

УДК 550.34.013.2

ВРЕМЕННЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАВКАЗА И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2017 г. А.И. Лутиков^{1,2}, Г.Ю. Донцова², С.Н. Родина¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Геофизическая служба РАН, г. Москва, Россия

На основании анализа данных об афтершоковых последовательностях двадцати трех сильных и умеренно сильных ($5.1 \leq M_W \leq 7.1$) землетрясений Кавказа и сопредельных территорий оценены продолжительность афтершоковых процессов (T_{aft}) и величина высвободившегося в ходе их развития суммарного скалярного сейсмического момента (M_{0aft}). Установленные по предложенным критериям выбора времени завершения афтершоковых последовательностей параметры M_{0aft} и T_{aft} в дальнейшем были использованы для построения регрессионных зависимостей. Выявлена значимая корреляционная связь между названными параметрами и моментной магнитудой главного события (M_{WME}). Проверка рассмотренной выборки землетрясений на выполнение эмпирического закона Бота показала, что закон в среднем выполняется. Однако разброс значений разности между магнитудами главного события и сильнейшего афтершока (ΔM) весьма значителен – при исключении парных событий $0.4 \leq \Delta M \leq 1.8$.

Ранее (2013 г.) авторами была выполнена аналогичная работа, основанная на выборке землетрясений Курило-Камчатского региона. Результаты, полученные к настоящему времени для двух сейсмоактивных регионов, позволяют заключить, что относительная интенсивность и продолжительность афтершокового процесса обратно пропорциональны сейсмической активности рассматриваемой территории. Это означает, что процессы релаксации, сопровождающие сильные сейсмические события, тем продолжительнее и интенсивнее, чем ниже средняя сейсмическая активность региона, в котором они происходят.

Этот вывод может считаться предварительным, поскольку нуждается в проверке на других сейсмоактивных территориях.

Ключевые слова: землетрясения, афтершоковые последовательности, скалярный сейсмический момент, продолжительность афтершокового процесса, Кавказский регион.

Введение

В работе [Лутиков, Родина, 2013] авторами была предложена оценка продолжительности афтершоковых последовательностей сильных и умеренно сильных Курило-Камчатских землетрясений и высвободившегося в ходе их развития суммарного скалярного сейсмического момента. Названную статью предварял краткий обзор работ, так или иначе относящихся к рассматриваемой проблеме, в заключающей части которого было отмечено отсутствие сколько-либо строгих критериев, позволяющих точно установить пространственно-временные границы афтершокового процесса. В данном исследовании аналогичная попытка предпринята для землетрясений Кавказа и северо-восточной Анатолии на основе анализа афтершоковых последовательностей двадцати трех событий с $5.1 \leq M_W \leq 7.1$ (рис. 1).

Прежде чем приступить к изложению самой работы, сделаем некоторые предварительные замечания. Основной критерий, по которому то или иное сейсмическое событие относится нами к афтершокам, – его пространственно-временная близость к более сильному землетрясению, называемому главным событием.

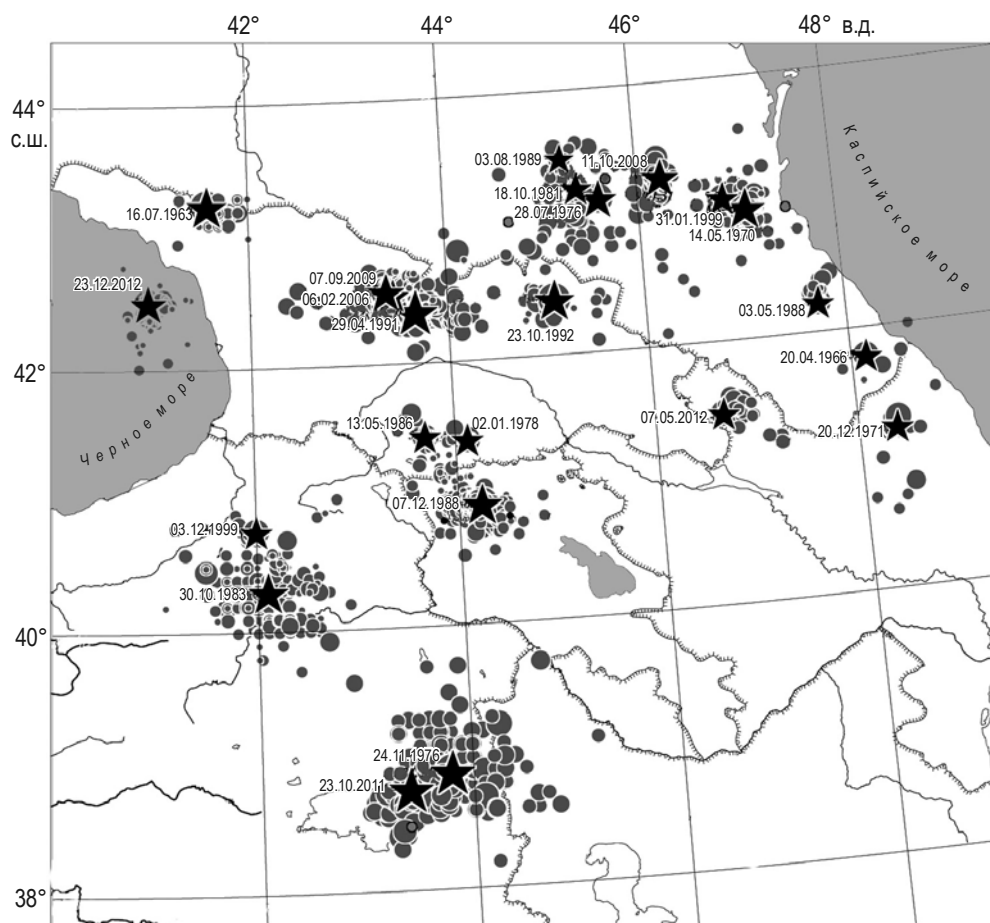


Рис. 1. Схема расположения эпицентров рассматриваемых в статье землетрясений Кавказа и северо-восточной Анатолии и их афтершоковых последовательностей. Звездочки – эпицентры землетрясений с указанием даты события; кружки – эпицентры афтершоков. Диаметр кружков и размер звездочек пропорциональны магнитудам событий, значение которых см. в приводимой ниже таблице

Задача выделения афтершоковых последовательностей сильных землетрясений не является тривиальной. Это связано с тем, что невозможно строго установить пространственные границы афтершоковой области, которая как и очаговая область (в отличие от очага), по мнению С.А. Федотова [Федотов и др., 1980], по своей природе четких границ не имеет. С другой стороны, как было отмечено в [Арефьев, Быкова, Вакарчук, 2011], сильное землетрясение, близкое по магнитуде к M_{\max} , существенно меняет сейсмотектоническую обстановку в своей очаговой зоне и иногда надолго повышает общий уровень сейсмичности прилегающих территорий. Таким образом, и во временной области часто оказывается невозможным точно указать время окончания афтершоковой последовательности.

Широко известный эмпирический закон Бота [Bath, 1965] определяет приближенное соотношение между магнитудами сильнейшего афтершока ($M_{\max \text{ aft}}$) и главного события (M_{ME}) в виде $\Delta M = M_{ME} - M_{\max \text{ aft}} \approx 1$. Если $\Delta M < 0.5$, то имеет смысл говорить уже не о сильнейшем афтершоке, а о парных событиях. Проведенный в [Kisslenger, Jones, 1991; Sherbakov, Turcotte, 2004] анализ показал, что величина ΔM меняется в пределах 0.6–1.7. Авторы работы [Татевосян, Антекман, 2008] отмечают, что закон Бота не соблюдается более чем для половины рассмотренных ими землетрясений. В сущности,

закон Бота указывает лишь на то, что магнитуда афтершоков должна быть заметно меньше магнитуды главного события.

Резюмируя сказанное, отметим, что, на наш взгляд, ради определенности следует вводить те или иные конвенционные ограничения окончания афтершокового процесса. Прежде всего, это касается времени его завершения, поскольку пространственные размеры афтершоковой последовательности легко оценить приближенно по облаку афтершоков.

Исходные данные

Для анализируемых в работе землетрясений Кавказа и северо-восточной Анатолии в целях решения поставленной задачи были составлены приводимые в таблице каталоги главных событий и афтершоковых последовательностей. Таблица содержит также оценки продолжительности афтершоковых процессов и суммарного скалярного сейсмического момента.

