

## Исследование афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения

© 2019 В. Н. Сычев\*, Н. А. Сычева, С. А. Имашев

Научная станция РАН в г. Бишкеке, Кыргызстан

\*E-mail: sychev@gdirc.ru

Исследована афтершоковая последовательность Суусамырского землетрясения 19.08.1992 г.,  $M = 7.3$ . Выделение афтершоков из каталога сейсмических событий (1980–2017 гг.) Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской республики производилось на основе подхода Г.М. Молчан, О.Е. Дмитриевой. Построено распределение полученной выборки событий в пространстве и времени. Каталог землетрясений и афтершоковая последовательность Суусамырского землетрясения рассмотрены с позиций неравновесной термодинамики с использованием статистики Тсаллиса, проведен анализ дальних корреляций. Показано, что параметры исследуемой афтершоковой последовательности описываются степенными зависимостями, а также подчиняются закону Омори–Утсу. Параметр Тсаллиса  $q$  для афтершоковой последовательности (1.605) превышает значение  $q$ , вычисленное для всего каталога землетрясений (1.569), что указывает на сохранение возросших корреляций во время следования афтершоков. Динамическое определение параметра  $q$  для событий по всему каталогу до и после Суусамырского землетрясения позволило отметить резкое возрастание взаимных корреляций в рассматриваемом регионе до главного события, резкое снижение сразу после него с дальнейшим возвратом к среднему значению, наблюдаемому до главного толчка.

**Ключевые слова:** землетрясение, фокальный механизм, афтершоки, закон Омори, энтропия, статистика Тсаллиса, неэкстенсивность.

## Study of aftershock sequence of Suusamyr earthquake

Vladimir N. Sychev, Nailia A. Sycheva, Sanjar A. Imashev

Research Station of RAS in Bishkek City, Kyrgyzstan

\*E-mail: sychev@gdirc.ru

Aftershock sequence of Suusamyr earthquake (August 19, 1992,  $M = 7.3$ ) has been investigated. The aftershocks were selected based on approach of G.M. Molchan, O.E. Dmitrieva within the seismic catalog of Institute of Seismology of National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic (CIS) including events from 1980 to 2017. The distribution of the resulting events sample in space and time has been obtained. The catalog of earthquakes and the aftershock sequence of Suusamyr earthquake has been analyzed from the position of non-equilibrium thermodynamics using Tsallis statistics, the analysis of long-range correlations has been performed as well. It is shown that parameters of the aftershock sequence are described by power law, and governed by the Omori–Utsu law. Tsallis parameter for the aftershock sequence ( $q = 1.605$ ) exceeds the value calculated for the entire catalog of earthquakes ( $q = 1.569$ ), which indicates that increased correlations persist during the aftershock following. Dynamic determination of  $q$  for events throughout the catalog before and after Suusamyr earthquake allows to note a sharp increase in cross correlations in the considered region before the main event, and a sharp decrease immediately after it with a further return to average value observed before the main shock.

**Keywords:** earthquake, focal mechanism, aftershocks, Omori law, entropy, Tsallis statistics, non-extensivity.

## Введение

Тянь-Шань является зоной современных интенсивных деформаций, которые сопровождаются активным сейсмическим процессом. Наиболее сильные землетрясения известны на Северном Тянь-Шане (зона сочленения Тянь-Шаньского орогена и Казахской платформы), где они образуют полосу, включающую в себя северный борт поднятия Киргизского хребта и систему поднятий хребтов Заилийский Алатау и Кунгей Алатау [Крестников и др., 1987]. Здесь известны такие сильнейшие землетрясения, как Беловодское (1885,  $M = 6.9$ ), Верненское (1887,  $M = 7.3$ ), Чиликское (1889,  $M = 8.3$ ), Кебинское (1911,  $M = 8.2$ ), Кебино-Чуйское (1938,  $M = 6.9$ ).

19 августа 1992 г. на Северном Тянь-Шане произошло сильное землетрясение, инструментальный эпицентр которого находился в Суусамырской впадине. На поверхности возникли сейсмогенные разломы и многочисленные вторичные гравитационные сейсмодислокации. Суусамырское событие длительное время сопровождалось афтершоковой деятельностью. По сейсмическим данным, после него произошли немногочисленные события умеренной силы – Луговское (22.05.2003), Карагайбулакское (16.01.2004), Кочкорское (25.12.2006) и др., которые также сопровождались афтершоковыми последовательностями.

Определенный интерес представляет изучение обстановки в сейсмоактивном регионе в периоды не только активации деформационных процессов, приводящих к землетрясениям, но и в период последующей релаксации напряжений, во время следования афтершоков. В степенных характеристиках последовательностей афтершоков проявляется существенно нелинейный, детерминированно-хаотический характер поведения системы разломов, в которых они происходят, а их различные характеристики могут отражать текущее состояние системы [Шебалин, 2004]. В частности, уже показано на другом масштабном уровне, что переход распределения энергии сигналов акустической эмиссии от экспоненциальной формы к степенной свидетельствует о том, что материал образца находится на критической стадии разрушения [Дамаскинская и др., 2018].

Поэтому изучение афтершоковых последовательностей с точки зрения динамически сложных систем на основе современных подходов и методик является актуальной задачей.

