

УДК 550.34.06.013.3

## НЕЭКСТЕНСИВНЫЙ АНАЛИЗ АФТЕРШОКОВ УМЕРЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЯНЬ-ШАНЯ И СЕВЕРНОГО ПАМИРА

© 2021 г. В. Н. Сычев<sup>а</sup>, \*, Н. А. Сычева<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек-49, 720049 Кыргызстан

\*e-mail: koitash@mail.ru

Поступила в редакцию 21.09.2019 г.

После доработки 24.08.2020 г.

Принята к публикации 22.10.2020 г.

Выделены афтершоковые последовательности 60 землетрясений с  $K \geq 11$  из каталога Института сейсмологии Национальной АН Киргизской республики (далее КИС). Каталог включает в себя 56 259 событий, произошедших на территории Тянь-Шаня и Северного Памира в период с 1980 по 2001 гг. Получены некоторые статистические характеристики каталога и определена его представительная часть. Построена карта сейсмической активности. Определены некоторые параметры главных событий и афтершоковых последовательностей — минимальное количество афтершоков составляет 3 события, максимальное — 2370, минимальная длительность афтершокового процесса включает 2 дня, максимальная — 2046 дней. Каталог землетрясений и афтершоковые последовательности рассмотрены с позиций неравновесной термодинамики с использованием статистики Тсаллиса (параметры  $q$  и  $a$ ). Для описания функции распределения землетрясений по энергиям использовались модифицированная модель очага землетрясения stick-slip и принцип максимума энтропии. Подход использовался для количественной оценки неэкстенсивного параметра Тсаллиса  $q$  в потоке землетрясений, а также для оценки изменения этого параметра непосредственно перед крупным землетрясением и во время следования афтершоков. Показано, что поток землетрясений представляет собой систему с памятью и дальними пространственными корреляциями. Параметр Тсаллиса  $q$  для афтершоковых последовательностей превышает значение  $q$ , вычисленное для всего каталога землетрясений, что указывает на сохранение нестабильного состояния сейсмогенной системы во время следования афтершоков. Наблюдается резкое возрастание параметра Тсаллиса  $q$  в некоторой области, включающей область подготовки землетрясения перед главным событием и резкое снижение сразу после него с дальнейшим возвратом к среднему уровню, наблюдаемому до главного события.

**Ключевые слова:** землетрясение, фокальный механизм, афтершоки, неэкстенсивный анализ, функция распределения землетрясений по энергиям, дальние корреляции, параметр Тсаллиса

**DOI:** 10.31857/S0203030621010053

### ВВЕДЕНИЕ

В сейсмологии установлены некоторые фундаментальные закономерности потока сейсмических событий. Широко известным соотношением является закон распределения землетрясений по энергиям Гутенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944]:

$$P(E) \sim E^{-\gamma}, \quad (1)$$

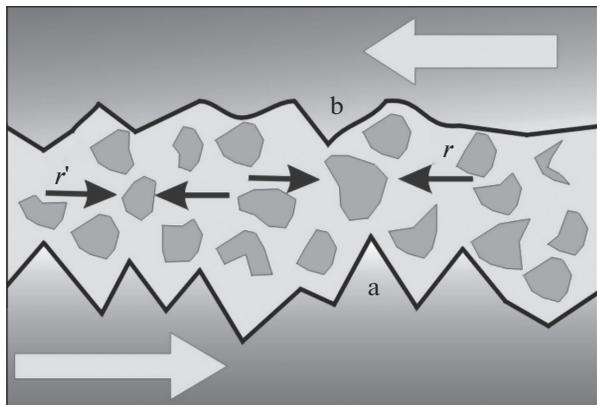
где  $\gamma$  — показатель степени,  $E$  — энергия землетрясения. В терминах количества событий с магнитудой  $M$ , превышающей значение  $m$ , закон распределения принимает вид:

$$N(M > m) \sim 10^{-bm}, \quad (2)$$

где  $N$  — число событий для указанного фиксированного периода времени и в заданном географическом регионе,  $b$  — константа ( $b$ -value), в боль-

шинстве случаев принимает значение около 0.9 [Касахара, 1985].

Следует отметить, что законы, описывающие последовательности землетрясений, в основном, являются эмпирическими и не могут быть выведены из положений равновесной (классической) термодинамики. В основе классической термодинамики лежит понятие энтропии, которая является функцией состояния термодинамической системы. Если  $p_i$  — вероятность пребывания системы в состоянии с номером  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ,  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ ), то энтропией Больцмана–Гиббса называют стандартную формулу для вычисления статистической механической энтропии термодинамической системы [Гиббс, 1982]:



**Рис. 1.** Иллюстрация относительного движения плоскостей разлома с материалом между ними. Фрагменты, показанные на рис. 1, могут играть роль подшипников, а также препятствовать относительному движению плоскостей между точками а и b;  $r$  и  $r'$  – характерный размер фрагмента между плоскостями [Sotolongo-Costa, Posadas, 2004].

$$S = -k \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i, \quad (3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1.38 \times 10^{-23}$  Дж/К),  $N$  – число возможных состояний системы. Полная энтропия системы в этом случае равна сумме энтропии ее частей (свойство аддитивности энтропии). В частности, если система состоит из двух независимых подсистем  $A$  и  $B$ , то суммарная энтропия системы будет следующей:

$$S(A + B) = S(A) + S(B). \quad (4)$$

В 1988 г. Константино Тсаллис для описания сложных неаддитивных статистических систем обобщил классическую формулу Больцмана–Гиббса, введя в выражение параметр  $q$ , характеризующий степень неаддитивности, и предложил так называемую неэкстенсивную или неаддитивную энтропию [Tsallis, 1988], которая на дискретном числе микросостояний  $N$  определяется следующим выражением:

$$S_q = k \frac{1}{q-1} \left( 1 - \sum_{i=1}^N p_i^q \right); \quad \sum_{i=1}^N p_i = 1, \quad (5)$$

где  $p_i$  – вероятность того, что система находится в  $i$ -состоянии,  $N$  – число состояний системы,  $k$  – некоторая положительная константа, которая определяет единицу измерения энтропии и в физических формулах служит для связки размерностей как, например, постоянная Больцмана. Статистика Больцмана (3) соответствует пределу  $q \rightarrow 1$ ,  $q > 1$  указывает на наличие дальних корреляций и памяти в неравновесной системе, когда аддитивность нарушается. Таким образом, энтропия Тсаллиса является уже неэкстенсивной функцией. Если, допустим, система разбита на две неза-

висимые подсистемы  $A$  и  $B$ , то суммарная энтропия системы будет следующей:

$$S_q(A + B) = S_q(A) + S_q(B) + (1 - q) S_q(A) S_q(B). \quad (6)$$

Параметр  $q$  в данном случае является мерой неэкстенсивности рассматриваемой системы: при  $q < 1$  получаем сверхэкстенсивный случай,  $q = 1$  – экстенсивный и при  $q > 1$  – субэкстенсивный [Чумак, 2011].

Эти положения неравновесной термодинамики все чаще стали использовать для описания потока землетрясений – неэкстенсивный анализ потока сейсмических событий [Telesca et al., 2001; Telesca, Chen, 2010; Kalliopi, Chochlaki, 2018].

В основе этих положений лежит новая модель описания функции распределения землетрясений по энергиям [Sotolongo-Costa, Posadas, 2004], основанная на взаимодействии двух поверхностей (рис. 1) и принципах неэкстенсивной статистической физики.

Эта модель землетрясения (Fragment-Asperity Interaction Model for Earthquakes [Sotolongo-Costa, Posadas, 2004]) соответствует модели очага землетрясения stick-slip – “прерывистое скольжение” двух плит друг по другу вдоль разлома при наличии трения [Brown et al., 1991]. Движение затрудняется не только пересечением двух шероховатостей на разломах, но и возможным относительным расположением нескольких фрагментов между точками “а” и “b” [Sotolongo-Costa, Posadas, 2004].

Используя эту модель и принцип максимума энтропии в работе [Sotolongo-Costa, Posadas, 2004], было получено выражение для функции распределения землетрясений по энергиям, которая обобщает исходную функцию распределения землетрясений по энергиям Гутенберга–Рихтера. В свою очередь, в работе [Silva et al., 2006] уточнили эту модель с использованием более реалистичной зависимости между энергией землетрясения и размером фрагмента. Далее, уже в работе [Telesca, 2011], получено аналитическое выражение, описывающее обобщенный закон Гутенберга–Рихтера, которое связывает кумулятивное число землетрясений с магнитудой, превышающей пороговое значение с параметром Тсаллиса  $q$ :

$$\lg \left( \frac{N(M > M_{th})}{N} \right) = \left( \frac{2-q}{1-q} \right) \lg \left[ 1 - \left( \frac{1-q}{2-q} \right) \left( \frac{10^{M_{th}}}{a^{2/3}} \right) \right], \quad (7)$$

где  $N(M > M_{th})$  – количество землетрясений с энергией больше порогового значения  $M_{th}$  и  $M \sim \lg(E)$ ,  $E$  – энергия землетрясения,  $N$  – полное количество землетрясений,  $a$  – константа про-

порциональности между энергией землетрясения  $E$  и размером фрагмента блоков  $r^3$  (см. рис. 1) между разломами и имеет размерность объемной плотности энергии [Silva et al., 2006; Telesca, 2011; Vallianatos et al., 2014; Complexity ..., 2018].

Приведенное выражение хорошо описывает распределение землетрясений по энергиям во всем диапазоне магнитуд в отличие от эмпирической формулы Гутенберга–Рихтера [Silva et al., 2006]. Причем оценка параметра Тсаллиса  $q$  оказывается стабильной по отношению к выбору порогового значения магнитуды  $M_{th}$ , нежели оценка параметра  $b$ -value, которая более требовательна к выбору линейного участка графика повторяемости [Complexity ..., 2018].