Каталог рассматриваемых в статье землетрясений с оценками продолжительности их афтершоковых процессов (T_{aft} , дни) и высвободившегося в афтершоках суммарного скалярного сейсмического момента (M_{0aft})

Дата события	Главное событие (ME)				Афтершоковая последовательность (aft)				
	φ_{ME}	λ_{ME}	M_{WME}	M_{0ME}	$M_{Wmax\ aft}$	M_{0aft}	M_{0aft}/M_{0ME}	$\lg M_{0aft}$	T_{aft}
16.07.1963 г.	43.25	41.58	6.4	4.59E+18	4.9	5.3E+16	0.011562	16.72463	167
20.04.1966 г.	41.79	48.15	5.5	2.25E+17	4.4	5.4E+15	0.023978	15.73241	60
14.05.1970 г.	43	47.09	6.5	6.0E+18	5.6	6.8E+17	0.113345	17.83255	563
20.12.1971 г.	41.23	48.38	5.6	3.04E+17					
20.12.1971 г.	41.3	48.4	5.4	1.67E+17					
			5.7	4.71E+17		6.7E+16	0.14224	16.82609	105
28.07.1976 г.	43.17	45.6	6.2	2.59E+18	4.6	6.16E+16	0.023797	16.78983	33
24.11.1976 г.	38.9	43.8	7.0	4.16E+19	5.3	1.31E+18	0.031539	18.11794	1171.5
02.01.1978 г.	41.41	44.12	5.6	2.77E+17	4.2	5.79E+15	0.020898	15.76259	18.5
18.10.1981 г.	43.26	45.38	5.6	2.83E+17	4.4	2.15E+16	0.076085	16.33308	35
30.10.1983 г.	40.31	42.1	6.6	8.70E+18	5.5	6.17E+17	0.070917	17.79027	406
13.05.1986 г.	41.45	43.7	5.7	4.97E+17	4.8	3.41E+16	0.068564	16.53246	123
03.05.1988 г.	42.23	47.73	5.3	9.99E+16	4.5	2.35E+16	0.235733	16.37199	83.5
07.12.1988 г.	40.92	44.23	6.7	1.62E+19	5.8	8.12E+17	0.050111	17.90945	420
03.08.1989 г.	43.49	45.23	5.1	6.25E+16	4.3	6.87E+15	0.109852	15.83669	3
29.04.1991 г.	42.4	43.67	6.9	3.34E+19	6.2	6.18E+18	0.184881	18.79064	560
23.10.1992 г.	42.43	45.08	6.4	4.93E+18	4.6	3.47E+16	0.007045	16.54073	161
31.01.1999 г.	43.09	46.87	5.7	4.46E+17	5.3	1.8E+17	0.402691	17.25431	276
03.12.1999 г.	40.77	42	5.7	3.97E+17	4.5	4.73E+16	0.11916	16.67492	167.5
06.02.2006 г.	42.53	43.45	5.3	1.06E+17	4.1	8.64E+15	0.081531	15.93663	203
11.10.2008 г.	43.29	46.25	5.8	6.56E+17	5.3	3.61E+17	0.549673	17.55701	497.5
07.09.2009 г.	42.56	43.38	6.0	1.16E+18	4.8	5.84E+16	0.050305	16.76607	287.5
23.10.2011 г.	38.74	43.4	7.1	6.27E+19	6.0	4.85E+18	0.077408	18.68605	1012.5
07.05.2012 г.	41.46	46.68	5.9	7.78E+17	5.3	1.99E+17	0.256029	17.29927	57
23.12.2012 г.	42.52	40.97	5.7	5.60E+17					
25.12.2012 г.	42.44	40.97	5.4	1.46E+17					
			5.8	7.06E+17		2.65E+16	0.03759	16.42387	159

В таблице и далее в тексте используются следующие обозначения. Для главного события (подстрочный индекс – ME от англоязычного *Main Event*): φ_{ME} , λ_{ME} – широта и

долгота, M_{WME} – моментная магнитуда, M_{0ME} – скалярный сейсмический момент; для событий афтершоковой последовательности: $M_{Wmax\ aft}$ – моментная магнитуда сильнейшего афтершока, M_{0aft} – высвободившийся в афтершоках суммарный скалярный сейсмический момент, T_{aft} – продолжительность афтершоковой последовательности в днях.

Информационной базой для анализа служили Общий каталог землетрясений Кавказа [Рогожин и др., 2013]; скомпилированный каталог землетрясений Кавказа для территории в границах 40.0° – 48.0° с.ш., 35.0° – 50.0° в.д. [Рогожин и др., 2013]; Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.; сборники “Землетрясения в СССР” за 1963, 1966, 1970, 1971, 1976, 1978, 1981, 1983, 1986, 1988, 1989 гг., “Землетрясения в России” за 2009, 2011, 2012 гг., “Землетрясения Северной Евразии” за 1991, 1992, 1999, 2006, 2008 гг.; Унифицированный каталог землетрясений Северной Евразии под редакцией В.И. Уломова и Н.В. Кондорской (www.ifz.ru); Оперативный сейсмологический каталог Геофизической службы РАН (OSC, www.gsras.ru); Каталог тензоров центра сейсмического момента (CMT), Гарвардский университет, США (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>; [Dziwonski, Chou, Woodhouse, 1981]).

Для событий 2012 г. использовались данные службы срочных донесений Геофизической службы РАН (<http://www.ceme.gsras.ru/>).

Для анализа афтершоковых последовательностей землетрясений северо-восточной Анатолии привлекались Каталог землетрясений Геологической службы США (NEIC) (http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.htm), Каталог Европейского Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC, <http://www.emsc-csem.org/>).

Содержащиеся в перечисленных каталогах данные проверялись с целью взаимного дополнения и исключения недостоверной информации. В каталогах сейсмические события характеризовались разными типами магнитуд (M) или энергетическим классом (K_P). Поэтому предварительно все составленные каталоги афтершоковых последовательностей были унифицированы по магнитуде M_W для событий, у которых отсутствовали прямые определения моментной магнитуды или скалярного сейсмического момента. Для такой унификации был получен ряд корреляционных зависимостей между различными типами магнитуд и M_W или $\lg M_0$, построенных с применением ортогональной регрессии.

Для событий, характеризовавшихся энергетическим классом (K_P) [Раутиан, 1960], по 27 значениям прямых определений M_W и $\lg M_0$ слабых и умеренных землетрясений Северного Кавказа $8.0 \leq K_P \leq 12.9$ ($2.7 \leq M_W \leq 4.5$) [Лутиков, Габсатарова, 2016] было получено соотношение между K_P и $\lg M_0$:

$$\lg M_0 = (0.730 \pm 0.086) K_P + 7.340 \pm 1.013, \quad R_C = 0.863. \quad (1)$$

Ниже приводятся другие использованные корреляционные соотношения.

По 69 парам событий была получена зависимость между используемой в каталоге NEIC магнитудой mb_{NEIC} и магнитудой M_S в виде

$$M_S = (1.308 \pm 0.117) mb_{NEIC} - (1.903 \pm 0.601), \quad R_C = 0.8136. \quad (2)$$

Магнитуда M_{PSP} (OSC) пересчитывалась в магнитуду M_S по корреляционной формуле, полученной по 98 парам событий:

$$M_S = (1.420 \pm 0.080) M_{PSP} - (2.852 \pm 0.460), \quad R_C = 0.8853. \quad (3)$$

Магнитуда $mb_{ССД}$ из каталога службы срочных донесений Геофизической службы РАН сначала пересчитывалась в магнитуду mb_{NEIC} по корреляционной формуле, полученной по 23 парам событий:

$$mb_{NEIC} = (0.938 \pm 0.128) mb_{ССД} + (0.193 \pm 0.641), \quad R_C = 0.851, \quad (4)$$

а затем – в магнитуду M_S по формуле (2).

Магнитуда M_L из каталога *EMSC* сначала пересчитывалась в энергетический класс K_P по корреляционной формуле, полученной по 31 паре событий:

$$K_P = (2.151 \pm 0.210)M_L + (2.221 \pm 0.805), R_C = 0.888, \quad (5)$$

а затем – в $\lg M_0$ по формуле (1).

Связь между магнитудой M_S и $\lg M_0$ для Кавказского региона была предложена в работе [Лутиков, Габсатарова, 2016] в виде:

$$\lg M_0 = (1.31 \pm 0.15)M_S + (10.28 \pm 0.66), R_C = 0.865. \quad (6)$$

Таким образом, применение формул (1)–(6) обеспечило полную унификацию составленных авторами каталогов афтершоков сильных и умеренных землетрясений рассматриваемого региона по величине M_0 всех слабых и умеренных ($M \leq 5.0$) сейсмических событий.