В данной работе афтершоковая последовательность Суусамырского землетрясения описана с помощью модифицированного закона Омори, это позволяет сопоставить значения полученных параметров с результатами исследований землетрясений в других сейсмоактивных регионах. Каталог землетрясений и афтершоковая последовательность Суусамырского землетрясения рассмотрены также с позиций неравновесной термодинамики с использованием статистики Тсаллиса, что дает возможность проверить гипотезу о том, что во время катастрофы значительно увеличиваются взаимные корреляции [Пригожин, Стенгерс, 1986], которые сохраняются и во время следования афтершоков.

Полученные оценки параметров на основе анализа афтершоков крупного сейсмического события можно принять в качестве эталонных для данного региона и в дальнейшем проанализировать умеренные землетрясения, происходящие на исследуемой территории.

## Результаты и обсуждение

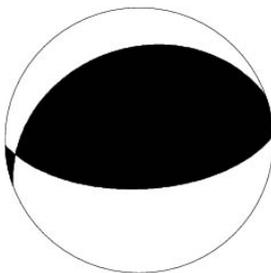
**Суусамырское землетрясение.** Суусамырскому землетрясению посвящено много работ [Кучай и др., 2002; Богачкин и др., 1993; Джанузаков и др., 1997; и др.]. Напомним некоторые его характеристики.

Суусамырское землетрясение является одним из самых сильных сейсмических событий на территории Северного Тянь-Шаня за последние годы. Магнитуда главного толчка составила 7.3, глубина очага 23 км, интенсивность сотрясений 9 баллов. Эпицентр его ( $\varphi = 42.1$  с.ш.;  $\lambda = 73.6$  в.д.) находился в Суусамырской впадине в слабоактивном сейсмическом районе [Богачкин и др., 1997].

Землетрясение произошло в зоне Предарамсуйского краевого разлома на сопряжении Арамсуйского инверсионного поднятия и Суусамырской впадины и сопровождалось образованием сейсмогенного разрыва и оползней. Следует отметить, что активность данного разлома в четвертичной геологии до этого землетрясения не проявлялась [Абдрахматов и др., 2001].

По данным [Богачкин и др., 1997; Джанузаков и др., 1997], к северу от эпицентра сформировалась протяженная система сейсмодислокаций негравитационного характера, отражающая выход очага на дневную поверхность. Взбросовый характер остаточных деформаций с небольшим правым сдвигом наблюдается для двух субширотных сейсморазрывов, которые прослеживаются вдоль Арамсуйского горного массива. Расстояние между сейсморазрывами 25 км, область между ними заполнена вторичными нарушениями (оползни) земной поверхности. Общая протяженность системы широтных сеймотектонических и сейсмогравитационных дислокаций составляет около 50 км. Поверхность сместителя падает на юг под углом  $70^\circ$ .

Согласно [Кучай и др., 2002], по механизму очага землетрясения из каталога СМТ (Centroid moment tensor) (рис. 1) тип смещения в очаге является взбросовым и обе nodal-плоскости имеют субширотное простирание. Одна из них падает под углом  $60^\circ$ , и по ней возможен взброс с очень незначительной правосдвиговой составляющей, что хорошо согласуется с простиранием и падением разрыва, вышедшего на поверхность. По другой плоскости, падающей к северу под углом в  $31^\circ$ , возможен надвиг. Эпицентр главного события располагается в 20 км южнее плоскости разрыва. При угле падения в  $60^\circ$  глубина очага может соответствовать 35 км. Главные оси очага ориентированы следующим образом: сжатие близгоризонтально, субмеридионального направления, растяжение близвертикально.



**Рис. 1.** Фокальный механизм очага Суусамырского землетрясения (решение СМТ). Дата: 1992.08.19. Время: 02:04:45.8 GMT.  $\varphi = 42.19^\circ$  с.ш.;  $\lambda = 73.32^\circ$  в.д.  $H = 17.0$  км.  $M_w = 7.2$ ;  $mb = 6.8$ ;  $M_s = 7.4$ .  $M_0 = 7.68 \times 10^{26}$  (скалярный сейсмический момент). Нодальные плоскости: strike = 250 dip = 31 slip = 74; strike = 88 dip = 60 slip = 99.

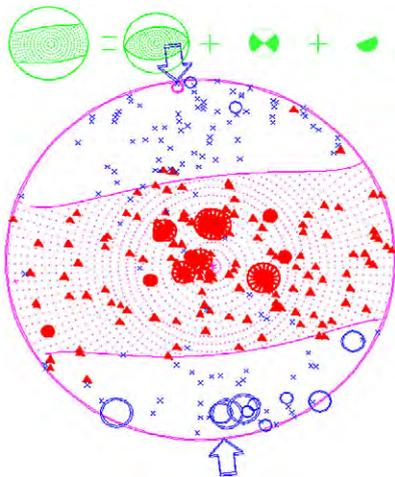
Суусамырское землетрясение сопровождалось активной афтершоковой деятельностью. Для выделения афтершоковой последовательности из каталога Института сейсмологии НАН КР, который включает в себя события, произошедшие на территории Тянь-Шаня с 1980 по 2017 г., был применен подход Г.М. Молчан и О.Е. Дмитриевой (см. [Молчан и Дмитриева, 1991; Соболев, Пономарев, 2003]), который предполагает удаление афтершоков из каталога перед расчетом графика повторяемости. Выделение афтершоков проводилось с помощью набора программ этих же авторов, в результате чего из каталога было выделено более 2000 афтершоковых событий. Этот же алгоритм использовался в работе [Мухаммадеева, Сычева, 2018] при исследовании афтершоковых последовательностей умеренных землетрясений, произошедших на территории Бишкекского геодинамического полигона за 1996–2017 гг.

