

УДК 550.34.013.2

ВРЕМЕННЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА КУРИЛО-КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2013 г. А.И. Лутиков, С.Н. Родина

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Проанализированы данные о 32 афтершоковых последовательностях сильных и умеренных ($5.3 \leq M_W \leq 8.3$) землетрясений Курило-Камчатского региона. По предложенным критериям выбора момента окончания последовательностей рассчитаны их параметры, использованные в дальнейшем для построения регрессионных зависимостей. Установлена тесная корреляционная связь между моментной магнитудой главного события и десятичными логарифмами двух характеристик – суммарного скалярного момента, высвободившегося при развитии афтершокового процесса, и его продолжительности.

Показано, что в теоретическом плане суммарный скалярный сейсмический момент всех афтершоков любого землетрясения определяется моментной магнитудой и скалярным сейсмическим моментом сильнейшего афтершока, а также параметрами графика повторяемости, построенного по всей афтершоковой последовательности.

Ключевые слова: землетрясения, афтершоковые последовательности, суммарный скалярный момент, продолжительность афтершокового процесса, Курило-Камчатский регион.

Введение

Сильные коровые землетрясения обычно сопровождаются многочисленными вторичными толчками – афтершоками. Всестороннее изучение разнообразных аспектов развития афтершокового процесса началось практически с момента становления инструментальной сейсмологии. Этим исследованиям посвящены многочисленные публикации. Ни в коем случае не претендуя на полноту обзора, обратимся лишь к некоторым работам, имеющим хотя бы косвенное отношение к теме настоящей статьи. Могут быть выделены три основных направления исследования афтершокового процесса: оценка пространственных размеров области распространения афтершоков; оценка продолжительности афтершокового процесса и оценка его интенсивности во времени.

Количественно интенсивность афтершокового процесса чаще всего оценивается по изменению во времени числа повторных толчков с магнитудой выше некоторой пороговой (низшей представительной). Широко известен закон Омори [Omori, 1894a,b; Utsu, 2002], согласно которому спад активности афтершокового процесса происходит по степенному закону. Однако довольно скоро выяснилось, что этот закон не является универсальным – убывание может происходить как по степенному закону или его модификации, учитывающей вторичные афтершоковые последовательности сильных повторных толчков [Utsu, 1961], так и по экспоненте [Kisslinger, 1993].

Дальнейшие исследования развития афтершокового процесса связаны с изучением изменений его структуры во времени. Работы [Люцина, Смирнов, 1990, 1993] посвящены анализу динамики временной структуры афтершоков нескольких землетрясений. Авторами названной работы было выявлено группирование событий во времени, с которым согласуется изменение параметра закона Омори γ (показателя степенной зависимости), а также наклон графика повторяемости b . В целом отмечалось, что афтершоковые последовательности сразу после главного толчка не подчиняются закону Омори (актив-

ность медленно снижается или иногда даже возрастает), который начинает описывать спад активности лишь по прошествии некоторого интервала времени. Эволюция структуры группирования сопровождается изменением показателя степени γ на разных участках афтершоковой последовательности.

В статье [Ромашкова, Кособоков, 2001] анализируется 11 сильнейших землетрясений мира, для большинства из которых афтершоковые последовательности наилучшим образом описываются модифицированным законом Омори. Для некоторых из рассмотренных землетрясений отмечается переход от экспоненциального закона убывания к степенному. В ряде случаев наблюдается резкий переход интенсивности сейсмического потока на фоновый уровень. В целом, выявлено несоответствие процесса стандартному закону Омори и установлено, что его эффективная продолжительность варьирует от двух недель до двух лет.

В исследовании [Татевосян, Аптекман, 2008] рассматривается 10 сильных землетрясений мира. Авторы этой работы приходят к выводу, что афтершоковые последовательности могут быть разделены на два этапа: первый – короткий, в ходе которого происходит большинство афтершоков, связанных с очагом; второй – более длительный, связанный с релаксацией прилегающей среды. Отмечается, что закон Омори соблюдается лишь в течение короткой стадии первого этапа.

В 1965 г. был сформулирован так называемый принцип Бота [Bath, 1965], согласно которому максимальная магнитуда афтершоков меньше магнитуды главного события на величину $\Delta M=1$. Дальнейшие уточнения [Kisslenger, Jones, 1991; Scherbakov, Turcotte, 2004] показали, что параметр ΔM может меняться в пределах от 0.6 до 1.7. Позже Р.Э. Татевосян и Ж.Я. Аптекман [2008] отметили, что в жестком смысле принцип Бота не соблюдается более чем для половины рассмотренных ими землетрясений.

Одним из инструментов изучения динамики афтершокового процесса во времени является слежение за наклоном графика повторяемости b на разных временных интервалах процесса. В работе [Weimer, Katsumata, 1999] было показано, что в афтершоковых последовательностях наклон графика повторяемости варьирует в пределах $0.6 \leq b \leq 1.4$. Позже [Смирнов, Пономарев, 2004] было отмечено, что сразу после главного события значение параметра b минимально и по мере развития афтершокового процесса постепенно возрастает до фонового.

В работе [Родкин, Тихонов, 2011] показано, что афтершоковые последовательности представляют собой совокупность трендовых изменений активности, в рамках которой отмечаются специфические всплески активности, сопровождающиеся не только увеличением числа и энергии событий, но и уменьшением глубины их гипоцентров и значения параметра b графика повторяемости.

Работы [Пиенников, 1965; Смирнов, Пономарев, 2004; Воноградов, 2006] также посвящены анализу особенностей релаксационных процессов в афтершоках.

Резюмируя сказанное, отметим, что вследствие уникальности каждого сильного сейсмического события и различий в строении вмещающей среды реальные афтершоковые процессы не могут быть адекватно описаны каким-либо одним законом спада активности. Кроме того, отсутствие сколько-нибудь строгих критериев не позволяет определить их пространственно-временные границы.

