

ПОВТОРЯЕМОСТЬ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ В ШКАЛЕ МОМЕНТНЫХ МАГНИТУД

© 2004 г. А. А. Гусев¹, Л. С. Шумилина²

¹Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

²Институт физики Земли им. Г.А. Гамбурцева РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 14.10.2002 г.

Составлен каталог моментных магнитуд M_W сильнейших землетрясений Камчатки за 1737–2000 гг. Для исторических землетрясений использованы макросейсмические данные и данные о цунами; для XX века M_W оценена через другие магнитуды с использованием нелинейных межмагнитудных связей либо определена непосредственно через M_0 . Построены графики повторяемости землетрясений в шкале M_W для периодов времени 1923–1952, 1952–1962 и 1963–1988 гг. Оценки среднегодового числа n_6 толчков с $M_W \geq M_{W0} = 6.0$ по разным периодам заметно различаются. Связь $\lg n_M(M_W)$ приблизительно линейна в области $M_W = 5.5–7$ с коэффициентом наклона графика $b = 0.95–1.1$. По данным о n_6 и b выполнен ряд вариантов “прогноза” повторяемости сильнейших ($M_W = 9$) землетрясений на основе гипотезы линейности графика повторяемости. Сопоставление таких “прогнозов” с фактическими данными за 264 года показывает, что наблюдаемая повторяемость заметно (до пяти раз) превышает любой из вариантов ее “прогноза” путем линейной экстраполяции графика повторяемости, полученного по данным диапазона $M_W = 5.5–7$. Таким образом, гипотеза линейности графика повторяемости неверна для наших данных, а повторяемость толчков средней силы заметно флуктуирует во времени. Отклонение графика повторяемости от линейного имеет характер, соответствующий модели характеристического землетрясения. Методические выводы следующие: эмпирические оценки повторяемости событий средней магнитуды по разным периодам времени могут заметно различаться; использование гипотезы линейности графика повторяемости имеет тенденцию существенно недооценивать повторяемость сильнейших толчков.

Ключевые слова: сейсмичность, каталог землетрясений, магнитуда, моментная магнитуда, график повторяемости.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки долговременного среднего уровня сейсмичности – одна из ключевых при изучении сейсмоопасности. Эта проблема имеет два аспекта: оценка повторяемости для того магнитудного уровня, который обеспечен наблюдениями, и экстраполяция наблюденной повторяемости на предельно большие магнитуды. Несмотря на многолетние исследования, эта проблема еще далека от полного решения. Основные трудности здесь следующие:

1. Существуют долговременные колебания уровня сейсмичности, обусловленного сильнейшими землетрясениями, что ставит вопрос – насколько осмыслена сама постановка задачи об оценке долговременных средних.

2. Происходят флуктуации уровня сейсмичности, определяемые толчками средней силы. В частности, хорошо известны трудности, связанные с периодами афтершоков сильных землетрясений. Более серьезные затруднения порождаются флуктуациями “фоновой” или “основной” сейсмичности; они слабо изучены.

3. Нередко имеет место отсутствие сквозной магнитудной классификации сильных и слабых землетрясений, а также различие магнитудных шкал для разных периодов времени. Для исторических землетрясений получить сколько-нибудь надежные оценки магнитуды особенно затруднительно.

4. Нет соответствия реальной сейсмичности закону Гутенберга–Рихтера (отсутствует “линейность графика повторяемости” в широком диапазоне магнитуд).

Шкала моментных магнитуд M_W дает хорошую основу для унификации оценок мощности очага, имеющих для разных периодов времени, разных магнитудных интервалов и полученных по разным шкалам. Основой такой унификации могут стать предварительно установленные мировые и региональные межмагнитудные связи. Такие связи установил А.А. Гусев [Гусев, Мельникова, 1990], что позволило изучить обсуждаемые вопросы для сейсмичности Камчатки. Работа выполнялась в три этапа. Сначала мы составили каталог сильнейших землетрясений Камчатки в шкале M_W . Затем провели оценки повторяемости землетрясений средней силы в той же шкале за

разные периоды инструментальных наблюдений и разными путями. Наконец, все эти данные проанализировали совместно.

**КАТАЛОГ СИЛЬНЕЙШИХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ШКАЛЕ M_W**

Для инструментального периода наблюдений за землетрясениями 1899–1990 гг. есть возможность оценить M_W камчатских землетрясений несколькими способами. Перечислим их в порядке степени доверия.

1. Шкала сейсмического момента M_0 , непосредственно связанного с M_W формулой [Hanks, Kanamori, 1979]

$$M_W = (2/3) \lg M_0 \text{ [дин.см]} - 10.7$$

С 1976 г. существует авторитетный мировой каталог значений M_0 Гарвардского университета [http://www.seismology.harvard.edu]. За более ранний период сейсмический момент определен вполне надежно лишь для события 1952 г. и довольно уверенно также для событий 1923, 1959 и 1971 гг. (24 ноября и 15 декабря) [Purcaru, Berckhemer, 1982; Зобин и др., 1988; Okal, 1992 I; II].

2. Шкала магнитуды M_I – по высоте цунами в дальней зоне (практически – на Гавайских о-вах) [Abe, 1979]. Эта шкала откалибрована по шкале M_0 , так что в идеале $M_I = M_0$. Шкала M_I оказалась весьма надежной для оценки M_0 и M_W для мелкофокусных надвигов зоны субдукции.

3. Шкала магнитуды по поверхностным волнам M_S . Связь между M_S и M_0 корреляционная и относительно менее надежная, чем для M_I . При работе с M_S следует учитывать следующие факты:

а) Абе [Abe, 1981; 1984] и Абе и Ногучи [Abe, Noguchi, 1983a; b] опубликовали оригинальные оценки M_S и $m_B (=m_{PV}, \text{ по } P\text{-волнам на среднепериодных приборах})$ из рабочих материалов Гутенберга. Они также исправили систематически завышенные Гутенбергом значения M_S и m_B за 1898–1912 гг. (причина завышения в том, что Гутенберг не учел резонансного характера передаточной функции приборов той эпохи). В результате получен набор значений M_S и m_B , заметно меняющий относительный “вес” разных событий XVIII–XX веков на Камчатке (и в мире). С появлением этих данных магнитуды в публикациях [Gutenberg, Richter, 1954] и [Duda, 1965] следует считать устаревшими. Обозначим значения M_S по Гутенбергу–Абе через M_S^{GR} .