По данным сейсмологического изучения очаговой зоны, интервал глубин гипоцентров афтершоков хорошо согласуется с глубиной главного толчка. Повторные толчки в западной ветви облака распространяются до больших глубин (20–25 км) и распределены по зоне Ичкелетау-Суусамырского разлома сравнительно равномерно. В восточной части облака отмечается постепенное увеличение глубин гипоцентров с севера на юг – от зоны выхода очага на поверхность под Арамсуйский горный массив. Сильное увеличение глубин гипоцентров отмечается в этой части облака повторных толчков и в западном направлении – в зоне Ичкелетау-Суусамырского разлома. Если учесть, что севернее субширотно ориентированной зоны выхода очага на поверхность афтершоки практически отсутствуют, то можно с уверенностью говорить о значимом падении к югу плоскости разрыва при главном толчке. Об этом же свидетельствует и интерпретация решения фокального механизма.

На рис. 2 представлена сводная диаграмма главных осей фокальных механизмов и соответствующий средний механизм, построенный на основе 172 афтершоковых событий окрестности очаговой зоны Сууса-

мирского землетрясения. В верхней части рисунка за пределами диаграммы Р-, Т-осей дается аддитивное разложение средней матрицы по четырем основным типам – взбросу (или сбросу), сдвигу и взрзу. Средний механизм демонстрирует типичную для Северного Тянь-Шаня обстановку одноосного горизонтального сжатия в субмеридиональном направлении. В целом же очаг Суусамырского землетрясения разместился в дизъюнктивном узле пересечения разломов близширотной Тянь-Шаньской (Арамсуйский взбросо-сдвиг) и северо-западной Таласо-Ферганской (Ичке-летау-Суусамырский сдвиг) ориентировок.

На рис. 3 представлено распределение афтершоков Суусамырского землетрясения во времени: в верхней части – распределение событий в течение первых часов (24 ч), в нижней части – в течение нескольких лет (на графике приведен временной интервал с 1992 по 1998 г.). На оси ординат отложен класс события. Можно отметить, что первые сутки сопровождалась мощной серией повторных толчков. За событиями 12–16 класса, произошедшими в первые часы суток, в дальнейшем последовали многочисленные события с 8 по 12 класс (рис. 3а). Интенсивность афтершоковых событий была высокой в течение длительного времени; после периода, указанного на графике рис. 3б, афтершоковая деятельность еще продолжалась.



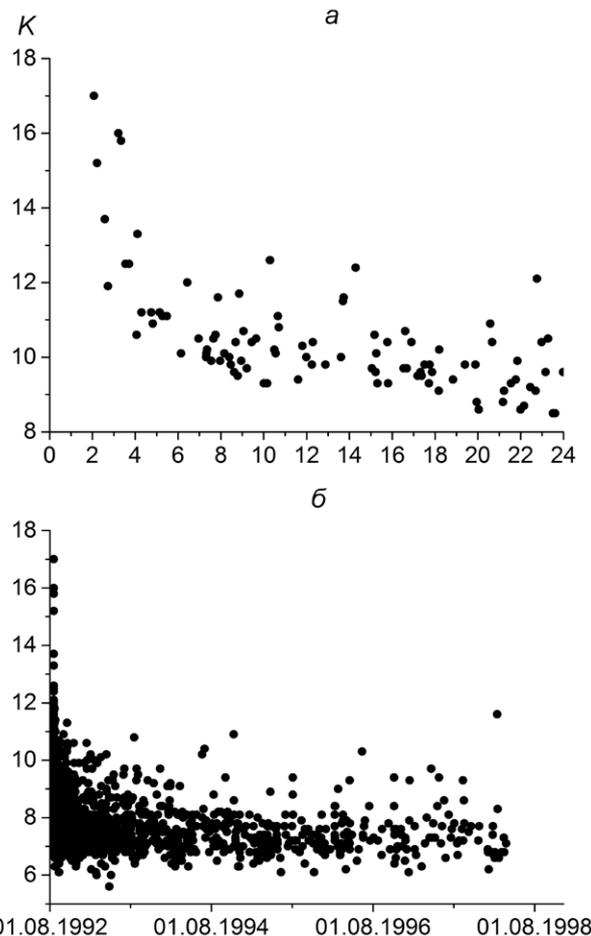
**Рис. 2.** Нодальные линии среднего механизма и оси Р (синий цвет), Т (красный) фокальных механизмов в окрестности очага Суусамырского землетрясения [Юнга, 2002]. Дата: 19.08.1992.  $\varphi = 42^\circ$  с.ш.;  $\lambda = 73.56^\circ$  в.д.  $M = 7.3$ .  $R_{\text{очага}} = 1.3$  км.  $H = 35$  км.  $N = 172$  события.  $K = 0.34$  (коэффициент соответствия).

