

УДК 550.34

Муралиев А.М., Искендеров С.А.  
Институт сейсмологии НАН КР  
г.Бишкек, Кыргызстан

### О МЕТОДИКЕ ВЫДЕЛЕНИЯ АФТЕРШОКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЯНЬ-ШАНЯ

**Аннотация:** В статье рассматривается вопрос об унификации метода выделения афтершоков применительно к сильным землетрясениям Тянь-Шаня. Проведено формальное описание афтершокового процесса сильных землетрясений на основе закона Омори-Хирано [3,4]. Предложены алгоритмы и компьютерные программы для идентификации афтершоков сильных землетрясений. Идентификация последующих толчков необходима для изучения статистических свойств совокупности очагов землетрясений региона и для разработки метода прогноза сильных афтершоков.

**Ключевые слова:** землетрясение, механизм очага, афтершок, магнитуда, энергетический класс, Тянь-Шань.

### ТЯНЬ-ШАНЬДАГЫ КҮЧТҮҮ ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨРДҮН АФТЕРШОКТОРУН БӨЛҮП АЛУУ ЫКМАСЫ ЖӨНҮНДӨ

**Кыскача мазмуну:** Макалада Тянь-Шандын күчтүү жер титирөөлөрүнө байланыштуу афтершокторду бөлүп алуу ыкмасын иштеп чыгуу боюнча маселе каралат. Күчтүү жер титирөөлөрдүн афтершоктук процессин Омори-Хиранонун закону [3,4] менен формалдык жазып чыгуу жасалган. Күчтүү жер титирөөлөрдүн афтершокторун идентификациялоо үчүн түзүлгөн алгоритмдер жана компьютердик программалар сунуш кылынган. Аймактагы жер титирөөлөрдүн уюшулган очокторунун статистикалык касиеттерин изилдөө үчүн жана күчтүү жер титирөөлөрдү божомолдоо усулун иштеп чыгуу үчүн кийинки титирөөлөрдү идентификациялоо зарыл.

**Негизги сөздөр:** жер титирөө, очок механизми, афтершок, магнитуда, энергетикалык класс, Тянь-Шань.

### ABOUT METHOD OF AFTERSHOCK PICKING FOR STRONG TIEN SHAN EARTHQUAKES

**Abstract:** The development of methods of aftershock pickings for strong Tien Shan earthquakes is presented in the paper. A formal description of an aftershock process of strong earthquakes according to the Omori-Hirano law [3.4] was conducted. Algorithms and computer programs for identification the aftershock of strong earthquakes are presented in the paper. Identification of aftershocks is necessary for studing of statistical properties of the cumulative earthquakes in the region and for the development of the method of strong aftershock predictions.

**Keywords:** earthquake, focal mechanism, aftershock, magnitude, energy class, Tien Shan.

#### Введение

Известно, что афтершок – это английское слово «aftershock» - после толчка, т.е. после главного толчка основного землетрясения происходят многочисленные толчки – афтершоки. Сильные землетрясения всегда сопровождаются многочисленными афтершоками, количество и величина магнитуды которых со временем уменьшаются, а продолжительность проявления может длиться месяцами и годами. Сильные афтершоки обычно происходят в первые часы (дни) после главного толчка. Возникновение афтершоков объясняется упругим последствием: во время главного толчка происходит неполное снятие напряжений,

накопленных в области очага, а в результате афтершоковой активности напряжения постепенно уменьшаются до некоторого стабильного уровня. Магнитуда самого сильного афтершока, по крайней мере, на единицу меньше магнитуды главного толчка. Однако в некоторых случаях через некоторый промежуток времени после главного толчка (недели, месяцы) в том же месте происходит повторное землетрясение почти той же силы, что и главное. Такое землетрясение уже нельзя рассматривать как афтершок: за это время афтершоковая активность уже спадает, а сила повторного толчка ненамного меньше силы первого землетрясения. Сильные афтершоки, повторные землетрясения представляют собой реальную опасность, которая вызывает значительные разрушения зданий, промышленных сооружений и природных объектов, ослабленных в результате первого толчка – основного землетрясения. Вопросы о выделении среди многочисленных сейсмических событий (фор- и афтершоков, рои, повторных и группировании землетрясений) окончательного решения пока не имеют. В данной статье мы рассмотрим способы выделения афтершоков применительно к сильным землетрясениям Тянь-Шаня. Отметим, что изучение свойств афтершоков необходимо для понимания природы сейсмического процесса и его энергетических характеристик [1]. Выявление аномалии в проявлении афтершокового процесса используется для прогноза сильных последующих толчков [2]. Самое важное для изучения сейсмичности региона - это идентификация афтершоков в каталоге землетрясений [6].