б) Магнитуды M_S (по 20-секундным поверхностным волнам), публикуемые сейсмологическими службами США [Earthquake..., 1973–1988] (далее обозначается M_S^{US}), не эквивалентны магнитудам по Гутенбергу–Абе из-за различия применяемых формул для расчета M_S [Abe, 1981; 1984]. Следует

Таблица 1. Соотношение магнитуд M_S^{US} и M_{LH}

| | | | | | |
|------------|-----|------|-----|-----|-----|
| M_{LH} | 4.5 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 8.5 |
| M_S^{US} | 4.4 | 5.35 | 6.2 | 7.3 | 8.5 |

исходить из следующей связи между M_S^{GR} и M_S^{US} [Abe, 1981; 1984]: $M_S^{US} = M_S^{GR} + 0.18$.

в) Магнитуду M_{LH} (M_{LV}) по поверхностным волнам по данным ЕССН СССР (Обнинск) в среднем по земному шару можно считать эквивалентной M_S^{US} (причем M_{LH} также расходится с M_S^{GR} примерно на 0.18). Однако для конкретного района Курило-Камчатской зоны (и Японии) это не так [Гусев, Мельникова, 1990]: M_{LH} и M_S^{US} различаются, причем это различие меняется с магнитудой (табл. 1). Яркие примеры такого различия – камчатские события 22 ноября 1969 г. ($M_S^{US} = 7.3$ и $M_{LH} = 7.7$) и 28 декабря 1984 г. ($M_S^{US} = 7.0$ и $M_{LH} = 7.5$).

г) Магнитуды M_{ATL} “Атласа землетрясений в СССР” [1962] можно считать однотипными с M_{LH} ; но их численные значения ниже M_{LH} на 0.2–0.25.

д) При составлении “Нового каталога...” [1977] (далее НК), насколько можно судить по фактическим цифрам, соответствующие магнитуды $M_{НК}$ для землетрясений 1899–1953 гг. опирались на данные из [Gutenberg, Richter, 1954; Duda, 1965], а для землетрясений 1953–1973 гг. – на M_{LH} . В силу пунктов а), б) и в) это означает отсутствие единства в определениях магнитуд (до 1954 г. магнитуды “тяжелее”, а до 1912 г. вообще искажены). Кроме того, нельзя забывать, что, согласно Абе [Abe, 1984], для глубин 40–60 км Гутенберг использовал в своем каталоге не M_S , а m_B (как и для больших глубин). Все это никак не позволяет рассматривать данные НК как окончательные.

С учетом описанных фактов, мы старались привести все магнитуды по поверхностным волнам к M_S^{GR} , а далее оценивали M_W по M_S^{GR} на основе нелинейного корреляционного соотношения между ними из [Гусев, Мельникова, 1990].

4. Шкала m_B (m_{PV}) по среднепериодным P -волнам, с учетом поправок согласно пункта 3а, – важнейший источник оценок M_W для толчков на глубинах более 70 км до 1977 г. Можно думать, что такие оценки более надежны, чем приводимые в НК оценки M_{LH}^* , полученные из M_{LH} с поправкой за глубину, так как индивидуальный разброс этой последней поправки велик. Оценку M_W по m_B вели на основе нелинейного корреляционного соотношения из [Гусев, Мельникова, 1990].

Для доинструментального периода 1737–1896 гг. определение M_W является тяжелой проблемой, и предлагаемые решения в ряде случаев имеют гадательный характер. Оценки магнитуд в НК базировались в ряде случаев на длительности периода ощутимых афтершоков. Мы старались не опираться на этот род данных, так как в условиях Камчатки надежность такого подхода сомнительна. Известно, что события 4 октября 1952 г., 15 декабря 1971 г. и 17 августа 1983 г. вызвали мощные афтершоковые серии, в то время как у сопоставимых по параметрам (магнитуды, глубины) событий, соответственно, 3 февраля 1923 г., 4 мая 1959 г. и 24 ноября 1971 г. афтершоков было гораздо меньше. В нашем анализе мы учитывали магнитуды НК, но данные пересматривали заново на основе макросейсмического каталога Кириллова [1962] и каталога цунами [Каталог..., 1987]. Материалы анализа в случаях, заслуживавших комментария, сведены в табл. 2.

Результаты определений M_W сведены в табл. 3. Дадим к ней пояснения. Мы надеемся, что каталог полон для $M_W \geq 7.5$ с 1899 г. Каталог относится к площади, ограниченной по широте 50.0° – 59.9° с.ш., по долготе 153.0° – 169.9° в.д. Увеличение региона “Камчатка” по отношению к району в НК связано с положением очага землетрясения 1952 г. (вероятно, также 1737 г.): он “выходит” за условные границы региона Камчатки. Индекс R – каталог Роте [Rothe, 1969]. Индекс d – магнитуда по длительности в НК. Для периода 1898–1912 гг. она может давать завышенные оценки магнитуды по тем же причинам, что и в случае M_S . Значения M_S^{GR} – по Гутенбергу–Абе. Пропуск M_S^{GR} – нет события в каталоге Абе; это значит, что M_S^{GR} (или m_B) равна 6.8 или менее. Столбцы 10–13 – определения M_W по корреляционным соотношениям с магнитудой, указанной в скобках. $M_W(M_0)$ (столбец 14) – определения из каталога Гарвардского университета [<http://www.seismology.harvard.edu>]. M_W в последнем столбце – наша окончательная оценка.

ОЦЕНКИ ПОВТОРЯЕМОСТИ ТОЛЧКОВ СРЕДНЕЙ СИЛЫ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ПОВТОРЯЕМОСТИ НА БОЛЬШИЕ МАГНИТУДЫ

Данные о сильнейших ($M \geq 7.5$) землетрясениях Камчатки за последние 100–105 лет можно считать полными, но этот период заведомо недостаточен для надежных оценок повторяемости таких землетрясений. Более надежны оценки повторяемости для магнитуд 6–7. Однако допустимость экстраполяции таких оценок в область наибольших магнитуд представляет особую проблему, которую мы надеемся далее прояснить. Данные 1737–1898 гг. не только неинструментальные, они к тому же заведомо неполны. Осо-

бенно много пропусков должно быть в период 1855–1898 гг. после перевода базы русского флота на Тихом океане из г. Петропавловска-Камчатского в Приморье и закрытия там военного порта. В самом деле, за 1855–1900 гг. (45 лет) в НК упомянуто 3 толчка, в то время как за 1810–1855 гг. – 11, за 1765–1810 гг. – 8, за 1720–1764 гг. – 8 толчков. Таким образом, оценки повторяемости за период 1737–1898 гг. заведомо занижены, и лишь для самых сильных толчков типа 17 октября 1737 г. есть некоторая надежда на полноту данных.