**Закон Омори.** В конце XIX в. японский сейсмолог Ф. Омори открыл первый закон физики землетрясений, согласно которому частота афтершоков в среднем гиперболически убывает с течением времени [Omori, 1894]. Дальнейшие исследования афтершоковых процессов показали, что закон Омори является слишком грубым приближением. В связи с этим японский сейсмолог Т. Утсу ввел понятие модифицированного закона Омори [Utsu, 1961] (в литературе встречаются также названия «закон Омори–Утсу» и «степенной закон»):

$$n(t) = \frac{K}{(c+t)^p}, \quad (1)$$

где  $p$  – параметр степенного спада, известный как параметр Омори,  $K$  и  $c$  – константы.

К настоящему времени параметр Омори измерен во всех сейсмоактивных регионах Земли, сделано, по ориентировочной оценке, не менее 300 тщательных его измерений.



**Рис. 3.** Распределение во времени афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения: а – часы; б – дни. Данные приведены за 1992–1998 гг.

Параметр  $p$  изменяется от места к месту и от случая к случаю в широких пределах [Гульельми, 2017], характеризуя тектонические условия региона [Utsu et al., 1995; Nanjo et al., 2007].

Согласно [Olsson, 1999], значения  $p$  обычно варьируют в пределах от 0.5 до 1.8, а типичным значением по эмпирическим данным, в соответствии с работами [Utsu et al., 1995; Kagan, 2004; Mandal et al., 2007], считается  $p \sim 1.0$ , указывающее на то, что исследуемые регионы являются сейсмически активными. Большое значение параметра  $p$  означает, что скорость потока событий со временем спадает быстрее, чем при меньшем значении  $p$ .

Два других коэффициента закона Омори–Утсу –  $K$  и  $c$  – могут дать дополнительную информацию о распределении афтершоков. Коэффициент  $K$  зависит от общего числа событий в последовательности и отражает наблюдаемую закономерность: число афтершоковых событий на ранней стадии не спадает с постоянной скоростью – в промежутке от начальных минут до нескольких часов она увеличивается, затем начинает уменьшаться [Kisslinger, 1996]. А параметр  $c$ , интерпретируемый как задержка между временем основного толчка и началом афтершоковой активности [Kanamori, 2004], обычно рассматривается как временное смещение, учитывающее частичную (неполную) регистрацию афтершоков из-за интенсивного характера афтершоковой активности в начальные промежутки времени сразу после главного события (см., например, [Utsu et al., 1995; Woessner et al., 2004]).

На практике коэффициенты закона Омори–Утсу находят из уравнения, получаемого из исходного (1) путем интегрирования [Utsu et al., 1995]:

$$N(t) = K\{c^{1-p} - (c + t)^{1-p}\}/(p - 1)$$

для  $p \neq 1$ ,

где  $N(t)$  – кумулятивное число событий на момент  $t$ . Нахождение коэффициентов этого уравнения является задачей обобщенной нелинейной регрессии, решение которой методом наименьших квадратов (нелинейным подбором данных) дает нам искомые значения параметров  $p$ ,  $K$  и  $c$ . На рис. 4 представлены результаты оценки вышеописанных параме-

тров для афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения. Параметр  $p$  из выражения (1), определенный для данной последовательности, имеет значение 1.20,  $c$  – 6.6 и  $K$  – 977. Полученные результаты хорошо согласуются с приведенными в литературе характеристиками афтершоковых последовательностей для различных сейсмических событий, зарегистрированных в разных сейсмически активных регионах мира, например для землетрясений Греции в 1980–1997 гг. [Telesca et al., 2001], землетрясения Бхуджа (Индия, 2001 г.) [Trivedi, 2015], землетрясений в Японии в 1969–1991 гг. [Matsu'ura, 1993].

### Неэкстенсивный анализ афтершоков Суусамырского землетрясения

По данным современных исследований, землетрясения обнаруживают признаки динамически сложных систем, которые можно отнести к системам с дальними корреляциями. К описанию таких систем можно подойти с точки зрения методов статистической физики и теории вероятностей. Первым и наиболее широко известным соотношением является закон Гуттенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944]:  $P(E) \sim E^{-\gamma}$ .

Однако это распределение является эмпирическим и не может быть выведено из положений равновесной термодинамики. Для описания статистических систем, подобных

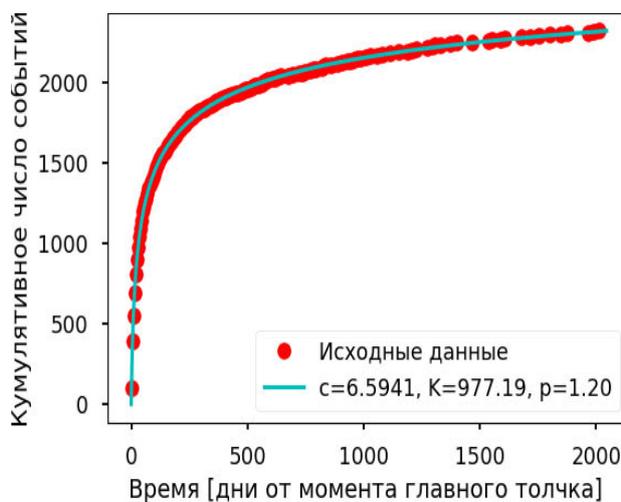


Рис. 4. Кумулятивное число афтершоковых событий Суусамырского землетрясения (красный цвет) и их аппроксимация законом Омори–Утсу (бирюзовая, сплошная).