Целью настоящего исследования является разработка количественного метода выделения серии афтершоков и его применение для сильных землетрясений Тянь-Шаня. Для разработки метода проведён анализ закона затухания интенсивности потока повторных толчков сильных землетрясений. Для выделения афтершоков используется динамический алгоритм [1]. Затухание интенсивности последовательности афтершоков во времени аппроксимируется законом Омори-Хирано. За область афтершоков берётся эллипс рассеивания, где каждый раз вычисляются параметры эллипса рассеивания.

### Теоретические предпосылки

Впервые модель затухания интенсивности потока афтершоков во времени  $n_a(\tau)$  была предложена Омори [3]:

$$n_a(\tau) = \frac{a}{\tau + b}, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  - некоторые постоянные;  $\tau$  - время после главного толчка.  $n_a(\tau)\Delta\tau$  - число афтершоков в интервале времени  $(\tau, \tau + \Delta\tau)$ . Позднее эта модель была усовершенствована Хирано [4] и подробно исследована Утсу [5] путём введения параметра степенного затухания  $c$ :

$$n_a(\tau) = \frac{a}{(\tau + b)^c}. \quad (2)$$

Степенная модель обладает недостатком, связанным с поведением параметра  $b$ , который введён в модель с единственной целью – избежать сингулярности при  $\tau = 0$ . Значительно более естественной представлялась бы модель экспоненциального затухания:

$$n_a(\tau) = \alpha \cdot e^{-\lambda_a \tau}. \quad (3)$$

Оценка параметров  $\alpha$  и  $\lambda_a$  методом максимального правдоподобия имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{N_a^2}{T_a} ; \quad (4)$$

$$\lambda_a = \frac{N_a}{T_a} , \quad (5)$$

где  $N_a$  - общее число афтершоков в последовательности,  $T_a$  - продолжительность последовательности.

В настоящей работе проведена оценка параметров степенной модели Омори-Хирано методом максимального правдоподобия при предположении независимости афтершоков друг от друга. Для практического применения параметров модели затухания Омори-Хирано произведена следующая процедура. Функция интенсивности афтершоков (2) пронормирована и переведена к плотности распределения афтершоков во времени

$$P_a(\tau) = \frac{1}{N_a} n_a(\tau):$$

$$P_a(\tau) = \frac{(c-1)b^{c-1}}{(\tau+b)^c} . \quad (6)$$

В предположении независимости афтершоков друг от друга функция правдоподобия имеет следующий вид:

$$L = N_a (\ln(c-1) + (c-1) \ln b) - c \sum_{i=1}^{N_a} \ln(\tau_i + b) . \quad (7)$$

Приравнявая к нулю производные по  $b$  и  $c$ , находим точку экстремума функции правдоподобия:

$$\frac{N_a(c-1)}{b} - c \sum_{i=1}^{N_a} \frac{1}{\tau_i + b} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{N_a}{c-1} + N_a \ln b - \sum_{i=1}^{N_a} \ln(\tau_i + b) = 0 . \quad (9)$$

Выражая параметр  $c$  из первого уравнения в виде :

$$c = \frac{N_a}{N_a - \sum_{i=1}^{N_a} \frac{b}{\tau_i + b}} , \quad (10)$$

получаем трансцендентное уравнение относительно параметра  $b$  :

$$N_a^2 / \sum_{i=1}^{N_a} \frac{b}{\tau_1 + b} - N_a(1 - \ln b) - \sum_{i=1}^{N_a} \ln(\tau_1 + b) = 0 \quad . \quad (11)$$