Постановка задачи и методы анализа

Цель настоящей работы – оценка продолжительности афтершоковых последовательностей сильных и умеренных землетрясений ($5.1 \leq M_W \leq 7.1$) Кавказа и северо-восточной Анатолии и высвободившегося в ходе их развития суммарного скалярного сейсмического момента.

Прежде чем перейти к рассмотрению экспериментальных данных, дадим определение очага землетрясения, исходя из представления об очаге как о дислокации [Ризниченко, 1985] или внезапной подвижке горных пород по некоторой поверхности ослабленной прочности [Юнга, 1990]. В соответствии с этим, под очагом землетрясения будем понимать разрыв или систему разрывов, которые возникли в результате главного толчка. Согласно такому определению, очаг землетрясения занимает вполне определенный объем вмещающего пространства, а само понятие очага оказывается, как уже было сказано выше, вообще говоря, не тождественным понятию очаговой области.

Выделение афтершоковых областей так же, как и в [Лутиков, Родина, 2013], осуществлялось оконным способом¹ [Gardner, Knopoff, 1974], как правило, по афтершокам первого месяца с обязательным последующим визуальным контролем [Лутиков, Донцова, 2002]. При этом, конечно же, могло быть пропущено некоторое число периферийных афтершоков, чей вклад в суммарный скалярный сейсмический момент афтершокового процесса незначителен. Отметим, что в работах А.Г. Прозорова [1982, 1986] также использовались оконные методы выделения афтершоковых последовательностей.

Изложим вкратце некоторые иные подходы к выделению афтершоковых последовательностей. В [Reasenber, 1985] предложен кластерный метод, позволяющий выделять не только афтер-, но и форшоки. Для определения временных рамок последовательности используется закон Омори. К подобному типу кластерного метода принадлежит и алгоритм Г.М. Молчана и О.Е. Дмитриевой [1991; Molchan, Dmitrieva, 1992]. Отмечая, что ручной (визуальный) способ выделения афтершоков субъективен и сложно применим при большом потоке данных, авторы предлагают минимаксный метод, в котором число пропущенных афтершоков и число фоновых толчков (принятых за афтершоки заданного события) минимальны и равны. Наибольшее распространение вышеупомянутый метод получил в результате его реализации в программе, разработанной В.Б. Смирновым² [2009]. Метод был успешно применен для территорий Северного Кавказа [Смирнов, Габсатарова, 2000], Курил [Andreeva, Levin, Sasorova, 2009], Камчатки [Saltykov, Kravchenko, 2010; Баранов, Чебров, 2012] и др.

¹ Использовались корреляционные зависимости размера эпицентрального поля и продолжительности последовательности от магнитуды главного события.

² Далее – программа Смирнова.

Отметим также работу [Радзиминович, Очковская, 2013], посвященную выделению афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Декластеризация была выполнена по программе Смирнова; для контроля проводилась ручная обработка. Сопоставление результатов показало, что различие в выделении афтершоков этими двумя методами составило примерно 25 %. Было отмечено, что в случае изучения индивидуальных серий визуальный контроль (ручная обработка) необходим.

В настоящей работе программа Смирнова использовалась для выделения афтершоковых последовательностей двух сильных землетрясений Кавказа – Рачинского 29.04.1991 г. и Курчалойского 11.10.2008 г. – с целью сопоставления полученных результатов с результатами использованного авторами метода анализа.

Приблизительным критерием окончания афтершокового процесса был его выход на фоновый уровень, определяемый, как правило, по временному ряду высвобождения скалярного сейсмического момента за некоторое время до возникновения главного события в очаговой области, оконтуривающей очаг по афтершокам первых месяцев (интервал дискретизации – 1 мес.). Это время (как до, так и после главного события) выбиралось тем большим, чем больше была магнитуда главного события. Поскольку использование такого критерия иногда допускало известную неоднозначность определения времени окончания процесса, последнее уточнялось из условия отсутствия в течение месяца сейсмических событий с магнитудой, большей или равной низшей представительной магнитуде используемого каталога.

Проиллюстрируем процесс получения анализируемых оценок на примере Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г. ($M_W=5.8$). С учетом расположения эпицентров афтершоков этого события (рис. 2) пространственная область анализа афтершокового процесса была ограничена по площади координатами $43.0^\circ \leq \varphi \leq 43.5^\circ$, $45.7^\circ \leq \lambda \leq 46.6^\circ$; по глубине ограничение составило 50 км.

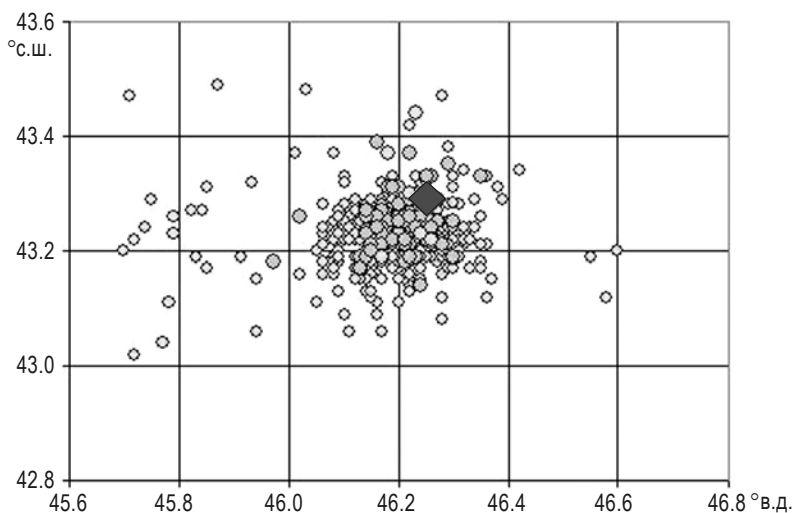


Рис. 2. Схема расположения инструментального эпицентра главного события (ромб) и эпицентров афтершоков (кружки) Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г. ($M_W=5.8$). Диаметр кружков пропорционален магнитудам афтершоков $2.2 \leq M_W \leq 5.3$

Временные ряды суммарного скалярного сейсмического момента (M_{0aft}) в области анализа с шагом дискретизации 3 мес. рассматривались за период с 1998 по 2011 г. включительно. Продолжительность периода анализа сейсмического процесса составляет 14 лет и позволяет достаточно надежно установить фоновый уровень высвобождаемого

скалярного сейсмического момента. Сводный каталог, унифицированный по магнитуде M_S , насчитывал всего 807 афтершоков с магнитудами $2.2 \leq M_S \leq 5.3$. В это число включено и само Курчалойское землетрясение 11.10.2008 г. ($M_W=5.8$) и его сильный афтершок ($M_W=5.3$), отмеченный в тот же день. На рис. 3, а представлен временной ряд $\lg M_{0aft}$ за 14 лет с трехмесячным шагом дискретизации.