идеальному газу, традиционно использовалась статистика Больцмана, которая предполагает отсутствие взаимодействий отдельных частей системы. При этом используются термины аддитивные (или экстенсивные) системы – когда энтропия системы равна сумме энтропий составных частей, и неаддитивные (или неэкстенсивные) – когда энтропия системы не равна сумме энтропий составных частей. При исследовании же землетрясений мы имеем дело с динамически сложными системами, в которых наблюдается сильное взаимодействие между отдельными частями системы и всей системой в целом. Это приводит к нарушению термодинамической аддитивности, поэтому их не удастся описать в терминах и понятиях статистики и термодинамики Больцмана.

Тсаллис предложил перейти от логарифмического распределения к степенному [Tsallis, 1988], тем самым он обобщил статистику Больцмана, введя в выражение для энтропии параметр  $q$ , характеризующий степень неаддитивности:

$$S_q = k \frac{1}{1-q} \left( 1 - \sum_{i=1}^N p_i^q \right),$$

где  $p_i = \frac{N_i}{N(\varepsilon)}$ ,  $N_i$  – число элементов системы, приходящихся на  $i$ -элемент  $\varepsilon$ -разбиения,  $N(\varepsilon)$  – полное число элементов заданного  $\varepsilon$  покрытия,  $k$  – размерная константа. Статистика Больцмана соответствует пределу  $q \rightarrow 1$ . Случай  $q < 1$  соответствует наличию предела по высоким событиям. А  $q > 1$  указывает на наличие дальних корреляций в неравновесной системе, когда аддитивность нарушается. Соответствующее выражение для магнитуд землетрясений, например, в [Telesca, 2011] принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \log \left( \frac{N(M > M_{th})}{N} \right) &= \\ &= \left( \frac{2-q}{1-q} \right) \log \left[ 1 - \left( \frac{1-q}{2-q} \right) \left( \frac{10^{M_{th}}}{a^{2/3}} \right) \right], \quad (2) \end{aligned}$$

где  $N(M > M_{th})$  – количество землетрясений с энергией больше порогового значения  $M_{th}$ ,  $N$  – полное количество землетрясений.

Используя выражение (2), по левой части можно построить нормализованное распределение количества землетрясений по магнитудам в логарифмическом масштабе  $\log \left( \frac{N(M > M_{th})}{N} \right)$  в зависимости от магнитуды. По полученным распределениям, используя методы численного решения нелинейных уравнений, из правой части (2) определяются неизвестные параметры  $a$  и  $q$ . Далее, по рассчитанному параметру Тсаллиса  $q$  можно получить оценку дальнедействующих корреляций в каталоге землетрясений или в отдельной его выборке.

В данной работе было решено проверить гипотезу о том, что перед катастрофой значительно возрастают взаимные корреляции, которые сохраняются во время активной фазы афтершоков, а затем спадают до прежнего уровня – при относительно равновесном состоянии системы.

На рис. 5а представлено эпицентральное расположение землетрясений анализируемого каталога. По нему построено распределение относительного количества событий с магнитудой  $M > M_{th}$  в зависимости от магнитуды. По этому распределению, с применением метода расчета коэффициентов нелинейной регрессионной модели в среде Matlab, получено значение параметра  $q = 1.569$ . Используя эту величину, можно вычислить правую часть выражения (2) и построить аппроксимирующую кривую распределения относительного количества землетрясений. Результаты этих построений приведены на рис. 5б. Как и предполагалось, вычисленное значение параметра Тсаллиса (1.569) показывает, что наблюдаемые явления (непрерывный поток землетрясений) представляют собой систему с памятью и дальнедействующими корреляциями. Причем эта величина хорошо согласуется с оценками, полученными для других сейсмоактивных регионов [Silva et al., 2006; Telesca, Chen, 2010; Telesca, 2011].

Применим подобные построения к афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения, которая является выборкой из этого же каталога (рис. 6а). Полученные результаты приведены на рис. 6б. Вычислен-

ное значение параметра Тсаллиса для этой выборки (1.605) показывает увеличение этого параметра по отношению к значению, рассчитанному по всему каталогу (1.569), и это свидетельствует о том, что во время крупного землетрясения в наблюдаемой системе возрастают взаимные корреляции, которые сохраняются во время афтершоковой активности.

Вышеприведенные результаты (рис. 5б и 6б) получены из расчетов по конечным выборкам землетрясений и не зависят от времени. Для исследования поведения параметра Тсаллиса в динамике были рассмотрены сейсмические события из каталога земле-

трясений в интервале времен  $\pm 6$  лет от даты Суусамырского землетрясения. Расчет  $q$  производился для последовательных выборок длительностью 600 событий со сдвигом 50 событий, результаты представлены на рис. 7.