Постановка задачи и методы анализа

Цель настоящей работы – оценка продолжительности афтершоковых последовательностей сильных и умеренных землетрясений ($5.3 \leq M_W \leq 8.3$) Курило-Камчатского региона и суммарного скалярного сейсмического момента, высвободившегося в ходе их развития. Отметим, что скалярный сейсмический момент M_0 землетрясения может

рассматриваться в качестве верхней оценки энергии тектонических сил, выделившейся при землетрясении. Действительно, согласно определению, $M_0 = \mu DS$, где μ – модуль сдвига; D – средняя величина подвижки по разрыву; S – площадь плоскости разрыва. В то же время величина μS может рассматриваться как тектоническая сила $F_{\text{тек}}$, вызвавшая разрыв (землетрясение). Тогда работа (или энергия E) тектонических сил, затраченная на реализацию землетрясения, равна скалярному произведению этих сил на величину подвижки – $E = (F_{\text{тек}} \cdot D)$, где $F_{\text{тек}}$ и D – векторы. Таким образом, работа тектонических сил, затраченная на реализацию землетрясения, в точности совпадает с его скалярным моментом при условии, что направления векторов подвижки и силы совпадают. Следовательно, скалярный сейсмический момент землетрясения может рассматриваться и в качестве верхней оценки полной энергии, выделяющейся при его реализации.

Полную энергию здесь следует понимать как сумму упругой и неупругой составляющих. Первая затрачивается на излучение сейсмических волн; вторая обуславливает неупругие деформации, возникающие в очаговой области. При возникновении неупругих деформаций часть механической энергии будет переходить в тепловую, а, возможно, и в другие виды энергии, например, в электромагнитное излучение.

Прежде чем перейти к рассмотрению экспериментальных данных, дадим определение очага землетрясения, исходя из представления о нем как о дислокации [Ризниченко, 1985] или внезапной подвижке горных пород по некоторой поверхности ослабленной прочности [Юнга, 1990]. В соответствии с этим, будем понимать под очагом землетрясения разрыв (или систему разрывов), возникающий в результате главного толчка. Согласно такому определению, очаг землетрясения занимает вполне определенный объем вмещающего пространства; само же понятие очага оказывается, вообще говоря, не тождественным понятию очаговой области, которая, по мнению С.А. Федотова, по своей природе не имеет четких границ [Федотов и др., 1980]. Выделение афтершоковых областей осуществлялось “оконным” способом, как правило, по афтершокам первого месяца с обязательным последующим визуальным контролем [Лутиков, Донцова, 2002]. При этом, конечно же, возможен пропуск некоторого числа периферийных афтершоков, но их вклад в суммарный скалярный сейсмический момент процесса незначителен.

Отметим, что существует достаточно много способов формализованного выделения афтершоковых областей. Сошлемся, например, на работу [Молчан, Дмитриева, 1991], в которой дан довольно полный обзор таких способов, а также предложены новые подходы к выделению афтершоков, основанные на минимизации числа возможных ошибок, классифицируемых как ложное принятие фонового или иного события за афтершок или, напротив, пропуск истинного афтершока. В работе справедливо указывается на сложность и неоднозначность идентификации афтершоков на поздней стадии процесса и в качестве критерия правильности предложенного алгоритма используется сравнение результатов формального анализа с данными ручной обработки. Вероятно, на уровне современных представлений об изучаемом явлении именно квалификацию и опыт интерпретатора следует признать решающими.

В настоящей работе критерием завершения афтершокового процесса считался его выход на фоновый уровень, определяемый, как правило, по временному ряду высвободившегося скалярного сейсмического момента с интервалом дискретизации в 1 мес. Рассматривались ряды за некоторое время до возникновения главного события в очаговой области, оконтуривающей очаг по афтершокам первых месяцев. Это время (как до, так и после главного события) выбиралось тем большим, чем больше была магнитуда рассматриваемого события. Поскольку использование этого приблизительного критерия иногда приводило к неоднозначности определения времени завершения процесса,

при необходимости оно уточнялось с учетом отсутствия в течение месяца сейсмических событий с магнитудой, большей или равной низшей представительной магнитуде используемого каталога.

Авторами были рассмотрены афтершоковые последовательности 32 сильных и умеренных Курило-Камчатских землетрясений с магнитудами от 5.3 до 8.3. Анализировались оценки их продолжительности в днях (T_{aft}) и суммарных скалярных сейсмических моментов, высвободившихся в ходе развития афтершокового процесса ($M_{0sum\ aft}$). Информационной базой для Камчатских землетрясений служил Региональный каталог землетрясений Камчатки (www.emsd.ru); для Курильских – Оперативный сейсмологический каталог Геофизической службы РАН (www.gsras.ru) и Каталог землетрясений геологической службы США (*NEIC*). Также были использованы данные Каталога *CMT* (www.globalcmt.org) и Унифицированного каталога землетрясений Северной Евразии под редакцией В.И. Уломова и Н.В. Кондорской (www.ifz.ru).

Переход от магнитуд слабых и умеренных землетрясений к скалярному сейсмическому моменту M_0 осуществлялся по имеющимся или специально полученным корреляционным зависимостям. Для сильных землетрясений с $M_W > 5.5$ скалярный момент брался непосредственно из каталогов *CMT* или *NEIC*.

Анализ экспериментальных данных

Схема расположения эпицентров рассматриваемых землетрясений и их афтершоков представлена на рис. 1.

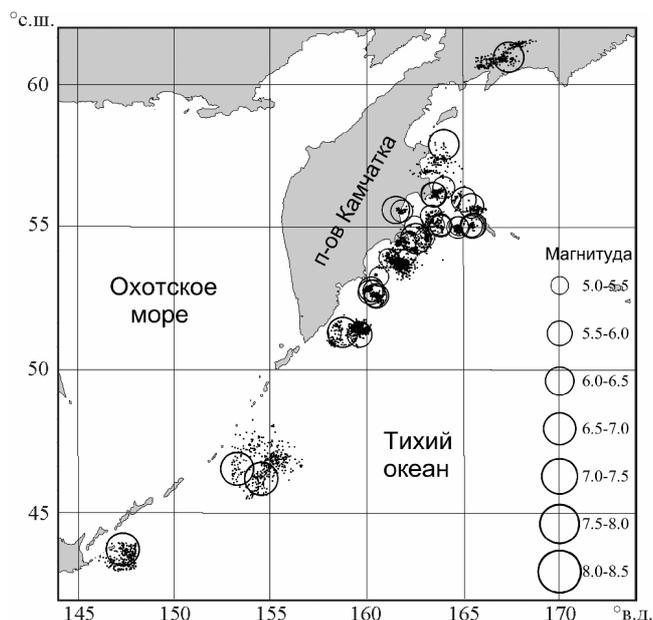


Рис. 1. Схема расположения эпицентров 32 рассматриваемых землетрясений и их афтершоков. Окружности разного радиуса – эпицентры событий с магнитудами от 5.0 до 8.5 (величина радиуса отображает значение M); черные точки – эпицентры афтершоков с $M < 5$