### Описание алгоритма

Каждое землетрясение определённого энергетического класса (например,  $K_R \geq 6.0$ ) использовано в качестве исходного данного. В качестве афтершока принимаются такие сейсмические события, которые удовлетворяют условиям:

$$0 < \tau = t_j - t_i < \tau_0 \quad , \quad (12)$$

$$d = \|\chi_j - \chi_i\| < d_0 \quad , \quad (13)$$

где  $\tau_0$  и  $d_0$  – определённые параметры, описанные ниже,  $\|\chi_j - \chi_i\|$  – расстояние в некоторой метрике между эпицентрами исходного  $i$ -го и последующего  $j$ -го событий в каталоге,  $t_k$  – время возникновения  $k$ -го землетрясения.

Параметры  $\tau_0$  и  $d_0$  являются порогами по времени и расстоянию для идентификации предварительных афтершоков. В следующем приближении по ходу развития событий они изменяются, т.е. итеративно уточняются. Преимуществом этого алгоритма является динамичность порогов по  $d$ , в отличие от обычно задаваемых фиксированных порогов. Исходными данными в этом алгоритме являются: каталог землетрясений; начальные значения порогов  $\tau_0$  и  $d_0$ ; некоторые вероятностные пороги  $\theta_1$  и  $\theta_2$ .

Первый шаг алгоритма – выбор исходного землетрясения для вычисления его афтершоков – начинается последовательно с самого высокого по энергии и первого по времени возникновения для равных по энергии землетрясений. Для каждого исходного землетрясения осуществляется поиск сопровождающих его последующих событий, т.е. производится проверка выполнения условий (12) и (13).

Сравнение по расстоянию. Начальное значение порога по расстоянию задаётся, как средний радиус области афтершоков исходного землетрясения, и в дальнейшем это значение должно уточняться.

В начале накопления афтершоков сравнение по расстоянию заключается в том: попадает ли событие в круг радиусом  $d_0$  с центром в точке  $\chi_i$ .

В действительности часто области афтершоков имеют форму близкую к эллипсу, а эпицентр главного толчка остаётся на краю в афтершоковой области. Поэтому в следующем приближении, если уже имеется достаточное число событий ( $n_a > N_0$ ), вместо круга за область афтершоков берётся эллипс рассеивания:

$$f_{\sigma_x \sigma_y}(x, y) = \frac{1}{1-r^2} \left[ \frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2r(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2} \right] = L_\theta \quad , \quad (14)$$

где  $m_x, m_y$  – координаты центра облака точек,  $\sigma_x, \sigma_y, r$  – параметры эллипса,

$L_\theta - 100(1 - \theta)$  – процентная точка  $\chi_2^2$  – распределения. В зависимости от заданного уровня значимости  $\alpha$  получаем  $\theta = 100(1 - \alpha)$  – процентные эллипсы рассеивания.

Вычисляем параметры эллипса рассеивания (14), т.е. величину смещения центра эллипса от эпицентра исходного землетрясения, полуоси эллипса, угол с большой осью эллипса. При этом необходимо учитывать возможные случаи вырождения эллипса в отрезок или в точку.

С появлением следующего события проверяем выполнение условия (13) с эллиптической метрикой (14) –  $f_{\sigma_x, \sigma_y}(x, y) < L_{\theta}$ , т.е. попадёт ли оно в  $\theta$  % - ный эллипс.

Сравнение во времени. Проверяется выполнение условия (12). В качестве первого приближения задаётся некоторое время  $\tau_0$ , достаточно малое, чтобы обеспечить малый уровень ошибки II рода, т.е. включение в афтершоки случайные толчки, и не исчерпывающие большие последовательности афтершоков. Далее параметр  $\tau_0$  уточняется, исходя из теоретических моделей и фактической продолжительности роя во времени.