Следует отметить значительное возрастание взаимных корреляций в рассматриваемом регионе непосредственно перед главным событием и резкое их снижение сразу же после него с дальнейшим возвратом к значению, наблюдаемому до главного толчка.

Таким образом, с помощью неэкстенсивного анализа каталога землетрясений показано,

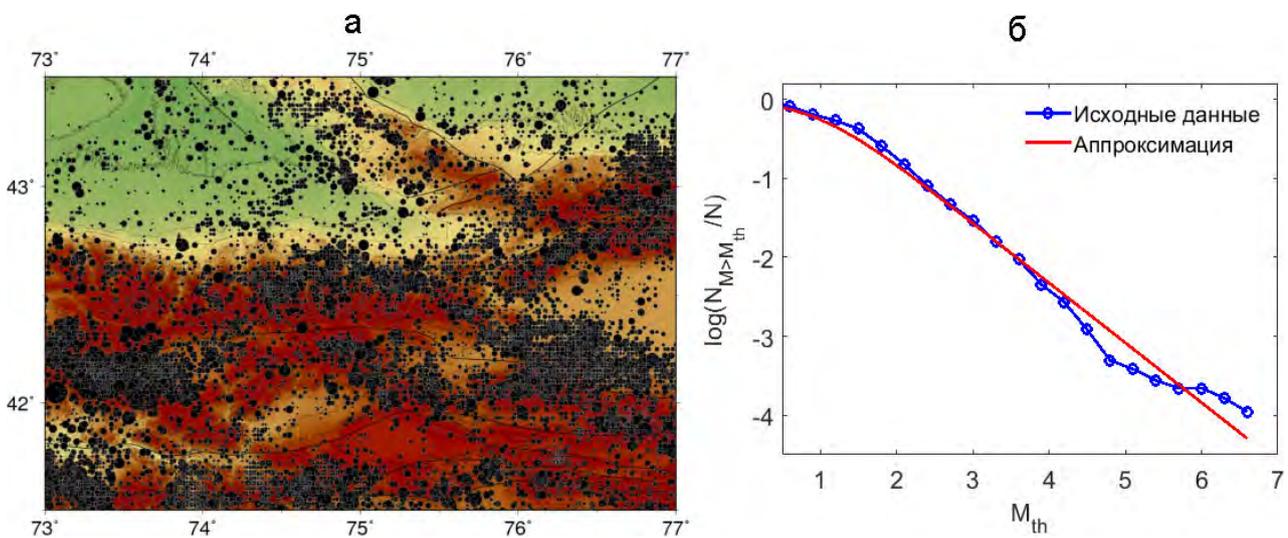


Рис. 5. Эпицентральное расположение (а) и соответствующее распределение относительного количества землетрясений с магнитудой  $M > M_{th}$  в зависимости от магнитуды и аппроксимирующая кривая (б) при  $q = 1.569$ , построенные по каталогу землетрясений 1980–2017 гг.

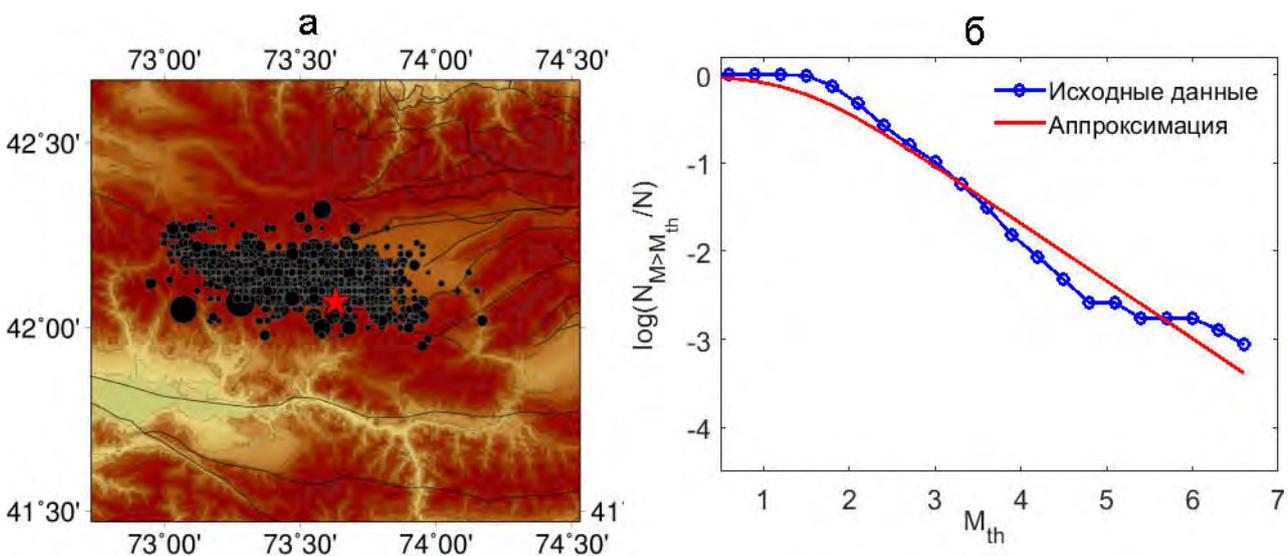


Рис. 6. Эпицентральное расположение (а) и распределение относительного количества землетрясений с магнитудой  $M > M_{th}$  в зависимости от магнитуды и аппроксимирующая кривая (б) при  $q = 1.605$ , построенные по афтершокам Суусамырского землетрясения 19.08.1992 г. ( $M = 7.3$ ).

