

УДК 550.343.6

ОЦЕНИВАНИЕ ОБЛАСТИ АФТЕРШОКОВОЙ АКТИВНОСТИ ПО ИНФОРМАЦИИ ОБ ОСНОВНОМ ТОЛЧКЕ

© 2018 г. С.В. Баранов¹, П.Н. Шебалин²

¹ Кольский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”, г. Апатиты, Россия

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

Рассматривается задача быстрого оценивания области будущей афтершоковой активности после сильного землетрясения по информации об основном толчке. Предложен подход к решению задачи, основанный на гипотезе Я. Кагана о самоподобии геометрических параметров зоны очага землетрясения, которая позволяет распространить связь между магнитудой землетрясения и размером очага на размер области ожидаемой афтершоковой активности.

В качестве исходных использовались данные за 1975–2016 гг. из каталогов *ANSS-ComCat* Геологической службы США (*USGS*)¹ и *GCMT*², первый из которых содержит информацию о землетрясениях по всему миру, второй – тензоры сейсмического момента и фокальные механизмы землетрясений. Показано, что масштабирующее соотношение $R \propto 10^{0.5M_m}$ (M_m – магнитуда основного толчка, R – расстояние между эпицентрами основного толчка и самого удаленного афтершока) выполняется независимо от времени, прошедшего после основного толчка, и типа его фокального механизма. Данное соотношение позволяет представить область афтершоковой активности в виде окружности, центр которой совпадает с эпицентром основного толчка, а радиус зависит от его магнитуды. Для разных интервалов времени после основного толчка и типов его фокального механизма получены оценки радиусов окружностей, в которых с 95- и 99-процентной вероятностью ожидаются афтершоки с магнитудами не ниже их пороговых значений.

Также предложен способ оценивания области афтершоковой активности при известной ориентации плоскости разрыва очага основного толчка. В этом случае форма области имеет вид “стадиона” – геометрического места точек, равноудаленных от задаваемого отрезка прямой.

Полученные результаты могут быть использованы на практике для оценки области повторных сильных толчков непосредственно после сильного землетрясения.

Ключевые слова: основной толчок, афтершоки, пространственное распределение, механизм очага, область афтершоковой активности.

Введение

Первым исследованием по оцениванию области ожидаемой афтершоковой активности стала опубликованная в середине прошлого столетия на японском языке работа сейсмологов Т. Утсу и А. Секи [*Utsu, Seki, 1954*], в которой было предложено эмпирическое соотношение, связывающее площадь области афтершоков и магнитуду основного толчка:

$$\lg A = aM_m + b, \quad (1)$$

где A – площадь области афтершоков; M_m – магнитуда основного толчка; a и b – параметры регрессии, оцениваемые по исходным данным. Оценки, полученные на основе афтершоковых последовательностей 39 землетрясений, зафиксированных в 1931–

¹ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (дата обращения 5.06.2017).

² <http://www.globalcmt.org> (дата обращения 5.06.2017).

1953 г. в районе Японии с магнитудами от 6.5 до 8.5 [Utsu, Seki, 1954], показали, что значения параметров a и b не зависят от того, где – в океане или на суше – произошел основной толчок; с учетом доверительных интервалов $a \approx 1$, $b \approx 3.4$.

Используя формулу (1) и соотношение между магнитудой и упругой энергией сейсмических волн $\lg E$ (Дж) = $1.5M + 4.8$, которое известно как соотношение Гуттенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1956], японский профессор К. Цубои [Tsuboi, 1956] получил пропорциональную связь между энергией основного толчка и площадью области его афтершоков в виде $E \propto A^{1.5}$. Из приводимого в [Костров, 1974] соотношения $E = 0.5 \Delta \sigma M_0 / \mu$, в котором $\Delta \sigma$ – падение напряжения, μ – модуль сдвига, M_0 – скалярный сейсмический момент, вытекает, что $E \propto M_0$ и, следовательно, $M_0 \propto A^{1.5}$.

Перейдя от площади области к ее линейному размеру, получим $M_0 \propto L^3$. Если положить, что L – длина разрыва очага, то мы получим частный случай известного масштабирующего соотношения

$$M_0 \propto L^p, \quad (2)$$

где $p=3$ для слабых ($M < 5$) и средних ($M = 5-6.4$) землетрясений, $p=2$ для сильных ($M = 6.5-8$) и $p=1$ для сильнейших ($M > 8$).

Соотношение (2) было обосновано авторами работы [Kanamori, Anderson, 1975] с использованием модели постоянного падения напряжения при образовании круговой трещины. В той же работе на основе модели простого смещения выведено соотношение Гуттенберга–Рихтера, связывающее магнитуду и энергию сейсмических волн. Отметим, что соотношение (2) в разных видах наиболее часто рассматривается в сейсмологической литературе в качестве масштабирующего [Miller, 2002].

Разные значения p в соотношении (2) объясняются тем, что для слабых землетрясений разрыв распространяется внутри хрупкой коры как в длину, так и в ширину; для сильных и сильнейших событий разрыв ограничен верхним слоем земной коры, в котором он вынужден распространяться только в длину [Kanamori, Anderson, 1975; Kagan, 2002].

Вопрос теоретического обоснования соотношения (2) для связи момента основного толчка и линейного размера области афтершоков на сегодняшний день остается открытым. В настоящей работе мы воспользуемся гипотезой Я. Кагана о самоподобии геометрических параметров зоны очага землетрясения [Kagan, 2002]. Эта гипотеза эмпирически подтверждена результатами исследования распределения областей афтершоков 91 землетрясения с $7 \leq M \leq 8.5$, которые произошли в 1977–2000 гг. на всем земном шаре (во всех случаях рассматривались афтершоки, зарегистрированные в течение первых суток после основного толчка). Согласно названной гипотезе, длина области афтершоков подобна длине разрыва и, как показали расчеты [Kagan, 2002], связана с моментом основного толчка соотношением (2) при $p \approx 3$ независимо от фокального механизма основного толчка и без каких-либо скачков для землетрясений с $M > 8$. При этом длина области афтершоков составляла $4\sigma_1$, где σ_1 – стандартное отклонение вдоль первого собственного вектора ковариационной матрицы, составленной из координат афтершоков. Отметим, что 86 % всех афтершоков находятся внутри эллипса, построенного на векторах ковариационной матрицы с осями $4\sigma_1$ и $4\sigma_2$ с центром, соответствующим среднему по координатам афтершоков.

Гипотеза о самоподобии геометрических параметров зоны очага землетрясения эмпирически подтверждена также результатами исследования связи размера области афтершоков и сейсмического момента для землетрясений в районе о. Тайвань [Wu, Zhao, Wu, 2013]. Авторы названной работы подтвердили выполнение масштабирующего соотношения (2) и получили $p \approx 3$.

В настоящей работе рассматривается вопрос оценки области афтершоков по информации об основном толчке в зависимости от времени после него и типа фокального механизма толчка; отдельно рассмотрен случай, когда известна ориентация плоскости разрыва очага основного толчка.

Исходные данные и выделение афтершоковых серий

Данные о землетрясениях за 1975–2016 гг. были взяты из каталога *ANSSComCat* Геологической службы США (*USGS*), содержащего информацию о землетрясениях по всему миру. Потенциальными основными толчками считались землетрясения с магнитудой ≥ 6.5 при глубине очага ≤ 80 км. Фокальные механизмы взяты из глобального каталога *GCMT* [Ekström, Nettie, Dziewonski, 2012].

Основные толчки и их афтершоки выделялись по алгоритму Молчана и Дмитриевой [1991; Molchan, Dmitrieva, 1992] с помощью программы В.Б. Смирнова [2009]. За период 1975–2016 гг. из каталога *ANSS* было выделено 383 афтершоковых серии, в каждой из которых в течение 24 ч после основного толчка произошло не менее 10 событий. Отметим, что в реальной ситуации данное условие проверяется простым сопоставлением разности между вступлениями объемных *S*- и *P*-волн при основном толчке и при последующих событиях (возможных афтершоках). В настоящем исследовании длительность серий ограничена одним годом после основного толчка.

Тип фокального механизма основного толчка определялся по углу подвижки (*slip*): при $135^\circ < slip < -45^\circ$ механизм основного толчка считается сбросовым, при $45^\circ < slip < 135^\circ$ – взбросовым, в иных случаях – сдвиговым. Если для нодальных плоскостей получались разные типы механизма, то наиболее подходящая плоскость выбиралась по ориентации облака афтершоков. Из 383 проанализированных основных толчков 111 имеют сдвиговый фокальный механизм, 51 – сбросовый, 221 – взбросовый (рис. 1).

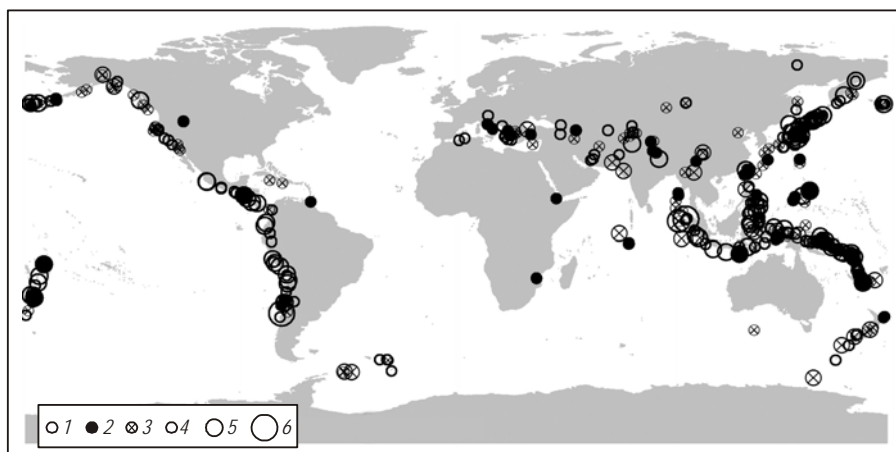


Рис. 1. Пространственное распределение эпицентров анализируемых основных толчков, выделенных из каталога *ANSS* за 1975–2016 гг.

1–3 – типы фокального механизма: взброс (1), сброс (2), сдвиг (3); 4–6 – диаметр условного знака отображает интервал, в котором лежат значения магнитуд событий: $M=6.5-7.5$ (4); $M=7.5-8.5$ (5); $M=8.5-9.1$ (6)

Fig. 1. Spatial distribution of epicenters of mainshocks in study distinguished from the *ANSS* catalog from 1975 till 2016; different circles refer to (1) reverse, (2) normal, and (3) strike-slip types of faulting; the diameter corresponds to the magnitude interval (4) $M=6.5-7.5$, (5) $M=7.5-8.5$, and (6) $M=8.5-9.1$

Оценка области афтершоков

При оценивании области ожидаемых афтершоков мы не можем использовать для аппроксимации эллипс, поскольку для этого должны быть известны эпицентры афтершоков. Поэтому область афтершоков будем аппроксимировать окружностью, центр которой совпадает с эпицентром основного толчка, а радиус равен расстоянию между эпицентрами основного толчка и самого удаленного из афтершоков. Линейным размером области в таком случае будет считаться радиус аппроксимирующей окружности.