Каталог анализируемых землетрясений с полученными оценками продолжительности их афтершоковых последовательностей (T_{aft}) и высвободившегося в афтершоках суммарного скалярного сейсмического момента ($M_{0sum\ aft}$) приведен в табл. 1, где M_{0me} – скалярный сейсмический момент главного события; звездочкой отмечены парные землетрясения.

Таблица 1. Каталог рассмотренных землетрясений с оценками продолжительности их афтершоковых последовательностей (T_{aft} , дни) и высвободившегося суммарного скалярного сейсмического момента ($M_{0sum\ aft}$)

Дата	Время, чч:мм:сс	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	h , км	M_0 , Н·м	M_W	$M_{0sum\ aft}$	M_{0sum}/M_{0me}	T_{aft} , дни
21.11.1982	23:27:10.5	55.42	163.36	40	2.35E+18	6.2	6.58E+16	0.0280	97
01.11.1984	18:43:38.6	55.11	163.83	14	3.01E+18	6.3	2.06E+16	0.0068	81
10.07.1987	18:49:52.4	55.06	165.44	49	3.55E+18	6.3	7.74E+16	0.0218	133
24.05.1989	13:31:20.0	56.42	164	44	3.54E+18	6.3	7.63E+17	0.2155	59
01.06.1998	5:34:2.9	52.81	160.37	31	5.75E+18	6.4	5.29E+16	0.0092	150
16.07.1996	3:48:25.4	56	165.05	40	7.19E+18	6.5	4.95E+16	0.0069	43
06.10.1987	20:11:36.2	52.86	160.23	33	6.22E+18	6.5	4.49E+16	0.0072	49
05.12.2003	21:26:14.1	55.78	165.43	29	1.14E+19	6.6	1.05E+17	0.0092	22
28.12.1984	10:37:53.6	56.18	163.45	19	1.42E+19	6.7	1.30E+17	0.0092	133
02.03.1992	12:29:38.5	52.76	160.2	20	1.62E+19	6.8	3.79E+18	0.2340	151
08.10.2001*	18:14:25.7	52.62	160.46	31	5.85E+18	6.4			
08.10.2001	18:20:37.5	52.63	160.49	24	8.66E+18	6.5			
					1.45E+19	6.5	3.99E+17	0.0275	72
08.06.1993	13:3:57.0	51.36	158.75	46	2.02E+20	7.5	4.55E+19	0.2252	323
20.04.2006	23:24:58.0	60.98	167.37		2.99E+20	7.6	2.30E+19	0.0769	183
05.12.1997	11:26:51.0	53.82	161.72		5.32E+20	7.8	2.70E+19	0.0508	448
04.10.1994	13:22:55.0	43.77	147.32	14	3.00E+21	8.3	1.29E+20	0.0589	893
03.03.1978	10:53:17.3	55.02	164.74	40	1.3E+18	6	1.2E+17	0.0923	29
22.03.1980	10:27:39.4	55.6	161.82	89	1.44E+18	6	6.47E+15	0.0045	34
04.11.1980	20:26:2.1	53.73	160.94	26	8.71E+17	5.9	7.97E+15	0.0092	18
31.05.1982	10:21:12.7	55.07	165.48	40	7.15E+18	6.5	2.73E+16	0.0038	15
21.11.1982*	23:27:10.4	55.43	163.36	39	2.35E+18	6.2			
09.01.1983	21:3:52.4	55.11	163.53	19	1.04E+18	5.9			
					3.39E+18	6.3	8.55E+16	0.0252	68
05.01.1983	2:1:1.5	54.66	163.01	20	5.21E+17	5.7	4.42E+16	0.0848	26
09.01.1983	21:3:52.4	55.11	163.53	19	1.04E+18	5.9	3.2E+16	0.0308	19
15.04.1983	14:51:57	53.3	160.64	30	1.96E+17	5.5	4.47E+15	0.0228	24.5
17.08.1983	10:55:55.5	55.64	161.52	98	4.06E+19	7	8.17E+17	0.0201	174
01.11.1984	18:43:38.6	55.12	163.84	14	3.01E+18	6.3	3.96E+16	0.0132	40
28.12.1984	10:37:53.9	56.17	163.5	19	1.42E+19	6.7	2.87E+17	0.0202	227
06.03.1985	22:31:52.1	55.09	162.47	45	6.75E+17	5.8	5.19E+15	0.0077	35
25.05.1985	23:29:22.8	53.95	161.13	33	4.97E+17	5.7	2.94E+15	0.0059	23
02.05.1986	10:30:2.7	55.07	163.85	20	1.71E+18	6.1	1.83E+16	0.0107	32
10.07.1987	18:49:52.4	55.07	165.44	49	3.55E+18	6.3	7.62E+16	0.0215	29
11.01.1988	21:7:31.4	54.62	161.81	42	1.37E+17	5.4	2.94E+15	0.0215	11
26.07.1988	0:31:29	55.37	166.83	40	1.2E+17	5.3	1.43E+16	0.1192	2.5
15.11.2006*	11:14:13.57	46.59	153.27	10	3.37E+21	8.3			
13.01.2007	4:23:21.16	46.24	154.52	10	1.65E+21	8.1			
					5.02E+21	8.4	6.31E+19	0.0126	583

Проиллюстрируем процесс получения приводимых в таблице оценок на примере парных Симуширских землетрясений, первое из которых произошло 15.11.2006 г. с $M_W=8.3$, второе – 13.01.2007 г. с $M_W=8.1$. Эти события при анализе рассматривались как одно; продолжительности афтершоковых процессов двух землетрясений суммировались; в соответствии с формулой Канамори [Kanamori, 1977], моментная магнитуда M_0 определялась по сумме скалярных моментов каждого из них:

$$M_0=1.5M_W+9.1 \text{ [Н}\cdot\text{м]}. \quad (1)$$

При анализе афтершоковых последовательностей названных землетрясений использовались каталоги *NEIC* и *CMT*; схема афтершоковых областей представлена на рис. 2.