Начнем с анализа данных XX века. Это массовые инструментальные данные (рассматривается область в пределах 50.0° – 60.0° с.ш., 156.0° – 165.9° в.д., глубины $H = 0$ – 69 км). Их обработка и анализ по каждому из шести использованных источников проведены по единой схеме, следующим образом:

1. Зафиксирован определенный период времени, в течение которого не было резких, очевидных изменений средней повторяемости землетрясений.

2. Выбран конкретный вид магнитуды, наиболее приемлемый для пересчета в M_W , и выполнен пересчет на основе корреляционных соотношений [Гусев, Мельникова, 1990].

3. Построен кумулятивный график повторяемости землетрясений в шкале M_W , в диапазоне $M_W = 5.5$ – 7 или близком к нему, и получена оценка его параметров: годовой повторяемости n_6 событий с $M_W \geq 6$ и наклона b .

4. По n_6 и b линейной экстраполяцией определена годовая повторяемость событий с $M_W \geq 9(n_9)$. Эта “прогнозная” оценка числа событий предельных магнитуд сопоставлена с наблюдаемым числом событий за 1737–2000 гг.

Все полученные численные оценки приведены в табл. 4.

Рассмотрим изученные каталоги последовательно.

1. В каталоге “Курило-Камчатские землетрясения. Данные наблюдений 1911–1952 гг.” [Викулин, Ким, 1983а, далее используем сокращение ККЗ], по мнению авторов, с 1923 г. полные толчки с $M > 5.5$. Магнитуды ККЗ (M_{OK}) привязаны к НК, поэтому сделанное выше замечание о вероятной неоднородности магнитудных оценок в НК здесь существенно.

По этому каталогу рассмотрен период 1923–3 ноября 1952 гг. (исключен ноябрь–декабрь 1952 г. – событие 4 ноября 1952 г. и начало его роя афтершоков) в предположении, что магнитуды M_{OK} из ККЗ за этот период приблизительно соответствуют M_S^{GR} . Обработка на этой основе отражена на рис. 1а и в табл. 4.

2. Для периода 4 ноября 1952–1961 гг. можно пользоваться оценками магнитуд в [Rothe, 1969], [Атлас..., 1962], значениями M_{LN} [Бюллетень..., 1954–1964]. Нет уверенности в совместимости

Таблица 2. Данные о землетрясениях за 1737–1896 гг. (верхний индекс “+” при значении M_W означает “или более”)

| Дата | Описание | Принятое M_W |
|-------------------|--|---|
| 17.10.1737 | Аналог события 1952 г. но мощнее. Интенсивность в Петропавловске-Камчатском 8–9 баллов, против 7 баллов в 1952 г., цунами 60 м (!?), против 20 м в 1952 г. $M_{HK} = 8.3$ | 9.2 |
| 04.11.1737 | В Нижне-Камчатске интенсивность 9–10 баллов, афтершоки на протяжении нескольких месяцев. $M_{HK} = 7.8$ | 7.8+ |
| 17.12.1737 | Цунами примерно как в 1952 г., но более локально. $M_{HK} = 7.5$ не соответствует масштабу цунами. Нет полной уверенности в реальности события: не исключено, что описание относится к 17 октября 1737 г. | 8 |
| 02.12.1790 | Ощущалось в Нижне-Камчатске и Петропавловске. По НК $M_{HK} = 7.5$ и эпицентр в Кроноцком заливе. Не менее вероятен глубокий толчок | Не включено в список M_W как ненадежная оценка |
| 15.04.1791 | 8 баллов в Нижне-Камчатске. По [Каталог ..., 1987], цунами имело место, хотя описание неоднозначно. $M_{HK} = 6.8$ – минимальная оценка | С учетом цунами принято $M_W = 7.5$ под сомнением |
| 22.08.1792 | Землетрясение отмечено от Нижне-Камчатска до Петропавловска-Камчатского. НК помещает эпицентр в Кроноцкий залив. Судя по описаниям сотрясений в Паратунке и Нижне-Камчатске, оба пункта близки к эпицентральной зоне. Если допустить эпицентр в Кроноцком заливе, надо предполагать необычно высокую макросейсмическую магнитуду. Возможно, имели место два события с $M_W \approx 8-8.5$ в районах Авачинского и Камчатского заливов, или очаг с $M_W \approx 8.5-9.2$ длиной около 600 км. Данные о цунами недостаточно определены. $M_{HK} = 8.4$ | Приняли $M_W = 8.8$ |
| 9–10 августа 1827 | Извержение Авачинской сопки сопровождалось сильными землетрясениями. Отмечено цунами (отход воды от берега). По-видимому, помимо всего прочего, имело место тектоническое землетрясение с $M_W \geq 7.0$. В НК события нет | 7.0+ |
| 18.05.1841 | Интенсивность в Петропавловске-Камчатском 8–9 баллов и цунами. Волна цунами 4,6 м в Хило, Гавайи. $M_t = 9$. $M_{HK} = 8.4$ | $M_W = M_t = 9$ относительно надежно |
| июнь 1848 | Колебания уровня воды в Петропавловском порту: “Море то поднималось на берег, то осушало дно залива”. (При этом отмечалось и землетрясение). В силу геометрии бухты это означает волну не ниже 5–10 м на побережье Авачинского залива, либо очень мощные сейши, так что можно принять $M_W \geq 7.5$. В НК события нет | 7.5+ |
| 28.10.1849 | Землетрясение вблизи о-вов Медного и Беринга. Интенсивность 9 баллов на о-ве Медный, цунами. $M_{HK} = 7.5$ – минимальная оценка | 7.5+ |
| 27.06.1854 | Дата по НК. Фактически, вероятно, она дана по старому стилю. Опустошительное цунами на о-ве Шумшу. $M_{HK} = 7.0$ | 7.5+ |
| 06.09.1866 | Не менее 7 баллов в Петропавловске. $M_{HK} = 7.0$ – минимальная оценка | 7.0+ |

этих магнитудных оценок. Мы приняли решение использовать для периода 4 ноября 1952–1961 гг. значение магнитуды по “Атласу” (M_{Atl}), считая что магнитуда здесь однородна и соответствует ($M_{LN} - 0.25$). Обработка на этой основе отражена на рис. 1б и в табл. 4.

3. Период 1962–1974 гг. изучали непосредственно по НК. Обработка на этой основе отражена на рис. 3в и в табл. 4. График далек от линейного из-за явного дефицита толчков с $M = 6.5-7.0$, поэтому b нельзя оценить уверенно.