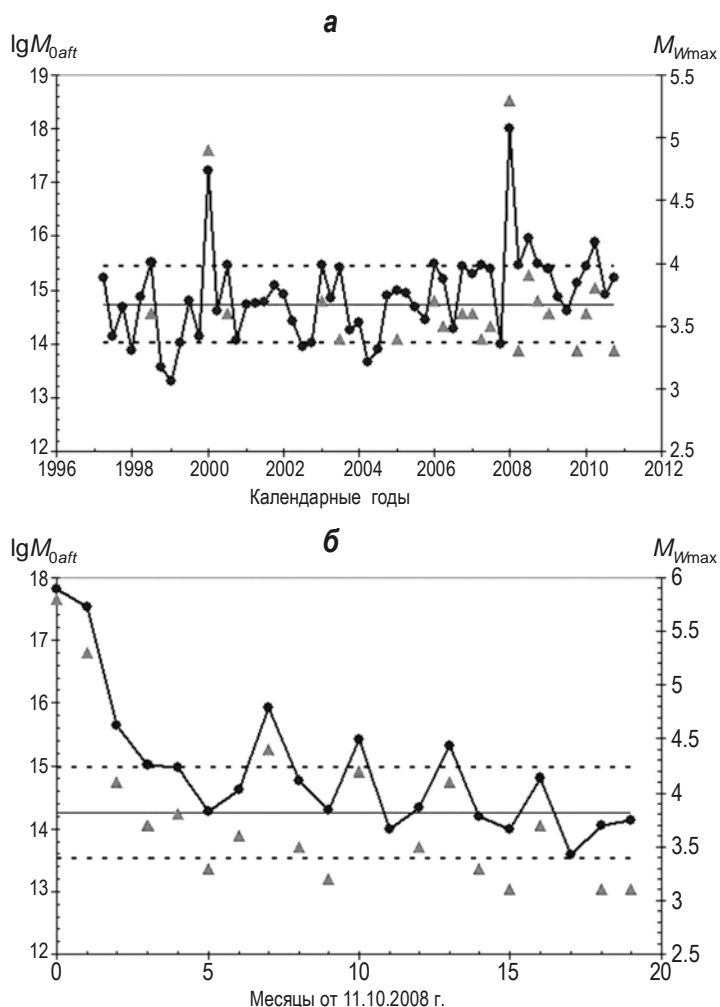


Рис. 3. Временные ряды $\lg M_{0aft}$, построенные для 1998–2011 гг. с шагом дискретизации 3 мес. (а) и для интервала от начала афтершокового процесса землетрясения 11.10.2008 г. по конец 2011 г. с шагом дискретизации 1 мес. (б). Сплошные кривые – временные ряды (левая ось ординат); треугольники – максимальные моментные магнитуды сейсмических событий на каждом шаге дискретизации (правая ось). Сплошная прямая – средние значения временного ряда; штриховые – границы коридора стандартных отклонений

Средние значения и стандартные отклонения временного ряда рассчитаны для периода с 1998 г. по 10.10.2008 г., т.е. для всего временного интервала, предшествовавшего возникновению Курчалойского землетрясения, поскольку относительно короткое и неглубокое сейсмическое затишье, которое наблюдалось в 2005 и 2008 гг., не внесло заметных искажений во временной ход высвобождения M_{0aft} в афтершоковой области. При этих расчетах точка, включавшая сильное событие 11.10.2000 г. ($M_W=5.3$), была исключена как явно превосходящая фон. Определенный по этому периоду времени средний фоновый уровень высвобождения M_{0aft} составил 14.73 ± 0.72 .

Обзорный временной ряд на рис. 3, а позволяет оценить фоновый уровень M_{0aft} и величину стандартного отклонения временного ряда, но вследствие его недостаточной детальности не позволяет надежно определить время окончания афтершокового процесса. Для этой цели использовался временной ряд $\lg M_{0aft}$, построенный от начала афтершокового процесса землетрясения 11.10.2008 г. по май 2010 г. с шагом дискретизации 1 мес. (рис. 3, б). Поскольку шаг дискретизации был уменьшен в три раза, то средний фоновый уровень M_{0aft} также уменьшился и составил 14.25.

По представленному на рис. 3 временному ряду $\lg M_{0aft}$ продолжительность афтершокового процесса (T_{aft}) оценена приблизительно в 16 мес. от его начала; после уточнения по каталогу афтершоков с точностью до дня она была принята равной приблизительно 497.5 дням. Такой выбор нуждается в некотором пояснении. За окончание афтершокового процесса принимается не первое достижение графиком $\lg M_{0aft}$ среднего фонового значения, а последний всплеск активности, приближающийся к верхней границе коридора стандартных отклонений. Для обоснования выбора можно сослаться, например, на работу [Родкин, Тихонов, 2011], где показано, что афтершоковые последовательности представляют собой совокупность трендовых изменений активности, в рамках которых существуют специфические всплески, которые сопровождаются увеличением числа и энергии событий. На рис. 3 наблюдается именно такая серия “специфических всплесков активности”.

Сравнение наших определений продолжительности афтершокового процесса и оценок M_{0aft} Курчалойского землетрясения с аналогичными характеристиками, полученными по программе Смирнова, показало, что определения продолжительности афтершокового процесса (с учетом соглашения о прерывании афтершоковой последовательности после более чем месячного перерыва) идентичны, а оценки M_{0aft} близки, составляя $3.32 \cdot 10^{17}$ Н·м по программе Смирнова и $3.61 \cdot 10^{17}$ Н·м по нашим определениям.

Подобные результаты были получены и при анализе афтершоков Рачинского землетрясения 29.04.1991 г.: по программе Смирнова M_{0aft} составило $5.70 \cdot 10^{18}$ Н·м, а T_{aft} – 549 дней; по нашим определениям $M_{0aft} = 6.18 \cdot 10^{18}$ Н·м, $T_{aft} = 560$ дней.

Незначительные расхождения по оценке M_{0aft} и T_{aft} для Курчалойского и Рачинского землетрясений обусловлены некоторым различием в идентификации афтершоков при их визуальном и машинном выделении.

По нашему мнению, уместно отметить, что землетрясение 15.06.1991 г. ($M_W = 6.2$) идентифицируется как сильнейший афтершок Рачинского землетрясения и в результате применения для выделения афтершоков программы Смирнова, и использованного нами визуального способа. Это событие идентифицируется как афтершок и в ряде других работ, посвященных Рачинскому землетрясению (см., например, [Арефьев, 2003; Рогожин, 2012]). Однако в недавней работе С.В. Баранова и И.П. Габсатаровой оно выделено в самостоятельное сейсмическое событие на основании того, что “через 39 суток после основного толчка количество афтершоков стало убывать экспоненциально и через 46.5 суток, к моменту второго Рачинского землетрясения (имеется в виду афтершок 15 июня), афтершоки практически прекратились” [Баранов, Габсатарова, 2015, с.141]. Это заключение, на наш взгляд, представляется малообоснованным.

Известно [Лутиков, 2007; Рогожин и др., 2016], что перед сильным афтершоком, удаленным на некоторое время от основного толчка, внутри афтершоковой последовательности всегда возникает фаза сейсмического затишья, которая искажает приблизительно соответствующий закону Омори [Omori, 1894; Utsu, 1961] ход афтершокового процесса.

Как уже отмечалось, авторами рассмотрены афтершоковые последовательности двадцати трех сильных и умеренных землетрясений Кавказа и северо-восточной Анатолии в интервале магнитуд $5.1 \leq M_W \leq 7.1$ (см. рис. 1 и таблицу). Оценены их продолжительности во времени T_{aft} (в днях) и суммарные скалярные сейсмические моменты M_{0aft} , высвободившиеся в ходе развития афтершокового процесса.

Для анализа афтершоковых последовательностей землетрясений северо-восточной Анатолии привлекались данные каталога землетрясений Геологической службы США (NEIC) и каталога Европейского Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC). Также были использованы Каталог CMT (www.globalcmt.org) и Унифициро-

ванный каталог землетрясений Северной Евразии под редакцией В.И. Уломова и Н.В. Кондорской.

Переход от магнитуд слабых и умеренных землетрясений ($M_S \leq 5.1$) к скалярному сейсмическому моменту (M_0) осуществлялся в соответствии с процедурой, описанной в разделе “Исходные данные”. Для более сильных ($M_W \geq 5.2$) землетрясений скалярный момент с 1976 г. брался непосредственно из каталогов *СМТ* или *NEIC*.

Для всех землетрясений до 1976 г. при определении M_0 использовалось соотношение (6); исключение составляло Дагестанское землетрясение 14.05.1970 г. ($M_S=6.6$), для которого имелось прямое определение M_0 [Дагестанское..., 1980].

Анализ экспериментальных данных

Карта эпицентров рассматриваемых в работе землетрясений Кавказа и северо-восточной Анатолии и их афтершоковых последовательностей представлена выше на рис. 1. Каталог этих событий и полученные нами оценки продолжительности их афтершоковых процессов (в днях) и высвободившегося в афтершоках суммарного скалярного сейсмического момента (M_{0aft}) приведены в таблице на с. 22. Отметим, что встречающиеся в таблице парные землетрясения рассматривались как одно событие; при этом продолжительность афтершоковых процессов парных землетрясений суммировалась, а моментная магнитуда определялась по сумме их скалярных моментов с использованием формулы Канамори [Kanamori, 1977].

Регрессионные зависимости между моментной магнитудой M_W главного события и параметров афтершоковых последовательностей $\lg M_{0aft}$ и $\lg T_{aft}$ приведены на рис. 4.