Исходя из того, что $\lg M_0 \propto 1.5M$ [Kanamori, Anderson, 1975], с учетом (2) при $p=3$ [Kagan, 2002; Wu, Zhao, Wu, 2013] получаем

$$\lg R \propto 0.5M_m, \quad (3)$$

где R – расстояние между эпицентрами основного толчка и самого удаленного афтершока.

Поскольку наше определение линейного размера области афтершоков отличается от определения Я. Кагана [Kagan, 2002], мы проверили выполнение соотношения (3) для разных фокальных механизмов в зависимости от времени, прошедшего после основного толчка. Для этого регрессия вида

$$\lg R = A + BM_m \quad (4)$$

оценивалась по данным от момента основного толчка ($t_0=0$) до возрастающих в геометрической прогрессии значений $t_1=2^k$ сут, $k = -1, -0.5, 0, \dots, 8.5$ (20 значений), т.е. через каждые два шага время удваивалось. При таком способе, в отличие от равномерного шага по времени, в случае выполнения гиперболического закона Омори [Utsu, 1961] количество афтершоков в интервалах постоянно. В более сложных случаях степенного затухания по закону Омори–Утсу, как и при затухании в виде гамма-функции [Narteau, Shebalin, Holschneider, 2002; Narteau et al., 2003], количество событий в таких интервалах возрастает или убывает, но незначительно по сравнению с использованием равномерного шага по времени [Баранов, Шебалин, 2016], благодаря чему прирост накопленного числа событий от момента основного толчка меняется незначительно. При оценивании регрессии (4) рассматривались афтершоки с $M \geq 4.5$, поскольку, начиная с этого значения M , каталог ANSS практически не пропускает землетрясений.

Зависимость значений параметра регрессии B от длительности временного интервала после основного толчка с учетом его фокального механизма показана на рис. 2. В табл. 1 приведены параметры, характеризующие соответствие регрессии (4) исходным данным: r_{\min} – минимальное значение коэффициента корреляции, σ_{\max} – максимальная стандартная ошибка, e_{\max} – максимальное отклонение фактических данных от модельных значений. Значения стандартной ошибки близки к оценкам из [Kagan, 2002], полученным по данным за первые сутки после основного толчка для соответствующих фокальных механизмов.

Можно констатировать, что значения B очень слабо зависят от времени после основного толчка и близки к 0.5 для всех фокальных механизмов (см. рис. 2). Разброс данных вокруг прямой регрессии (см. табл. 1) естественен и обусловлен случайным рассеиванием афтершоков внутри области. Следовательно, масштабирующее соотношение (3) справедливо и для случая, когда за линейный размер области афтершоков принято расстояние между эпицентрами основного толчка и самого удаленного афтершока. Кроме того, соотношение (3) выполняется независимо от времени после основного толчка и типа его фокального механизма. Далее мы везде принимаем $B=0.5$.

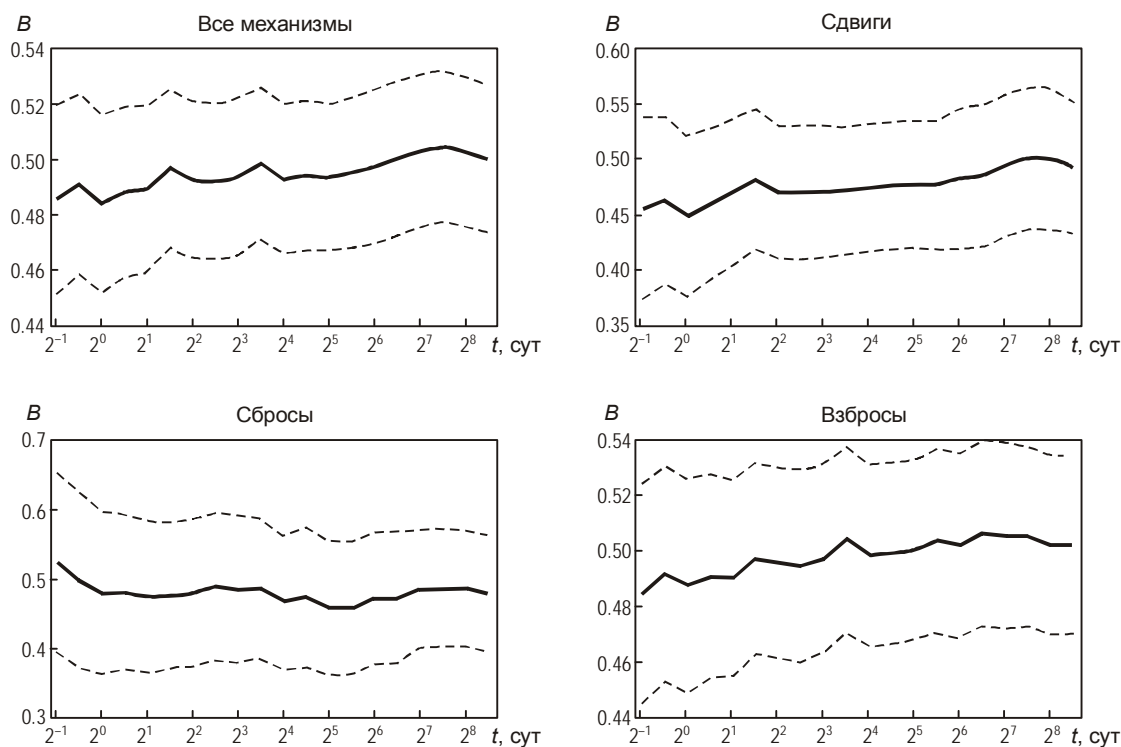


Рис. 2. Значения параметра B регрессии (4) в зависимости от времени, прошедшего после основного толчка, для фокальных механизмов разных типов: *вверху* – все механизмы (*слева*), сдвиги (*справа*); *внизу* – сбросы (*слева*), взбросы (*справа*). Сплошные кривые – значения B ; штриховые – границы 95-процентных доверительных интервалов. Рассматривались афтершоки с $M \geq 4.5$; характеристики соответствия регрессии исходным данным см. в табл. 1

Fig. 2. B values (solid lines) from regression (4) depending on time in days from the mainshock estimated for different types of source mechanisms and 95 % confidence intervals (dashed lines); (upper left) all mechanisms, (lower left) normal, (upper right) strike-slip, and (lower right) thrust; aftershocks with $M \geq 4.5$ were considered; the regression (4) correspondence to initial data is shown in Table 1

Таблица 1. Характеристики соответствия регрессии (4) исходным данным

	Типы фокальных механизмов			
	Все типы	Сдвиги	Сбросы	Взбросы
r_{\min}	0.86	0.80	0.79	0.87
σ_{\max}	0.12	0.14	0.11	0.12
e_{\max}	0.53	0.53	0.26	0.49

Таким образом, задача оценивания радиуса области афтершоковой активности сводится к оцениванию разброса исходных значений вокруг регрессии (4) при $B=0.5$.

Согласно выражению (3), $R \propto 10^{0.5M_m}$, т.е. меняя множитель перед $10^{0.5M_m}$, мы будем получать значения радиуса круга, внутри которого с некоторой вероятностью ожидаются афтершоки. Чтобы связать R и вероятность, рассмотрим случайную величину

$$100d/10^{0.5M_m}, \quad (5)$$

где d – максимум расстояния от эпицентра основного толчка до эпицентров его афтершоков, км; множитель 100 введен для удобства представления малых значений.

Через $Q(q)$ обозначим значение случайной величины (5), соответствующее квантилю q (обратная функция распределения). При принятых обозначениях радиус круга, центр которого совпадает с эпицентром основного толчка и в котором с вероятностью q будут находиться все афтершоки, задается выражением

$$R(q) = 10^{-2} \cdot Q(q) \cdot 10^{0.5M_m}. \quad (6)$$

Вероятность, что вне этого круга будет находиться хотя бы один афтершок, равна $1-q$.

Поскольку $R \propto 10^{0.5M_m}$ не зависит от времени после основного толчка и типа его фокального механизма, то естественно предположить, что случайная величина (5) имеет нормальное распределение, в связи с чем, рассчитав ее среднее значение (μ) и стандартное отклонение (σ), можно оценить значение $Q(q)$. Такой подход к определению Q дает результат, более устойчивый по сравнению с получаемым при использовании квантилей эмпирической функции распределения.

Выше было показано, что масштабирующее соотношение (3) выполняется независимо от времени после основного толчка и типа его фокального механизма, но при этом нельзя утверждать, что коэффициенты пропорциональности и разброс исходных данных являются одинаковыми. Отметим, что увеличение области афтершоков с течением времени наблюдалось многими авторами, например, при анализе уровней выделившейся сейсмической энергии [Tajima, Kanamori, 1985].

Мы будем анализировать средние значения μ и стандартные отклонения σ случайной величины (5), рассчитанной для разных интервалов времени после основного толчка, типов его фокального механизма и магнитуд афтершоков. При этом преследуются две цели: первая – выяснение, зависят ли рассматриваемые статистики величины (5) от названных характеристик; вторая – получение определяемой выражением (6) оценки радиуса области афтершоковой активности $R(q)$ для $q=0.95, 0.99$.

Результаты

Графики эмпирических функций распределения случайной величины (5), построенные для всех анализируемых основных событий без разделения по типам их фокальных механизмов, а также отдельно для сдвигов, сбросов и взбросов, приведены на рис. 3. При построении магнитуды афтершоков не ограничивались; длительность рассматриваемых серий составляла до одного года от момента основного толчка. Получается, что для всех типов фокальных механизмов круг с центром в эпицентре основного толчка при радиусе $0.03 \cdot 10^{0.5M_m}$ содержит все афтершоки, ожидаемые в течение года после основного толчка. Отметим, что круг радиуса $0.02 \cdot 10^{0.5M_m}$ км [Tsuboi, 1956; Wu, Zhao, Wu, 2013] содержит все такие афтершоки с вероятностью 0.32.

Полученные результаты имеют скорее методическое значение. Когда при исследовании афтершоковой активности необходимо установить область, в которой ожидаются повторные толчки, с их учетом можно ограничиться кругом радиуса $0.03 \cdot 10^{0.5M_m}$ км с центром в эпицентре основного толчка. На практике гораздо важнее после сильного землетрясения иметь возможность оценить изменение радиуса области ожидаемой афтершоковой активности для разных пороговых магнитуд (M_{th}) в зависимости от времени.