Уравнение (7) позволяет оценить степень неэкстенсивности в рассматриваемом регионе. Кроме того, как отмечено в работах [Sarlis et al., 2010; Vallianatos et al., 2014], это уравнение можно считать обобщенным уравнением распределения землетрясений по энергиям, так как при значениях магнитуд выше некоторого порогового значения это распределение сводится к выражению Гутенберга–Рихтера вида (2) со значением  $b$ -value [Vallianatos et al., 2014]:

$$b = \frac{2 - q}{q - 1}. \quad (8)$$

Во множестве публикаций указывается, что значение параметра  $q$  можно использовать как меру стабильности активной тектонической зоны [Matcharashvili et al., 2011; Papadakis, 2016; Papadakis et al., 2013, 2015, 2016; Telesca, 2010a, b, c; Valverde-Esparza et al., 2012; Vallianatos et al., 2014; Complexity ..., 2018]. Резкое увеличение параметра  $q$  указывает на рост взаимодействия между разломными блоками и их фрагментами и подразумевает отклонение от равновесного состояния [Complexity ..., 2018].

Используя выражение (7), по левой части можно построить нормализованное кумулятивное распределение количества землетрясений по магнитудам в логарифмическом масштабе  $\log(N(M > M_{th})/N)$  в зависимости от магнитуды. По полученным распределениям, используя методы численного решения нелинейных уравнений, из правой части (7) определяются неизвестные параметры функции распределения землетрясений по энергиям  $a$  и  $q$ .

Параметр Тсаллиса  $q$  получен из модели землетрясения [Sotolongo-Costa, Posadas, 2004] и отражает масштаб взаимодействий между блоками разломов и фрагментами, заполняющими пространство между ними. Увеличение  $q$  означает, что можно ожидать сильного землетрясения, поскольку блоки разломов отклоняются от равновесия [Complexity ..., 2018]. Согласно [Telesca, 2010c], увеличение значения параметра Тсаллиса

$q$  предполагает, что степень дальних пространственных корреляций также возрастает, и что сейсмогенная система входит в критическое состояние, характеризующееся нестабильностью, которая может вызвать крупномасштабные реакции и выделение энергии [Kalimeri et al., 2008]. Определяя параметр Тсаллиса для всего каталога землетрясений и отдельных выборок, можно оценить дальнедействующие пространственные корреляции в этих выборках, а также как эти корреляции изменяются при сильных землетрясениях и в афтершоковых последовательностях.

По рассчитанным параметрам можно также определить, как полученные результаты согласуются со значениями, приведенными в литературе для других сейсмоактивных регионов.

Исследованию афтершоковых последовательностей Тянь-Шаньского региона посвящены работы [Мухамадеева, Сычева 2018; Сычев и др., 2019; Муралиев, Искендеров, 2015; Kuchay et al., 2017 и др.]. В первой работе рассмотрены афтершоковые последовательности, сопровождавшие умеренные и слабые землетрясения, произошедшие с 1996 по 2017 гг. на территории Бишкекского геодинамического полигона (Северный Тянь-Шань) и в его ближайшем окружении. Для анализа использовался каталог землетрясений по данным сети KNET, который включал события с 1994 по 2017 гг. Выделено 21 землетрясение с  $K \geq 10$  и их афтершоки. Получены различные характеристики афтершоковой деятельности и построены их зависимости от класса главного события. Во второй работе каталог КИС и афтершоковая последовательность Суусамырского землетрясения (19.08.1992 г.,  $M = 7.3$ ) рассмотрены с позиций неравновесной термодинамики с использованием статистики Тсаллиса, проведен анализ дальних корреляций. Параметр Тсаллиса  $q = 1.605$  для афтершоковой последовательности превышает значение  $q = 1.569$ , вычисленное для всего каталога землетрясений, 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 дальних корреляций в рассматриваемом регионе до главного события, резкое снижение сразу после него с дальнейшим возвратом к среднему уровню, наблюдаемому до главного события.

Данная работа является продолжением предыдущих исследований [Сычев и др., 2019] и посвящена неэкстенсивному анализу афтершоковых последовательностей 60 умеренных землетрясений, произошедших на территории Тянь-Шаня и Северного Памира в период с 1983 по 1999 гг. Для выделения афтершоковых последовательностей рассматривался каталог КИС, который включает

землетрясения с 1980 по 2001 гг. Данные каталога были получены, в основном, на основе аналоговых станций. Качественные данные цифровой сейсмологической сети KNET (Kyrgyz net), установленной на территории Северного Тянь-Шаня в 1991 г., стали поступать с момента ее работы в режиме реального времени (середина 1998 г.).

Задача данной работы – применение неэкстенсивного анализа с использованием статистики Тсаллиса к афтершоковым процессам умеренных землетрясений Тянь-Шаня и Северного Памира для подтверждения выводов, сделанных в работе [Сычев и др., 2019] для афтершоков Суусамырского землетрясения (19.08.1992,  $M = 7.3$ ).

## ИССЛЕДУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

**Каталог.** Для выделения афтершоковых последовательностей использовался каталог КИС за 1980–2001 гг. (56259 землетрясений). Некоторые статистические характеристики исследуемого каталога представлены на рис. 2. Каталог включает в себя события с  $5.5 \leq K \leq 17$  (см. рис. 2а); согласно распределению Гутенберга–Рихтера исследуемого каталога, представительными являются землетрясения с  $7.5 \leq K \leq 14$  (35 593 землетрясения или 63% от всего каталога) (см. рис. 2б); распределение событий во времени неравномерное (см. рис. 2в); максимум событий приходится на 1992 г., когда произошло Суусамырское землетрясение, и основная часть событий произошла на глубине до 15 км (см. рис. 2г). Согласно [Юдахин, 1983], землетрясения Тянь-Шанского региона происходят на глубине до 30 км. Максимум событий, происходящих на нулевую глубину, объясняется отсутствием значения глубины в каталоге для некоторых землетрясений, которые при анализе были отнесены к нулевой глубине.

**Афтершоки.** Для выделения из каталога афтершоковых последовательностей для событий с  $K \geq 11$  был применен подход Г.М. Молчан и О.Е. Дмитриевой [Молчан, Дмитриева, 1991; Соболев, Пономарев, 2003]. Выделение афтершоков проводилось с помощью набора программ этих же авторов. Этот подход активно используется исследователями при выделении афтершоков [Шебалин и др., 2018; Баранов, Шебалин, 2019; и др.]. За исследуемый период из каталога было выделено 60 землетрясений, после которых наблюдались афтершоковые события. Дата главного события, эпицентральное положение, энергетическая характеристика (класс  $K$  и магнитуда  $M$ ), а также количество афтершоков  $N_{\text{афт}}$  и их длительность  $T_{\text{афт}}$  в днях представлены в табл. 1. Для пересчета класса землетрясения в магнитуду использовалось выражение  $K = 1.8M + 4$  [Раутиан, 1960]. Серым цветом в таблице отмечены землетрясения, для которых  $N_{\text{афт}} \geq 100$  (14 событий).

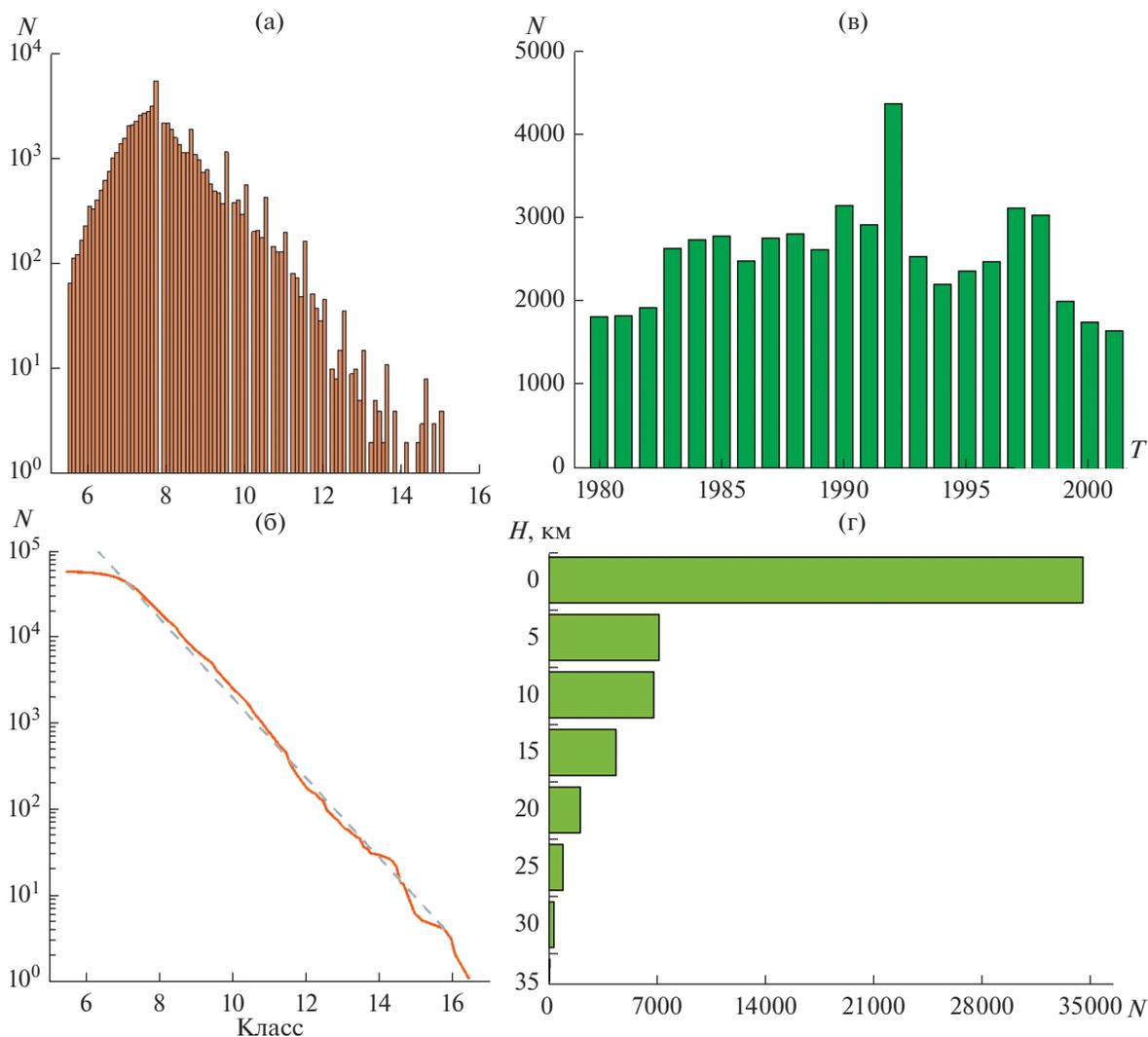
Во введении было отмечено, что основная часть землетрясений зарегистрирована аналоговыми станциями и вполне вероятно, что каталог включает в себя не все афтершоковые события, следующие за главным событием, что может быть обусловлено чувствительностью сети (конфигурация сети, положение и количество станций по отношению к землетрясению). В таблице представлены значения минимального класса  $K_{\text{min}}$  для всех афтершоковых последовательностей и варьируется от  $K_{\text{min}} = 5.6$ –8.0, а также время начала серии афтершоков  $t_{\text{start}}$  и меняется от 6 мин до 109 дней. Такая длительность между главным событием и первым афтершоком обусловлена тем, что согласно конфигурации сети для события с  $t_{\text{start}} = 109$  были зарегистрированы лишь афтершоки с  $K > 8$ , исключая более слабые события.