4. С конца 60-х годов сейсмическими службами США систематически определяется “двадцатисекундная” магнитуда M_S [Earthquake..., 1973–1988], которая хорошо коррелируется с M_W . Мы исполь-

зовали данные 1973–1988 гг. Их обработка отражена на рис. 1г и в табл. 4. Снова виден явный дефицит толчков с $M = 6.5-7$.

5. Для периода 1964–1973 гг. опубликована сводка [Сейсмическое..., 1980], где подсчитано число событий с разными значениями энергетического класса $K^{Ф68}$ [Федотов, 1972]. Эта сводка приводится, в частности, для зон надежной регистрации толчков с $K^{Ф68} = 9$ и 11 (т.е. 8.5 и более и 10.5 и более), первая из которых чуть меньше, а вторая чуть больше изучаемой нами области. Мы использовали непосредственно результаты этих подсчетов. Их обработка отражена на рис. 1д. В качестве окончательного результата в табл. 4

Таблица 3. Каталог Камчатских землетрясений

| Дата: год, месяц, день | Координаты эпицентра | | Глубина H , км | Магнитуды | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------|---------|---------------------|-----------------|-------------------|------------|----------------|-------|------------|------------|------------|------------|--------|
| | с.ш., ° | в.д., ° | | M_{HK}/M_{LH} | M_{GR}/M_{Rote} | M_S^{GR} | M_S^{US}/M_m | m_B | $M_W(M_S)$ | $M_W(m_B)$ | $M_W(M_O)$ | $M_W(M_I)$ | M_W |
| 1737.10.17 | 50.5 | 158.0 | (40) | 8.3 | | | | | | | | 9.2 | 9.2 |
| 1737.11.04 | 55.5 | 163.0 | (20) | 7.8 | | | | | | | | | (7.8+) |
| 1737.12.17 | 50.0 | 157.0 | (50) | 7.5 | | | | | | | | | (8) |
| 1742.11.18 | 50.5 | 157.0 | (40) | 7.5 | | | | | | | | | (7.5) |
| 1790.12.02 | 54.0 | 162.0 | (20) | 7.5 | | | | | | | | | (7.5) |
| 1791.04.15 | 56.0 | 163.0 | (20) | 6.8 | | | | | | | | | (7.5) |
| 1792.08.22 | 54.0 | 162.0 | (20) | 8.4 | | | | | | | | | (8.8) |
| 1827 | 53.1 | 158.5 | | | | | | | | | | | (7.0+) |
| 1841.05.17 | 52.5 | 159.5 | (30) | 8.4 | | | | | | | | 9.0 | 9.0 |
| 1848 | 52.5 | 159.5 | | | | | | | | | | | (7.5+) |
| 1849.10.28 | 55.0 | 166.0 | (20) | 7.5 | | | | | | | | | (7.5+) |
| 1854.06.27 | 51.0 | 158.0 | (40) | 7.0 | | | | | | | | | (7.5+) |
| 1858.01.22 | 55.0 | 166.0 | (20) | 7.5 | | | | | | | | | (7.5+) |
| 1866.09.06 | 52.5 | 159.5 | (30) | 7.0 | | | | | | | | | (7.0+) |
| 1899.11.23 | 53.0 | 159.0 | (20) | 7.9 | 7.9 | 7.4 | | | 7.55 | | | | 7.6 |
| 1904.06.25 14 ч | 52.0 | 159.0 | (30) | 7.7d | 8.0 | 7.2 | | 7.3 | 7.35 | 7.5 | | | 7.4 |
| 1904.06.25 21 ч | 52.0 | 159.0 | (30) | 7.7d | 8.1 | 7.4 | | 7.2 | 7.55 | 7.35 | | | 7.5 |
| 1904.06.27 | 52.0 | 159.0 | (30) | 7.3d | 7.9 | 7.2 | | 7.0 | 7.35 | 7.15 | | | 7.3 |
| 1904.07.24 | 52.0 | 159.0 | (30) | 6.9 | 7.5 | (6.7) | | 7.1 | (6.9) | 7.25 | | | 7.0 |
| 1905.09.15 | 53.0 | 164.0 | (30) | 7.0d | 7.6 | 7.4 | | 7.1 | 7.55 | 7.25 | | | 7.5 |
| 1906.10.08 | 53.5 | 154.5 | (200) | 7.0 | 7.0 | | | 6.2 | | (6.2) | | | |
| 1907.08.17 | 52.0 | 157.0 | (120) | 7.2 | 7.25 | | | 7.0 | | (7.0) | | | 7.2 |
| 1914.03.06 | 52.0 | 159.4 | (50) | 6.7 | 7.0 | 6.3 | | 7.1 | 6.6 | 7.25 | | | 6.6 |
| 1915.07.31 | 53.5 | 163.3 | (20) | 7.3 | 7.75 | 7.6 | | 7.5 | 7.75 | 7.8 | | | 7.8 |
| 1917.01.30 | 55.2 | 164.5 | (20) | 8.1 | 7.75 | 7.8 | | 7.7 | 8.0 | 8.1 | | | 8.0 |
| 1922.03.04 | 53.1 | 158.3 | 220 | 7.4 | 7.0 | | | 7.1 | | 7.25 | | | 7.3 |
| 1923.02.02 | 52.5 | 160.5 | (20) | 7.0 | 7.25 | 7.2 | | 7.3 | 7.35 | 7.5 | | | 7.4 |
| 1923.02.03 | 53.0 | 161.0 | (20) | 8.5 | 8.3 | 8.3 | 8.4m | 7.7 | 8.7 | 8.2 | | 8.8 | 8.5 |
| 1923.02.24 | 55.0 | 162.4 | (20) | 7.7 | 7.4 | 7.3 | | 7.4 | 7.45 | 7.7 | | | 7.5 |
| 1923.04.13 | 55.4 | 162.8 | (20) | 7.3 | 7.25 | 7.2 | | | 7.35 | | | 8.2 | 8.2 |
| 1925.08.19 | 54.4 | 168.6 | (20) | 6.9 | 7.2 | 7.0 | | 7.3 | 7.2 | 7.5 | | | 7.2 |
| 1927.12.28 | 53.8 | 161.4 | (20) | 7.1 | 7.3 | 7.3 | | 7.0 | 7.45 | 7.7 | | 7.5 | 7.5 |
| 1929.01.13 | 50.6 | 154.7 | 135 | 7.8 | 7.7 | | | 7.4 | | 7.7 | | | 7.7 |
| 1933.03.17 | 54.4 | 162.5 | 20 | 6.6 | 6.9 | 7.0 | | 7.1 | 7.2 | 7.25 | | | 7.2 |
| 1936.06.30 | 55.0 | 165.0 | (20) | 7.2 | 7.4 | 7.4 | | 7.4 | 7.55 | 7.7 | | | 7.6 |
| 1936.11.13 | 56.2 | 163.3 | (20) | 7.3 | 7.2 | 7.1 | | 7.3 | 7.3 | 7.6 | | | 7.3 |
| 1941.09.24 | 50.0 | 157.8 | 70 | | 7.0 | | | 6.8 | | 6.9 | | | 6.9 |
| 1942.08.23 | 53.0 | 163.8 | (20) | 6.9 | 7.0 | 6.4 | | 7.0 | | 7.1 | | | 7.1 |
| 1944.09.23 | 53.0 | 162.5 | (20) | 6.9 | 7.4 | 7.2 | | 7.3 | 7.4 | 7.5 | | | 7.4 |
| 1945.04.15 | 57.0 | 164.0 | (20) | 7.0 | 7.0 | 7.2 | | 7.0 | 7.35 | 7.1 | | | 7.3 |
| 1946.09.13 | 52.4 | 158.2 | 80 | 7.0 | | | | | | | | | |
| 1946.10.02 | 52.0 | 159.0 | 50 | 7.2 | 6.75 | | | | | | | | |
| 1952.11.04 | 52.3 | 161.0 | (20) | 8.5 | 8.25 | 8.2 | | 7.9 | 8.6 | 8.7 | 9.0 | 9.0 | 9.0 |
| 1952.11.29 | 52.8 | 159.2 | 40 | 7.3 | | | | | | | | | |
| 1953.09.04 | 50.4 | 157.0 | 60 | 7.3 | | | | | | | | | |
| 1953.11.10 | 50.9 | 157.6 | 60 | 7.0 | 6.9R | | | 7.0 | | 7.1 | | | 7.1 |
| 1955.03.18 | 54.0 | 161.0 | 70 | 7.1 | 7.4R | 7.3 | | 7.2 | 7.45 | 7.35 | | | 7.4 |
| 1955.11.23 | 50.4 | 157.3 | 60 | 7.3 | | 6.8 | | 6.9 | | | 7.1 | | 7.1 |