В качестве пороговых магнитуд рассматривались $M_{th}=4.5; 6; M_m-1.1$. Временные вариации μ и σ случайной величины (5) исследовались для афтершоков с магнитудами выше этих значений. Выбор $M_{th}=4.5$ обусловлен тем, что, начиная с этой магнитуды

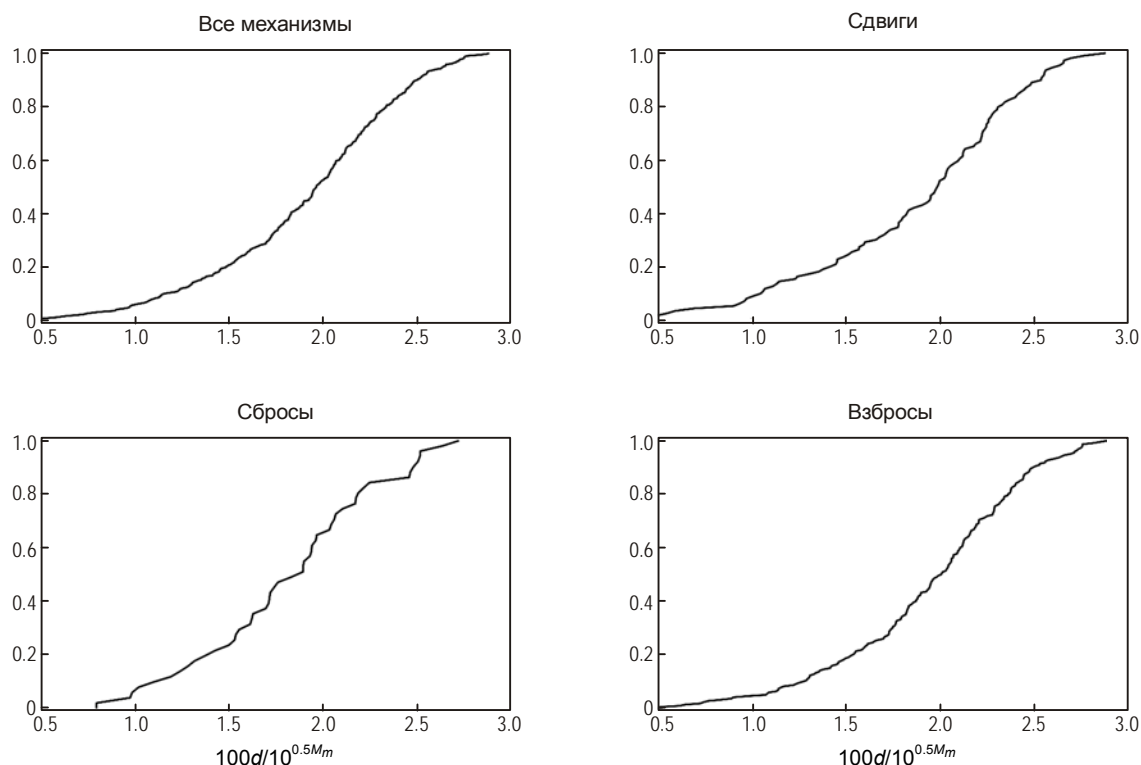


Рис. 3. Эмпирические функции распределения случайной величины (5), рассчитанные для разных типов фокальных механизмов основных толчков по данным каталога *ANSS*. Анализировались все афтершоки, произошедшие в течение года вне зависимости от их магнитуд

Fig. 3. Empirical functions of distribution of a random parameter (5) calculated for different types of source mechanisms of mainshocks from the *ANSS* data; panels are as in Fig. 2; all aftershocks that occur during a year were analyzed regardless of their magnitudes

каталог *ANSS*, как уже отмечалось выше, практически не пропускает событий; $M_{th}=6$ позволяет получить оценки радиуса для сильных афтершоков. Выбор порогового значения $M_{th}=M_m-1.1$ определяется законом Бота [*Bath, 1965*], согласно которому средняя разность между магнитудами основного толчка и сильнейшего афтершока составляет от 1.1 до 1.2. Для используемых нами данных среднее значение равно 1.1, стандартное отклонение составляет 0.6. Число серий, в которых имеется хотя бы один афтершок с магнитудой выше пороговой, в зависимости от времени, прошедшего после основного толчка, и типа его фокального механизма, иллюстрирует рис. 4.

Рассмотрим поведение μ и σ случайной величины (5), рассчитанной для афтершоков с $M \geq M_{th}=4.5$ в зависимости от времени после основного толчка (t) и типа его фокального механизма (рис. 5). Можно констатировать, что для всех типов фокальных механизмов μ возрастает, а σ убывает по логарифмическому закону $\log_2 t$. При этом рост μ отображает наблюдаемое некоторыми авторами (см., например, [*Tajima, Kanamori, 1985*]) расширение области афтершоков с течением времени, а убывание σ свидетельствует об уменьшении с течением времени величины среднего разброса. В данном случае кривая зависимости μ от $\log_2 t$ имеет регулярный вид, хотя и не является линейной для всех типов фокальных механизмов. В то же время зависимость σ от $\log_2 t$ близка к линейной для всех основных толчков без разделения их по типу фокального механизма, а также для сдвиговых и сбросовых.

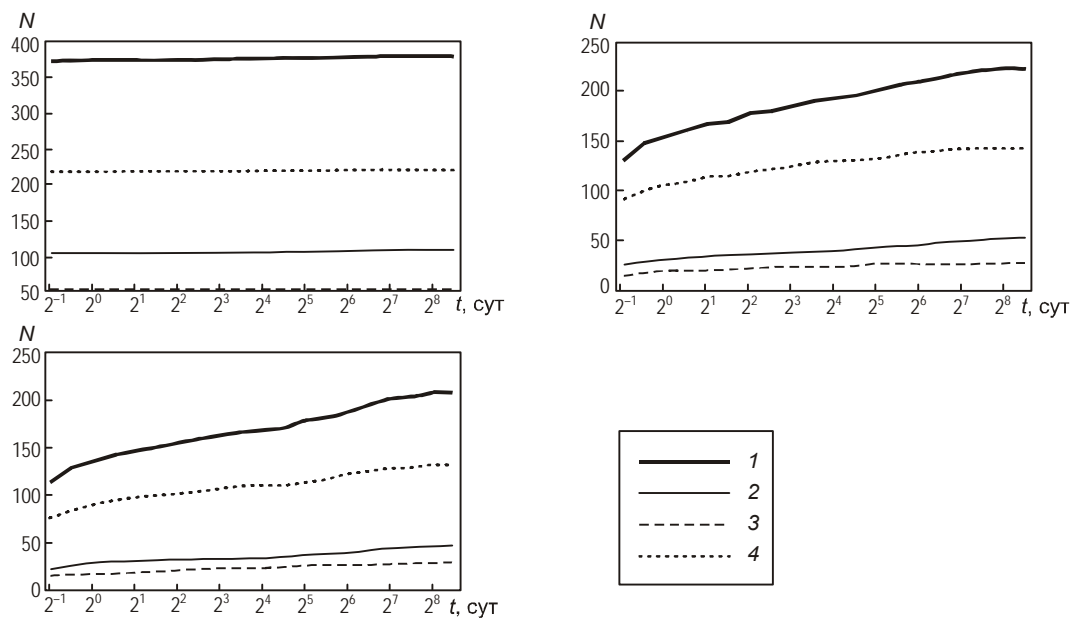


Рис. 4. Число серий, в которых хотя бы один афтершок имеет магнитуду $M \geq M_{th}=4.5$ (вверху слева), $M \geq M_{th}=6$ (вверху справа), $M \geq M_{th}=M_m-1.1$ (внизу), в зависимости от времени, прошедшего после основного толчка, и типа его фокального механизма. Кривые 1 – все механизмы, 2 – сдвиги, 3 – сбросы, 4 – взбросы (M_{th} – пороговое значение магнитуды)

Fig. 4. Number of series with at least one aftershock with $M \geq M_{th}$ depending on time from the mainshock and type of its mechanism; (upper left) $M_{th}=4.5$, (upper right) $M_{th}=6$, and (bottom) $M_{th}=M_m-1.1$; (1) all mechanisms, (2) normal, (3) strike-slip, and (4) thrust

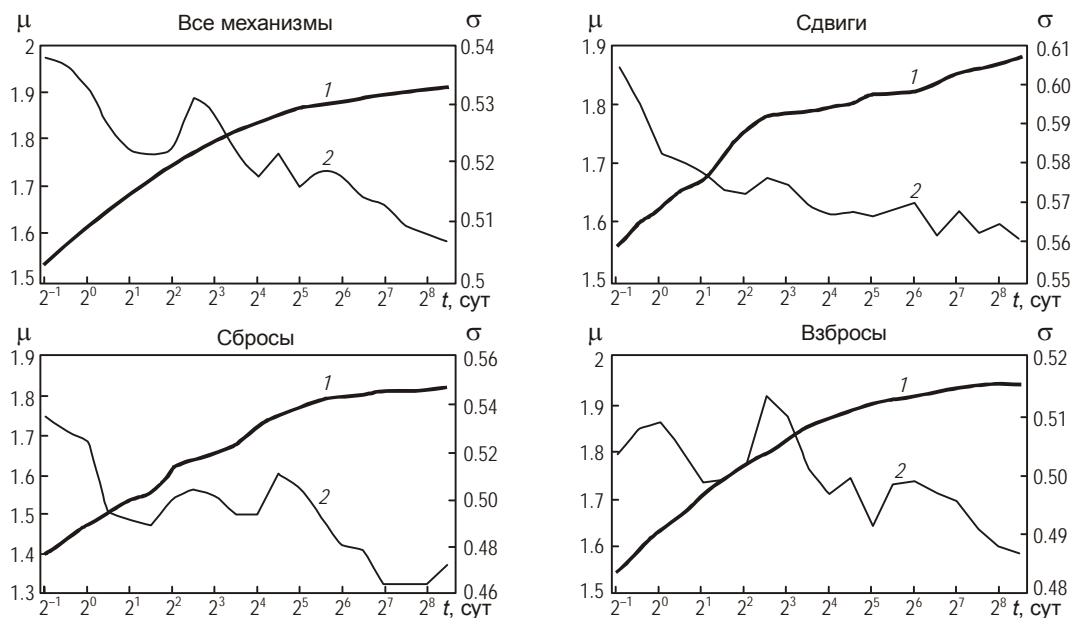


Рис. 5. Среднее значение (μ , кривые 1, шкалы слева) и стандартное отклонение (σ , кривые 2, шкалы справа) случайной величины (5) в зависимости от времени, прошедшего после основного толчка, и типа его фокального механизма, рассчитанные для афтершоков с $M \geq M_{th}=4.5$

Fig. 5. Mean value μ (line 1) and standard deviation σ (line 2) of a random parameter (5) depending on time from the mainshock and type of its mechanism calculated for aftershocks with $M \geq M_{th}=4.5$; panels are as in Fig. 2

Для сглаживания значений статистик μ и σ , а также для выделения тренда будем использовать регрессию вида

$$f = U + V \cdot \log_2 t, \quad (7)$$

где f – либо μ , либо σ ; t – время в сутках после основного толчка; U и V – параметры регрессии. Использование логарифма по основанию 2 в (7) определяется тем, что значения статистик μ и σ рассчитаны от момента основного толчка до возрастающих в геометрической прогрессии значений времени $t=2^k$ сут, $k=-1, -0.5, 0, \dots, 8.5$ (см. выше).

Анализ приводимых в табл. 2 параметров регрессии (7) показывает, что для всех основных толчков без разделения по типам фокальных механизмов, а также для сдвиговых и сбросовых основных толчков коэффициент корреляции не ниже 0.82, а максимальное значение ошибки не превышает 0.02. При такой ошибке для σ максимальная разность радиусов области афтершоковой активности (6) оказывается <10 км при магнитуде основного толчка $M_m=9$; с уменьшением магнитуды основного толчка значение разности также уменьшается.