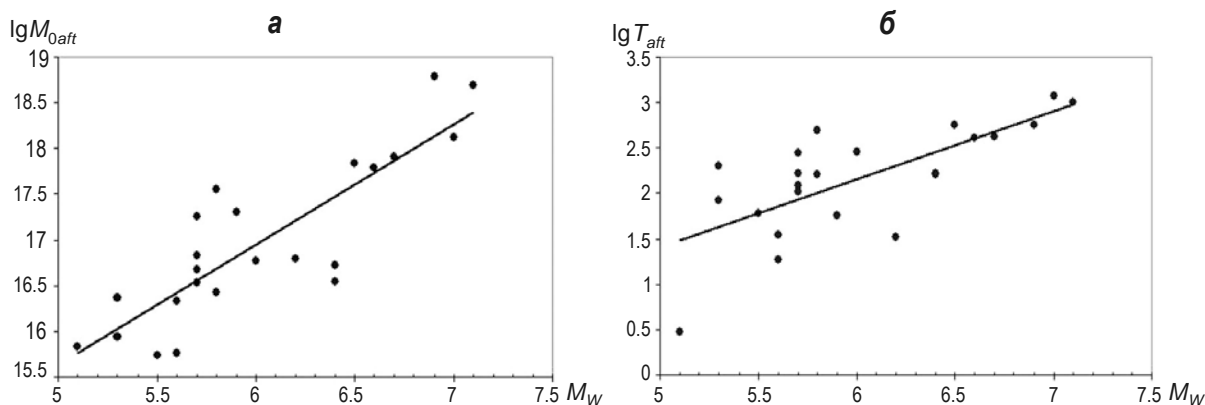


Рис. 4. Регрессионные зависимости между моментной магнитудой M_W главного события и параметров афтершоковых последовательностей $\lg M_{0aft}$ (а) и $\lg T_{aft}$ (б)

Зависимости строились по соответствующим столбцам таблицы (см. с. 22) в интервале магнитуд $5.1 \leq M_W \leq 7.1$. При этом использовался обычный метод наименьших квадратов, поскольку оценки суммарного скалярного сейсмического момента M_{0aft} , высвободившегося в афтершоках, и продолжительности афтершокового процесса T_{aft} получены с заведомо большими ошибками, чем значения соответствующих моментных магнитуд главных событий.

В аналитической форме представленные зависимости имеют вид:

$$\lg M_{0aft} = (1.316 \pm 0.182)M_W + 9.071 \pm 1.105, R_C = 0.845, \quad (7)$$

$$\lg T_{aft} = (0.745 \pm 0.160)M_W - 2.315 \pm 0.971, R_C = 0.713. \quad (8)$$

Зависимость (7) демонстрирует умеренно тесную корреляционную связь между M_{0aft} и моментной магнитудой главного события. В то же время корреляционная связь между T_{aft} и M_W (8) уже является достаточно слабой – $R_C \approx 0.71$. При этом более низкий коэффициент корреляции во временной зависимости представляется вполне естественным, поскольку, как правило, трудно или практически невозможно указать точное время завершения афтершокового процесса. Одновременно следует отметить, что периферийные по времени афтершоки обычно являются сравнительно слабыми и вносят незначительный вклад в суммарный скалярный сейсмический момент.

Обсуждение результатов

Представляется интересным сравнить зависимости (7) и (8) для Кавказа и северо-восточной Анатолии с таковыми для Курило-Камчатского региона [Лутиков, Родина, 2013], имеющими вид:

$$\lg(M_{0aft}) = (1.57 \pm 0.11)M_W + 7.025 \pm 0.73, \quad R_C = 0.932, \quad (9)$$

$$\lg T_{aft} = (0.645 \pm 0.064)M_W - 2.394 \pm 0.422, \quad R_C = 0.879. \quad (10)$$

Соотношения для Курило-Камчатского региона были получены в интервале магнитуд $5.3 \leq M_W \leq 8.3$. Видно, что зависимости (7)–(8) и (9)–(10) заметно различаются, хотя и совпадают в пределах ошибок. На рис. 5, а представлены зависимости (7), (9), на рис. 5, б – (8), (10).

Можно видеть, что как высвободившийся в афтершоках суммарный скалярный момент (M_{0aft}), так и продолжительность афтершокового процесса (T_{aft}) при одних и тех же магнитудах главных событий заметно больше для Кавказского региона. В то же время, если величины M_{0aft} при росте M_W для Кавказского и Курило-Камчатского регионов сближаются, продолжительность афтершокового процесса для Кавказского региона даже увеличивается по сравнению с Курило-Камчатским по мере роста M_W .

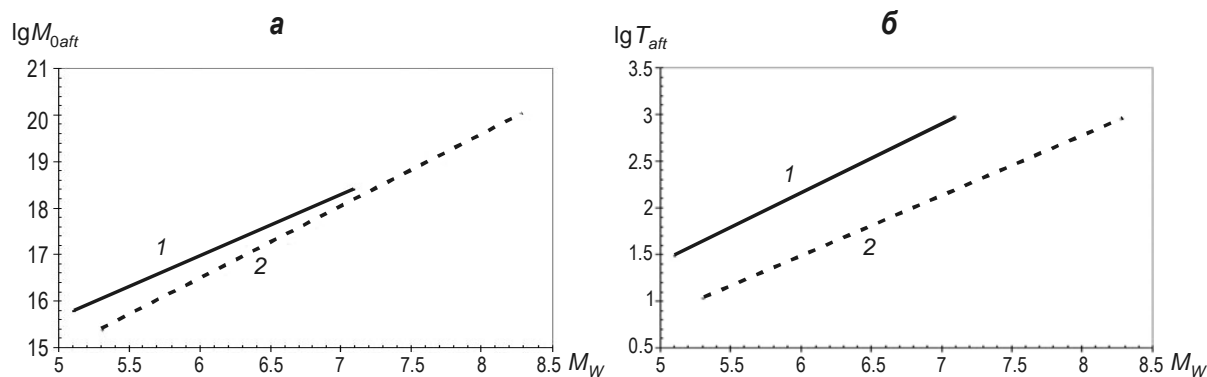


Рис. 5. Сравнение регрессионных зависимостей $\lg M_{0aft}(M_W)$ (а) и $\lg T_{aft}(M_W)$ (б) для Кавказского (1) и Курило-Камчатского (2) регионов

Корреляция между $\lg M_{0aft}$ и $\lg T_{aft}$ с M_W для Курило-Камчатского региона по сравнению с Кавказом и северо-восточной Анатолией является гораздо более тесной. Такому различию можно предложить, по крайней мере, два объяснения. Во-первых, магнитудный диапазон, в котором получены соотношения (9) и (10), смещен более чем на единицу в область больших магнитуд, где рассматриваемые характеристики афтершокового процесса являются более устойчивыми. Во-вторых, Кавказский регион гораздо сложнее в тектоническом отношении, чем Курило-Камчатский, что также обуславливает больший разброс рассматриваемых параметров афтершокового процесса.

Результаты исследования афтершорковых процессов, протекающих в двух регионах с существенно разной тектоникой, показали, что скорость и интенсивность релаксационных процессов в них также различны; анализируемые параметры афтершорковых процессов M_{0aft} и T_{aft} могут рассматриваться в качестве характеристики релаксационного процесса в геологической среде.

Изменение относительной интенсивности афтершокового процесса, определяемой нами как отношение M_{0aft}/M_{0ME} , в зависимости от M_W представлено на рис. 6, а; гистограмма распределения всех рассмотренных землетрясений по величине отношения M_{0aft}/M_{0ME} – на рис. 6, б.