На рис. 3 звездочками показано эпицентральное положение главных 60 событий. Красными звездочками выделены события, для которых  $N_{\text{афт}} \geq 100$ . Фоном является распределение сейсмической активности, которая определялась количеством землетрясений в ячейке размерностью  $0.2^\circ$ , глубина исследуемого слоя составляла 30 км. Рассматриваемые землетрясения произошли на территории, которая, согласно легенде, характеризуется высоким значением сейсмической активности. Основная часть событий произошла в зонах сочленения Южного Тянь-Шаня с Северным Памиром и северной частью Тарима, по несколько событий вдоль Таласо-Ферганского разлома, в Ферганской впадине, вдоль Кунгей и Терской-Алатау и по два события в восточной части Кокшаал Тоо и на Киргизском хребте.

Для оценки параметра Тсаллиса  $q$  и константы  $a$ , описывающих распределение землетрясений по энергиям, использовалось выражение (7). Оба параметра рассчитывались как для всего каталога, так и для всех афтершоковых последовательностей. Для четырех крупных событий изменение параметров распределения  $q$  и  $a$  рассматривались в динамике (время). При этом события анализировались в окрестности эпицентра главного события на некотором временном интервале, включающем дату землетрясения (сформированная выборка). Указанные параметры рассчитывались в окне, включающем заранее определенное количество событий, каждый раз сдвиг осуществлялся на одно событие из сформированной выборки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Фокальные механизмы главных событий.** На рис. 3 представлены фокальные механизмы очагов для событий с  $N_{\text{афт}} \geq 100$ . Для рассматриваемых землетрясений типы подвижек имеют взбросовый или взбросо-сдвиговый характер. Азимуты осей сжатия имеют субмеридианальное направ-



**Рис. 2.** Статистические характеристики каталога КИС (56259 землетрясений). а – график повторяемости; б – распределение Гутенберга–Рихтера; в – распределение во времени; г – распределение по глубине.

ление, что соответствует региональному режиму, определенному во многих работах по сейсмологическим и GPS-данным [Sycheva, Mansurov, 2017; Rebetsky, Alekseev, 2014; Zubovich, Mukhamediev, 2010; Костюк, 2008; Абдрахматов и др., 2001; и др.].

**Афтершоки.** Анализ данных таблицы показал, что при одном энергетическом классе главного события наблюдается разное количество афтершоков и различная длительность афтершокового процесса. Длительный период афтершоков не всегда сопровождается большим количеством событий. Минимальное количество афтершоков составляет 3 события, максимальное – 2370, минимальная длительность афтершокового процесса включает 2 дня, максимальная – 2046 дней (см. табл. 1). На рис. 4 представлены зависимости рас-

пределения количества и длительности афтершоков от класса главного события. Отдельно рассматриваются и описываются линейной моделью землетрясения с  $N_{\text{афт}} < 100$  (отмечены серым цветом) и с  $N_{\text{афт}} \geq 100$  (отмечены черным цветом). Для всех рассматриваемых зависимостей определены коэффициенты корреляции, значения которых указаны на графиках. В целом для рассматриваемых выборок отмечается небольшая тенденция возрастания количества и длительности афтершоков с увеличением класса главного события, низкий коэффициент корреляции рассматриваемых зависимостей также указывает на слабую связь между количеством и длительностью афтершоков и классом главного события. Отмечается высокий уровень отклонений от ли-

Таблица 1. Некоторые параметры главных событий и результаты неэкстенсивного анализа афтершоков

№	Дата	Время	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	$H, \text{ км}$	$K$	$M$	$K_{\min}$	$N_{\text{афр}}$	$T_{\text{афр}}$	$q$	$err_q$	$a$	$err_a$	$t_{\text{start}}, \text{ час}$	$t_{\text{start}}, \text{ дни}$
1	13.01.1980	05:54:31	39.43	72.80	10	13.40	5.22	6.9	10	99	1.760	0.018	124.416	98.142	5.07	
2	05.07.1980	20:25:23	41.92	77.50	20	13.80	5.44	5.9	21	293	1.670	0.018	77.623	38.582	1.27	
3	11.12.1980	14:35:27	41.33	69.05	10	13.50	5.28	7.6	53	897	1.586	0.017	7797.716	2627.079	0.75	
4	03.03.1981	05:52:31	39.32	72.60	15	13.80	5.44	7.3	23	623	1.707	0.018	196.710	131.145	0.98	
3	06.05.1982	15:42:20	40.17	71.50	20	14.40	5.78	6.2	34	1173	1.694	0.016	330.356	197.389	0.30	
5	31.12.1982	19:46:46	42.87	77.37	15	13.60	5.33	5.6	13	538	1.692	0.015	54.101	21.399	—	5.30
7	13.02.1983	01:40:09	40.23	75.23	20	16.10	6.72	6.8	624	1879	1.608	0.006	1166.505	249.954	0.21	
8	16.12.1983	13:15:53	39.38	72.92	15	14.50	5.83	6.4	321	1351	1.587	0.007	697.179	149.371	0.31	
9	02.02.1984	14:40:51	40.92	71.13	15	11.00	3.89	6.6	52	13	1.490	0.011	4888.878	613.850	0.22	
10	15.02.1984	21:57:02	40.90	71.10	20	12.80	4.89	7.2	58	2	1.615	0.009	15588.787	2312.567	0.06	
11	17.02.1984	23:26:52	40.85	71.02	25	14.00	5.56	6.3	355	1021	1.510	0.005	8409.918	938.727	0.07	
12	26.10.1984	20:22:17	39.20	71.23	15	14.50	5.83	6.5	287	1332	1.572	0.009	1180.591	299.238	0.25	
13	24.03.1985	11:54:17	41.80	77.50	19	11.10	3.94	6.3	14	187	1.662	0.018	94.763	39.368	0.08	
14	23.08.1985	12:41:55	39.43	75.48	20	16.50	6.94	5.8	551	669	1.589	0.009	4641.616	1436.507	0.20	
15	13.10.1985	15:59:51	40.28	69.80	10	14.60	5.89	7.0	51	517	1.661	0.012	1329.136	551.367	0.21	
16	25.04.1986	16:12:32	40.18	77.28	25	14.20	5.67	7.4	30	178	1.705	0.013	241.847	126.537	2.28	
17	24.01.1987	08:09:17	41.43	79.27	13	14.70	5.94	6.6	620	1353	1.568	0.005	911.333	142.212	0.06	
18	30.04.1987	05:17:37	39.82	74.68	25	14.50	5.83	6.7	89	494	1.639	0.008	936.524	249.086	0.35	
19	09.01.1988	03:55:01	39.23	71.50	0	12.60	4.78	5.6	22	463	1.633	0.022	146.457	71.183	0.36	
20	02.03.1988	18:42:08	40.90	71.23	2	12.30	4.61	6.9	23	408	1.649	0.017	354.095	144.398	0.49	
21	15.03.1988	15:55:19	42.10	75.43	5	11.20	4.00	6.4	11	211	1.711	0.028	18.688	15.703	28.83	
22	10.06.1988	21:11:12	39.20	71.70	10	12.00	4.44	6.0	9	184	1.717	0.014	356.745	137.946	0.21	
23	12.08.1988	18:58:27	39.80	74.37	31	13.30	5.17	6.5	34	215	1.702	0.008	1630.301	399.534	4.49	
24	17.08.1988	14:56:31	39.48	72.32	20	12.80	4.89	6.5	10	207	1.740	0.012	265.209	106.738	41.45	
25	21.10.1988	01:55:18	39.75	72.18	10	11.20	4.00	6.4	13	302	1.660	0.013	306.712	76.770	0.09	
26	14.12.1988	11:45:51	39.27	71.80	5	13.30	5.17	6.2	24	313	1.701	0.012	224.204	89.726	0.75	
27	22.03.1989	01:34:50	40.83	74.08	20	11.90	4.39	6.2	27	415	1.623	0.009	1430.629	234.287	0.33	
28	29.03.1990	16:19:12	39.43	73.25	21	13.70	5.39	6.7	20	169	1.732	0.014	230.548	123.236	0.07	
29	17.04.1990	01:59:19	39.45	74.55	29	15.00	6.11	6.3	426	672	1.586	0.010	441.467	149.575	0.22	
30	03.11.1990	16:39:50	39.15	71.45	10	13.80	5.44	5.5	30	202	1.665	0.017	54.552	27.452	0.62	
31	12.11.1990	12:28:51	42.98	77.92	15	15.00	6.11	5.6	138	1312	1.649	0.011	42.014	17.774	0.21	
32	01.12.1990	18:09:27	40.88	73.65	5	12.60	4.78	6.3	104	601	1.585	0.014	238.152	79.564	0.17	
33	25.02.1991	14:30:25	40.18	79.32	0	14.20	5.67	7.3	75	1348	1.619	0.012	1732.081	600.350	0.63	
34	26.04.1991	22:23:58	39.08	70.98	0	13.30	5.17	6.4	34	662	1.655	0.016	139.543	63.718	0.94	
35	18.06.1991	15:38:36	39.58	72.68	15	12.40	4.67	6.8	26	315	1.646	0.016	283.734	111.133	0.09	
36	31.10.1991	02:29:03	40.17	72.87	15	13.60	5.33	6.2	65	536	1.645	0.011	261.207	86.741	0.25	
37	02.01.1992	05:50:07	41.00	71.13	15	11.20	4.00	7.5	13	3	1.595	0.019	1783.046	441.145	0.76	
38	05.01.1992	17:14:20	40.98	71.12	15	12.60	4.78	7.0	29	66	1.643	0.010	956.616	223.887	0.15	
39	15.05.1992	08:07:59	41.10	72.42	10	15.00	6.11	5.8	1380	1752	1.525	0.011	812.910	258.885	0.24	
40	19.08.1992	02:04:36	42.07	73.63	20	17.00	7.22	5.6	2370	2046	1.613	0.008	207.591	75.713	0.14	
41	12.01.1994	10:22:48	39.47	75.77	0	13.30	5.17	7.3	23	95	1.679	0.015	749.876	324.222	0.17	
42	20.02.1995	04:12:22	39.38	71.03	4	13.60	5.33	7.5	12	131	1.732	0.015	748.058	384.603	1.47	
43	01.11.1995	12:29:28	43.03	80.15	0	13.10	5.06	6.9	10	236	1.748	0.017	238.328	151.349	1.21	
44	18.01.1996	09:33:49	41.90	77.45	5	13.20	5.11	6.2	6	504	1.702	0.023	141.090	67.187	21.15	