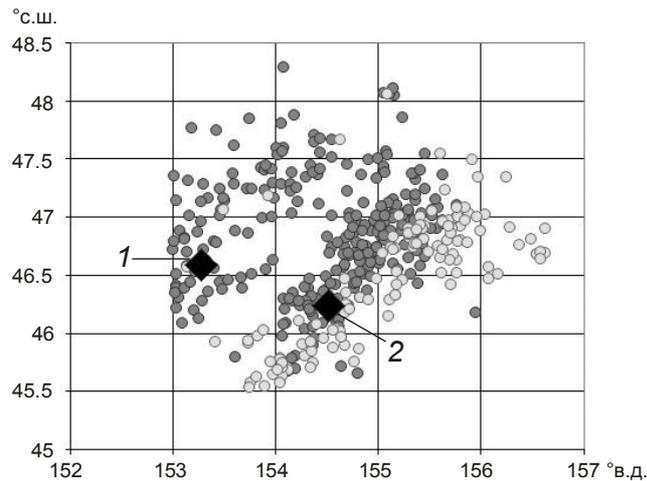


Рис. 2. Схема афтершоковых областей анализируемых Симуширских землетрясений

Черные ромбы – эпицентры главных событий: 1 – 15.11.2006 г.; 2 – 13.01.2007 г.; темные кружки – эпицентры афтершоков с $m_b \geq 3.8$, зарегистрированных в первые сутки после события 1; светлые – то же самое для события 2

Анализируемая афтершоковая область Симуширских землетрясений ограничена координатами $45.0^\circ\text{--}48.5^\circ$ с.ш., $152.5^\circ\text{--}157.0^\circ$ в.д. и глубиной h менее 100 км. В этой области рассматривались временные ряды суммарного скалярного сейсмического момента ($M_{0\text{sum}}$) с шагом дискретизации 3 мес. за период с 1985 г. по 2009 г. включительно. Достаточно длительный (25-летний) период анализа сейсмического процесса был выбран для обеспечения надежности установления фонового уровня высвобождения скалярного сейсмического момента. В используемых каталогах *NEIC* и *HARVARD* содержится 914 сейсмических событий с $m_b \geq 3.3$, произошедших с начала 1985 г. по 15.11.2006 г., и 1430, зарегистрированных с 15.11.2006 г. по 31.12.2009 г. Таким образом, в исследуемой области за весь период 1985–2009 гг. произошло 2344 интересующих нас сейсмических события.

Для уяснения структуры каталога *NEIC* рассмотрим распределение числа событий в нем по типам магнитуд и их величине, исключив из анализа главные события 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. (табл. 2). Можно видеть, что для событий с $M < 4.5$ каталог непредставителен, что, однако, при использовании временных рядов $M_{0\text{sum}}$ не так важно, поскольку основной вклад в $M_{0\text{sum}}$ вносится событиями с большими магнитудами.

Таблица 2. Структура каталога *NEIC* для очаговой области Симуширских землетрясений за 1985–2009 гг.

Тип магнитуды	Магнитуда								N
	3.3–3.7	3.8–4.2	4.3–4.7	4.8–5.2	5.3–5.7	5.8–6.2	6.3–6.7	7.3–7.7	
m_b	25	492	1098	452	37	4	1	0	2109
M_S	0	0	1	3	1	1	0	0	6
M_W	0	0	3	125	66	28	6	1	229

Для перехода от магнитуд m_b и M_S к M_0 использовались специально полученные корреляционные соотношения. Соотношение между m_b (*NEIC*) и $\lg M_0$ (*HARVARD*) строилось по 116 парам значений в интервале магнитуд $4.8 \leq m_b \leq 6.6$, а между M_S (*NEIC*) и $\lg M_0$ (*HARVARD*) – по 90 парам в интервале магнитуд $4.2 \leq M_S \leq 6.6$:

$$\lg M_0 = 1.337 M_S + 9.881, R_c = 0.860;$$

$$\lg M_0 = 0.910 m_b + 12.567, R_c = 0.843,$$

где R_c – коэффициент линейной корреляции.

Переход от моментной магнитуды M_W к M_0 осуществлялся непосредственно по формуле (1). Временной ряд суммарного скалярного сейсмического момента $M_{0\text{sum}}$ за период 1985–2009 гг. с шагом дискретизации 3 мес представлен на рис. 3, а.

Были рассчитаны средние значения и стандартные отклонения временного ряда для двух периодов – 1985–1994 и 1995–2005 гг. Легко видеть, что в течение первого из них скалярный момент $M_{0\text{sum}}$ высвобождался в среднем интенсивнее, чем в ходе второго. Действительно, в первом случае средние темпы высвобождения $\lg M_{0\text{sum}} = 17.488 \pm 0.495$, а во втором – $\lg M_{0\text{sum}} = 17.114 \pm 0.540$, т.е. почти в 2.5 раза ниже. Период с 1995 по 2005 гг. может быть отнесен к фазе сейсмического затишья перед Симуширскими землетрясениями 2006–2007 гг., и поэтому фоновый уровень высвобождения $M_{0\text{sum}}$ следует определять по средним значениям 1985–1994 гг.

Временной ряд с шагом дискретизации 3 мес. недостаточно детален для того, чтобы оценить время завершения афтершокового процесса. Для этой цели использовался временной ряд $\lg M_{0\text{sum}}$ с шагом дискретизации 1 мес. (рис. 3, б), построенный от начала афтершокового процесса землетрясения 13.01.2007 г. по конец 2009 г. Как и в первом случае, средний уровень высвобождения $M_{0\text{sum}}$ принят по 1985–1994 гг., т.е. $\lg M_{0\text{sum}} = 17.488 \pm 0.495 - \lg 3$ (с учетом в 3 раза меньшего шага дискретизации).