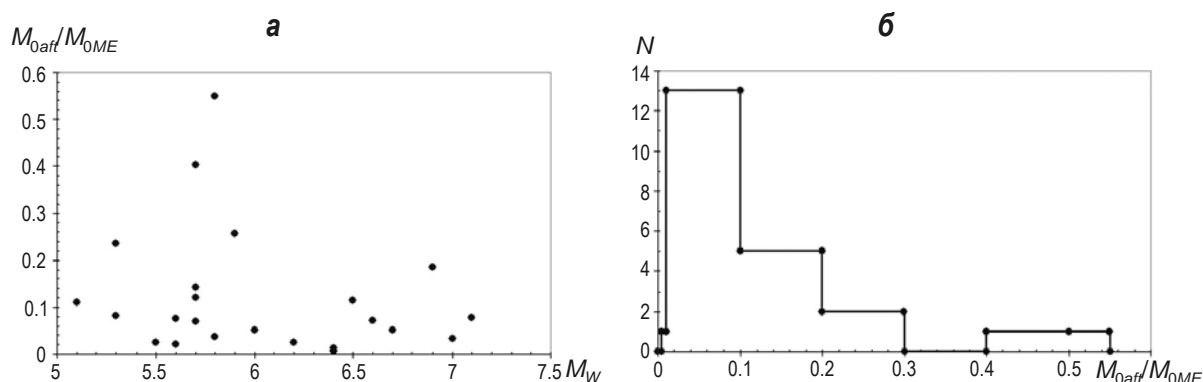


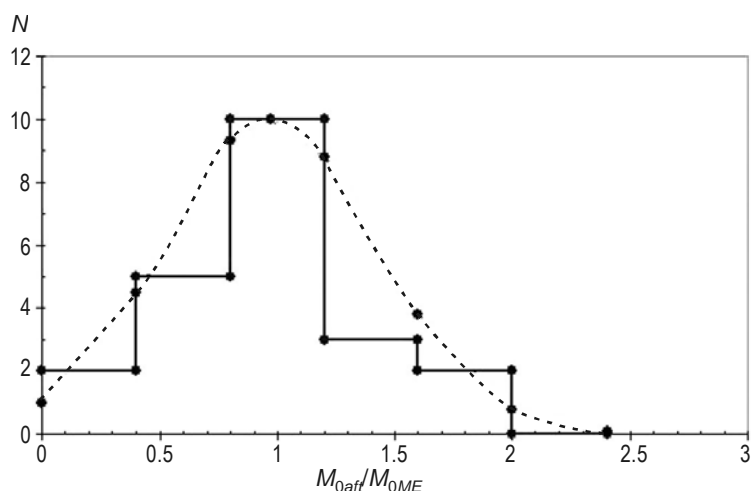
Рис. 6. Изменение относительной интенсивности афтершокового процесса (M_{0aft}/M_{0ME}) в зависимости от M_W (а) и распределение землетрясений Кавказа и северо-восточной Анатолии по величине отношения M_{0aft}/M_{0ME} (б)

Из приведенного на рис. 6 следует, что какая-либо видимая зависимость M_{0aft}/M_{0ME} от M_W так же, как в случае Курило-Камчатского региона, отсутствует. Суммарный скалярный сейсмический момент афтершоковых последовательностей приблизительно 61 % землетрясений не превышает 10 % от M_{0ME} . В среднем в афтершоках высвобождается 11.9 % от скалярного сейсмического момента главного события. Максимальная относительная интенсивность афтершокового процесса $M_{0aft}/M_{0ME} \approx 0.55$ отмечена для Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г. ($M_W = 5.8$). Приведенные выше оценки значительно отличаются от таковых для Курило-Камчатского региона, где в среднем в афтершоках высвобождается всего около 4.7 % от скалярного сейсмического момента главного события.

В целом, на примере двух регионов – Кавказского сейсмоактивного региона с сопредельными территориями и Курило-Камчатского – можно заключить, что относительная интенсивность и продолжительность афтершокового процесса обратно пропорциональны сейсмической активности рассматриваемой территории, т.е. сопровождающие сильные сейсмические события релаксационные процессы тем продолжительнее и интенсивнее, чем ниже средняя сейсмическая активность в регионе, где они происходят. Этот вывод нуждается в проверке на других сейсмоактивных территориях и поэтому может считаться предварительным.

В заключение раздела проверим выполнение закона Бота [Bath, 1965] на рассмотренной выборке землетрясений. Распределение величины $M_{WME} - M_{Wmax aft}$ для всей выборки представлено на рис. 7; моментные магнитуды сильнейших афтершоков – в таблице (см. с. 22).

Рис. 7. Распределение величины $M_{WME}-M_{Wmax\ aft}$ для выборки рассмотренных землетрясений Кавказа и сопредельных территорий. Пунктирная линия – распределение Гаусса при среднем значении и стандартном отклонении эмпирического распределения



Можно видеть (см. рис. 7), что полученное эмпирическое распределение довольно близко к распределению Гаусса. Его среднее значение $\Delta M = M_{WME} - M_{Wmax\ aft} \approx 0.97$ при стандартном отклонении $\sigma \approx 0.45$. Поскольку среднее значение эмпирического распределения весьма близко к 1, можно говорить, что на рассмотренной выборке, включающей 23 землетрясения, закон Бота в среднем выполняется. В то же время величина $M_{WME} - M_{Wmax\ aft}$ варьирует в весьма широких пределах – $0.2 \leq \Delta M \leq 1.8$.

Заключение

Основные результаты проведенных исследований сводятся к следующему.

1. На основании анализа афтершоковых полей двадцати трех сильных и умеренно-сильных ($5.1 \leq M_W \leq 7.1$) землетрясений Кавказа и северо-восточной Анатолии были получены оценки суммарного скалярного сейсмического момента (M_{0aft}), высвободившегося в афтершоках, и продолжительности афтершокового процесса (T_{aft}) в днях от момента главного события. Использованный авторами оконный способ с последующим визуальным контролем дал результаты близкие к получаемым при выделении афтершоков с применением программы Смирнова.

2. Установлена умеренно тесная корреляционная ($R_C = 0.845$) связь между M_{0aft} и моментной магнитудой главного события. В то же время корреляционная связь между T_{aft} и M_W оказалась уже довольно слабой – $R_C = 0.713$ (формулы (7) и (8)).

3. Отмечено, что относительная интенсивность афтершокового процесса, определяемая нами как отношение M_{0aft}/M_{0ME} , не обнаруживает никакой значимой зависимости от M_W главного события.

4. Построенное эмпирическое распределение (см. рис. 7) всех рассмотренных землетрясений по величине отношения M_{0aft}/M_{0ME} показывает, что суммарный скалярный сейсмический момент афтершоковых последовательностей приблизительно для 61 % землетрясений не превышает 10 % от M_{0ME} . В среднем в афтершоках высвобождается 11.9 % от скалярного момента главного события; в целом отношение M_{0aft}/M_{0ME} по всем событиям не превосходит 0.55.

5. Проверка рассмотренной выборки, включающей 23 землетрясения, на выполнение эмпирического закона Бота [Bath, 1965], который определяет приближенное соотношение между магнитудами сильнейшего афтершока и главного события как $\Delta M = M_{ME} - M_{max\ aft} \approx 1$, показала, что в среднем закон Бота выполняется. Построенное

эмпирическое распределение $N(\Delta M)$ оказалось весьма близким к распределению Гаусса. Величина ΔM варьирует в широких пределах – от 0.2 до 1.8; при этом условие приближенного выполнения закона Бота ($0.8 \leq \Delta M \leq 1.2$) отмечается лишь для 43.5 % землетрясений из рассмотренной выборки.

6. На примере двух сейсмоактивных регионов – Кавказского с сопредельными территориями и Курило-Камчатского – можно заключить, что относительная интенсивность и продолжительность афтершокового процесса обратно пропорциональны сейсмической активности рассматриваемой территории. Иными словами, сопровождающие сильные сейсмические события релаксационные процессы тем продолжительнее и интенсивнее, чем ниже средняя сейсмическая активность в регионе, где они происходят. Однако этот вывод нуждается в проверке на других сейсмоактивных территориях и поэтому может рассматриваться как предварительный.

Литература

- Арефьев С.С.* Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. С.193–233.
- Арефьев С.С., Быкова В.В., Вакарчук Р.Н.* Модель очага землетрясения 7 сентября 2009 г. на центральном Кавказе // Геофизические исследования. 2011. Т. 12, № 1. С.33–46.
- Баранов С.В., Габсатарова И.П.* Афтершоковые процессы сильных землетрясений Западного Кавказа // Физика Земли. 2015. № 3. С.134–144.
- Баранов С.В., Чебров Д.В.* Моделирование и прогнозирование афтершоковых процессов Камчатки // Физика Земли. 2012. № 11/12. С.35–46.
- Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. М.: Наука, 1980. 219 с.
- Лутиков А.И.* Предварительный анализ афтершокового процесса Олюторского землетрясения 20.04.2006 г. в Корьякии // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корьякское нагорье). Первые результаты исследований / Отв. ред. В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С.241–250.
- Лутиков А.И., Габсатарова И.П.* Соотношение между моментной магнитудой M_W и магнитудой по поверхностным волнам M_S для Кавказского региона и сопредельных территорий // Геофизические исследования. 2016. Т. 17, № 1. С.29–36.
- Лутиков А.И., Донцова Г.Ю.* Оценка линейных размеров очагов землетрясений Камчатки по размерам облака афтершоков // Физика Земли. 2002. № 6. С.46–56.
- Лутиков А.И., Родина С.Н.* Временные и энергетические параметры афтершокового процесса Курило-Камчатских землетрясений // Геофизические исследования. 2013. Т. 14, № 4. С.5–17.
- 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.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР / Под ред. Н.В. Кондорской и Н.В. Шебалина. М.: Наука, 1977. 563 с.
- Прозоров А.Г.* Удаленные афтершоки – предвестники землетрясений в Южной Калифорнии // Вычислительная сейсмология, 1982. № 14. С.20–26.
- Прозоров А.Г.* Динамический алгоритм выделения афтершоков для мирового каталога землетрясений. Математические методы в сейсмологии и геодинимике // Вычислительная сейсмология. 1986. Вып. 19. С.58–62.
- Раутиан Т.Г.* Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М.: ИФЗ АН СССР, 1960. С.75–114. (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)).
- Радзиминович Н.А., Очковская М.Г.* Выделение афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений Байкальской рифтовой зоны // Геодинимика и тектонофизика. 2013. Т. 4, № 2. С.169–186.
- Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука, 1985. 14 с.
- Рогожин Е.А.* Очерки региональной сеймотектоники. М.: ИФЗ РАН, 2012. С.44–56.

- Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Овсяченко А.Н., Донцова Г.Ю., Кучай М.С., Родина С.Н.* Опыт детального сейсмического районирования Северного Кавказа // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С.38–42.
- Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Собисевич Л.Е., То Шень, Канониди К.Х.* Землетрясение Горкха 25 апреля 2015 г. в Непале: тектоническая позиция, афтершоковый процесс и возможности прогнозирования развития сейсмической ситуации // Физика Земли. 2016. № 4. С.67–83.
- Родкин М.В., 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.
- Землетрясения в СССР в 1963 году. М.: Наука, 1966. С.19–32.
- Землетрясения в СССР в 1966 году. М.: Наука, 1970. С.19–31.
- Землетрясения в СССР в 1970 году. М.: Наука, 1973. С.19–27.
- Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука, 1975. С.24–28.
- Землетрясения в СССР в 1976 году. М.: Наука, 1980. С.127–137.
- Землетрясения в СССР в 1978 году. М.: Наука, 1982. С.101–109.
- Землетрясения в СССР в 1981 году. М.: Наука, 1984. С.140–146.
- Землетрясения в СССР в 1983 году. М.: Наука, 1986. С.168–179.
- Землетрясения в СССР в 1986 году. М.: Наука, 1989. С.227–240.
- Землетрясения в СССР в 1988 году. М.: Наука, 1991. С.236–247.
- Землетрясения в СССР в 1989 году. М.: Наука, 1993. С.255–273.
- Землетрясения в СССР в 1991 году. М.: ОИФЗ РАН, 1997. С.110–114.
- Землетрясения Северной Евразии в 1992 году. М.: ОИФЗ РАН, 1997. С.139–150.
- Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. Обнинск: ГС РАН, 2005. 368 с.
- Землетрясения Северной Евразии 2006. Обнинск: ГС РАН, 2012. 504 с.
- Землетрясения Северной Евразии 2008. Обнинск: ГС РАН, 2014. 520 с.
- Землетрясения России в 2009 году. Обнинск: ГС РАН, 2011. 208 с.
- Землетрясения России в 2011 году. Обнинск: ГС РАН, 2013. 208 с.
- Землетрясения России в 2012 году. Обнинск: ГС РАН, 2014, 224 с.
- Смирнов В.Б.* Прогностические аномалии сейсмического режима. 1. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 2. С.7–22.
- Смирнов В.Б., Габсатарова И.П.* Представительность каталога землетрясений Северного Кавказа: расчетные данные и статистические оценки // Вестник ОГГГГН РАН. 2000. Т. 4, № 14. С.83–95.
- Татевосян Р.Э., Антекман 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 сеймотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.
- Andreeva M.Y., Levin B.W., Sasorova E.V.* Peculiarities of the with in year distribution of earthquakes in the Kuril region // Russian Journal of Pacific Geology. 2009. V. 3, Is. 5. P.491–500.
- Gardner J.K., Knopoff L.* Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1974. V. 64, Is. 5. P.1363–1367.
- Bath M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle // Tectonophysics. 1965. V. 2, Is. 6. P.483–514.
- Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P.2825–2852.
- Kanamori H.* The energy release of great earthquakes // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P.2981–2987.
- Kisslenger C., Jones L.M.* Properties of aftershock sequences in southern California // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P.11947–11958.
- Molchan G.M., Dmitrieva O.* Aftershock identification: methods and new approaches // Geophys. J. Inter. 1992. V. 109, Is. 3. P.501–516.

- Omori F.* On the aftershocks of earthquake // J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo. 1894. V. 7. P.111–200.
- Reasenber P.* Secondorder moment of central California seismicity, 1969–1982 // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1985. V. 90 (B7). P.5479–5495.
- Saltykov V.A., Kravchenko N.M.* Parameters of Kamchatka seismicity in 2008 // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. V. 1, N 2. P.186–196.
- Sherbakov R., Turcotte D.L.* A modified form of bath's law // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2004. V. 94. P.1968–1975.
- Utsu T.A.* Statistical study on the occurrence of aftershocks // Geophysical Magazine. 1961. V. 30. P.521–605.

Сведения об авторах

ЛУТИКОВ Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; Геофизическая служба РАН. 249035, Калужская обл., г. Обнинск, пр. Ленина, д. 189. Тел.: +7(499) 254-53-50. E-mail: ail@ifz.ru

ДОНЦОВА Галина Юрьевна – научный сотрудник, Геофизическая служба РАН. 249035, Калужская обл., г. Обнинск, пр. Ленина, д. 189. Тел.: +7(499) 254-02-01. E-mail: donzova@ifz.ru

РОДИНА Светлана Николаевна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-92-50. E-mail: rodina@ifz.ru

TIME AND ENERGETIC PARAMETERS OF THE AFTERSHOCK PROCESS FOR THE EARTHQUAKES IN THE CAUCASUS AND ADJACENT AREAS

© 2017 г. A.I. Lutikov^{1,2}, G.Yu. Dontsova², S.N. Rodina¹

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. Based on the analysis of aftershock sequences of 23 strong and moderate ($5.1 \leq M_w \leq 7.1$) earthquakes of the Caucasus and adjacent areas, the duration of the aftershock process T_{aft} and the total scalar seismic moment M_{0aft} released during it were estimated. Parameters M_{0aft} и T_{aft} were selected according to the criteria proposed and were used in the development of the regression relationships. The significant correlation between these parameters and the moment magnitude of the main shock was revealed. The empirical Bath's law was tested for the set of the earthquakes considered and demonstrated its validity on average. However, the difference between the magnitudes of the main shock and the strongest aftershock ΔM is significant; if the double events are excluded, $0.4 \leq \Delta M \leq 1.8$.

Earlier, in 2013, we conducted the similar study for the earthquakes in the Kurile-Kamchatka region. The results obtained for two seismically active regions lead to the conclusion that relative intensity and duration of the aftershock process are inversely proportional to seismic activity of the territory considered, which means that relaxation processes accompanying strong seismic events display longer duration and higher intensity in the regions of lower seismic activity.

This conclusion can be regarded as preliminary because it should be tested for other seismically active regions.

Keywords: earthquakes, aftershock sequences, scalar seismic moment, duration of the aftershock process, the Caucasus.