Затухание последовательности афтершоков во времени аппроксимируем следующими двумя распределениями:

- 1) экспоненциальным законом:

$$n_a(\tau) = \alpha \cdot e^{-\lambda_a \tau},$$

где  $\alpha$  и  $\lambda_a$  - параметры распределения.

- 2) законом Омори-Хирано:

$$n_a(\tau) = \frac{a}{(\tau + b)^c}, \quad c > 1,$$

где  $a, b, c$  – постоянные.

Временной порог  $\tau_0$  сначала уточняют, исходя из экспоненциального закона распределения в зависимости от имеющегося количества афтершоков. Когда возможности продления порога по времени по экспоненциальному распределению исчерпаны, порог проверяется по распределению Омори-Хирано и временной порог принимает новое значение.

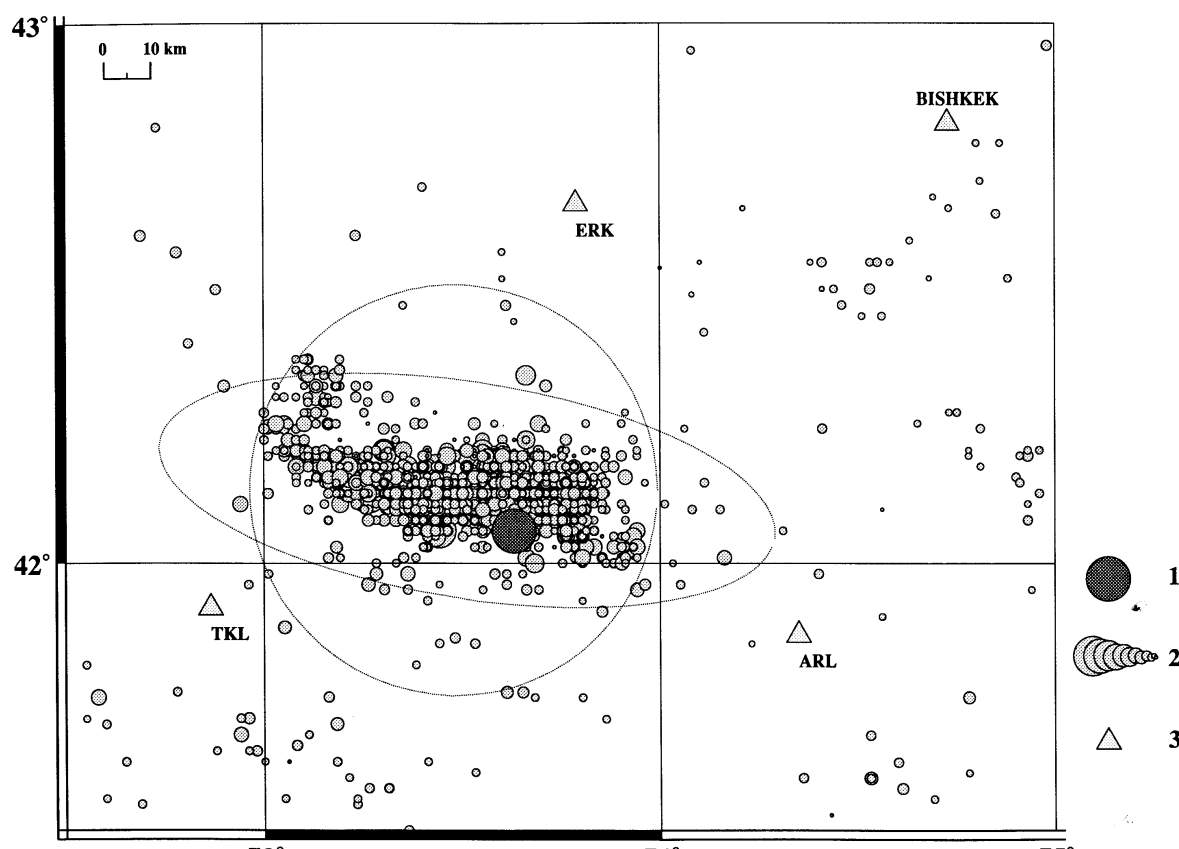
Продление времени для идентификации афтершоков будет прекращено, когда итерационное уточнение 0 (с помощью экспоненциального и Омори-Хирано распределений) не даёт дальнейшего увеличения  $\tau_0$ . Процесс выделения афтершоков  $i$ -го исходного землетрясения прекращается и следует переход к  $(i+1)$ -му исходному землетрясению для выделения его афтершоков.