Таблица 3. Окончание

| Дата: год, месяц, день | Координаты эпицентра | | Глубина H , км | Магнитуды | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------|---------|---------------------|-----------------|-------------------|------------|----------------|-------|------------|------------|------------|------------|-------|-----|
| | с.ш., ° | в.д., ° | | M_{HK}/M_{LH} | M_{GR}/M_{Rote} | M_S^{GR} | M_S^{US}/M_m | m_B | $M_W(M_S)$ | $M_W(m_B)$ | $M_W(M_O)$ | $M_W(M_I)$ | M_W | |
| 1958.06.26 | 54.0 | 160.1 | 120 | 7.0* | | | | | | | | | | |
| 1959.05.04 | 53.1 | 160.3 | 20 | 7.6 | | 7.7 | 7.9m | 7.8 | 7.9 | | | | 8.2 | 8.0 |
| 1959.06.18 | 53.9 | 160.5 | 15 | 7.0 | | | | | | | | | | |
| 1960.07.25 | 53.5 | 158.9 | 120 | 7.2* | | | | 7.2 | | 7.35 | | | | 7.4 |
| 1960.10.28 | 51.8 | 157.8 | 110 | 7.4* | | | | 6.9 | | 7.05 | | | | 7.1 |
| 1969.11.22 | 57.8 | 163.6 | 20 | 7.7 | | | | 7.3 | 7.4 | 7.3 | 7.7 | | 7.75 | 7.7 |
| 1970.08.30 | 52.3 | 151.7 | 640 | 7.0* | | | | 7.2 | | 7.35 | | | | 7.4 |
| 1971.11.24 | 52.67 | 159.5 | 125 | 7.3* | | | 7.4m | 7.4 | | 7.7 | 7.65 | | | 7.5 |
| 1971.12.15 | 55.91 | 163.37 | 30 | 7.8 | | | | 7.8 | 7.5 | 7.8 | 7.7 | 7.8 | | 7.8 |
| 1973.02.28 | 50.36 | 156.70 | 70 | 7.5 | | | | 7.2 | 7.2 | | 7.35 | | | 7.4 |
| 1977.02.19 | 53.53 | 169.92 | 33 | 7.1LH | | | | 6.7 | 7.0 | | | | | 6.8 |
| 1983.08.17 | 55.64 | 161.52 | 98 | 7.5LH | | | | 6.7 | 6.9 | | 7.0 | | | 7.1 |
| 1984.12.28 | 56.29 | 163.49 | 13 | 7.5LH | | | | 7.0 | 7.0 | | 6.7 | | | 6.7 |
| 1988.02.29 | 55.02 | 167.38 | 30 | 7.1LH | | | | 6.8 | 7.0 | | 6.9 | | | 6.9 |
| 1990.11.06 | 53.42 | 169.82 | 27 | 7.6LH | | | | 7.0 | | | 7.1 | | | 7.1 |
| 1992.03.02 | 52.92 | 159.89 | 41 | 7.1LH | | | | 6.8 | | | 6.8 | | | 6.8 |
| 1993.06.08 | 51.25 | 157.77 | 54 | 7.4LH | | | | 7.3 | | | 7.5 | | | 7.5 |
| 1993.11.13 | 51.95 | 158.67 | 52 | 7.1LH | | | | 7.1 | | | 7.0 | | | 7.0 |
| 1996.01.01 | 54.00 | 159.65 | 33 | 7.0LH | | | | | | | (6.3) | | | 6.4 |
| 1996.06.21 | 51.79 | 158.98 | 36 | 7.3LH | | | | 6.6 | | | 6.7 | | | 6.7 |
| 1997.12.05 | 54.88 | 161.95 | 33 | 7.9LH | | | | 7.6 | | | 7.9 | | | 7.9 |
| 1999.03.08 | 51.75 | 159.87 | 15 | | | | | | | | 6.9 | | | 6.9 |

Данные в столбцах 1–5 из [Новый..., 1977] для 1737–1974 гг. и из [Каталог Северной Евразии..., 2000] для 1975–1999 гг. В столбце 8 M_m – магнитуда по мантийным волнам из [Okal, 1992 I, II].