Таблица 1. Окончание

№	Дата	Время	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	$H, \text{ км}$	$K$	$M$	$K_{\text{мин}}$	$N_{\text{афт}}$	$T_{\text{афт}}$	$q$	$err_q$	$a$	$err_a$	$t_{\text{start}}$ , час	$t_{\text{start}}$ , дни
45	19.03.1996	15:00:26	40.08	76.65	0	14.60	5.89	7.2	180	1086	1.635	0.008	724.212	194.878	0.20	
46	14.06.1996	22:45:36	42.50	72.87	5	12.70	4.83	6.6	74	592	1.616	0.009	330.459	70.419	0.48	
47	16.12.1996	07:00:14	42.83	78.02	0	12.20	4.56	6.3	15	402	1.709	0.009	276.235	70.212	4.04	
48	21.01.1997	01:47:12	39.43	76.98	0	14.40	5.78	7.3	479	84	1.604	0.009	6866.819	1693.128	1.24	
49	31.03.1997	19:12:48	39.30	76.93	0	12.10	4.50	8.1	11	629	1.608	0.018	12459.739	3039.979	—	109
50	15.04.1997	18:19:12	39.67	76.97	0	15.00	6.11	7.1	1154	1715	1.543	0.011	2195.576	708.907	267.61	
51	13.08.1997	14:30:13	41.87	79.48	0	13.00	5.00	7.4	3	84	1.828	0.016	684.277	519.508	—	26
52	21.09.1997	08:24:17	42.62	74.98	5	11.50	4.17	6.0	13	100	1.664	0.021	217.821	100.378	0.61	
53	27.12.1997	04:20:58	42.23	78.28	10	11.60	4.22	6.7	16	353	1.629	0.016	739.813	218.304	0.70	
54	29.05.1998	22:49:35	41.35	75.60	0	13.60	5.33	6.9	5	290	1.794	0.016	182.342	122.586	—	8
<b>55</b>	<b>27.08.1998</b>	<b>08:38:53</b>	<b>39.45</b>	<b>77.28</b>	<b>0</b>	<b>11.90</b>	<b>4.39</b>	<b>7.6</b>	<b>19</b>	<b>418</b>	<b>1.539</b>	<b>0.017</b>	<b>5679.195</b>	<b>1284.925</b>	<b>8.01</b>	
<b>56</b>	<b>27.08.1998</b>	<b>08:53:08</b>	<b>39.67</b>	<b>77.25</b>	<b>0</b>	<b>11.60</b>	<b>4.22</b>	<b>7.8</b>	<b>11</b>	<b>141</b>	<b>1.650</b>	<b>0.020</b>	<b>6392.032</b>	<b>1921.761</b>	<b>16.31</b>	
<b>57</b>	<b>27.08.1998</b>	<b>09:01:15</b>	<b>39.45</b>	<b>77.43</b>	<b>0</b>	<b>11.10</b>	<b>3.94</b>	<b>7.8</b>	<b>14</b>	<b>152</b>	<b>1.633</b>	<b>0.029</b>	<b>1252.294</b>	<b>632.489</b>	<b>—</b>	<b>35</b>
<b>58</b>	<b>27.08.1998</b>	<b>11:15:51</b>	<b>39.35</b>	<b>77.15</b>	<b>0</b>	<b>12.00</b>	<b>4.44</b>	<b>8.0</b>	<b>38</b>	<b>415</b>	<b>1.510</b>	<b>0.033</b>	<b>19576.168</b>	<b>4387.398</b>	<b>5.48</b>	
59	03.09.1998	06:43:00	39.37	77.32	0	12.80	4.89	8.4	16	409	1.548	0.018	58813.270	11981.160	14.28	
60	06.12.1999	07:33:12	42.67	76.27	0	13.00	5.00	6.1	15	454	1.728	0.019	28.298	15.794	0.38	

Примечание.  $\varphi$  — широта,  $\lambda$  — долгота,  $H$  — глубина,  $K$  — класс,  $M$  — магнитуда,  $K_{\text{мин}}$  — минимальный класс афтершоковой последовательности,  $N_{\text{афт}}$  — количество афтершоков,  $T_{\text{афт}}$  — длительность афтершокового процесса,  $a$  и  $q$  — параметры Тсаллиса,  $err_q$  и  $err_a$  — ошибка их вычисления,  $t_{\text{start}}$  — время первого афтершока в последовательности.

нейной модели для афтершоковых последовательностей с  $N_{\text{афт}} < 100$ .

Обращают на себя внимание события 55–58 (см. табл. 1), которые произошли в один день, разница во времени между первым и последним составляет три часа. Эти события располагаются недалеко друг от друга в северной части Тарима. Вполне вероятно, что первое из этих событий (самое северное, рис. 5) явилось триггером для остальных событий, которые группируются недалеко друг от друга.

**Неэкстенсивный анализ.** Перед рассмотрением параметра Тсаллиса  $q$  для афтершоковых последовательностей были выполнены необходимые построения и определены параметр Тсаллиса  $q$  и константа  $a$  для всего каталога (рис. 6). На графике синим цветом показана функция распределения землетрясений по энергиям по данным каталога, красным — аппроксимация с использованием вычисленных значений  $a$  и  $q$ . На рисунке также представлена традиционная аппроксимация законом Гутенберга–Рихтера (черная линия) и вычисленный параметр этого распределения  $b$ -value.

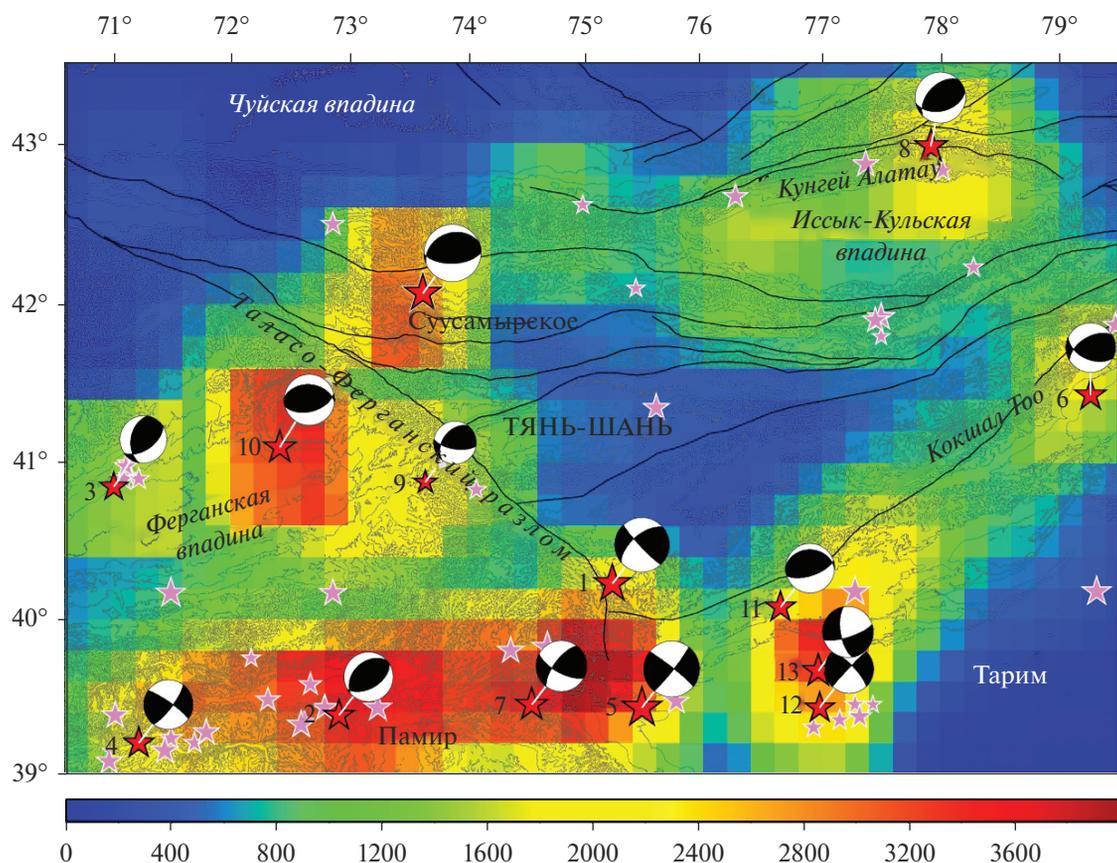
Полученное значение параметра Тсаллиса для всего каталога  $q = 1.526$  характеризует исследуемый регион как сейсмоактивный и хорошо согласуется со значениями  $q$  для других сейсмоактивных регионов [Silva et al., 2006; Telesca, Chen, 2010; Telesca, 2011; Vallianatos et al., 2014; Comple-

xity ..., 2018; Papadakis, 2016; Papadakis et al., 2013, 2015, 2016 и др.].