Таблица 2. Оценка параметров регрессии (7) для стандартного отклонения σ , выполненная без учета и с учетом типа фокального механизма основного толчка для афтершоков с $M \geq M_{th}=4.5$

Типы фокальных механизмов	s	U	V	r	e	e_{\max}
Все типы	0.03 (5.8 %)	0.531 ± 0.0029	-0.003 ± 0.0006	0.91	0.004	0.01
Сдвиг	0.04 (7.3 %)	0.582 ± 0.0046	-0.003 ± 0.0010	0.85	0.01	0.02
Сброс	0.07 (13.4 %)	0.516 ± 0.0093	-0.006 ± 0.0020	0.82	0.01	0.02
Взброс	0.03 (5.2 %)	0.507 ± 0.0037	-0.002 ± 0.0008	0.76	0.005	0.01

В табл. 2 приведены следующие параметры: s – разница между максимальным и минимальным значениями статистики (в скобках указан % разброса); U , V – параметры регрессии (7) \pm границы 95-процентного доверительного интервала; r – коэффициент корреляции; e – стандартное значение разности фактических и модельных значений; e_{\max} – максимум модуля разности фактических и модельных значений.

Как отмечалось выше, для основных толчков с взбросовыми механизмами поведение σ отличается от линейного – значение коэффициента корреляции $r=0.76$ (см. табл. 2). Вместе с тем, разброс значений σ для всех основных толчков не превышает 0.03 и при практическом использовании может быть заменен средним значением, равным 0.5. В таком случае максимальная разница между радиусами области ожидаемой афтершоковой активности, определяемыми выражением (6), также не превысит 10 км.

Для удобства практического использования в табл. 3 приведены значения μ и σ , а также $Q(0.95)$ и $Q(0.99)$ случайной величины (5), полученные по обратной функции нормального распределения для разных временных интервалов после основного толчка ($\tau=0.5, 1, 16, 32, 128, 362$ сут) с учетом типа его фокального механизма. При расчетах использованы те же значения μ , что и на рис. 5; значения σ получены по оценкам из табл. 2 для основных толчков с фокальными механизмами всех типов, кроме взбросовых, для которых $\sigma=0.5$.

Можно констатировать, что для афтершоков с $M \geq M_{th}=4.5$ с течением времени значения $Q(0.95)$ меняются на 10–14 %, значения $Q(0.99)$ – на 8–13 %. Соответствующие изменения радиуса области афтершоковой активности при $M_m \geq 7$ становятся более 10 км^1 , что говорит о необходимости учета фактора времени, прошедшего после основного толчка.

¹ Типичная ошибка определения координат эпицентра в каталоге ANSS составляет 10–15 км.

Таблица 3. Значения μ , σ , $Q(0.95)$ и $Q(0.99)$ случайной величины (5), рассчитанные для афтершоков с $M \geq M_{th} = 4.5$ в зависимости от разных временных интервалов после основного толчка τ и типа его фокального механизма (в последнем столбце – разрыв между начальным и конечным значениями соответствующих величин, %)

	$\tau=-1$	$\tau=0$	$\tau=4$	$\tau=5$	$\tau=6$	$\tau=8.5$	%
Все типы фокальных механизмов							
μ	1.53	1.61	1.83	1.86	1.87	1.91	19.9
σ	0.53	0.53	0.52	0.52	0.51	0.51	-3.9
$Q(0.95)$	2.4	2.5	2.7	2.7	2.7	2.7	12
$Q(0.99)$	2.8	2.8	3.0	3.1	3.1	3.1	10
Сдвиги							
μ	1.56	1.62	1.80	1.82	1.82	1.88	17.0
σ	0.58	0.58	0.57	0.57	0.56	0.55	-5.5
$Q(0.95)$	2.5	2.6	2.7	2.7	2.7	2.8	10
$Q(0.99)$	2.9	3.0	3.1	3.1	3.1	3.2	8
Сбросы							
μ	1.40	1.48	1.73	1.78	1.81	1.83	23.5
σ	0.52	0.52	0.49	0.49	0.48	0.47	-10.6
$Q(0.95)$	2.3	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6	13
$Q(0.99)$	2.6	2.7	2.9	2.9	2.9	2.9	10
Взбросы							
μ	1.55	1.63	1.88	1.91	1.92	1.94	20.1
σ	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.0
$Q(0.95)$	2.4	2.5	2.7	2.7	2.7	2.8	14
$Q(0.99)$	2.7	2.8	3.0	3.1	3.1	3.1	13

Рассматривая вопрос о зависимости радиуса области афтершоковой активности от типа фокального механизма основного толчка, мы выполнили следующие вычисления: рассчитали определяемые выражением (6) радиусы области афтершоковой активности R для $Q(0.95)$ из табл. 3 с учетом фокального механизма и без него, изменяя M_m от 6.5 до 9 с шагом 0.5; затем из значений $R(0.95)$, полученных с учетом фокального механизма основного толчка, вычли значения $R(0.95)$ без его учета, обозначив модули полученных величин как $dR(0.95)$. Аналогичные вычисления проделали для $Q(0.99)$ и получили $dR(0.99)$. Если $dR > 10$ км (напомним, что типичная ошибка определения координат эпицентра землетрясения с $M \geq 4.5$ составляет примерно 10 км), то радиус области афтершоковой активности будем считать значимо зависящим от типа фокального механизма основного толчка.

Результаты анализа показывают, что для сдвиговых основных толчков, начиная с $M_m = 8$, оба значения – $dR(0.95)$ и $dR(0.99)$ – превышают 10 км; для взбросовых толчков 10 км превышает лишь $dR(0.99)$ для $M_m = 9$. Этот результат закономерен, так как более половины всех основных толчков имеет сбросовый фокальный механизм. Таким образом, при оценивании радиуса круга, содержащего все афтершоки с $M \geq 4.5$, для основных толчков с $M_m \geq 8$ необходимо учитывать тип механизма очага.

Аналогичным образом исследуем поведение μ и σ для афтершоков с $M \geq M_{th} = 6.0$ в зависимости от времени после основного толчка и типа его фокального механизма. Расчеты показывают (рис. 6), что для всех типов фокальных механизмов основных толчков μ и σ линейно возрастают по $\log_2 t$, т.е. временные вариации μ у сильных ($M \geq 6$) и слабых ($M \geq 4.5$) афтершоков схожи, а вариации σ различны.

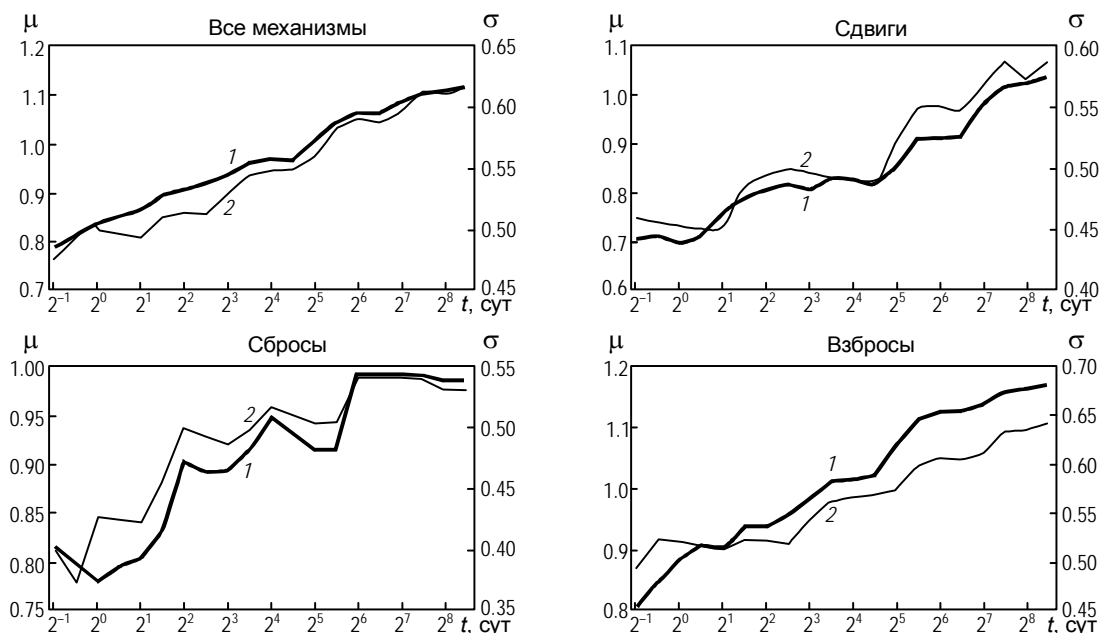


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для афтершоков с $M \geq M_{th} = 6.0$

Fig. 6. The same as in Fig. 5 for aftershocks with $M \geq M_{th} = 6.0$

Поскольку в данном случае (см. рис. 6) рост значений μ и σ близок к линейному при их значительном разбросе (по μ – более 0.21, по σ – 0.14), для сглаживания и выделения тренда мы будем использовать регрессию (7), оценки параметров которой U и V приведены в табл. 4 (количество серий, по которым выполнялись оценки, см. на рис. 4, *вверху справа*). Отметим, что регрессия (7) достаточно хорошо описывает рассматриваемые статистики μ и σ , а именно, значения коэффициента корреляции $r \geq 0.9$, стандартное отклонение разности между фактическими и модельными значениями $e \leq 0.03$, максимальная ошибка $e_{\max} \leq 0.06$.

Таблица 4. Оценки параметров регрессии (7), выполненные с учетом и без учета типа фокального механизма основного толчка для афтершоков с $M \geq M_{th} = 6.0$ (использованы те же обозначения, что в табл. 2)

Статистика	s	U	V	r	e	e_{\max}
Все типы фокальных механизмов						
μ	0.31 (29.3%)	0.833 ± 0.0079	0.035 ± 0.0017	1.00	0.01	0.02
σ	0.14 (22.9%)	0.489 ± 0.0062	0.015 ± 0.0013	0.99	0.01	0.01
Сдвиг						
μ	0.34 (32.7%)	0.714 ± 0.0203	0.036 ± 0.0043	0.97	0.03	0.06
σ	0.14 (23.8%)	0.453 ± 0.0117	0.015 ± 0.0025	0.95	0.01	0.04
Сброс						
μ	0.21 (21.3%)	0.814 ± 0.0201	0.024 ± 0.0042	0.94	0.03	0.04
σ	0.17 (30.8%)	0.428 ± 0.0166	0.016 ± 0.0035	0.91	0.02	0.05
Взброс						
μ	0.36 (31.0%)	0.871 ± 0.0124	0.038 ± 0.0026	0.99	0.02	0.03
σ	0.15 (22.9%)	0.506 ± 0.0088	0.015 ± 0.0019	0.97	0.01	0.03

Воспользовавшись оценками, приводимыми в табл. 4, мы рассчитали значения μ , σ , а также $Q(0.95)$ и $Q(0.99)$ для сильных афтершоков с $M \geq M_{th} = 6.0$ через 0.5, 1, 16, 32, 128 и 362 сут после основного толчка с учетом его фокального механизма (табл. 5).

