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N., Dzoboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A.* Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic // *Appl. Sci.* 2022. V. 12. P. 5010. DOI:10.3390/app12105010
- Di Giacomo D., Bondár I., Storchak D.A., Engdahl E.R., Bormann P., Harris J.* ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), III. Re-computed MS and mb, proxy MW, final magnitude composition and completeness assessment // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2015. V. 239. P. 33–47.
- Ekström G., Nettles M., Dziewoński A.M.* The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2012. V. 200–201. P. 1–9. DOI:10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Hirata T.* A correlation between the  $b$ -value and the fractal dimension of earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94B. P. 7507–7514.
- Howell B.F. Jr.* On the effect of too small a data base on earthquake frequency diagrams // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1985. V. 75. P. 1205–1207.
- Ishibe T. and Shimazaki K.* Characteristic Earthquake Model and Seismicity around Late Quaternary Active Faults in Japan // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2012. V. 102. No. 3. P. 1041–1058. DOI:10.1785/0120100250
- Kagan Y.Y., Jackson D.D., Geller R.J.* Characteristic Earthquake Model, 1884–2011, R.I.P. // *Seismological Research Letters*. 2012. V. 83. № 6. P. 951–953. DOI:10.1785/0220120107
- Kanamori H., Anderson D.* Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1975. V. 65. № 5. P. 1073–1095.
- King G.* The accommodation of large strains in the upper lithosphere of the earth and other solids by self-similar fault systems: the geometrical origin of  $b$ -value // *Pure Appl. Geophys.* 1983. V. 121. P. 761–815.

- Mogi K.* Some features of recent seismic activity in and near Japan // *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo.* 1968. V. 46. P. 1225–1236.
- Molchan G., Kronrod T., Panza G.* Multi-scale seismicity model for seismic risk // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1997. V. 87. № 5. P. 1220–1229. DOI:10.1785/BSSA0870051220
- Mulargia F., Gasperini P.* Evaluation of the applicability of the time-and slip-predictable earthquake recurrence models to Italian seismicity // *Geophys. J. Int.* 1995. V. 120. P. 453–473.
- Okubo P.G., Aki K.* Fractal geometry in the San Andreas fault system // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 92. P. 345–355.
- Page M.T., Felzer T.* Southern San Andreas fault seismicity is consistent with the Gutenberg–Richter magnitude–frequency distribution // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2015. V. 105. № 4. P. 2070–2080. DOI:10.1785/0120140340
- Pisarenko V.F., Rodkin M.V.* Approaches to Solving the Maximum Possible Earthquake Magnitude ( $M_{\max}$ ) Problem // *Surveys in Geophysics.* 2022. V. 43. № 2. P. 561–595. DOI: 10.1007/s10712-021-09673-1
- Romanowicz B.* Strike-slip earthquakes on quasi-vertical transcurrent faults: inferences for general scaling relations // *Geophysical Research Letters.* 1992. V. 19. P. 481–484. DOI: 10.1029/92GL00265
- Scholz C.H.* Evidence for a strong San Andreas fault // *Geology.* 2000. V. 28. P. 163–166.
- Schwartz D.P., Coppersmith K.J.* Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. *Journal of Geophysical Research.* 1984. V. 89(B7). P. 5681–5698.
- Shebalin P.N., Baranov S.V., Vorobieva I.A. et al.* Seismicity Modeling in Tasks of Seismic Hazard Assessment // *Dokl. Earth Sc.* 2024. DOI: 10.1134/S1028334X23603115
- Shebalin P., Narteau C.* Depth dependent stress revealed by aftershocks // *Nature Communications.* 2017. V. 8. № 1. P. 1317.
- Shebalin P., Narteau C., Holschneider M.* From alarm-based to rate-based earthquake forecast models // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2012. V. 102. № 1. P. 64–72.
- Shebalin P.N., Narteau C., Zechar J.D., Holschneider M.* Combining earthquake forecasts using differential probability gains // *Earth, Planets and Space.* 2014. V. 66. № 1. P. 35.
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake productivity law // *Geophysical Journal International.* 2020. V. 222. Is. 2. P. 1264–1269. DOI: 10.1093/gji/ggaa252
- Shebalin P., Baranov S., Vorobieva I.* Earthquake Productivity Law in a Wide Magnitude Range // *Frontiers in Earth Science.* 2022. V. 10. P. 881425. DOI: 10.3389/feart.2022.881425
- The Seismological Bulletin of Japan. Japan Meteorological Agency. 2023. [https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index\\_e.html](https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index_e.html) (Accessed 10 January 2023).
- Stein S., Geller R.J., Liu M.* Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it // *Tectonophysics.* 2012. V. 562–563. P. 1–25. DOI:10.1016/j.tecto.2012.06.047
- Stirling M.W., Zuniga F.R.* Shape of the magnitude–frequency distribution for the Canterbury earthquake sequence from integration of seismological and geological data // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2017. V. 107. № 1. P. 495–500. DOI:10.1785/0120160246
- Sykes L.R.* Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 8021–8041.
- Tsuboi C.* Earthquake Energy, Earthquake Volume, Aftershock Area, and Strength of the Earth's Crust // *Journal of Physics of the Earth.* 1956. V. 4. P. 63–66.
- Turcotte D.L.* *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics.* 2. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1997. 386 p.
- Ulomov V.I.* Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica.* 1999. V. 42. Is. 6. P. 1023–1038.
- Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C.* Break of slope in earthquake size distribution and creep rate along the San Andreas Fault system // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. № 13. P. 6869–6875. DOI:10.1002/2016GL069636
- Vorobieva I., Narteau C., Shebalin P., Beauce F., Necessian A., Clouard V., Bouin M.P.* Multiscale Mapping of Completeness Magnitude of Earthquake Catalogs // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2013. V. 103. P. 2188–2202. DOI: 10.1785/0120120132
- Wells D.L., Coppersmith K.J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994. V. 84.4. P. 974–1002.
- Wesnousky S.G.* Crustal deformation processes and the stability of the Gutenberg–Richter relationship // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 1999. V. 89. № 4. P. 1131–1137.
- Wyss M., Nekrasova A., Kossobokov V.* Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates // *Natural Hazards.* 2012. V. 62. Is. 3. P. 927–935.
- Zaliapin I., Ben-Zion Y.* Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2013. V. 118. P. 2847–2864. DOI:10.1002/jgrb.50179
- Zoback M.D., Zoback M.L., Eaton J.P., Mount V.S., Suppe J., Healy J.H., Oppenheimer D., Reasenber P., Jones L., Raleigh C.B., Wong I.G., Scotti O., Wentworth C.* New evidence on the state of stress of the San Andreas fault system // *Science.* 1987. V. 238. P. 1105–1111.
- Zoback M., Hickman S., Ellsworth W., SAFOD Science Team.* Scientific drilling into the San Andreas fault zone—an overview of SAFOD's first five years // *Scientific Drilling.* 2011. V. 11. P. 14–28.