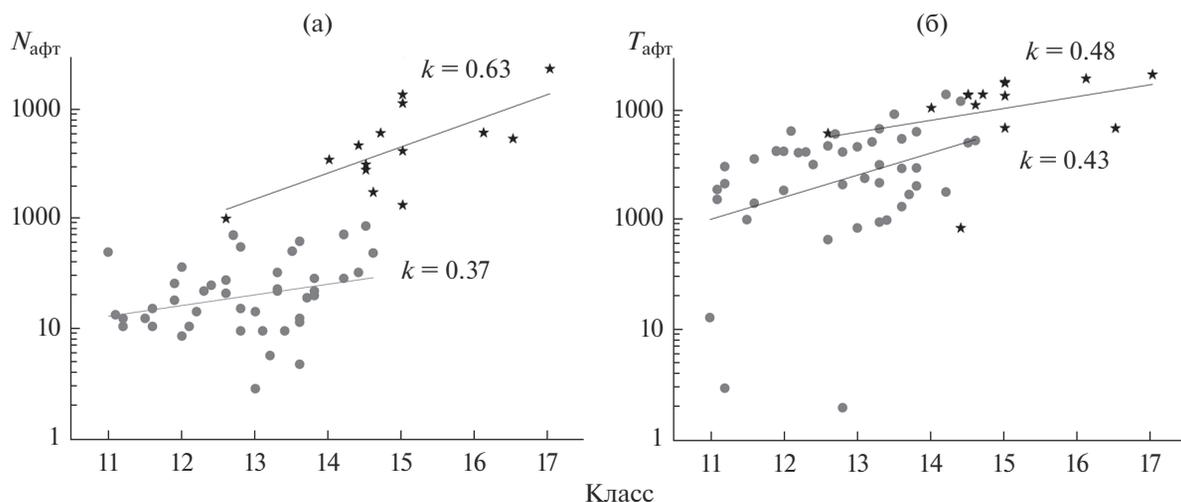
По рис. 6 можно проверить правильность положений, приведенных во введении. Так, если подставим полученное значение параметра Тсаллиса  $q$  в выражение (8), то получим значение параметра  $b$ -value закона Гутенберга–Рихтера, вычисленное по выражению (2) для линейного участка (см. рис. 6):  $b = (2 - 1.526)/(1.526 - 1) = 0.90$ . Полученное значение хорошо согласуется с вычисленным значением для распределения Гутенберга–Рихтера по выражению (2):  $b = 0.886$ .

Результаты оценки параметра Тсаллиса  $q$ , константы  $a$  и ошибки их вычислений для афтершоковых последовательностей представлены в табл. 1. Минимальное значение параметра Тсаллиса  $q = 1.410$ , максимальное  $q = 1.828$ . Для 56 афтершоковых последовательностей (93%) значение параметра Тсаллиса превышает величину  $q$ , рассчитанную для всего каталога.

В работе [Пригожин, Стенгерс, 1986] отмечено, что амплитуды дальнедействующих пространственных корреляций в неравновесной диссипативной системе сначала малы, а затем, по мере удаления от метастабильного состояния, нарастают и в точках бифуркаций могут обращаться в бесконечность. В нашем случае повышенные значения параметра Тсаллиса  $q$  в афтершоковых последовательностях по отношению ко всему каталогу могут означать, что землетрясения



**Рис. 3.** Эпицентральное расположение главных событий землетрясений (обозначены звездочками). Красные звездочки обозначают положение главных событий с  $N_{\text{афт}} \geq 100$ . Для событий с  $N_{\text{афт}} \geq 100$  представлены фокальные механизмы очагов.

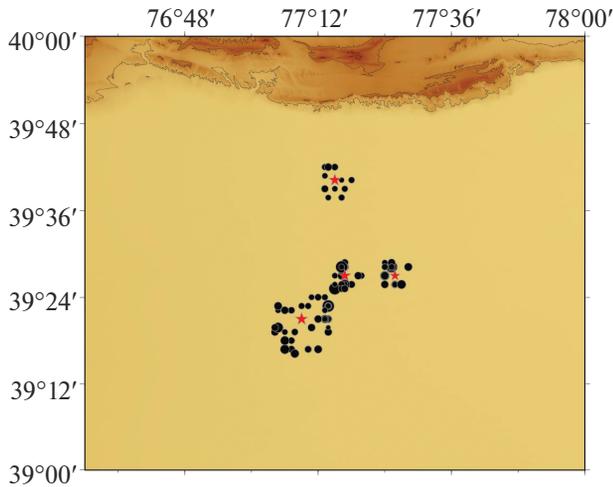


**Рис. 4.** Зависимость количества (а) и длительности (б) афтершоков от класса главного события. Серым цветом отмечены события с  $N_{\text{афт}} < 100$ , черным – события с  $N_{\text{афт}} \geq 100$ .

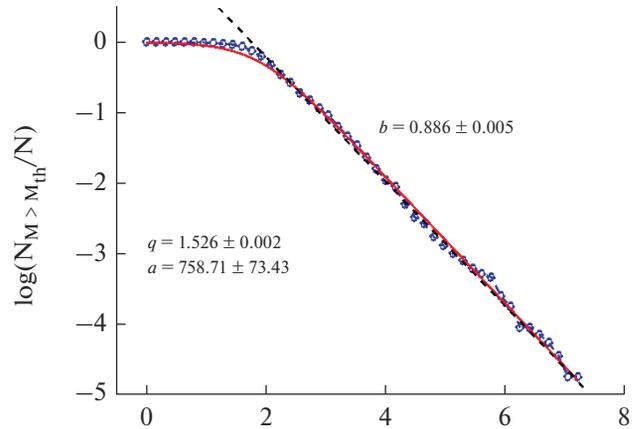
сопровождаются ростом дальних пространственных корреляций. Это также может свидетельствовать о том, что сейсмогенерирующие зоны после главного события еще не вернулись в состояние

относительного равновесия, и накопленная энергия продолжает высвобождаться.

На рис. 7 представлена зависимость параметра Тсаллиса  $q$  от количества афтершоков и их дли-



**Рис. 5.** Эпицентральное положение главных событий (красные звездочки) и их афтершоков (черные кружки) для землетрясений 55–58 (см. табл. 1).



**Рис. 6.** График повторяемости, построенный по всему каталогу (синий цвет), и его аппроксимация: красный цвет – расчет на основе выражения (7), черный цвет – закон Гутенберга–Рихтера (выражение (2)).

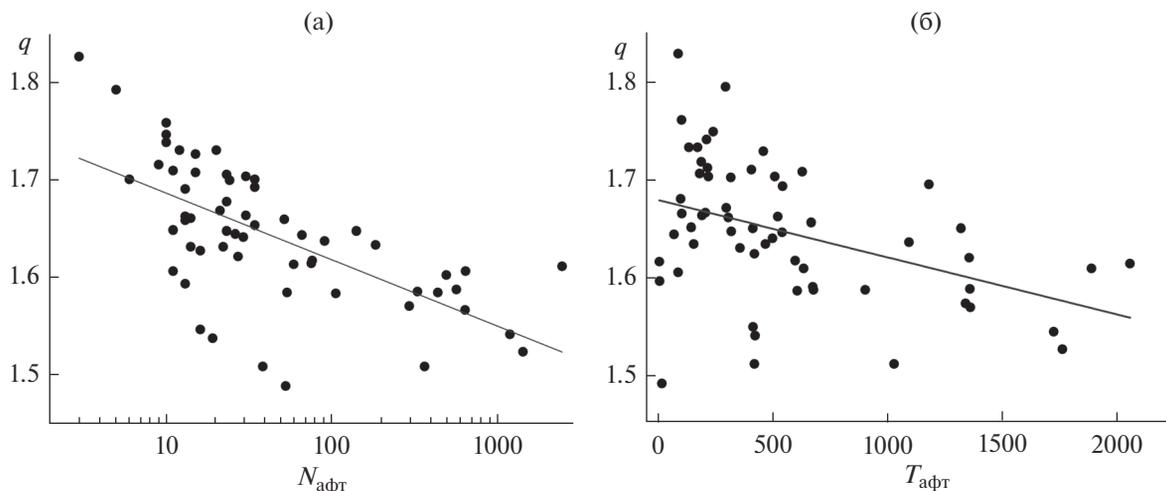
тельности (см. табл. 1). Для зависимости  $q$  от количества афтершоков ось абсцисс представлена в логарифмическом масштабе. Отмечается, что значение параметра Тсаллиса падает с увеличением количества афтершоков и их длительности.

Длительное затухание активного сейсмического процесса приводит к постепенной разрядке напряжений, и параметр Тсаллиса  $q$  демонстрирует уменьшение дальних пространственных корреляций.