Таблица 5. Значения μ , σ , $Q(0.95)$ и $Q(0.99)$ случайной величины (5), рассчитанные для афтершоков с $M \geq M_{th} = 6.0$ в зависимости от разных временных интервалов после основного толчка τ и типа его фокального механизма (в последнем столбце – разрыв между начальным и конечным значениями соответствующих величин, %)

	$\tau=-1$	$\tau=0$	$\tau=4$	$\tau=5$	$\tau=6$	$\tau=8.5$	%
Все типы фокальных механизмов							
μ	0.80	0.83	0.97	1.01	1.04	1.13	29.2
σ	0.47	0.49	0.55	0.57	0.58	0.62	24.2
$Q(0.95)$	1.6	1.6	1.9	1.9	2.0	2.2	27
$Q(0.99)$	1.9	2.0	2.3	2.3	2.4	2.6	26
Сдвиги							
μ	0.68	0.71	0.86	0.89	0.93	1.02	33.3
σ	0.44	0.45	0.51	0.53	0.54	0.58	24.1
$Q(0.95)$	1.4	1.5	1.7	1.8	1.8	2.0	29
$Q(0.99)$	1.7	1.8	2.1	2.1	2.2	2.4	28
Сбросы							
μ	0.79	0.81	0.91	0.93	0.96	1.02	22.5
σ	0.41	0.43	0.49	0.51	0.52	0.56	26.8
$Q(0.95)$	1.5	1.5	1.7	1.8	1.8	1.9	24
$Q(0.99)$	1.7	1.8	2.1	2.1	2.2	2.3	25
Взбросы							
μ	0.83	0.87	1.02	1.06	1.10	1.20	30.8
σ	0.49	0.51	0.57	0.58	0.60	0.64	23.4
$Q(0.95)$	1.6	1.7	2.0	2.0	2.1	2.2	27
$Q(0.99)$	2.0	2.0	2.3	2.4	2.5	2.7	26

Можно констатировать, что радиус области афтершоковой активности с течением времени после основного события меняется более чем на 24 % для всех типов фокальных механизмов. Такие изменения для основных толчков с $M_m = 6.5$ приводят к разности радиусов области афтершоковой активности более 10 км, что превышает типичную ошибку определения координат эпицентров землетрясений в каталоге ANSS. Следовательно, при оценивании радиуса области афтершоковой активности для афтершоков с $M \geq M_{th} = 6.0$, начиная с магнитуды основного толчка 6.5, для всех типов фокальных механизмов необходим учет времени.

Рассмотрим зависимость радиуса области афтершоковой активности от типа фокального механизма основного толчка. Расчеты показывают, что для сдвиговых и сбросовых основных толчков $dR(0.95)$ и $dR(0.99)$ превышают 10 км, начиная с $M_m = 7.5$; максимальное значение $dR(0.95)$ составляет 56 и 63 км, $dR(0.99)$ – 64 и 79 км. Для взбросовых толчков $dR(0.95)$ и $dR(0.99)$ превышают 10 км, начиная с $M_m = 8.5$; максимальное значение $dR(0.95)$ равно 30 км, $dR(0.99)$ – 32 км. Поскольку средняя ошибка определения координат эпицентра в каталоге ANSS составляет ~ 10 км, то для основных толчков с магнитудой ≥ 7.5 необходимо учитывать тип фокального механизма основного толчка при оценке радиуса области афтершоковой активности для афтершоков с $M \geq M_{th} = 6.0$.

Аналогичным образом исследуем поведение μ и σ случайной величины (5) для афтершоков с $M \geq M_{th} = M_m - 1.1$ в зависимости от времени после основного толчка и типа

его фокального механизма. Согласно выполненным расчетам (рис. 7), для взбросовых толчков, как и для всех толчков без разделения по типу фокального механизма, значения μ и σ почти линейно возрастают по $\log_2 t$ на всем рассматриваемом интервале времени, что позволяет моделировать поведение этих статистик регрессией вида (7). Для сдвиговых основных толчков линейно возрастают только значения параметра μ , поведение которого также будем моделировать регрессией (7). Поведение σ , начиная с первых суток, практически не меняется (разброс равен 0.04), общий разброс – 0.19 (28 %). Поведение стандартного отклонения σ не является линейным: в течение первых суток после основного толчка наблюдается его рост, затем значения стабилизируются. Тем не менее, говорить о четкой закономерности мы не можем из-за малого числа серий (28) со сдвиговыми основными толчками и афтершоками с $M \geq M_{th} = M_m - 1.1$, произошедшими в течение первых суток после основного толчка (см. рис. 4, внизу).

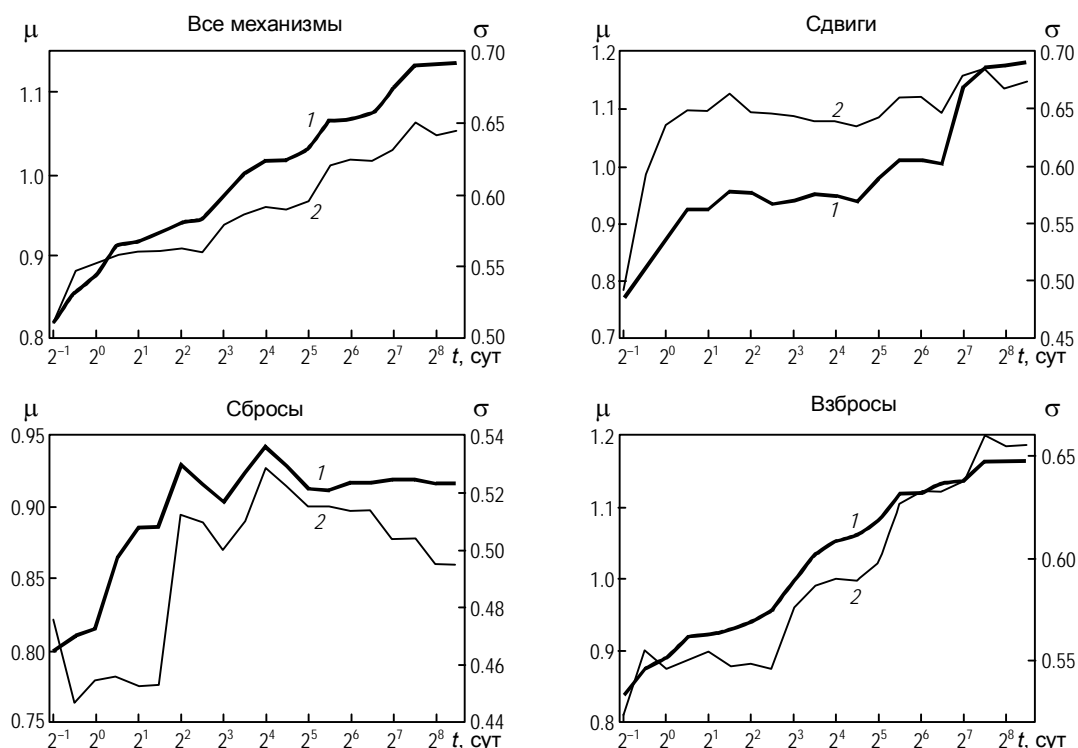


Рис. 7. То же, что на рис. 5, для афтершоков с $M \geq M_{th} = M_m - 1.1$

Fig. 7. The same as in Fig. 5 for aftershocks with $M \geq M_{th} = M_m - 1.1$

Мы не можем заменить σ на всем интервале времени его средним значением, так как при $q=0.95$, 0.99 ошибка для R , определяемого выражением (6), окажется >10 км. Поэтому, чтобы избежать недооценки радиуса, на всем интервале времени примем $\sigma=0.65$ (среднее значение за период $[2^{0.5}, 2^{8.5}]$ сут).

Для сбросовых основных толчков μ возрастает лишь в течение первых 16 сут после события; затем его значение стабилизируется. Тем не менее, трудно говорить о какой-либо закономерности, так как число серий со сбросовыми основными толчками и афтершоками с $M \geq M_{th} = M_m - 1.1$ мало (от 15 до 29; см. рис. 4, внизу). Поэтому, чтобы избежать ложной зависимости и, как следствие, недооценки радиуса, примем $\mu=0.92$ (среднее значение на интервале $[2^2, 2^{8.5}]$ сут). Поскольку значения σ меняются незначительно (от 0.45 до 0.53, разница со средним значением <0.05), примем его среднее значение 0.5.

Информация о временных вариациях статистик μ и σ для серий с основными толчками всех типов и афтершоками с $M \geq M_m - 1.1$ приведена в табл. 6 в виде параметров регрессии (7). Если значение статистики не меняется, то $V=0$. С использованием этой таблицы были рассчитаны значения μ , σ , $Q(0.95)$ и $Q(0.99)$ для афтершоков с $M \geq M_m - 1.1$ через 0.5, 1, 16, 32, 128, 362 сут после основного толчка с учетом его фокального механизма (табл. 7).

Таблица 6. Оценки параметров регрессии (7), выполненные с учетом и без учета типа фокального механизма основного толчка для афтершоков с $M \geq M_m - 1.1$ (использованы те же обозначения, что в табл. 2)

Статистика	s	U	V	r	e	e_{\max}
Все фокальные механизмы						
μ	0.32 (27.8 %)	0.876±0.0088	0.032±0.0019	0.99	0.01	0.03
σ	0.14 (21.8 %)	0.541±0.0071	0.013±0.0015	0.97	0.01	0.02
Сдвиги						
μ	0.41 (34.9 %)	0.851±0.0351	0.035±0.0074	0.92	0.04	0.07
σ	0.19 (28.0 %)	0.65	0	–	–	–
Сбросы						
μ	0.14 (15.3 %)	0.92	0	–	–	–
σ	0.08 (15.6 %)	0.5	0	–	–	–
Взбросы						
μ	0.33 (28.1 %)	0.888±0.0127	0.036±0.0027	0.99	0.02	0.03
σ	0.14 (20.6 %)	0.537±0.0094	0.014±0.0020	0.96	0.01	0.03

Таблица 7. Значения μ , σ , $Q(0.95)$ и $Q(0.99)$ случайной величины (5), рассчитанные для афтершоков с $M \geq M_{th} = M_m - 1.1$ в зависимости от разных временных интервалов после основного толчка τ и типа его фокального механизма (в последнем столбце – разрыв между начальным и конечным значениями соответствующих величин, %)

	$\tau=1$	$\tau=0$	$\tau=4$	$\tau=5$	$\tau=6$	$\tau=8.5$	%
Все типы фокальных механизмов							
μ	0.84	0.88	1.01	1.04	1.07	1.15	27.0
σ	0.53	0.54	0.59	0.61	0.62	0.65	18.5
$Q(0.95)$	1.7	1.8	2.0	2.0	2.1	2.2	23
$Q(0.99)$	2.1	2.1	2.4	2.4	2.5	2.7	22
Сдвиги							
μ	0.82	0.85	0.99	1.02	1.06	1.14	28.1
σ	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.0
$Q(0.95)$	1.9	1.9	2.1	2.1	2.1	2.2	14
$Q(0.99)$	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	12
Сбросы							
μ	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.0
σ	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.0
$Q(0.95)$	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	0.0
$Q(0.99)$	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	0.0
Взбросы							
μ	0.85	0.89	1.03	1.07	1.11	1.20	29.2
σ	0.52	0.54	0.59	0.61	0.62	0.66	21.2
$Q(0.95)$	1.7	1.8	2.0	2.1	2.1	2.3	25.0
$Q(0.99)$	2.1	2.1	2.4	2.3	2.6	2.7	24.0

Можно видеть, что, значение радиуса афтершоковой активности R , определяемое выражением (6), при $q=0.95, 0.99$ с течением времени меняется более чем на 22 % для серий со взбросовыми основными толчками и без учета фокальных механизмов основных толчков. Такое изменение для $M_m=6.5$ составляет 8 км, а для $M_m \geq 7$ превышает 14 км. Для сдвиговых основных толчков $R(0.95)$ и $R(0.99)$ с течением времени меняется на 14 и 12 % соответственно. При этом изменения становятся значимыми (>10 км), начиная с $M_m=7.2$. Для сбросовых основных толчков удалось обнаружить четкую зависимость R от времени. Таким образом, фактор времени необходимо учитывать при оценивании радиуса области афтершоковой активности, инициированной взбросовыми основными толчками, или когда тип основного толчка неизвестен для $M_m \geq 7$, а также сдвиговыми основными толчками для $M_m \geq 7.2$. Для афтершоков с $M \geq M_m - 1.1$, вызванных сбросовыми основными толчками, радиус области их проявления не зависит от времени, прошедшего после основного толчка.