В афтершоковом процессе могут быть выделены два этапа: первый – постепенное, довольно медленное, почти монотонное спадание его интенсивности в первые 7–8 мес; второй – три волны всплеска сейсмической активности, перемежающиеся с относительно короткими (1–3 мес.) периодами спада (всего около 10 мес.). Периоды всплеска активности связаны с возникновением довольно сильных афтершоков 25.10.2007 г. ($M_W = 6.1$), 3.03.2008 г. ($M_W = 6.5$), 23.06.2008 г. ($M_W = 5.6$). В течение всего рассмотренного периода уровень высвобождения $M_{0\text{sum}}$ превышал фоновый коридор стандартных отклонений или находился в его пределах (в периоды спада активности). Отметим, что такое развитие афтершокового процесса подобно ситуации, описанной в работе [Родкин, Тихонов, 2011].

После упомянутого выше события 23.06.2008 г. ($M_W = 5.6$) ежемесячное высвобождение $M_{0\text{sum}}$ в течение полугода лежало в пределах фонового коридора стандартных отклонений или было еще ниже, что позволило ограничить во времени афтершоковый процесс этим всплеском активности. Поэтому сильное событие с $M_W = 7.4$, произошедшее на рассматриваемой территории 15.01.2009 г., может считаться независимым, хотя, возможно, и связанным с Симуширскими землетрясениями.

Таким образом, продолжительность афтершокового процесса оценивается приблизительно в 18 мес. – до конца июня 2008 г. С учетом продолжительности афтершокового процесса первого из Симуширских землетрясений, прерванного 13.01.2007 г. вторым землетрясением, в общей сложности процесс длился 589 дней. Число зарегистрированных в этот период афтершоков с $m_b \geq 3.8$ составило 1331; оценка их суммарного скалярного сейсмического момента (см. табл. 1) – $M_{0\text{sum aft}} = 6.31 \cdot 10^{19}$ Н·м.

Аналогичным образом с оценкой продолжительности их афтершоковых последовательностей и высвободившийся суммарный скалярный сейсмический момент были проанализированы все остальные землетрясения, представленные в табл. 1.

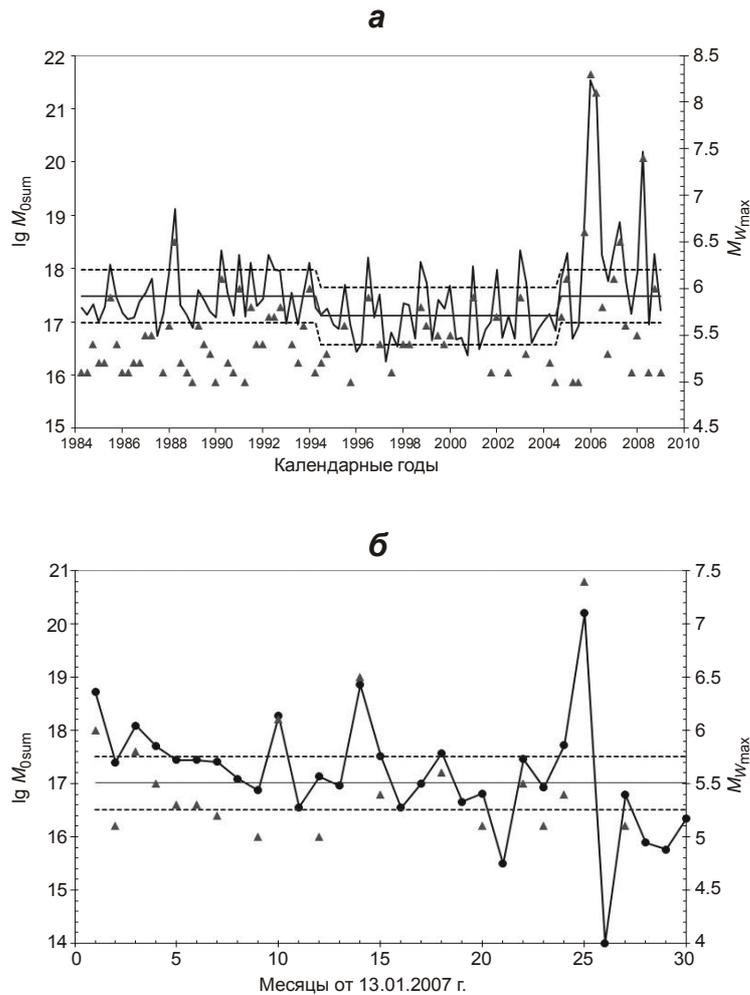


Рис. 3. Временные ряды $\lg M_{0\text{sum}}$, построенные для 1985–2009 гг. с шагом дискретизации 3 мес. (а) и для временного интервала от начала афтершокового процесса события 13.01.2007 г. по конец 2009 г. с шагом дискретизации 1 мес. (б). Сплошные кривые – временные ряды (левая ось); треугольники – максимальные значения моментных магнитуд ($M_W \geq 5.0$) сейсмических событий на каждом шаге дискретизации (правая ось); сплошная прямая – фоновый уровень временного ряда; штриховые – границы коридора стандартных отклонений

Для Камчатских землетрясений переход от магнитуд слабых и умеренных событий к скалярному сейсмическому моменту M_0 осуществлялся по ранее полученным [Рогожин и др., 2011] корреляционным зависимостям между $\lg M_0$ и региональным камчатским энергетическим классом K_ϕ , принятым в 1978–2006 гг. в Региональном каталоге землетрясений Камчатки (www.emsd.ru):

$$\lg M_0 = (1.313 \pm 0.078)K_\phi + 0.424 \pm 1.092, 11.8 \leq K_\phi \leq 15, R_c = 0.852;$$

$$\lg M_0 = 0.75K_\phi + 7.36, K_\phi \leq 11.8.$$

По соответствующим столбцам табл. 1. были построены регрессионные зависимости между параметрами афтершокового процесса $M_{0\text{sum aft}}$ и T_{aft} и моментной магнитудой главного события M_W (рис. 4). При построении использовался обычный метод наименьших квадратов, поскольку оценки суммарного скалярного сейсмического момента $M_{0\text{sum aft}}$, высвободившегося в афтершоках, и продолжительности афтершокового процесса T_{aft} получены с заведомо большими ошибками, чем значения соответствующих моментных магнитуд главных событий M_W . В аналитической форме эти регрессионные зависимости имеют вид:

$$\lg(M_{0\text{sum aft}}) = (1.57 \pm 0.11)M_W + 7.025 \pm 0.23, R_c = 0.932; \quad (2)$$

$$\lg T_{\text{aft}} = (0.645 \pm 0.064)M_W + 2.394 \pm 0.42, R_c = 0.879, \quad (3)$$

где R_c – коэффициент линейной корреляции.