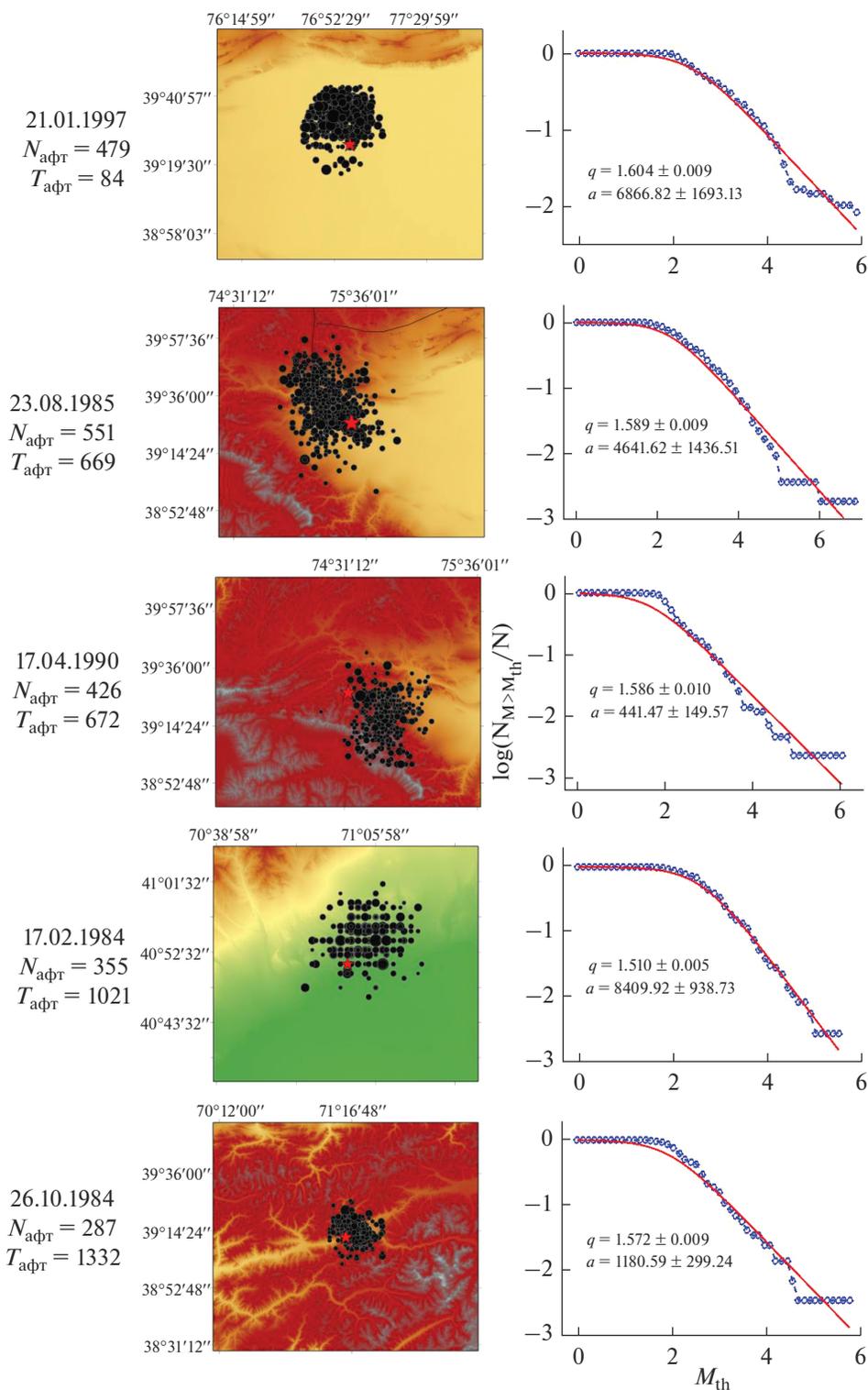
Для графического представления результатов расчета параметра Тсаллиса  $q$  и константы  $a$  в дальнейшем рассматриваются землетрясения с  $N_{\text{афт}} > 300$  (10 событий). На рис. 8, 9 слева направо представлены: дата главного события, количество афтершоков и их длительность, карты эпицентрального расположения главного события (звездочка) и афтершоков (черные кружки) и рассчитанные параметры функции распределения землетрясений по энергиям ( $q, a$ ). Порядок расположения результатов на указанных рисунках сверху вниз зависит от длительности афтершокового процесса. Минимальная длительность составляет  $T_{\text{афт}} = 84$  дня (см. рис. 8, верхний ряд), максимальная  $T_{\text{афт}} = 1879$  (см. рис. 9, нижний ряд).

Во всех рассматриваемых случаях положение главного толчка, которое определяет место начала разрыва, приходится на краевую часть области расположения афтершоков.

В анализируемых афтершоковых последовательностях (см. рис. 8, 9) максимальное значение  $q$  составляет 1.604, минимальное – 1.510. Для одной афтершоковой последовательности значение  $q$  совпадает со значением, полученным для всего



**Рис. 7.** Распределение параметра  $q$  в зависимости от количества  $N_{\text{афт}}$  (а) и длительности афтершоков  $T_{\text{афт}}$  (б).



**Рис. 8.** Распределение афтершоков в пространстве (слева) и построения, необходимые для расчета параметров Тсал-лиса  $q$  и  $a$  для событий с  $N_{\text{афт}} > 300$ . Значения  $q$  и  $a$  представлены в табл. 1.

каталога, для другой — это значение ниже. Оба главных события приходятся на северный борд Ферганской впадины. Первое землетрясение произошло 15.05.1992 с  $M = 6.11$  и сопровожда-

лось 1380 афтершоками длительностью 1752 дня. Второе произошло 17.02.1987 с  $M = 5.5$  и сопровождалось 355 афтершоками продолжительностью 1021 день. На первые сутки приходится чет-

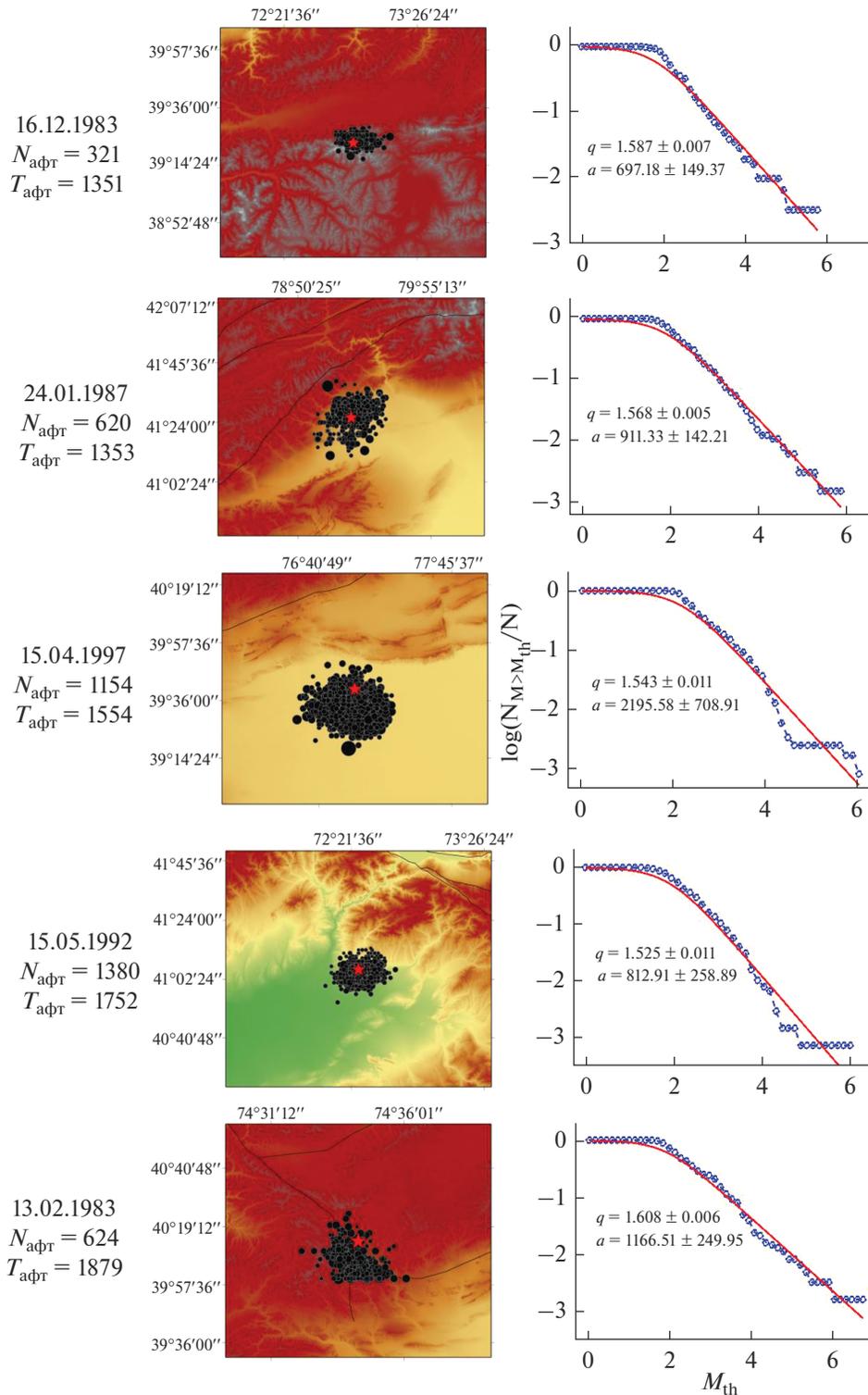
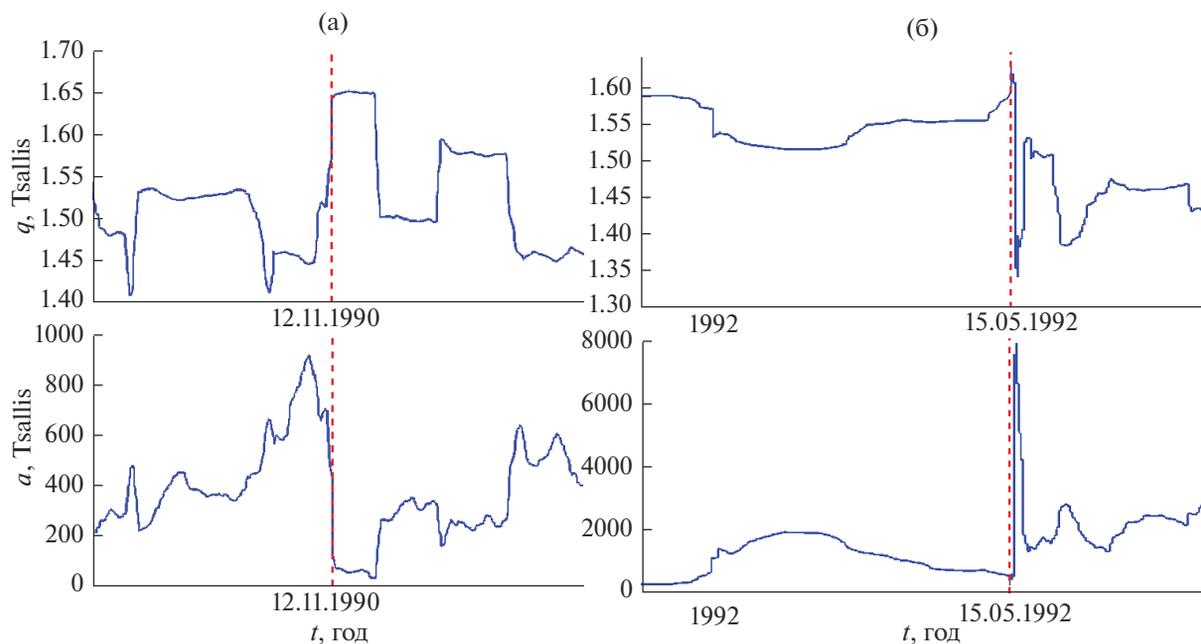