Наконец, используя табл. 7, рассмотрим вопрос о зависимости радиуса области афтершоковой активности от типа фокального механизма основного толчка для афтершоков с $M \geq M_m = M_m - 1.1$. Расчеты показывают, что в случае сдвиговых толчков $dR(0.95)=11$ км для $M_m=7$, $dR(0.99)=13$ км для $M_m=7.5$; сбросовых – $dR(0.95)=11$ км и $dR(0.99)=11$ для $M_m=7$; взбросовых – $dR(0.95)=11$ км, а $dR(0.99)=12$ км для $M_m=8.5$. Следовательно, учет типа фокального механизма необходим для событий, имеющих магнитуду $M_m \geq 7$.

Учет ориентации плоскости разрыва основного толчка и обсуждение результатов

В настоящей работе авторы аппроксимировали границу области ожидаемых афтершоков окружностью с центром в эпицентре основного толчка и радиусом, зависящим от его магнитуды. Вместе с тем, контуры областей афтершоков, как правило, имеют форму напоминающую эллипс, ориентированный по разрыву (см., например, [Tajima, Kanamori, 1985; Henry, Das, 2001; Wu, Zhao, Wu, 2013; Баранов, Шебалин, 2017]). Попытка теоретически определить форму области афтершоков [Kaku, 1985] на основе модели эллиптической трещины, показала, что она имеет вид эллипса с соотношением осей 3:4, который с течением времени трансформируется в окружность. Отметим, что на практике трансформация эллипса в окружность наблюдается редко. Так, среди рассмотренных в [Tajima, Kanamori, 1985] 54 серий четкая трансформация эллипса в окружность прослежена только у Курильского землетрясения 1963 г. ($M_w=8.5$).

Для построения эллипсовидной области афтершоков необходимо знание центра эллипса, длины его осей и направления одной из них, оценка которых требует информации об афтершоках, произошедших в течение хотя бы 12 ч после основного толчка [Баранов, Шебалин, 2017]. При быстром оценивании области ожидаемых афтершоков в качестве ориентации большей оси эллипса можно принять угол между направлением на север и плоскостью разрыва (*strike*) при условии, что нодальная плоскость известна, например, исходя из ориентации разломов в районе очага. Также имеется возможность определить нодальную плоскость, используя данные двух сейсмостанций, расположенных на удалении от основного толчка, не превышающем нескольких десятков километров [Delouis, Legrand, 1999].

Заметим, что нодальная плоскость, соответствующая плоскости разрыва, может быть выбрана и по ориентации облака афтершоков, произошедших в течение первых суток после основного толчка [Marsan, Lengline, 2010]. В этом случае мы приходим

к задаче оценивания области афтершоков по данным о начальной стадии афтершокового процесса, анализируемой в [Баранов, Шебалин, 2017]. В настоящем исследовании рассматривается задача оценивания радиуса области афтершоковой активности по информации об основном толчке. Возможными грубыми оценками центра эллипса при этом могут быть либо эпицентр основного толчка, либо центроид тензора момента. Центр эллипса, совпадающий с центром облака афтершоков, рассчитывается как среднее координат всех афтершоков и может находиться на значительном удалении от эпицентра основного толчка [Баранов, Шебалин, 2017].

Было выполнено сравнение расстояний от центра облака афтершоков до эпицентра основного толчка и центроида, нормированных для сопоставимости на длину разрыва, которая зависит от магнитуды основного толчка и типа его фокального механизма [Wells, Coppersmith, 1994]. Результаты этого сравнения показали, что для всех фокальных механизмов предпочтительнее использование основного толчка (в этом случае значения средних и стандартных отклонений меньше); расстояние от эпицентра основного толчка до центра облака афтершоков в среднем составляет половину длины разрыва в очаге основного толчка (табл. 8).

Таблица 8. Рассчитанные для разных фокальных механизмов основного толчка значения средних и стандартных отклонений расстояний от центра облака афтершоков до основного толчка и центроида тензора моментов, нормированных на длину разрыва по [Wells, Coppersmith, 1994]

Фокальный механизм	Отклонения			
	от основного толчка		от центроида	
	среднее	стандартное	среднее	стандартное
Все механизмы	0.51	0.33	0.61	0.53
Сдвиг	0.43	0.32	0.51	0.42
Сброс	0.52	0.34	0.76	0.48
Взброс	0.54	0.32	0.64	0.58

Для ответа на вопрос о том, как изменится область афтершоковой активности при переходе от модели круга к модели эллипса, большая ось которого ориентирована по пересечению плоскости разрыва с горизонтом, вычислим отношения

$$r_1 = E[d_L \cdot 10^{-0.5M_m}] / E[d \cdot 10^{-0.5M_m}], \quad (8.1)$$

$$r_2 = E[d_P \cdot 10^{-0.5M_m}] / E[d_L \cdot 10^{-0.5M_m}], \quad (8.2)$$

$$r_3 = S[d_L \cdot 10^{-0.5M_m}] / S[d \cdot 10^{-0.5M_m}], \quad (8.3)$$

где d_L , d_P – расстояния от основного толчка до самого удаленного афтершока по направлению, задаваемому ориентацией плоскости разрыва, и перпендикулярно к нему, соответственно; d – расстояния от основного толчка до самого удаленного афтершока; $E[d_L \cdot 10^{-0.5M_m}] = \mu / 100$ – среднее значение; $S[d_L \cdot 10^{-0.5M_m}] = \sigma / 100$ – стандартное отклонение. Величины $d_L \cdot 10^{-0.5M_m}$ и $d_P \cdot 10^{-0.5M_m}$ – модификации случайной величины (5), в которых расстояния считаются по направлению плоскости разрыва и перпендикулярно к нему.

При расчете отношений (8.1)–(8.3) плоскость разрыва выбиралась с учетом ориентации облака афтершоков – использовалась нодальная плоскость, вдоль разрыва которой эпицентры афтершоков имеют большую дисперсию. В реальной ситуации нодальная плоскость может быть выбрана либо с учетом ориентации разломов в районе очага, либо по данным двух станций, расположенных вблизи основного толчка [Delouis, Legrand, 1999].

Отношение (8.2) характеризует отношение малой и большой осей эллипса; отношения (8.1) и (8.3) показывают, на сколько нужно скорректировать среднее значение μ и стандартное отклонение σ случайной величины (5), чтобы получить среднее значение и стандартное отклонение большой полуоси эллипса.

Отношения (8.1)–(8.3) рассчитывались с учетом фокальных механизмов основных толчков для рассматриваемых пороговых магнитуд афтершоков M_{th} и времени от момента основного толчка ($t_0=0$) до возрастающих в геометрической прогрессии значений $t_1=2^k$ сут, $k=-1, -0.5, 0, \dots, 8.5$. На рис. 8 приведены графики значений отношений r_1, r_2, r_3 , рассчитанные только для афтершоков с $M \geq M_{th}=4.5$.

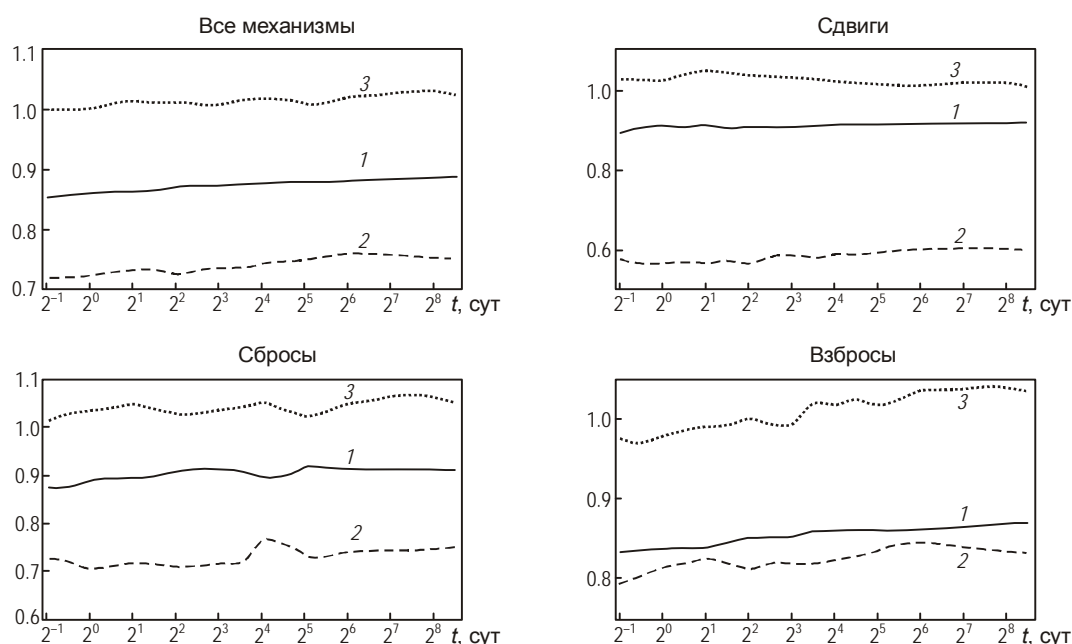


Рис. 8. Зависимости r_1 (1), r_2 (2), r_3 (3) от времени после основного толчка с учетом и без учета типа его фокального механизма, рассчитанные для афтершоков с $M \geq M_{th}=4.5$

Fig. 8. Ratios r_1 (1), r_2 (2), and r_3 (3) depending on time from the mainshock and type of its mechanism calculated for aftershocks with $M \geq M_{th}=4.5$

Результаты расчетов (см. рис. 8) показывают, что все три отношения, завися от типа фокального механизма основного толчка, незначительно меняются с течением времени. Отметим, что отношение средних r_2 , определяемых выражением (8.2), вдоль направления плоскости разрыва и перпендикулярно к нему близко к теоретическому значению 3:4, полученному по модели эллиптической трещины [Kaku, 1985] в случаях сбросового типа фокального механизма основного толчка и без его учета. Для остальных типов основных толчков расхождение фактических данных и теоретического значения существенны.