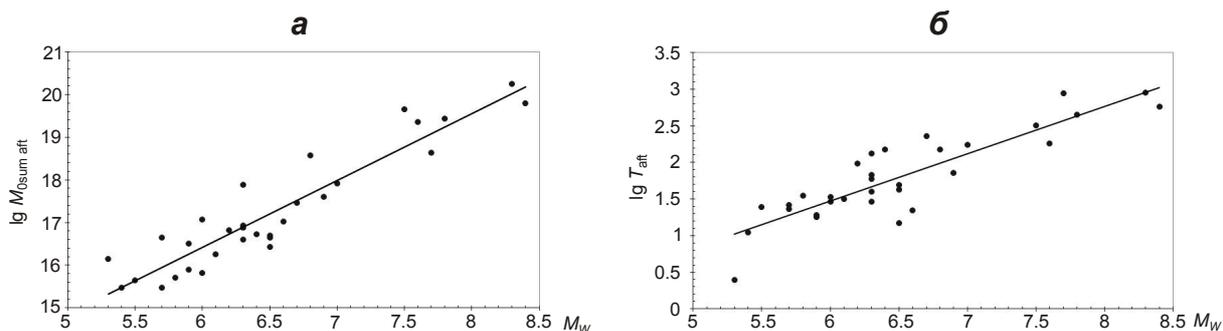
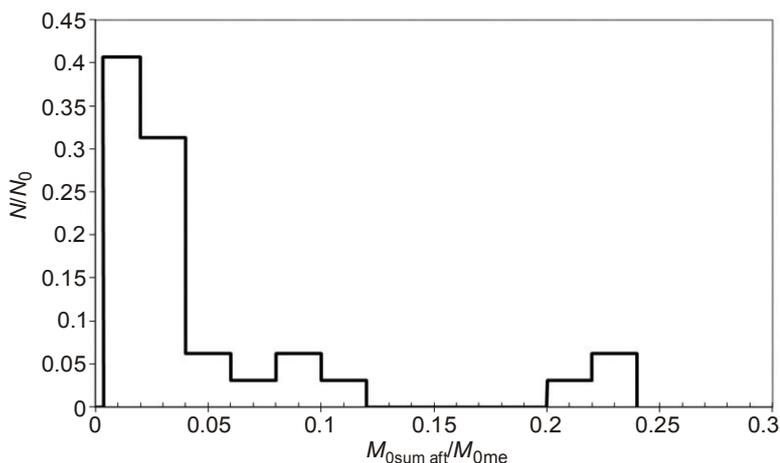


Рис. 4. Регрессионные зависимости между моментной магнитудой M_W главных событий и параметрами афтершоковых последовательностей $\lg M_{0\text{sum aft}}$ (а) и $\lg T_{\text{aft}}$ (б)

Корреляционная связь между названными параметрами достаточно тесная. При этом более низкий коэффициент корреляции для T_{aft} представляется вполне естественным, поскольку, как правило, трудно или даже практически невозможно установить точные временные границы афтершокового процесса. При этом периферийные по времени афтершоки обычно сравнительно слабы и вносят незначительный вклад в суммарный скалярный сейсмический момент афтершоков.

Одновременно следует отметить, что относительная интенсивность афтершокового процесса, определяемая нами как отношение $M_{0\text{sum aft}}/M_{0\text{me}}$ ($M_{0\text{me}}$ – скалярный сейсмический момент главного события), не обнаруживает никакой значимой зависимости ни от M_W главного события, ни от механизма его очага или пространственного положения его гипоцентра. На рис. 5 приведена гистограмма распределения всех рассмотренных землетрясений по величине отношения $M_{0\text{sum aft}}/M_{0\text{me}}$. Видно, что для более чем 70% землетрясений относительная интенсивность афтершокового процесса лежит в пределах $0.0038 \leq M_{0\text{sum aft}}/M_{0\text{me}} \leq 0.04$, т.е. в подавляющем большинстве случаев в афтершоках высвобождается не более 4% от скалярного момента главного события. Эмпирическое распределение на рис. 5 является примером распределения с “тяжелыми хвостами”, достаточно типичного для сейсмологии [Родкин, Писаренко, 2007].

Рис. 5. Распределение землетрясений Курило-Камчатского региона по величине отношения $M_{0\text{sum aft}}/M_{0\text{me}}$



Следует отметить, что аналогичные оценки по формулам (2) и (3) для других регионов Земли будут, вероятно, демонстрировать близкую по величине R_c корреляционную связь $\lg(M_{0\text{sum aft}})$ и $\lg T_{\text{aft}}$ с M_W , но параметры этих зависимостей могут существенно отличаться от приведенных выше. То же, вероятно, будет касаться и вида распределения, представленного на рис. 5.

Обсуждение результатов

Рассмотрим расчетный способ оценки $M_{0\text{sum aft}}$ – суммарного скалярного сейсмического момента, высвобождаемого в афтершоках. Для произвольного землетрясения с моментной магнитудой $M_{W\text{me}}$ мы можем представить суммарный скалярный сейсмический момент всех афтершоков как

$$M_{0\text{sum aft}} = \sum M_{0i}, \quad (4)$$

где суммирование ведется по всем афтершокам.