References

- Andreeva M.Y., Levin B.W., and Sasorova E.V. Peculiarities of the with in year distribution of earthquakes in the Kuril region, *Russian Journal of Pacific Geology*, 2009, vol. 3, no. 5, pp. 491-500.
- Arefiev S.S., *Epitsentral'nye seismologicheskie issledovaniya* (Epicentral Seismological Studies), Moscow: Akademkniga, 2003.
- Arefiev S.S., Bykova V.V., and Vakarchuk R.N., Source model of the Central Caucasus earthquake, September 7, 2009, *Geophys. Research*, 2011, vol. 12, no. 1, pp. 33-46.
- Baranov S.V. and Gabsatarova I.P. The aftershock processes of strong earthquakes in the Western Caucasus, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2015, vol. 51, no.3, pp. 448-458.
- Baranov S.V. and Chebrov D.V. Modeling and forecasting the aftershock processes in Kamchatka, *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2012, vol. 48, no. 11-12, pp. 817-828.
- Bath M. Lateral inhomogeneities of the upper mantle, *Tectonophysics*, 1965, vol. 2, no. 6, pp. 483-514.
- Dagestanskoe zemletryasenie 14 maya 1970 g.* (Dagestan earthquake of May 14, 1970), Moscow: Nauka, 1980.
- Dziewonski A.M., Chou T.A., and Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 1981, vol. 86, pp. 2825-2852.
- Fedotov S.A., Chernyshev S.D., Chernysheva G.V., and Vikulin A.V. Determination of the boundaries of earthquakes sources with $M \geq 7 \frac{3}{4}$, peculiarities of seismic cycle and long-term seismic prediction for the Kurile-Kamchatka arc, *Volcanol. Seismol.*, 1980, no. 6, pp. 52-67.
- Gardner J.K. and Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 1974, vol. 64, no. 5, pp. 1363-1367.
- Kanamori H. The energy release of great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 1977, vol. 82, pp. 2981-2987.
- Kisslenger C. and Jones L.M. Properties of aftershock sequences in southern California, *J. Geophys. Res.*, 1991, vol. 96, pp. 11947-11958.
- Lutikov A.I. and Dontsova G. Yu. Estimation of linear dimensions of Kamchatka earthquake sources from the dimensions of the aftershock region, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 469-484.
- Lutikov A.I. Preliminary analysis of the aftershock process of April 20, 2006 Olyutora earthquake in Koryakiya, in *Olyutorskoe zemletryasenie (20 (21) aprelya 2006 g., Koryakskoe nagor'e)*. *Pervye rezul'taty issledovaniy* (The Olyutora Earthquake of April 20(21), 2006, Koryak Plateau), Chebrov, V.N., Ed., Petropavlovsk-Kamchatskii: GS RAN, 2007, pp. 241-250.
- Lutikov A.I. and Rodina S.N. Temporal and power parameters of aftershock process of the Kuriles-Kamchatka earthquakes, *Geophys. Research*, 2013, vol. 14, no. 4, pp. 5-17.
- Lutikov A.I. and Gabsatarova I.P. Relationship between moment magnitude M_w and surface wave magnitude M_s for the Caucasus region and adjacent areas, *Geophys. Research*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 29-36.
- Molchan G.M. and Dmitrieva O.E., Identifying the aftershocks: a review and new approaches, in *Vychislitel'naya seismologiya. Vyp. 24* (Computational Seismology, vol. 24), Moscow, 1991, pp. 19-50.
- Molchan G.M. and Dmitrieva O. Aftershock identification: methods and new approaches, *Geophys. J. Inter.*, 1992, vol. 109, no. 3, pp. 501-516.
- Novyi katalog sil'nykh zemletryasenii na territorii SSSR s drevneishikh vremen do 1975 g* (New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Time to 1975), ed. N. V. Kondorskaya and N. V. Shebalin, Moscow: Nauka, 1977.
- Omori F. On the aftershocks of earthquake, *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 1894, vol. 7, pp. 111-200.
- Prozorov A.G. Remote aftershocks - precursors of earthquakes in Southern California, *Vychislitel'naya seismologiya. Vyp. 14* (Computational Seismology, vol. 14), Moscow, 1982, pp. 20-26.
- Prozorov A.G., Dynamical algorithm for identifying the aftershocks for the world earthquake catalog, *Vychislitel'naya seismologiya. Vyp. 19* (Computational Seismology, vol. 19), Moscow, 1986, pp. 58-62.
- Rautian T.G. The energy of earthquakes. Methods of detailed study of seismicity, *Trudy IFZ AN SSSR*, 1960, vol. 176, no. 9, Moscow, pp. 75-114.
- Radziminovich N.A. and Ochkovskaya M.G., G. Identification of earthquake aftershock and swarm sequences in the Baikal rift zone, *Geodynamics & Tectonophysics*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 169-186.
- Reasenber P. Secondorder moment of central California seismicity, 1969-1982, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1985, vol. 90 (B7), pp. 5479-5495.
- Riznichenko Yu.V. *Problemy seismologii* (Problems of Seismology), Moscow: Nauka, 1985.
- Rodkin M.V. and Tikhonov I.N. Megaequake of March 11, 2011 in Japan: earthquake's siae and aftershock sequence behavior, *Geophys. processes and biosphere*, 2011, vol.10, no. 1, pp. 64-80.
- Rogozhin E.A. *Ocherki regional'noi seismotektoniki* (Essays on Regional Seismotectonics), Moscow: IFZ, 2012.

- Rogozhin E.A., Lutikov A.I., Ovsyuchenko A.N., Dontsova G.Yu., Kuchay M.S., and Rodina S.N. Experience of detailed seismic zoning of North Caucasus, *Prirodnye i technogennye riski. Bezopasnost sooruzhenii*, 2013, no. 4, pp. 38-42.
- Rogozhin E.A., Lutikov A.I., Sobisevich L.E., Shen T., and Kanonidi K.K. The Gorkha earthquake of April 25, 2015 in Nepal: Tectonic position, aftershock process, and possibilities of forecasting the evolution of seismic situation, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 534-549.
- Saltykov V.A. and Kravchenko N.M. Parameters of Kamchatka seismicity in 2008, *Geodynamics & Tectonophysics*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 186-196.
- Sherbakov R. and Turcotte D.L. A modified form of bath's law, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 2004, vol. 94, pp. 1968-1975.
- Smirnov V.B. Prognostic anomalies of seismic regime and technique for preparation of original data, *Geophys. Research*, 2009, vol. 10, no. 2, pp. 7-22.
- Smirnov V.B. and Gabsatarova I.P. Representativeness of the earthquake catalogue for the North Caucasus: calculation data and statistical estimates, *Vestnik OGGGN RAN*, 2000, vol. 4, no. 4, pp. 83-95.
- Utsu T.A. Statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophysical Magazine*, 1961, vol. 30, pp. 521-605.
- Yunga S.L. *Metody i rezul'taty izycheniya seismotektonicheskikh deformatsii* (Seismotectonic Deformations: Methods and Results of Study), Moscow: Nauka, 1990.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1963 godu* (Earthquakes in the USSR in 1963), Moscow: Nauka, 1966, pp. 19-32.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1966 godu* (Earthquakes in the USSR in 1966), Moscow: Nauka, 1970, pp. 19-31.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1970 godu* (Earthquakes in the USSR in 1970), Moscow: Nauka, 1973, pp. 19-27.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1971 godu* (Earthquakes in the USSR in 1971), Moscow: Nauka, 1975, pp. 24-28.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1976 godu* (Earthquakes in the USSR in 1976), Moscow: Nauka, 1980, pp. 127-137.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1978 godu* (Earthquakes in the USSR in 1978), Moscow: Nauka, 1982, pp. 101-109.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1981 godu* (Earthquakes in the USSR in 1981), Moscow: Nauka, 1984, pp. 140-146.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1983 godu* (Earthquakes in the USSR in 1983), Moscow: Nauka, 1986, pp. 168-179.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1986 godu* (Earthquakes in the USSR in 1986), Moscow: Nauka, 1989, pp. 227-240.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1988 godu* (Earthquakes in the USSR in 1988), Moscow: Nauka, 1991, pp. 236-247.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1989 godu* (Earthquakes in the USSR in 1989), Moscow: Nauka, 1993, pp. 255-273.
- Zemletryaseniya v SSSR v 1991 godu* (Earthquakes in the USSR in 1991), Moscow: OIFZ RAN, 1997, pp. 110-114.
- Zemletryaseniya Severnoi Evrazii v 1992 godu* (Earthquakes in the Northern Eurasia in 1992), Moscow: OIFZ RAN, 1997, pp. 139-150.
- Zemletryaseniya Severnoi Evrazii v 1999 godu* (Earthquakes in the Northern Eurasia in 1999), Obninsk: GS RAN, 2005.
- Zemletryaseniya Severnoi Evrazii v 2006 godu* (Earthquakes in the Northern Eurasia in 2006), Obninsk: GS RAN, 2012.
- Zemletryaseniya Severnoi Evrazii v 2008 godu* (Earthquakes in the Northern Eurasia in 2008), Obninsk: GS RAN, 2014.
- Zemletryaseniya Rossii v 2009 godu* (Earthquakes in Russia in 2009), Obninsk: GS RAN, 2011.
- Zemletryaseniya Rossii v 2011 godu* (Earthquakes in Russia in 2011), Obninsk: GS RAN, 2013.
- Zemletryaseniya Rossii v 2012 godu* (Earthquakes in Russia in 2012), Obninsk: GS RAN, 2014.