Таким образом, пороги по расстоянию и времени для идентификации афтершоков являются динамическими, т.е. каждый раз автоматически итеративно уточняются.

**Результаты применения метода идентификации афтершоков** для сильных землетрясений Тянь-Шаня. Для идентификации афтершоков сильных землетрясений Кыргызстана (Чаткальского 1946 г. с магнитудой  $M = 7.6$ ; Маркансуйского 1974 г. с  $M = 7.4$ ;

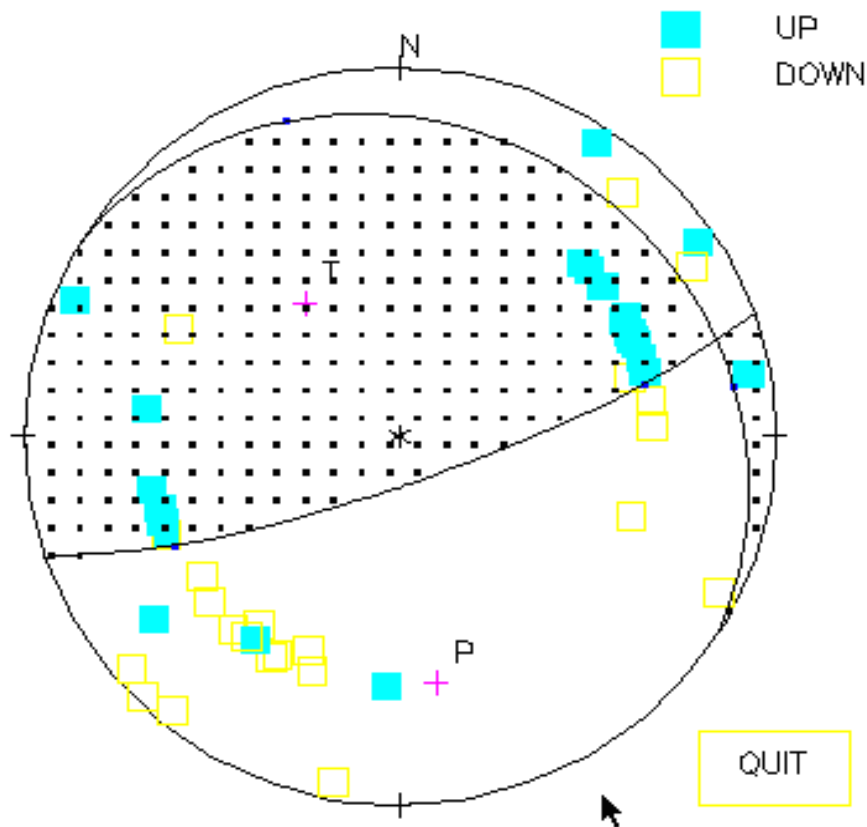
Исфара-Баткенского 1977 г. с  $M=6.9$ ; Алайского 1978 г. с  $M=7.8$ ; Сарыкамышского 1970 г. с  $M=7.5$ ; Жаланаш-Тюпского 1978 г. с  $M=6.6$ ; Суусамырского 1992 г. с  $M=7.3$  и др.) применён закон Омори –Хирана [6]. Основное внимание уделено оценке размера занимаемой пространственной области афтершоков и затуханию последовательности афтершоков во времени.

В качестве примера на рисунке 1 показано выделение афтершоков Суусамырского землетрясения 1992 года с магнитудой  $M=7.3$ , как результат применения вышеуказанного алгоритма. По предложенным алгоритмам составлена компьютерная программа, получившая название «идентификация афтершоков».