Рис. 9. Распределение афтершоков в пространстве (слева) и построения, необходимые для расчета параметров Тсаллиса  $q$  и  $a$  для событий с  $N_{\text{афг}} > 300$ . Значения  $q$  и  $a$  представлены в табл. 1.

вертая часть афтершоков (95), остальные произошли в течение трех лет.

Для исследования поведения параметров  $q$  и  $a$  функции распределения землетрясений по энер-

гиям, выражение (7), в динамике были рассмотрены четыре землетрясения с  $M = \sim 6$ . При построении рассматривались не все события каталога (большая территория, см. рис. 3), а только те,



**Рис. 10.** Поведение параметра Тсаллиса  $q$  и параметра  $a$  в динамике вблизи даты главного события (см. табл. 1) в области с радиусом 200 км для событий: а – 12.11.1990,  $M = 6.1$ ; б – 15.05.1992,  $M = 6.1$ . Вертикальной пунктирной линией отмечено время события.

которые находились в области с радиусом 200 км от положения главного события, при этом в полученной последовательности рассматривалось 200 событий с шагом 1 событие. Результаты расчета представлены на рис. 10, 11. Вертикальной пунктирной линией на рисунках отмечено время главного события.

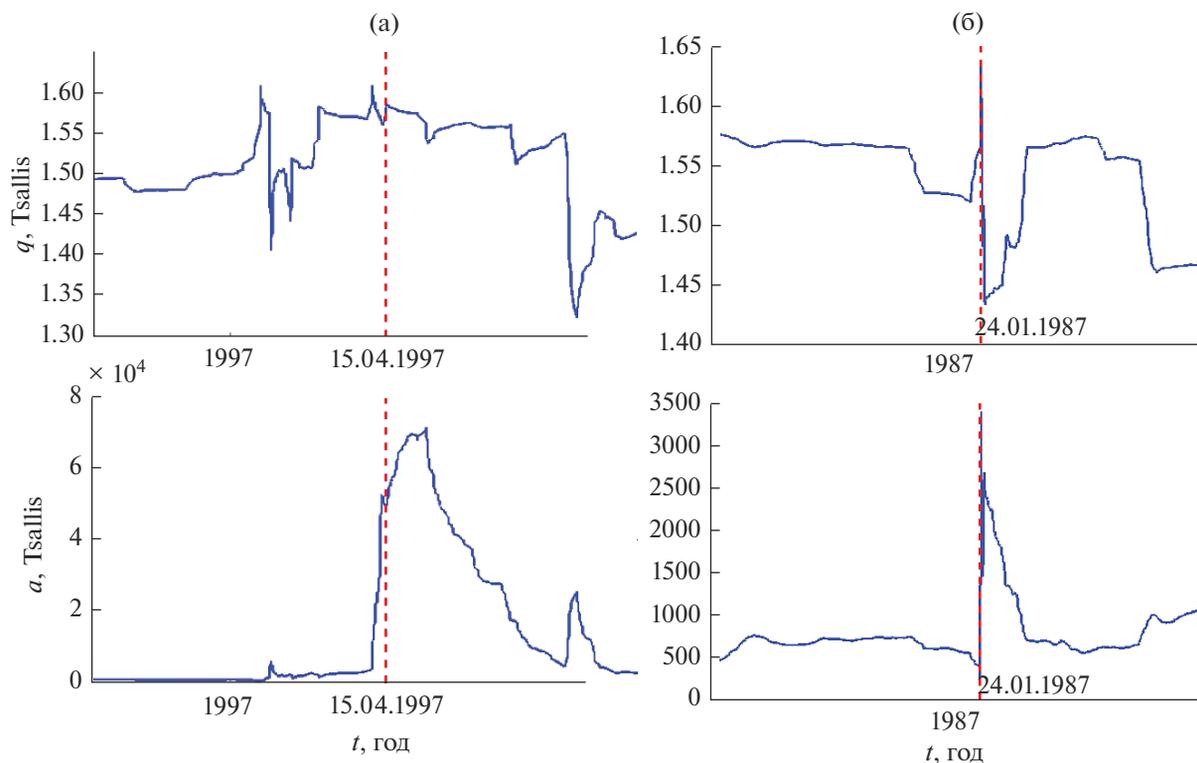
Поведение параметра Тсаллиса  $q$  в динамике, представленное на рис. 10, 11, демонстрирует возрастание дальних пространственных корреляций перед землетрясением. Иначе говоря, любая катастрофа сопровождается ростом дальних корреляций [Пригожин, Стенгерс, 1986], а затем, вместе со сбросом накопленных напряжений, происходит уменьшение этих корреляций.

В то же время интересным является поведение параметра  $a$ , который имеет размерность объемной плотности энергии и определяется энергией землетрясения  $E$  и размером фрагмента блоков  $r^3$  между разломами. Длину единичного сейсмогенного разрыва в гипоцентре землетрясения можно оценить по формуле [Ризниченко, 1985; Завьялов, 2006]:  $\lg l_j = bK_j + c$ ; где  $K_j$  – энергетический класс землетрясения, для Тянь-Шаньского региона рекомендуемые значения  $b = 0.244$ ,  $c = -2.266$  [Ризниченко, 1985]. Афтершоки, как правило, имеют меньшие энергетические классы, чем главное событие, сопровождаются меньшими длинами разрывов и меньшими фрагментами, участвующими в процессе. Тем не менее (см. рис. 10б, 11а, 11б) вместе с уменьшением параметра  $q$  происходит

рост параметра  $a$ , что означает рост высвобождения энергии за счет движения более мелких фрагментов. Происходит рост количества афтершоков с вовлечением большего сейсмоактивного объема. Это, возможно, связано с тем, что вся сейсмогенная система еще не пришла в состояние равновесия, и продолжает высвобождаться энергия в рассматриваемой области.

На рис. 10а наблюдается несколько иной процесс. Согласно данным таблицы, четыре рассматриваемых события имеют разное количество афтершоков: 138 (событие 12.11.1990), 1380 (15.05.1992), 1154 (15.04.1997), 620 (24.01.1987). Скорее всего, для события 12.11.1990 основная накопленная энергия вместе с главным событием выделилась в несколько ближайших суток. Так как в первые 2–3 дня после главного события и вблизи его эпицентра произошла серия крупных землетрясений, это отразилось в повышенных значениях параметра Тсаллиса  $q$ . Однако в процесс еще не вовлечены большие объемы, возможно поэтому наблюдается снижение параметра  $a$ .

Исследования параметра  $a$  находятся на предварительном этапе, и чтобы полностью понять поведение этого параметра во времени, требуются дополнительные тесты, это отмечается и в работе [Complexity ..., 2018].



**Рис. 11.** Поведение параметра Тсаллиса  $q$  и параметра  $a$  в динамике вблизи даты главного события (см. табл. 1) в области с радиусом 200 км для событий: а – 15.04.1997,  $M = 6.1$ ; б – 24.01.1987,  $M = 5.94$ . Вертикальной пунктирной линией отмечено время события.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен каталог землетрясений (56259 событий), произошедших на территории Тянь-Шаня и Северного Памира с 1983 по 2001 гг. Выделено 60 событий с  $K \geq 11$ , которые сопровождались афтершоковыми последовательностями. Рассматриваемые землетрясения произошли на территории, которая характеризуется высоким значением сейсмической активности. Для землетрясений с  $N_{\text{афт}} > 100$  определены фокальные механизмы. Механизмы очагов имеют взбросовый или взбросо-сдвиговый характер. Азимут осей сжатия имеет субмеридианальное направление, что соответствует региональному геодинамическому режиму.

При одном энергетическом классе главного события отмечено разное количество афтершоков и различная длительность афтершокового процесса. Для рассмотренных афтершоковых последовательностей отмечается слабая тенденция возрастания количества и длительности афтершоков с увеличением класса события.

Для большинства исследуемых землетрясений главное событие находится на границе сейсмического облака, что указывает на точку начала разрыва в земной коре, и разрыв, как правило, разбивается по одну сторону от главного события.