## The Limits of Applicability of the Gutenberg–Richter Law in the Problems of Seismic Hazard and Risk Assessment

K. V. Krushelnitskii<sup>a, \*</sup>, P. N. Shebalin<sup>a, b</sup>, I. A. Vorobieva<sup>a, b</sup>,  
O. V. Selyutskaya<sup>a</sup>, and A. O. Antipova<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

<sup>b</sup>*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia*

\*e-mail: kirillkrush@mail.ru

Received March 22, 2024

revised April 15, 2024

accepted April 27, 2024

**Abstract** – The Gutenberg–Richter law establishes a log-linear relationship between the number of earthquakes that have occurred within some spatiotemporal volume and their magnitude. This similarity property presumably reflects fractal structure of the fault system in which earthquake sources are formed. The Gutenberg–Richter law plays a key role in the problems of seismic hazard and risk assessment. Using the Gutenberg–Richter relationship, we can estimate the average recurrence period of strong earthquakes from the recurrence rate of weaker earthquakes. Since the strongest earthquakes occur infrequently, with intervals of a few hundred years or more, it is not possible to directly assess their recurrence. From indirect geologic and paleoseismic estimates it often seems that strong earthquakes on individual faults occur more frequently than expected in accordance with the Gutenberg–Richter law. Such estimates underlie the hypothesis of the so called characteristic earthquakes. This hypothesis is in many cases additionally supported by the form of the magnitude–frequency distributions for individual faults, constructed from the data of modern earthquake catalogs. At the same time, an important factor affecting the form of the magnitude–frequency distribution is the choice of the spatial domain in which the distribution is constructed. This paper investigates the influence of this factor and determines the conditions under which the Gutenberg–Richter law is applicable for estimating the recurrence of strong earthquakes.

*Keywords:* Gutenberg–Richter law, log-linear relation, hypothesis of characteristic earthquakes