Отношение r_3 , определяемое по (8.3), близко к 1, т.е. стандартные отклонения случайной величины (5) и расстояния от основного толчка до самого удаленного афтершока вдоль направления плоскости разрыва примерно совпадают.

Рассчитанные с учетом и без учета типа фокальных механизмов основных толчков минимальные, средние, максимальные значения отношений r_1, r_2 и r_3 для разных пороговых магнитуд афтершоков M_{th} и афтершоков с $M \geq 4.5$ приведены в табл. 9.

Таблица 9. Рассчитанные для разных пороговых магнитуд афтершоков M_{th} и типов фокальных механизмов основных толчков и афтершоков с $M \geq 4.5$ минимальные, средние, максимальные значения отношений r_1 , r_2 и r_3 (в скобках – значения их стандартных отклонений)

M_{th}	r_1	r_2	r_3
Все фокальные механизмы			
4.5	0.85/0.88/0.89 (0.01)	0.72/0.74/0.76 (0.01)	1.00/1.02/1.03 (0.01)
6.0	0.79/0.82/0.84 (0.01)	0.61/0.63/0.66 (0.01)	0.93/0.96/0.99 (0.02)
$M_m-1.1$	0.75/0.78/0.80 (0.01)	0.68/0.70/0.74 (0.02)	0.90/0.94/0.96 (0.01)
Сдвиги			
4.5	0.89/0.91/0.92 (0.01)	0.56/0.58/0.60 (0.01)	1.01/1.03/1.05 (0.01)
6.0	0.78/0.82/0.85 (0.02)	0.47/0.55/0.63 (0.04)	0.84/0.90/0.99 (0.04)
$M_m-1.1$	0.81/0.84/0.88 (0.02)	0.43/0.49/0.55 (0.04)	0.98/1.01/1.06 (0.02)
Сбросы			
4.5	0.87/0.90/0.91 (0.01)	0.70/0.73/0.77 (0.02)	1.01/1.04/1.07 (0.02)
6.0	0.71/0.77/0.81 (0.02)	0.67/0.71/0.79 (0.03)	0.94/1.02/1.22 (0.08)
$M_m-1.1$	0.76/0.79/0.83 (0.02)	0.59/0.69/0.74 (0.03)	0.98/1.04/1.09 (0.04)
Взбросы			
4.5	0.83/0.85/0.87 (0.01)	0.79/0.82/0.84 (0.01)	0.97/1.01/1.04 (0.02)
6.0	0.79/0.83/0.84 (0.02)	0.59/0.63/0.67 (0.02)	0.93/0.97/1.01 (0.03)
$M_m-1.1$	0.71/0.76/0.78 (0.02)	0.74/0.78/0.82 (0.02)	0.84/0.90/0.92 (0.02)

Для афтершоков с $M \geq 4.5$ отношения r_1 , r_2 , r_3 имеют наибольшие значения для всех пороговых магнитуд M_{th} и для каждого типа фокального механизма (см. табл. 9); эти отношения для $M_{th}=4.5$ получены по большему количеству серий. Отмеченное позволяет считать, что для оценивания размеров эллипсоидной области афтершоков лучше использовать значения r_1 , r_2 , r_3 , полученные для $M_{th}=4.5$.

Если известно направление плоскости разрыва основного толчка, то эллипсоидная область афтершоковой активности строится следующим образом. Центр эллипса совпадает с эпицентром основного толчка, ориентация большой оси эллипса – с ориентацией плоскости разрыва. Средняя длина большой полуоси $E[d_L] = \mu E[r_1]$, где μ – среднее значение величины (5), $E[r_1]$ – среднее r_1 (8.1) из табл. 9, а стандартные отклонения совпадают ($S[d_L] \approx \sigma$). Затем по обратной функции нормального распределения рассчитываются $Q(0.95)$ или $Q(0.99)$ и длина большой полуоси эллипса по формуле (6). Длина малой полуоси равна длине большой, умноженной на среднее значение r_2 из табл. 9.

Значения r_1 , r_2 выбираются из табл. 9 для $M_{th}=4.5$ в соответствии с типом фокального механизма основного толчка; значения μ и σ – по заданной магнитуде афтершоков, времени после основного толчка и типу фокального механизма основного толчка из табл. 3, 5, 7.

Отметим, что мы не можем использовать $S[d_P]$ (стандартные отклонения расстояния от основного толчка до самого удаленного афтершока перпендикулярно плоскости разрыва) для оценивания длины малой оси эллипса с помощью обратной функции нормального распределения, поскольку нет оснований считать, что выполняется соотношение $d_P \propto 10^{0.5M}$.

В то же время, мы проверили, что $d_L \propto 10^{0.5M_m}$ и, следовательно, можно принять, что случайная величина $d_L \cdot 10^{-0.5M_m}$ имеет нормальное распределение. Мы использовали также средние значения и стандартные отклонения отношений (8.1)–(8.3), рассчитанные для афтершоков с $M \geq 4.5$, поскольку для больших пороговых магнитуд эти значения такие же или превышают их (см. табл. 9).

Авторы специально используют термин “эллипсоидный” вместо “эллипс”. Ранее [Баранов, Шебалин, 2017] ими было показано, что для области афтершоков предпочтительнее использование термина “стадион”, определяющего геометрическое место точек, равноудаленных от задаваемого отрезка прямой (разрыва). Расстояние, на которое точки удалены от этого отрезка, называется шириной или радиусом стадиона. В нашем случае форма стадиона имеет простую физическую интерпретацию – афтершоки происходят на некотором удалении от разрыва и, следовательно, термин “стадион” также предпочтительнее. При этом отрезок прямой, моделирующий разрыв, совпадает с большой осью эллипса, а ширина стадиона равна длине его малой полуоси.

Заключение

Предложен подход к решению задачи оценивания области афтершоковой активности, основанный на гипотезе Я. Кагана о самоподобии геометрических параметров зоны очага землетрясения, позволяющей распространить связь магнитуды землетрясения и размера очага на размер области афтершоковой активности. В качестве области ожидаемой афтершоковой активности рассматривался круг с центром в эпицентре основного толчка и зависящим от его магнитуды M_m радиусом, определяемым выражением (6). Показано, что расстояние от эпицентра основного толчка до эпицентра самого удаленного афтершока удовлетворяет масштабирующему соотношению $\lg R \propto 0.5M_m$ независимо от времени, прошедшего после основного толчка, и типа его фокального механизма.

Для случайной величины (5), равной отношению расстояния от основного толчка до самого удаленного афтершока с магнитудой не ниже заданных пороговых значений $M_{th}=4.5, 6.0, M_m-1.1$ и значения $10^{0.5M_m}$, рассчитаны средние значения μ и стандартные отклонения σ , соответствующие квантилям 0.95 и 0.99. Расчет названных статистик выполнен в зависимости от времени после основного толчка и типа его фокального механизма (см. табл. 3, 5, 7). Используя приводимые в таблицах значения, по формуле (6) можно рассчитать радиус круга с центром в эпицентре основного толчка, содержащего с вероятностью 0.95 или 0.99 все афтершоки с заданными характеристиками.

Анализ статистик случайной величины (5) позволил установить следующее.

1. Для афтершоков с $M \geq 4.5$ учитывать время после основного толчка имеет смысл только в случаях, когда магнитуда основных толчков ≥ 7 . Учитывать тип фокального механизма через 2^{16} сут после основного толчка целесообразно только для сильных землетрясений с магнитудой ≥ 8 .

2. Для афтершоков с $M \geq 6$ установлен линейный характер возрастания среднего значения и стандартного отклонения отношения расстояния от основного толчка до самого удаленного афтершока к $10^{0.5M_m}$. Показано, что с течением времени радиус афтершоковой активности меняется на 24–29 %, что приводит к необходимости учета фактора времени для основных толчков с магнитудой ≥ 6.5 ; для основных толчков с $M_m \geq 7.5$ при оценивании радиуса области афтершоковой активности следует учитывать тип фокального механизма.

3. Для афтершоков с $M \geq M_m - 1.1$ учет времени необходим для основных толчков, имеющих магнитуду ≥ 7 и взбросовый механизм очага (или когда механизм неизвестен). Для сдвиговых механизмов время следует учитывать, если магнитуда основного толчка $M_m \geq 7.2$. Тип фокального механизма основного толчка надо учитывать для основных толчков с $M_m \geq 7$.

При анализе модификаций случайной величины (5), в которых расстояние от эпицентра основного толчка до эпицентра самого удаленного афтершока считается вдоль направления плоскости разрыва основного толчка и перпендикулярно к нему, установлена связь средних значений и стандартных отклонений этих величин. Названная связь позволяет оценить размеры эллипсовидной области, содержащей афтершоки с магнитудами не ниже пороговых, в зависимости от времени после основного толчка и типа его фокального механизма.

Достоверность полученных результатов определяется широким набором данных о землетрясениях, произошедших в период 1975–2016 гг. на всем Земном шаре, взятых из каталога *ANSSComCat* Геологической службы США (*USGS*). Фокальные механизмы основных толчков взяты из каталога *GCMT*. В ходе исследования рассматривались 383 афтершоковые серии, выделенные с помощью программы В.Б. Смирнова [2009], реализующей алгоритм Молчана и Дмитриевой [1991; *Molchan, Dmitrieva, 1992*].

Полученные результаты имеют важное практическое значение, поскольку сразу же после того, как произошло сильное землетрясение, позволяют оценить не только область, внутри которой с вероятностью 95 и 99 % можно ожидать развитие афтершоковой активности, но и области, где с той же вероятностью возможны сильные афтершоки с $M \geq 4.5$, $M \geq 6.0$ и $M \geq M_m - 1.1$.

В заключение приведем алгоритм оценивания области афтершоковой активности по информации об основном толчке. В этом случае входными являются следующие данные:

- магнитуда основного толчка M_m ;
- тип его фокального механизма (может быть неизвестен);
- время после основного толчка, для которого выполняется оценка, $t = 2^{-1}, 2^0, 2^4, 2^5, 2^6, 2^{8.5}$ сут;
- пороговые значения магнитуд афтершоков $M_{th} = 4.5, 6.0$ или $M_m - 1.1$;
- значение вероятности $q = 0.95$ или 0.99 , с которой область будет содержать все афтершоки с $M \geq M_{th}$.

Задавшись значениями M_{th} , $\tau = \log_2 t$, типом фокального механизма основного толчка и q , по соответствующим таблицам находим значение $Q(q)$, используя для $M_{th} = 4.5$ табл. 3, для $M_{th} = 6.0$ табл. 5, $M_{th} = M_m - 1.1$ табл. 7. После этого по формуле (6) вычисляем радиус области афтершоковой активности $R(q)$.

Если, например, по данным о разломах в районе эпицентра основного толчка известна ориентация плоскости разрыва в его очаге, то размеры будущей афтершоковой области могут быть оценены в виде эллипса или стадиона. Для этого по заданным значениям M_{th} , $\tau = \log_2 t$, типу фокального механизма основного толчка и q для случайной величины (5) находим среднее значение (μ) и стандартное отклонение (σ) по соответствующим таблицам ($M_{th} = 4.5$ – табл. 3, $M_{th} = 6.0$ – табл. 5, $M_{th} = M_m - 1.1$ – табл. 7). Затем, используя табл. 9 для $M_{th} = 4.5$ и учитывая тип фокального механизма основного толчка, находим r_1, r_2 .