Таблица 4. Параметры графиков повторяемости

| Период (годы) | Исходная магнитуда | $M_{W1}-M_{W2}^*$ | n_6^{**} | $n_9 \times 10^3$ *** | b **** | C ***** |
|--------------------|-----------------------|-------------------|------------|-----------------------|----------|-----------|
| 1923–3 ноября 1952 | M_{OK} | 6.1–7.0 | 3.26 | 4.9 | 0.93 | 2.4 |
| 4 ноября 1952–1961 | M_{ATL} | 5.6–6.8 | 11.90 | 6.1 | 1.10 | 1.9 |
| 1962–1974 | M_{HK} | 5.8–6.5 | 1.26 | – | [1.69] | – |
| 1973–1988 | M_S^{US} | 5.5–6.4 | 1.43 | 0.15 | 1.32 | – |
| 1964–1973 | $K^{\Phi 68}$ | 4.3–6.1 | 1.16 | 1.2 | 1.00 | – |
| 1976–2000 | M_W | 5.5–7 | 1.74 | 2.5 | 0.95 | 4.8 |
| 1962–2000 | $(M_W)^{\#}$ | (5.5–7) | 1.55 | 2.2 | 0.95 | 5.4 |
| 1923–2000 | $(M_W)^{\#}$ | (5.5–7) | 3.50 | 3.5 | 1.00 | 3.3 |
| 1900–2000 | $(M_W)^{\#}$ | – | – | 10(1) | – | – |
| 1737–2000 | $(M_W)^{\#}$ | – | – | 11.8(3) | – | – |

* Диапазон магнитуд, в котором оценивали n_6 и b .

** Среднегодовое число событий с $M_W \geq 6$, полученное линейной аппроксимацией в указанном диапазоне магнитуд.

*** Экстраполированное или фактическое (выделено полужирным) среднегодовое число событий с $M_W \geq 9$. В скобках – число событий, по которому построена фактическая оценка.

**** Оценка наклона графика повторяемости.

***** Отношение фактической оценки n_9 за 1737–2000 гг. к результату экстраполяции из данной строки.

Моментная магнитуда, оцененная частично или в основном косвенным путем.

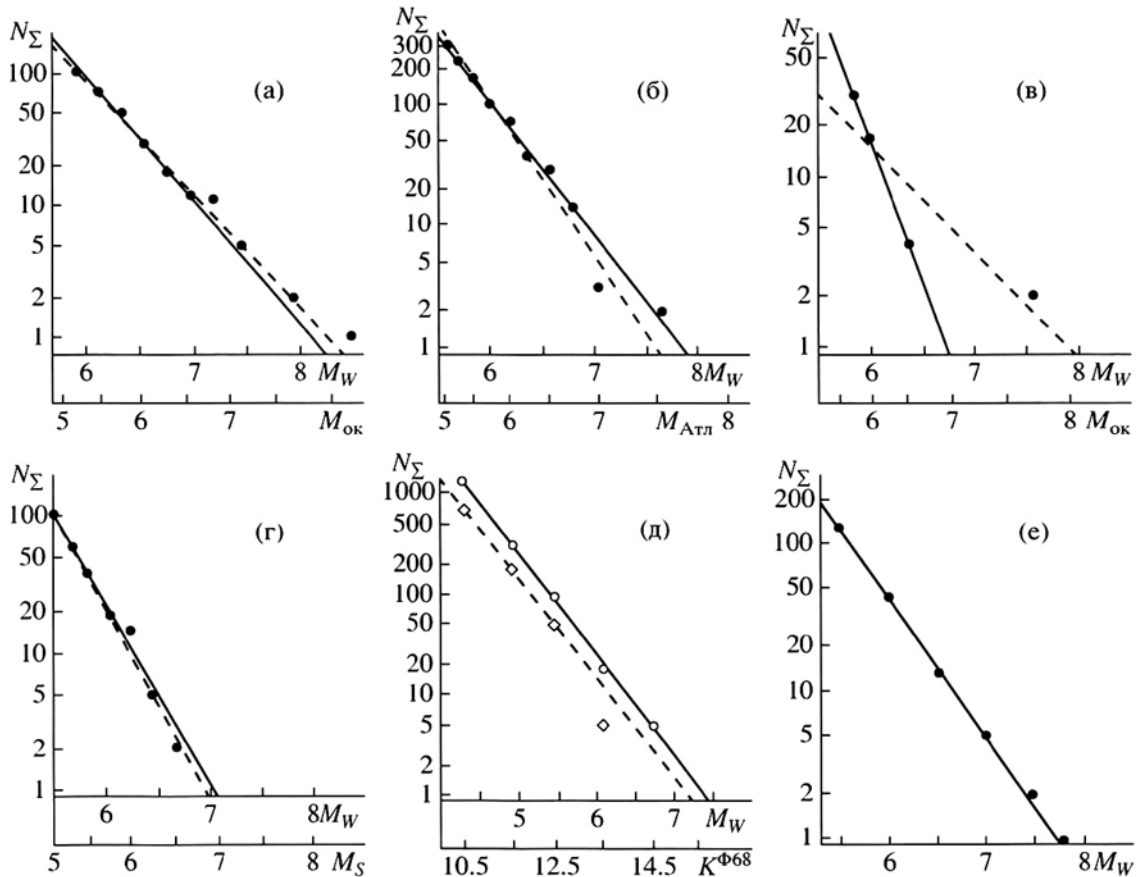


Рис. 1. “Кумулятивные” графики повторяемости для моментных магнитуд (число землетрясений $N_{\Sigma}(M_W)$ с магнитудой $M_W \geq M_W$) за ряд периодов XX века. Графики а–д перестроены из других магнитудных шкал; приведена соответствующая дублирующая оцифровка шкалы абсцисс.

(а) – период 1923 г. – 3 ноября 1952 г. по каталогу [Викулин, Ким, 1983а], магнитуда $M_{ОК}$. Сплошная прямая – аппроксимация в диапазоне $M_{ОК} = 5.5–7.0$; штриховая – то же, $M_{ОК} = 5.7–8.5$; (б) – период 4 ноября 1952–1961 гг. по каталогу [Викулин, Ким, 1983а], магнитуда $M_{Атл}$. Сплошная прямая – аппроксимация в диапазоне $M_{Атл} = 5.5–8$; штриховая – то же, $M_{Атл} = 5.5–7.0$; (в) – период 1962–1974 гг. по каталогу [Новый..., 1977], магнитуда $M_{НК}$. Сплошная прямая – формальная аппроксимация в диапазоне $M_{НК} = 5.5–7$; штриховая – то же, $M_{НК} = 5.5–8.0$. Аппроксимация прямой по существу некорректна для данной выборки; (г) – период 1973–1988 гг. по каталогу [Earthquake..., 1973–1988], магнитуда M_S согласно NEIC США. Сплошная прямая – аппроксимация в диапазоне $M_{НК} = 5.5–7$; штриховая – то же, $M_{НК} = 5.5–6.5$; (д) – период 1964–1973 гг. по данным из [Сейсмическое..., 1980], магнитудный параметр – энергетический класс $K^{\Phi 68}$. Кружки и сплошная линия – подсчет в пределах контура надежной регистрации событий с $K^{\Phi 68} \geq 11$, глубина гипоцентров $H = 0–50$ км; ромбы и штриховая линия – аналогично для контура $K^{\Phi 68} \geq 9$, $H = 0–100$ км. В обоих случаях использован диапазон $K^{\Phi 68} = 10.0–13.0$; (е) – период 1976–2000 гг. по каталогу Гарвардского университета [http://www.seismology.harvard.edu], использована моментная магнитуда M_W . Прямая – аппроксимация данных в диапазоне $M_W = 5.5–7$.