Используя формулу (1) и взяв десятичный логарифм от левой и правой частей выражения (4), с учетом закона повторяемости его можно переписать в виде:

$$\lg M_{0\text{sum aft}} = \lg \sum N(M_{Wi}) 10^{1.5M_{Wi}+9.1}.$$

Здесь $\lg N(M_{Wi}) = -b_W M_{Wi} + A_W$, где b_W , A_W – параметры среднего закона повторяемости по моментной магнитуде, построенного по всей афтершоковой последовательности. Далее, вынося постоянный множитель $10^{9.1+A_W}$ за знак суммы и переходя от суммы к интегралу по M_W , имеем

$$\lg M_{0\text{sum aft}} = \lg \frac{1}{\Delta M_W} \int_{-\infty}^{M_{W\text{aft max}}} 10^{(1.5-b_W)M_W} dM_W + 9.1 + A_W,$$

или

$$\lg M_{0\text{sum aft}} = \lg \int_{-\infty}^{M_{W\text{aft max}}} \exp[\ln 10(1.5-b_W)M_W] dM_W + 9.1 + A_W - \lg \Delta M_W.$$

Здесь $M_{W\text{aft max}}$ – моментная магнитуда самого сильного афтершока.

В итоге, после интегрирования и логарифмирования правой части получим общую формулу, связывающую суммарный скалярный сейсмический момент афтершоков с моментной магнитудой самого сильного афтершока и параметрами среднего по всей афтершоковой последовательности графика повторяемости b_W и A_W :

$$\lg M_{0\text{sum aft}} = (1.5-b_W)M_{W\text{aft max}} + 9.1 + A_W - \lg \Delta M_W - \lg [\ln 10(1.5-b_W)]. \quad (5)$$

Воспользовавшись в выражении (5) еще раз формулой (1), получим в явном виде величину суммарного скалярного сейсмического момента афтершоков

$$M_{0\text{sum aft}} = \frac{10^{-b_W M_{W\text{aft max}} + A_W} M_{0\text{aft max}}}{\Delta M_W \ln 10(1.5-b_W)}, \quad (6)$$

где $M_{0\text{aft max}}$ – скалярный сейсмический момент самого сильного афтершока. Из последней формулы следует, что наклон графика повторяемости всегда должен быть строго меньше 1.5.

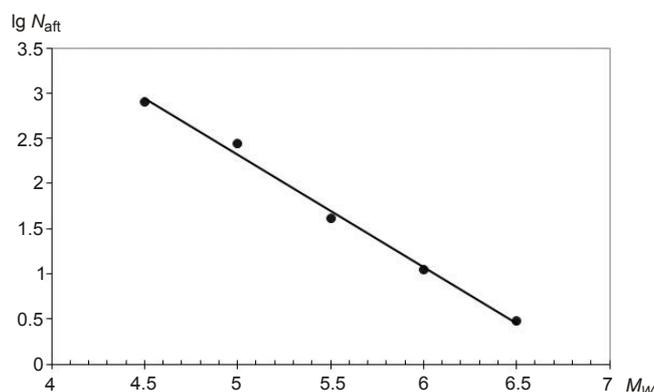
Таким образом, в теоретическом плане суммарный скалярный сейсмический момент афтершоков определяется моментной магнитудой и соответственно скалярным сейсмическим моментом сильнейшего афтершока и параметрами графика повторяемости, построенного по всей афтершоковой последовательности.

Проиллюстрируем применение формулы (6) на примере рассмотренных выше парных Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. Сильнейшим афтершоком первого из них было событие с магнитудой $M_W = 6.7$ ($M_0 = 1.41^{19}$ Н·м), произошедшее 15.11.2006 г. приблизительно в 11 ч 41 мин, т.е. через 27 мин после главного события.

В табл. 3 представлено распределение афтершоков по магнитудам в пределах всей афтершоковой последовательности с 15.11.2006 по 27.06.2008 гг., из которой следует, что магнитуда $M_W = 4.0$ в используемом каталоге является заведомо непредставительной. Построенный в соответствии с таблицей график повторяемости приведен на рис. 6.

Таблица 3. Распределение афтершоков с 15.11.2006 г. по 27.06.2008 г. по магнитудам

Интервал M_W	M_W	N	$\lg N$
3.9–4.2	4.0	189	2.2765
4.25–4.75	4.5	810	2.9085
4.75–5.25	5.0	277	2.4425
5.25–5.75	5.5	41	1.6128
5.75–6.25	6.0	11	1.0414
6.25–6.75	6.5	3	0.4771

Рис. 6. График повторяемости для афтершоковой последовательности Симуширских землетрясений 2006–2007 гг.

В аналитической форме построенный методом ортогональной регрессии график повторяемости имеет вид $\lg N(M_W) = -(1.257 \pm 0.058)M_W + 8.609 \pm 0.400$, $R_c = 0.997$ и, таким образом, $b_W = 1.257 \pm 0.058$, $A_W = 8.609 \pm 0.400$.

Подставляя параметры графика повторяемости и значение магнитуды сильнейшего афтершока в формулу (6), получим $M_{0\text{sum aft}} = 7.78 \cdot 10^{19}$ Н·м. Напомним, что значение $M_{0\text{sum aft}}$ по результатам прямого расчета составило $6.31 \cdot 10^{19}$ Н·м, что приблизительно на 20% ниже теоретической оценки.

Результаты аналогичных расчетов, выполненных для Шикотанского землетрясения 04.10.1994 г. ($M_W = 8.3$), также вполне удовлетворительны: по прямой оценке $M_{0\text{sum aft}}$ составляет $1.767 \cdot 10^{20}$ Н·м, при оценке по формуле (6) – $2.68 \cdot 10^{20}$ Н·м.

Заключение

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. На основании анализа афтершоковых последовательностей 32 сильных и умеренных ($5.3 \leq M_W \leq 8.3$) Курило-Камчатских землетрясений были получены прямые оценки суммарного скалярного сейсмического момента, высвободившегося в афтершоках, и продолжительности афтершокового процесса в днях от момента главного события.

2. Установлена достаточно тесная корреляционная связь между десятичными логарифмами $M_{0\text{sum aft}}$ и T_{aft} и моментной магнитудой главного события и получены соответствующие корреляционные зависимости для Курило-Камчатского региона (формулы (2), (3)).