Каталог землетрясений и афтершоковые последовательности рассмотрены с позиций неравновесной термодинамики с применением неэкстенсивной статистики Тсаллиса. Полученное распределение землетрясений по энергиям описывается предложенной моделью во всем диапазоне магнитуд и согласуется с распределением Гутенберга–Рихтера в представительном интервале магнитуд. Параметр Тсаллиса  $q$ , рассчитанный для всего каталога, имеет значение  $q = 1.526$  и согласуется со значениями, полученными для других сейсмоактивных регионов. Параметр Тсаллиса для рассмотренных афтершоковых последовательностей меняется от 1.410 до 1.828. Отмечается, что значение параметра Тсаллиса падает с увеличением количества афтершоков и их длительности. Для 56 афтершоковых последовательностей (93%) значение параметра Тсаллиса превышает величину  $q$ , рассчитанную для всего каталога. Это может означать, что нестабильное состояние, в которое пришла сейсмогенная система перед главным событием, продолжает сохраняться и во время следования афтершоков, активный сейсмический процесс продолжается, и сейсмогенерирующие зоны еще не вернулись в состояние относительного равновесия.

При рассмотрении изменения параметра Тсаллиса в динамике для 4 землетрясений было

отмечено, что во всех рассматриваемых случаях наблюдается возрастание параметра Тсаллиса  $q$  вблизи даты главного события и его понижение в течение некоторого времени. Иначе говоря, любая катастрофа сопровождается возрастанием дальних корреляций [Пригожин, Стенгерс, 1986] до некоторого критического значения, а затем, вместе со сбросом накопленных напряжений, происходит уменьшение этих корреляций.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Частично исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции РАН в г. Бишкеке (темы № АААА-А19-119020190064-9 и № АААА-А19-119020190066-3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдрахматов К.Е., Уилдон Р., Томпсон С. И др.* Происхождение, направление и скорость современного сжатия Центрального Тянь-Шаня (Киргизия) // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1585–1610.
- Баранов С.В., Шебалин П.Н.* Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН, 2019. 218 с.
- Гиббс Дж.В.* Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982. 584 с.
- Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
- Костюк А.Д.* Деформационные изменения земной коры Северного Тянь-Шаня по данным космической геодезии // Вестник КРСУ. 2008. Т. 8. № 3. С. 140–144.
- Молчан Г.М., Дмитриева О.Е.* Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. Вып. 24. М.: Наука, 1991. С. 19–50.
- Муралиев А.М., Искендеров С.А.* О методике выделения афтершоков сильных землетрясений Тянь-Шаня // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2015. № 1. С. 80–87.
- Мухаммадеева 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.
- Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой / Пер. с англ. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
- Раутиан Т.Г.* Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М.: Изд-во АН СССР, 1960. № 176. С. 75–114.
- Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии // Избранные труды. М.: Наука, 1985. 408 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Сычев В.Н., Сычева Н.А., Имашев С.А.* Исследование афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 35–43. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.035-043>
- Чумак О.В.* Энтропия и фракталы в данных. М., Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Институт компьютерных исследований, 2011. 164 с.
- Шебалин П.Н., Баранов С.В., Дзебоев Б.А.* Закон повторяемости количества афтершоков // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 3. С. 320–323.
- Юдахин Ф.Н.* Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1983. 246 с.
- Brown S.R., Scholz C.H., Rundle J.B.* A simplified spring-block model of earthquakes // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. № 2. P. 215–218.
- Complexity of Seismic Time Series: Measurement and Application / Eds T. Chelidze, F. Vallianatos, L. Telesca. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018. P. 548. <https://www.elsevier.com/books/complexity-of-seismic-time-series/chelidze/978-0-12-813138-1>
- Gutenberg B., Richter C.F.* Frequency of earthquakes in California // Bull. Seismol. Soc. Am. 1944. V. 34. P. 185–188.
- Chochlaki K.* Complexity of the Yellowstone Park Volcanic Field Seismicity in Terms of Tsallis Entropy / Eds K. Chochlaki, G. Michas, F. Vallianatos // Entropy. 2018. V. 20. P. 721. <https://doi.org/10.3390/e20100721>
- Kalimeri M., Papadimitriou C., Balasis G., Eftaxias K.* Dynamical complexity detection in pre-seismic emissions using nonadditive Tsallis entropy // Phys. 2008. A 387. P. 1161–1172.
- Kuchay O.A., Kalmet'eva Z.A., Kozina M.E., Abdрахматов К.Е.* Stress fields revealed by aftershocks of the strongest earth-quakes of Tien Shan // Geodynamics & Tectonophysics. 2017. № 8(4). P. 827–848. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0319>
- Matcharashvili T., Chelidze T., Javakhishvili Z. et al.* Non-extensive statistical analysis of seismicity in the area of Javakheti, Georgia // Comput. Geosci. 2011. V. 37. P. 1627–1632.
- Papadakis G., Vallianatos F., Sammonds P.* Evidence of non-extensive statistical physics behavior of the Hellenic subduction zone seismicity // Tectonophysics. 2013. V. 608. P. 1037–1048.
- Papadakis G., Vallianatos F., Sammonds P.* A nonextensive statistical physics analysis of the 1995 Kobe, Japan earthquake // Pure Appl. Geophys. 2015. V. 172. P. 1923–1931.
- Papadakis G., Vallianatos F., Sammonds P.* Non-extensive statistical physics applied to heat flow and the earthquake frequency-magnitude distribution in Greece // Phys. 2016. A 456. P. 135–144.
- Papadakis G.* A Non-Extensive Statistical Physics Analysis of Seismic Sequences: Application to the Geodynamic System of the Hellenic Subduction Zone, PhD Thesis. London: University College, 2016.
- Rebetsky Yu.L., Alekseev R.S.* The field of recent tectonic stresses in Central and South-Eastern Asia // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. № 5(1). P. 257–290. <https://doi.org/10.5800/GT2014510127>
- Sarlis N.V., Skordas E.S., Varotsos P.A.* Nonextensivity and natural time: The case of seismicity // Phys. Rev. E 82 (American Physical Society (APS)). 2010. 021110. P. 021110-1–021110-9. <https://doi.org/10.1103/physreve.82.021110>

- Silva R., Franca G.S., Vilar C.S., Alcanis J.S.* Nonextensive models for earthquakes // *Phys. Rev. E* 73(2). 2006. 026102. P. 026102-1–026102-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.026102>
- Sotolongo-Costa O., Posadas A.* Fragment-Asperity Interaction Model for Earthquakes // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 92. № 4. P. 048501-1–048501-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.048501>
- Sycheva N.A., Mansurov A.N.* Comparison of crustal deformation rates estimated from seismic and GPS data on the Bishkek geodynamic polygon // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. № 8(4). P. 809–825. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0318>
- Telesca L., Cuomo V., Lapenna V. et al.* Analysis of the temporal properties of Greek aftershock sequences // *Tectonophysics*. 2001. V. 341(1–4). P. 163–178.
- Telesca L., Chen C.C.* Nonextensive analysis of crustal seismicity in Taiwan // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010. V. 10. P. 1293–1297. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1293-2010>
- Telesca L.* Analysis of Italian seismicity by using a nonextensive approach // *Tectonophysics*. 2010a. V. 494. P. 155–162.
- Telesca L.* Nonextensive analysis of seismic sequences // *Phys.* 2010b. A 389. P. 1911–1914.
- Telesca L.* A non-extensive approach in investigating the seismicity of L'Aquila area (central Italy), struck by the 6 April 2009 earthquake ( $M_L$  5.8) // *Terra Nova*. 2010c. V. 22(2). P. 87–93.
- Telesca L.* Tsallis-based nonextensive analysis of the Southern California seismicity // *Entropy*. 2011. V. 13(7). P. 127–1280. <https://doi.org/10.3390/e13071267>
- Tsallis C.* Possible generalization of Boltzmann–Gibbs statistics // *J. Stat. Phys.* 1988. V. 52(1–2). P. 479–487. <https://doi.org/10.1007/bf01016429>
- Vallianatos F., Michas G., Papadakis G.* Non-extensive and natural time analysis of seismicity before the  $M_w$  6.4, October 12, 2013 earthquake in the South West segment of the Hellenic Arc // *Phys. A*. 2014. V. 414. P. 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.07.038>
- Valverde-Esparza S.M., Ramirez-Rojas A., Flores-Marquez E.L., Telesca L.* Non-extensivity analysis of seismicity within four subduction regions in Mexico // *Acta Geophys.* 2012. V. 60. P. 833–845.
- Zubovich A.V., Mukhamediev Sh.A.* A method of superimposed triangulations for calculation of velocity gradient of horizontal movements: application to the Central Asian GPS network // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010. V. 1. № 2. P. 169–185.

## Nonextensive Analysis of Aftershocks of Moderate Earthquakes of the Tyan Shan and Northern Pamir

V. N. Sychev<sup>1, \*</sup> and N. A. Sycheva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek city, Bishkek-49, 720049 Kyrgyzstan

\*e-mail: koitash@mail.ru

The aftershock sequences of 60 earthquakes with  $K \geq 11$  were selected from the catalog of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (KIS). The catalogue includes 56259 events that occurred in the territory of Tian Shan and the Northern Pamirs from 1980 to 2001. Some statistical characteristics of the catalog were obtained and its representative part was determined. A map of seismic activity has been constructed. Some parameters of the main events and aftershock sequences have been determined - the minimum number of aftershocks is 3 events, the maximum is 2370, the minimum duration of the aftershock process includes 2 days, and the maximum is 2046 days. Earthquake catalogue and aftershock sequences are considered from the positions of nonequilibrium thermodynamics using Tsallis statistics (parameters  $q$  and  $a$ ). To describe the energy distribution function of earthquakes, a modified model of the stick-slip earthquake source and the principle of maximum entropy were used. The approach was used to quantify the nonextensive Tsallis parameter  $q$  in the flow of earthquakes, as well as to estimate the change in this parameter immediately before a large earthquake and during the aftershocks. It is shown that the earthquake flow is a system with memory and long-range spatial correlations. The Tsallis parameter  $q$  for aftershock sequences exceeds the value  $q$  calculated for the entire earthquake catalog, which indicates the preservation of an unstable state of the seismogenic system during the aftershocks. An abrupt increase in the Tsallis parameter  $q$  is observed in a certain area, including the area of the earthquake preparation before the main event and an abrupt decrease immediately after it, with a further return to the average level observed before the event.

**Keywords:** aftershocks, non-intensive analysis, function of earthquake distribution by energies, far correlations, Tsallis parameter