приводится среднегеометрическое из двух значений n_6 . Варианты значения b совпали.

6. За период 1976–2000 гг. имеются прямые определения M_0 (т.е. M_W) [http://www.seismology.harvard.edu; Dziewonski et al., 1981; Dziewonski, Woodhouse, 1983]. В отличие от пяти предыдущих случаев, эти данные суть непосредственные определения моментных магнитуд, а не косвенные оценки на основе корреляционных связей. Обработка отражена на рис. 1е.

Анализ результатов, отраженных в табл. 4, показывает, что повторяемость толчков средней си-

лы в 1962–2000 гг. менялась в ограниченных пределах, и ее можно принять приблизительно постоянной. Соответствующая средневзвешенная оценка для n_6 также приведена в табл. 4. Для целей экстраполяции ее можно комбинировать со значением $b = 0.95$, полученным по гарвардскому каталогу. Другие оценки b ведут к еще более низким экстраполированным оценкам n_9 .

Оценка n_6 за период 1923–3 ноября 1952 гг., по-видимому, несколько менее надежна. Тем не менее различие с периодом 1962–2000 гг. более чем в два раза по годовой повторяемости, как на уров-

не $M = 6$, так и на уровне $M = 7$, по-видимому, вполне реально. Еще более высокая оценка n_6 за период 4 ноября 1952–1961 гг. не вызывает вопросов – она явно связана с мощным афтершоковым процессом в очаговой зоне землетрясения 4 ноября 1952 г. Была также построена (см. табл. 4) средне-взвешенная оценка n_6 за период 1923–2000 гг. Для целей экстраполяции ее можно комбинировать со значением $b = 1.00$, близким к средневзвешенному за эти годы.

Теперь можно сопоставить фактические данные о сильных толчках (см. табл. 3) с “прогнозом”, полученным на основе гипотезы линейности графика повторяемости (“закон Гутенберга-Рихтера”). Фактическая повторяемость событий разных магнитуд в периоды 1901–2000 гг. (100 лет, $M_W \geq 7.5$) и 1737–2000 гг. (264 года, $M_W \geq 8.5$) отражена на рис. 2. Нижние пороги выбраны так, что можно надеяться на определенную степень полноты каталога для этого порога. Сопоставляя фактические данные с экстраполяцией по событиям средней силы за 1923–3 ноября 1952 гг. или 1962–2000 г.г, можно видеть, что экстраполированные значения устойчиво ниже, чем реальная повторяемость сильных событий. Это занижение в количественном виде отображено в последнем столбце табл. 4. Там приведены коэффициенты, отражающие во сколько раз наблюдаемая повторяемость n_9 за 264 года превышает n_9 , полученную линейной экстраполяцией по разным наборам данных. По наиболее надежным данным за период после 1962 г. занижение экстраполированной повторяемости n_9 составляет около пяти раз. Заметим, что любая попытка учесть возможное наличие пропусков в данных сильных толчков в 1737–1899 гг. лишь усилит наши выводы о том, что линейная экстраполяция ведет к заниженным оценкам.

ОБСУЖДЕНИЕ

Можно думать, что рис. 2 качественно отражает реальную структуру зависимости $N(M_W)$ для участка островной дуги: приблизительно линейный тренд для средних магнитуд и отклонение вверх при приближении к предельно большим магнитудам. Подобные эффекты обнаруживались неоднократно, впервые для Северо-Анатолийского разлома [Båth, 1981], а позже и для зон субдукции, в частности Мексиканской [Singh et al., 1983] и Алеутской [Davidson, Scholz, 1985]. Общий характер такой тенденции отмечали Весновски и др. [Wesnousky et al., 1984], связав ее с так называемой моделью “характеристического землетрясения”. Более детально данный вопрос изучен в [Stirling et al., 1996]. Таким образом, можно уверенно отвергнуть идею “автоматического” использования закона Гутенберга-Рихтера для экстраполяции повторяемости от средних к большим магнитудам. Подобная экстраполяция в типичных случаях дает заниженные оценки, причем на-

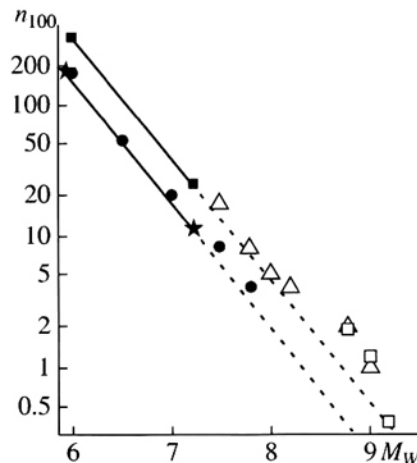


Рис. 2. Сводка кумулятивных графиков повторяемости землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд. Все графики приведены к единому периоду 100 лет. Черные квадраты и соединяющая прямая – оценка по данным 1923–4 ноября 1952 гг. (см. табл. 4), продолжение этой прямой в виде штриховой линии – экстраполяция этих данных на большие магнитуды. Звездочки – аналогичное построение по данным 1962–2000 гг. (см. табл. 4). Залитые кружки – данные M_W по гарвардскому каталогу за 1976–2000 гг. Треугольники – фактические данные за 1900–2000 гг. Квадраты – фактические данные за 1737–2000 гг. Видно, что варианты линейной экстраполяции данных средних магнитуд ведут к более или менее существенной недооценке повторяемости для больших магнитуд.

блюдаемая в нашем случае степень занижения в 2–5 раз также достаточно типична. Но, по-видимому, есть случаи, когда закон Гутенберга-Рихтера отражает реальность.

Любопытно отметить, что график $\lg N(M_W)$ становится явно нелинейным только в шкале M_W ; в случае графика $\lg N(M_{LH})$, наложение изгиба зависимости $\lg N(M_W)$ и изгиба зависимости $M_{LH}(M_W)$ почти уничтожает нелинейность формы графика. Таким образом, если считать “опорной” шкалу M_{LH} , изучаемая проблема может быть квалифицирована как искусственная. Однако такой взгляд едва ли справедлив: в мировой сейсмологической литературе видна явная тенденция к переходу на шкалу M_W как на опорную.