По обратной функции нормального распределения определяем длину стадиона, соответствующую большой полуоси эллипса $L(q)$, используя среднее $r_1 \mu$ и стандартное отклонение σ . Ширина стадиона (малая полуось эллипса) определяется как $P(q) = r_2 L(q)$. Ориентация стадиона или эллипса совпадает с ориентацией плоскости разрыва. Отметим, что при оценивании прогнозируемой области афтершоковой активности стадион представляется более предпочтительным, чем эллипс.

В части подготовки исходных данных, включая выделение основных толчков и их афтершоков, определение типов фокальных механизмов основных толчков, постановки задачи и выработки подхода к ее решению, статья подготовлена в рамках НИР госзадания ФИЦ ЕГС РАН № 007-00186-18-00.

В части обоснования связи магнитуды основного толчка с размерами области афтершоковой активности, написания программ и проведения необходимых расчетов работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16-05-00263А “Прогнозирование пространственного распределения и оценивание вероятности возникновения повторных сильных землетрясений”).

Литература

- Баранов С.В., Шебалин П.Н.* О прогнозировании афтершоковой активности. 1. Адаптивные оценки на основе законов Омори и Гуттенберга–Рихтера // Физика Земли. 2016. № 2. С.82–101. doi: 10.7868/S0002333716020034
- Баранов С.В., Шебалин П.Н.* О прогнозировании афтершоковой активности. 2. Оценка области распространения сильных афтершоков // Физика Земли. 2017. № 3. С.43–61. doi: 10.7868/S0002333717020028
- Костров Б.В.* Сейсмический момент, энергия землетрясения и сейсмическое течение горных масс // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 1. С.23–40.
- Молчан Г.М., Дмитриева О.Е.* Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С.19–50.
- Смирнов В.Б.* Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 2. С.7–22.
- Bath M.* Lateral inhomogeneities in the upper mantle // Tectonophysics. 1965. V. 2. P.483–514.
- Delouis B., Legrand D.* Focal Mechanism Determination and Identification of the Fault Plane of Earthquakes Using Only One or Two Near-Source Seismic Recordings // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1999. V. 89, N 6. P.1558–1574.
- Ekström G., Nettie M., Dziewonski A.M.* The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Phys. Earth Planet. 2012. V. 200-201. P.1–9. doi: 10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Gutenberg B., Richter C.F.* Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1956. V. 46. P.105–145.
- Henry C., Das S.* Aftershock zones of large shallow earthquakes: fault dimensions, aftershock area expansion and scaling relations // Geophys. J. Int. 2001. V. 147. P.272–293.
- Kagan Y.* Aftershock zone scaling // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2002. V. 92, N 2. P.641–655.
- Miller S.A.* Earthquake scaling and the strength of seismogenic faults // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, N 10. DOI: 10.1029/2001GL014181
- Molchan G.M., Dmitrieva O.E.* Aftershock identification: methods and new approaches // Geophys. J. Int. 1992. V. 109. P.501–516.
- Kanamori H., Anderson D.* Theoretical basis of some empirical relations in seismology // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1975. V. 65, N 5. P.1073–1095.
- Tajima F., Kanamori H.* Global Survey of aftershock area expansion patterns // Phys. Earth Planet. 1985. V. 40. P.77–134. DOI: 10.1016/0031-9201(85)90066-4
- Kaku R.* Theoretical Shape of Aftershock Area // Journal of the Seismological Society of Japan. 1985. V. 38, N 3. P.343–349.
- Marsan D., Lengline O.* A new estimation of the decay of aftershock density with distance to the mainshock // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. B09302. doi: 10.1029/2009JB007119
- Narteau C., Shebalin P., Holschneider M.* Temporal limits of the power law aftershock decay rate // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N B12. doi: 10.1029/2002JB001868

- Narteau C., Shebalin P., Hainzl S., Zöller G., Holschneider M. Emergence of a band-limited power law in the aftershock decay rate of a slider-block model // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 11. P.22-1–22-4. doi: 10.1029/2003GL017110
- Tsuboi C. Earthquake Energy, Earthquake Volume, Aftershock Area, and Strength of the Earth's Crust // *J. Phys. Earth.* 1956. V. 4. P.63–66.
- Utsu T. A Statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geophysical Magazine.* 1961. V. 30. P.521–605.
- Utsu T., Seki A. Relation between the Area of the Aftershock Region and the Energy of the Mainshock // *Journal of the Seismological Society of Japan.* 1954. V. 7. P.233–240.
- Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura R. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershocks activity // *J. Phys. Earth.* 1995. V. 43. P.1–33.
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1994. V. 84, N 4. P.974–1002.
- Wu W.-N., Zhao L., Wu Y.-M. Empirical Relationships between Aftershock Zone Dimensions and Moment Magnitudes for Plate Boundary Earthquakes in Taiwan // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2013. V. 103, N 1. P.424–436. doi: 10.1785/0120120173

Сведения об авторе

БАРАНОВ Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Кольский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”. 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14. Тел.: +7(81555) 797-59. E-mail: bars.vl@gmail.com

ШЕБАЛИН Петр Николаевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. Тел.: +7 (495) 333-11-12. E-mail: p.n.shebalin@gmail.com

ESTIMATING AFTERSHOCK AREA BASED ON THE MAINSHOCK INFORMATION

S.V. Baranov¹, P.N. Shebalin²

¹ Kola Branch of Federal Research Center Unified Geophysical Survey, RAS, Apatity, Russia

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia

Abstract. The paper considers the task of quick estimating an area where aftershocks are expected after a strong earthquake using information about its mainshock. The suggested approach is based on the hypotheses by Y. Kagan that geometrical parameters of earthquake focal zones are self-similar. This hypothesis allows one to extend scaling relation connecting an earthquake magnitude and its fault size to the aftershock area size. The research data are ANSS Comprehensive Catalog (ComCat) provided by USGS and GCMT catalog that contains seismic moment tensors and fault plane solutions of earthquakes. We used data for 1975–2016 covering the whole Earth. It is shown that scaling relation $R \propto 10^{0.5M_m}$ (M_m is a mainshock magnitude, R is a distance from the mainshock to the most remote aftershock) is satisfied independently on time after the mainshock and the type of its focal mechanism. This relation allows modeling an aftershock area by a circle centered at the mainshock epicenter and radius that depends on the mainshock magnitude. The radiuses of circles, where aftershocks with magnitudes exceeding given values are expected with probabilities of 95 and 99%, are estimated for different time intervals after the mainshock and types of its focal mechanism. It is also proposed the way to evaluate the aftershock activity area, if the mainshock fault plane is known. In this case, the shape reminds a “stadium” being an area of the points equally-spaced from the line segment. The results obtained can be used in practice for estimating an area, where strong repeated shocks are expected after a strong earthquake.

Keywords: mainshock, aftershocks, scaling relation, fault plane solution, aftershock area.

References

- Baranov S.V. and Shebalin P.N. Forecasting Aftershock Activity: 1. Adaptive Estimates Based on the Omori and Gutenberg-Richter Laws. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 413-431, doi: 10.1134/S1069351316020038
- Baranov S.V. and Shebalin P.N. Forecasting Aftershock Activity: 2. Estimating area of strong aftershock occurrence. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2017, vol. 2, pp. 366-384, doi: 10.7868/S0002333717020028
- Bath M. Lateral inhomogeneities in the upper mantle, *Tectonophysics*, 1965, vol. 2, pp. 483-514.
- Delouis B. and Legrand D. Focal Mechanism Determination and Identification of the Fault Plane of Earthquakes Using Only One or Two Near-Source Seismic Recordings, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1999, vol. 89, no. 6, pp. 1558-1574.
- Ekström G., Nettleton M., and Dziewonski A.M. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Phys. Earth Planet. Int.*, 2012, vol. 200-201, pp. 1-9, doi: 10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Gutenberg B. and Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1956, vol. 46, pp. 105-145.
- Henry C. and Das S. Aftershock zones of large shallow earthquakes: fault dimensions, aftershock area expansion and scaling relations, *Geophys. J. Int.*, 2001, vol. 147, pp. 272-293.
- Kagan Y. Aftershock zone scaling, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2002, vol. 92, no. 2, pp. 641-655.
- Kaku R. Theoretical Shape of Aftershock Area, *J. Seismol. Soc. Japan*, 1985, vol. 38, no. 3, pp. 343-349.
- Kanamori H. and Anderson D. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1975, vol. 65, no. 5, pp. 1073-1095.
- Kostrov B.V. Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow rock. *Izv., Earth Physics*, 1974, vol. 1, pp. 23-40.
- Marsan, D. and Lengline O. A new estimation of the decay of aftershock density with distance to the mainshock, *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, B09302, doi: 10.1029/2009JB007119
- Miller S.A. Earthquake scaling and the strength of seismogenic faults, *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol. 29, no. 10, doi: 10.1029/2001GL014181
- Molchan G.M. and Dmitrieva O.E. Aftershock identification: review and new approaches. *Computational seismology*, 1991, is. 24, pp. 19-50.
- Molchan G.M. and Dmitrieva O.E. Aftershock identification: methods and new approaches, *Geophys. J. Int.*, 1992, vol. 109, pp. 501-516.
- Narteau C., Shebalin P., and Holschneider M. Temporal limits of the power law aftershock decay rate, *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, no. B12, doi: 10.1029/2002JB001868
- Narteau C., Shebalin P., Hainzl S., Zöller G., and Holschneider M. Emergence of a band-limited power law in the aftershock decay rate of a slider-block model, *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, no. 11, pp. 22-1-22-4, doi: 10.1029/2003GL017110
- Smirnov V.B. Predictive anomalies of the seismic regime. I. Methodological basis for preparing initial data. *Geofizicheskie issledovaniya* (Geophysical Research), 2009, vol. 10, no. 2, pp. 7-22.
- Tajima F. and Kanamori H. Global Survey of aftershock area expansion patterns, *Phys. Earth Planet. Int.*, 1985, vol. 40, pp. 77-134, doi: 10.1016/0031-9201(85)90066-4
- Tsuboi C. Earthquake Energy, Earthquake Volume, Aftershock Area, and Strength of the Earth's Crust, *J. Phys. Earth*, 1956, vol. 4, pp. 63-66.
- Utsu T. A Statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophysical Magazine*, 1961, vol. 30, pp. 521-605.
- Utsu, T., Ogata Y., and Matsu'ura R. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershocks activity, *J. Phys. Earth*, 1995, vol. 43, pp. 1-33.
- Utsu.T., Seki A. Relation between the Area of the Aftershock Region and the Energy of the Mainshock, *J. Seismol. Soc. Japan*, 1954, vol. 7, pp. 233-240.
- Wells D.L. and Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1994, vol. 84, no. 4, pp. 974-1002.
- Wu W.-N., Zhao L., and Wu Y.-M. Empirical Relationships between Aftershock Zone Dimensions and Moment Magnitudes for Plate Boundary Earthquakes in Taiwan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2013, vol. 103, no. 1, pp. 424-436, doi: 10.1785/0120120173