3. Отмечено, что относительная интенсивность афтершокового процесса, определяемая нами как отношение $M_{0\text{sum aft}}/M_{0\text{me}}$, не обнаруживает значимой зависимости ни от магнитуды главного события, ни от механизма его очага или пространственного положения его гипоцентра.

4. Эмпирическое распределение всех рассмотренных землетрясений по отношению $M_{0\text{sum aft}}/M_{0\text{me}}$ (см. рис. 5) при $0.0038 \leq M_{0\text{sum aft}}/M_{0\text{me}} \leq 0.04$ имеет резкий максимум. Таким образом, около 72% всех рассмотренных сейсмических событий характеризуется

относительной интенсивностью афтершокового процесса в пределах 0.38–4.0% от M_0 главного события. В целом, отношение $M_{0\text{sum aft}}/M_{0\text{me}}$ по всем событиям не превосходит 0.234.

5. Показано, что в теоретическом плане суммарный скалярный сейсмический момент афтершоков определяется моментной магнитудой и скалярным сейсмическим моментом сильнейшего афтершока и параметрами графика повторяемости, построенного по всей афтершоковой последовательности (формула (6)). Оценки $M_{0\text{sum aft}}$, выполненные с применением формулы (6) для Симуширских 2006–2007 гг. и Шикотанского 1994 г. землетрясений, показали удовлетворительное согласие с прямыми оценками, полученными суммированием скалярных моментов всех афтершоков (см. табл. 1).

Соотношения (2) и (3) могут быть полезны при предварительном анализе развития афтершокового процесса сильных землетрясений в Курило-Камчатском регионе.

Работа выполнена при частичной поддержке Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы (соглашение № 8615).

Литература

- Виноградов С.Д. Афтершоки как отражение релаксационного процесса в области, содержащей очаг землетрясения // Геофизические исследования. 2006. Вып. 6. С.46–50.
- Лутиков А.И., Донцова Г.Ю. Оценка линейных размеров очагов землетрясений Камчатки по размерам облака афтершоков // Физика Земли. 2002. № 6. С.46–56.
- Люсина А.В., Смирнов В.Б. О временной структуре афтершоковых последовательностей (на примере Аляскинского и Камчатского землетрясений) // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С.45–54.
- Люсина А.В., Смирнов В.Б. Временное группирование афтершоковых последовательностей (на примере землетрясений Коалинга 2 мая 1983 г. и Айдахо 28 октября 1983 г.) // Физика Земли. 1993. № 8. С.9–14.
- Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы интерпретации сейсмологических данных. Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С.19–50.
- Пшеничников К.В. О природе последующих толчков землетрясений // Динамика земной коры. М.: Наука, 1965. С.27–32.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука, 1985. 14 с.
- Рогожин Е.А., Йогансон Л.И., Завьялов А.Д., Захаров В.С., Лутиков А.И., Славина Л.Б., Рейснер Г.И., Овсяченко А.Н., Юнга С.Л., Новиков С.С. Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реального сейсмического прогноза. М.: Светоч Плюс, 2011. 368 с.
- Родкин М.В., Писаренко В.Ф. Распределение с тяжелыми хвостами: приложение к анализу катастроф. М.: ГЕОС, 2007. 236 с.
- Родкин В.М., Тихонов И.Н. Мегаземлетрясение в Японии 11 марта 2011 г.: величина события и характер афтершоковой последовательности // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 1. С.64–80.
- Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г. Динамика сейсмической активности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985–2000 // Вычислительная сейсмология. 2001. Вып. 32. С.162–189.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // Физика Земли. 2004. № 10. С.26–36.
- Татевосян Р.Э., Аптекман Ж.Я. Этапы развития афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений мира // Физика Земли. 2008. № 12. С.3–23.
- Федотов С.А., Чернышев С.Д., Чернышева Г.В., Викулин А.В. Уточнение границ землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$, свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология 1980. № 6. С.52–67.

- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.
- Bath M. Lateral inhomogeneities of the upper mantle // *Tectonophysics*. 1965. N 2(6). P.483–514.
- Kanamori H. The energy release of great earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. P.2981–2987.
- Kisslinger C., Jones L.M. Properties of aftershock sequences in southern California // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P.11947–11958.
- Kisslinger C. The stretched exponential function as an alternative model for aftershock decay rate // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P.1913–1921.
- Omori F. On the aftershocks // *Rep. Imp., Earthquake Invest., Comm.* 1894a. N 2. P.103–139.
- Omori F. On the aftershocks of earthquake // *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*. 1894b. V. 7. P.111–200.
- Sherbakov R., Turcotte D.L. A modified form of bath's law // *BSSA*. 2004. V. 94. P.1968–1975.
- Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geophys. Mag.* 1961. V. 30. P.521–605.
- Utsu T. Statistical features of seismicity // *International handbook of earthquake seismology* / Ed. W.H.K. Lee et al. San Diego Academic Press, 2002. P.719–732.
- Weimer S., Katsumata K. Spatial variability of seismicity parameters in aftershock zones // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P.13135–13151.

Сведения об авторах

ЛУТИКОВ Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-99-50. E-mail: ail@ifz.ru

РОДИНА Светлана Николаевна – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-92-50. E-mail: rodina@ifz.ru

TEMPORAL AND POWER PARAMETERS OF AFTERSHOCK PROCESS OF THE KURILES-KAMCHATKA EARTHQUAKES

A.I. Lutikov, S.N. Rodina

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Aftershock sequences of 32 strong and moderate Kurile-Kamchatka earthquakes of magnitude range in $5.3 \leq M_W \leq 8.3$ were analysed. The suggested criteria for selecting the moment of sequence termination were used to calculate their parameters, used further to build regressive dependencies. A close correlation was found between the moment magnitude of the main event and decimal logarithms of two characteristics - the total scalar seismic moment release during aftershock process and its duration.

It is shown that in theoretical terms, the total scalar seismic moment of aftershocks is determined by the moment magnitude and the scalar seismic moment of the strongest aftershock as well as the parameters of the recurrence plot built throughout the aftershock sequence.

Keywords: earthquakes, aftershock sequence, total scalar seismic moment, duration of aftershock sequence, Kurile-Kamchatka region.