**Рисунок 1.** Пространственное распределение эпицентров афтершоков и главного толчка Суусамырского землетрясения 1992 года с  $M=7.3$ . Кругом обозначен предварительный порог по расстоянию для идентификации афтершоков; эллипсом – окончательное распределение афтершоковой области за период с 19 августа по 26 октября 1992 г. 1- эпицентр главного толчка; 2- эпицентры афтершоков и других сейсмических толчков; 3- сейсмические станции.

Выявлено направление развития афтершокового процесса Суусамырского землетрясения 1992 года – полоса эпицентрального поля афтершоков трассируется с востока на запад и северо-запад. Эпицентры афтершоков расположены в северном и северо-западном направлениях от эпицентра главного толчка. Для объяснения этого явления мы привлекли к анализу данные о механизме очага Суусамырского землетрясения (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Стереограмма механизма очага Суусамырского землетрясения 1992 года с магнитудой  $M=7.5$ , глубиной очага  $h=20$  км в проекции нижней полусферы.

Результаты изучения механизма очага Суусамырского землетрясения 1992 года с  $M=7.3$  по данным региональной и мировой сети сейсмических станций представлены в [7]. Одна из нодальных плоскостей, имея вертикальный характер, простирается в близширотном направлении, по ней происходит сдвиговое (левостороннее) движение. Другая равновероятная нодальная плоскость имеет пологий характер и простирается по направлению с востока-юго-востока на северо-запад. Южное-юго-западное крыло разрыва поднимается и продвигается на запад и северо-западном. Основное излучение сейсмической энергии из очага ориентировано в запад-северо-западном направлении. По-видимому, это одно из доказательство того, что эпицентры афтершоков расположены в запад-северо-западном направлении.

### Заключение

Предложен унифицированный метод идентификации афтершоков, который был применён для сильных землетрясений Кыргызского Тянь-Шаня. По расчётным математическим формулам составлены алгоритмы и компьютерные программы для оценки идентификации афтершоков сильных землетрясений. Эпицентры афтершоков Суусамырского землетрясений 1992 г. с магнитудой  $M=7.3$  расположены по площади внутри большого круга и эллипса, вне этих геометрических фигур эпицентры по предложенной методике не считаются повторными толчками (рисунок 1). Развитие облака афтершоков Суусамырского землетрясения 1992 г. сопоставлено с его механизмом очага. Ориентация

плоскости разрыва в очаге Суусамырского землетрясения 1992 года совпадает с ориентацией большой оси эллипса эпицентрального поля его афтершоков.

Анализ результатов исследований афтершокового процесса сильных землетрясений Тянь-Шаня показал, что пространственно-временное распределение афтершоков подчиняются закону Омори-Хирана и описывается эллипсом рассеивания.

Предложенная методика может быть применена к любому региональному каталогу сильных землетрясений для выделения афтершоков.

*Работа выполнена при поддержке гранта МНТЦ КР-2011.*

### Литература

1. Прозоров А.Г. Характеристика группирования землетрясений мира. // Прогноз землетрясений и изучение строения Земли. М.: Наука, 1983. С. 18–26 (Вычисл. сейсмология; Вып. 15).
2. Кейлис-Борок В.И., Ротвайн И.М., Сидоренко Т.В. Усиленный поток афтершоков как предвестник сильных землетрясений. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 242. № 3. С. 567–569.
3. Omori F/ On the aftershocks of earthquake. // J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo. 1894. V.7. P. 111–200.
4. Hirano R. Investigation of the aftershocks of the great Kwanto earthquake. // J. Met. Soc. Japan. 1924. V. 11. № 2. P. 77–85.
5. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks. // Geophys. Mag. 1961. V. 30. № 4. P. 521–605.
6. Прозоров А.Г., Искендеров С.А. Затухание интенсивности потока афтершоков сильных землетрясений Киргизского региона. // Известия АН Кирг.ССР. 1987. №2. С. 71-77.
7. Муралиев А.М. Механизм очага Суусамырского землетрясения 19 августа 1992 года. // Сейсмологические наблюдения в Кыргызстане. Бишкек. Изд-во: Илим, 1993. С. 64-69.

*Рецензент: к.г.-м.н. М.Омуралиев.*