Обнаружение в данной работе существенных флуктуаций уровня сейсмичности представляет большой интерес. Можно полагать, что вариации n_6 , обнаруженные в работе, отражают реальные колебания уровня сейсмичности для толчков средней силы. Повышенная частота толчков в афтершоковый период события 1952 г. давно известна; но различие уровня в 1923–3 ноября 1952 г. и 1962–1988 гг. (более чем в два раза) ранее не отмечено. Флуктуации такого масштаба могут дополнительно исказить оценки повторяемости

сильнейших землетрясений на основе данных о частоте толчков средней силы.

ВЫВОДЫ

1. Впервые составлен каталог сильнейших землетрясений Камчатки в шкале моментной магнитуды. Использование этой шкалы позволило изучать статистику землетрясений на надежной методической основе.

2. Изучена повторяемость толчков средней силы на Камчатке за 1923–2000 гг. Обнаружены временные вариации повторяемости таких толчков.

3. Сопоставлена фактическая повторяемость сильнейших землетрясений за 1737–2000 гг. и ее “прогноз” по статистике толчков средней силы за 1923–2000 гг. на основе гипотезы линейности графика повторяемости. Все варианты прогноза дают заниженные оценки повторяемости толчков предельных магнитуд. По наиболее надежным данным последних лет занижение составляет около 5 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас землетрясений в СССР / Под ред. Е.Ф. Саваренского и др. М.: Изд-во АН СССР. 1962. 336 с.

Бюллетень сети сейсмических станций СССР (1952–1961 гг.). М.: Изд-во АН СССР. 1954–1964.

Викулин А.В., Ким Ч.У. Курило-Камчатские землетрясения. Данные наблюдений 1911–1952 гг. Материалы Мирового центра данных Б. М: Межведомственный Геофизический Комитет при Президиуме АН СССР. 1983а. 81 с.

Викулин А.В., Ким Ч.У. Курило-Камчатские землетрясения. Данные наблюдений 1953–1961 гг. Материалы Мирового центра данных Б. М: Межведомственный Геофизический Комитет при Президиуме АН СССР. 1983б. 83 с.

Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.

Зобин В.М., Федотов С.А., Гордеев Е.И., Гусева Е.М., Митякин В.П. Сильные землетрясения на Камчатке и Командорских островах в 1962–1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 3–23.

Каталог землетрясений Северной Евразии / Под ред. Н.В. Кондорской и В.И. Уломова. Фонды ИФЗ РАН. 2000.

Каталог цунами на Камчатке. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД. 1987. 51 с.

Кириллов Ф.А. Каталог землетрясений Курило-Камчатской зоны. Отчет. Фонды ИФЗ АН СССР. 1962. 254 с.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука. 1977. 536 с.

Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. М.: Наука. 1980. 307 с.

Сейсмологический бюллетень сети сейсмических станций СССР (1962–1963 гг.). М.: Изд-во АН СССР. 1962–1963.

Сейсмологический бюллетень сети опорных сейсмических станций СССР (1964–1973 гг.). М.: Изд-во АН СССР. 1965–1977.

Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука. 1972. 116 с.

Abe K. Size of Great Earthquakes of 1837–1974 Inferred from Tsunami Data // J. Geophys. Res. 1979. 84. B4. P. 1561–1568.

Abe K. Magnitudes of Large Shallow Earthquakes from 1904 to 1980 // Phys. Earth Planet. Interiors. 1981. 27. P. 72–92.

Abe K. Complements to Magnitudes, 1904 to 1980 // Phys. Earth Planet. Interiors. 1984. V. 34. P. 13–23.

Abe K., Noguchi S. Determination of Magnitude for Large Shallow Earthquakes, 1898–1917 // Phys. Earth Planet. Interiors. 1983a. 32. P. 45–59.

Abe K., Noguchi S. Revision of Magnitudes of Large Shallow Earthquakes, 1897–1912 // Phys. Earth Planet. Interiors. 1983b. 33. P. 1–11.

Båth M. Earthquake recurrence of a particular type // Pure and Appl. Geophys. 1981. Vol. 119. P. 1063–1076.

Davidson F.C., Scholz C.H. Frequency-moment distribution of earthquakes in the Aleutian Arc: A test of the characteristic earthquake model // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1985. V. 75. P. 1349–1361.

Duda S.J. Secular seismic energy release in the Circum-Pacific belt // Tectonophysics. 1965. V. 2. № 5. P. 409–452.

Dziewonski, A.M., T.-A. Chou and J.H. Woodhouse. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2825–2852.

Dziewonski A.M., Woodhouse J.H. Studies of the seismic source using normal-mode theory / Kanamori H., E. Boschi, eds. Earthquakes: observation, theory and interpretation: notes from the International School of Physics “Enrico Fermi” (1982: Varenna, Italy), North-Holland Publ. Co., Amsterdam. 1983. P. 45–137.

Earthquake Data Report; 1973–1988. US National Earthquake Information Service. Rockville: US Dept of Commerce Washington Science Centre.

Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. 2nd ed. Princeton: Univ. Press. 1954. 310 p.

Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 2348–2350.

Okal E. Use of mantle magnitude M_m for the reassessment of the moment of historical earthquakes. I. Shallow events // Pure Appl. Geophys. 1992. V. 136. P. 17–57.

Okal E. Use of mantle magnitude M_m for the reassessment of the moment of historical earthquakes. II. Intermediate and deep events // Pure Appl. Geophys. 1992. V. 136. P. 59–85.

Purcaru G., Berckhemer H. Quantative Relations of Seismic Source Parameters and a Classification of Earthquakes // Tectonophysics. 1982. V. 84. P. 57–128.

Rothe J.P. The Seismicity of the Earth, 1953–1965. UNESCO. 1969. 36 p.

Singh S.K., Rodriguez M., Esteva L. Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican subduction zone // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1983. V. 73. № 6. P. 1779–1796.

Stirling M.W., Wesnousky S.G., Shimazaki K. Fault trace complexity, cumulative slip and the shape of the magnitude-frequency distribution for strike-slip faults: a global survey // Geophys. J. Int. 1996. V. 124. P. 833–868.

Wesnousky S.G., Sholz C.H., Shimazaki K., Matsuda T. Integration of geological and seismological data for the analysis of seismic hazard: a case study of Japan // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1984. V. 74. № 2. P. 687–708.