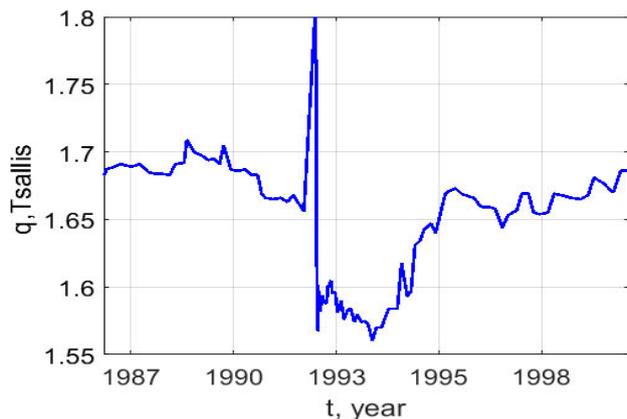


Рис. 7. Поведение параметра Тсаллиса в динамике в период вблизи даты Суусамырского землетрясения.

что в период Суусамырского землетрясения количественно подтверждается гипотеза возрастания взаимных корреляций в рассматриваемой системе при приближении к катастрофе.

### Заключение

Исследован каталог сейсмических событий Института сейсмологии НАН КР за 1980–2017 гг. Выделены афтершоки Суусамырского землетрясения 19.08.1992 г.,  $M = 7.3$ . Построены распределения афтершоковых событий в пространстве и во времени. Показано, что энергетические и временные параметры афтершоковых последовательностей подчиняются степенным законам распределения, что характерно для систем с детерминированным хаосом.

Активность афтершоков Суусамырского землетрясения хорошо описывается модифицированным законом Омори, значение параметра которого согласуется с результатами исследований афтершоковых последовательностей в других регионах.

Значение параметра Тсаллиса, вычисленное по каталогу сейсмических событий Института сейсмологии НАН КР ( $\sim 1.5$ ), также соответствует результатам, полученным для других сейсмоактивных регионов. На основе анализа афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения с использованием неэкстенсивной термодинамики Тсаллиса отмечено повышение дальности действующих корреляций до ( $\sim 1.6$ ) после Суусамырского землетрясения по сравнению с каталогом всех землетрясений, зарегистрированных в 1980–2017 гг.

Динамическое определение параметра  $q$  для событий по всему каталогу до и после Суусамырского землетрясения позволило отметить значительное возрастание взаимных корреляций в рассматриваемом регионе до главного события, резкое снижение этих корреляций сразу после него с дальнейшим возвратом к среднему значению, наблюдаемому до главного толчка. Тем самым получена количественная оценка гипотезы о том, что во время катастрофы значительно увеличиваются взаимные корреляции.

Авторы благодарны директору Института сейсмологии НАН КР К.Е. Абдрахматову за предоставленный каталог землетрясений.

### Список литературы

1. Абдрахматов К.Е., Томсон С., Уилдон Р., Дельво Д., Клеркс Ж. Активные разломы Тянь-Шаня // *Наука и новые технологии*. 2001. № 2. Стр. 22–28.
2. Богачкин Б.М., Плетнев К.Г., Рогожин Е.А. Суусамырское землетрясение 1992 г.: материалы геологического и сейсмологического изучения в ближней зоне // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. М.: Геоинформмарк, 1993. С. 143–147.
3. Богачкин Б.М., Корженков А.М., Мамыров Э., Нечаев Ю.В., Омуралиев М., Петросян А.Э., Плетнев К.Г., Рогожин Е.А., Чаримов Т.А. Структура очага Суусамырского землетрясения 1992 г. на основании анализа его геологических и сейсмологических проявлений // *Физика Земли*. 1997. № 11. С. 3–18.
4. Гульельми А.В. Закон Омори (из истории геофизики) // *Успехи физических наук*. 2017. Т. 187, № 3. С. 343–348. [Guglielmi A.V. Omori's law: A note on the history of geophysics. *Physics-Uspexhi*, 2017, 60(3): 319–324. <https://doi.org/10.3367/ufne.2017.01.038039>]
5. Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Фролов Д.И., Василенко Н.Ф. Признаки критической стадии разрушения деформированных гетерогенных материалов // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 3. С. 245–251. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.3.245-251.
6. Джанузакон К.Д., Ильясов Б.И., Муралиев А.М., Юдахин Ф.Н. Суусамырское землетрясение 19 августа 1992 года // *Землетрясения Северной Евразии в 1992 году*. М.: Геоинформмарк, 1997. С. 49–54.
7. Крестников В.Н., Шишкин Е.И., Штанге Д.В., Юнга С.Л. Напряженное состояние земной коры Центрального и Северного Тянь-Шаня // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1987. № 3. С. 13–30.
8. Кучай О.А., Муралиев А.М., Абдрахматов К.Е., Дельво Д., Дучков А.Д. Суусамырское землетрясение 1992 года и поле деформаций афтершоковой последовательности // *Геология и геофизика*. 2002. Т. 43, № 11. С. 1038–1048.

9. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // *Вычислительная сейсмология*. Вып. 24. М.: Наука, 1991. С. 19–50.
10. Мухамадеева В.А., Сычева Н.А. Об афтершоковых процессах, сопровождающих умеренные и слабые землетрясения на территории Бишкекского геодинамического полигона и в его окрестностях // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 3. С. 165–180. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.3.165-180.
11. Пригожин И., Стенгерс И. *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой*: пер. с англ. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
12. Соболев Г.А., Пономарев А.В. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 2003. 270 с.
13. Шебалин П.Н. Афтершоки как индикаторы напряженного состояния в системе разломов // *Докл. АН*. 2004. Т. 398, № 2. С. 249–254.
14. Юнга С.Л. *Изучение движений поверхности и деформаций земной коры на территории Центрального Тянь-Шаня, Казахской платформы и Алтая; создание программ обработки сейсмологических данных, проведение обработки*: Отчет о науч.-исслед. работе / Единая геофизическая служба РАН. Обнинск, 2002. 41 с.
15. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California // *Bull. of the Seismological Society of America*. 1944. Vol. 34. P. 185–188.
16. Kagan Y.Y. Short-term properties of earthquake catalogs and models of earthquake source // *Bull. of the Seismological Society of America*. 2004. Vol. 94. P. 1207–1228.
17. Kanamori H., Brodsky E.E. The physics of earthquakes // *Reports on Progress in Physics*. 2004. Vol. 67. P. 1429–1496. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/67/8/R03>
18. Kisslinger C. Aftershock and fault zone properties // *Advances in Geophysics*. 1996. Vol. 38. P. 1–36. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60019-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60019-9)
19. Mandal P., Chadha R.K., Raju I.P., Kumar N., Satyamurty C., Narsaiah R. Are the 7 March 2006 Mw 5.6 event and the 3 February 2006 Mw 4.58 event triggered by the five years continued occurrence of aftershocks of the 2001 Mw 7.7 Bhuj event? // *Current Science*. 2007. Vol. 92. P. 1114–1124.
20. Matsu'ura R.S. Median values of parameters in the modified Omori formula for main shocks in and near Japan of M 6.0 and larger (1969–1991): abstracts // *Japan Earth Planet. Sci. Joint Meeting*. 1993. 224. (In Japan).
21. Nanjo K.Z., Enescu B., Shcherbakov R., Turcotte D.L., Iwata T., Ogata Y. Decay of aftershock activity for Japanese earthquakes // *J. of Geophysical Research*. 2007. Vol. 112. Article ID B08309. <http://dx.doi.org/10.1029/2006jb004754>
22. Olsson R. An estimation of the maximum b-values in the Gutenberg–Richter relation // *J. of Geodynamics*. 1999. Vol. 27(4-5). P. 547–552. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(98\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(98)00022-2)
23. Omori F. On after-shocks of earthquakes // *J. of the College of Science, Imperial Univ. of Tokyo*. 1894. Vol. 7. P. 111–200.
24. Silva R., Franca G.S., Vilar C.S., Alcanis J.S. Nonextensive models for earthquakes // *Phys. Rev. E*. 2006. Vol. 73, 026102. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.73.026102>
25. Telesca L. Tsallis-based nonextensive analysis of the Southern California seismicity // *Entropy*. 2011. Vol. 13(7). P. 127–1280. <https://doi.org/10.3390/e13071267>
26. Telesca L., Chen C.C. Nonextensive analysis of crustal seismicity in Taiwan // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2010. Vol. 10. P. 1293–1297. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-10-1293-2010>
27. Telesca L., Cuomo V., Lapenna V., Vallianatos F., Drakatos G. Analysis of the temporal properties of Greek aftershock sequences // *Tectonophysics*. 2001. Vol. 341(1-4). P. 163–178. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00221-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00221-9)
28. Trivedi P. Application of Omori's decay law to the 2001 Bhuj aftershock sequence for Kachchh Region of Western India // *Open J. of Earthquake Research*. 2015. Vol. 4(3). P. 94–101. <http://dx.doi.org/10.4236/ojer.2015.43009>
29. Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics // *J. of Statistical Physics*. 1988. Vol. 52(1–2). P. 479–487. <https://doi.org/10.1007/bf01016429>
30. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geophysical Magazine*. 1961. Vol. 30. P. 521–605.
31. Utsu T., Ogata Y., Matsuura R.S. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity // *J. of Physics of the Earth*. 1995. Vol. 43. P. 1–33. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.43.1>
32. Woessner J., Hauksson E., Wiemer S., Neukomm S. The 1997 Kagoshima (Japan) earthquake doublet: A quantitative analysis of aftershock rate changes // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. Article ID L03605. <http://dx.doi.org/10.1029/2003gl018858>

Сведения об авторах

СЫЧЕВ Владимир Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, СЫЧЕВА Найля Абдуллоевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ИМАШЕВ Санжар Абылбекович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник – Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан.