



SOME CHARACTERISTICS OF THE EARTHQUAKE CATALOG AND THE SEISMIC PROCESS ACCORDING TO THE KNET NETWORK

N.A. Sycheva  

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

Research Station, Russian Academy of Science, Bishkek 720049, Kyrgyzstan

ABSTRACT: Some characteristics of the earthquake catalog and seismic process are considered. The catalog is obtained according to the KNET network (KN-code in FSDN, International Federation of Digital Seismograph Networks, that is operated by Research Station of RAS, RS RAS) and contains more than 10000 earthquake parameters from 1994 to 2020. The catalog and seismicity characteristics were determined the whole catalog as well as the catalog that is limited by the coordinates of the Bishkek geodynamic polygon (BGP). Statistical analysis of arrival times of direct P - and S -waves registered at KNET network stations was carried out. The maximum P - and S -waves were registered at AAK station, the minimum – at ULHL station. The territory of the BGP is covered by great P -traces density. We analyzed earthquake localization errors, i.e. the difference between the observed and calculated arrival times of P - and S -wave fronts (RMS), horizontal error (ERH, epicenter) and vertical error (ERZ, depth). Occurred on the BGP territory earthquakes have minimum values of the considered errors. The representative sample is defined: for the whole catalog it includes $K \geq 7.2$ earthquakes and for the limited by BGP coordinates catalog – $K \geq 6.7$. Statistical characteristics of the representative part of the catalog in terms of time and depth are determined. The temporal distribution of earthquakes by energy classes is constructed and the absence of positive or negative trends in the number of events is noted. Spatial distribution of earthquakes by depth – 0–5, 5–10, 10–15 and more than 15 km is constructed. The smallest errors of earthquake depth determination have the events that occurred on the BGP territory. During the study 46 moderate earthquakes with $K \geq 12$ occurred. The most part of these events happened in the North Tien Shan seismogenic zone. 22 events were determined with $K \geq 10$ followed by aftershock sequences and give some aftershock characteristics. The most events with aftershocks occurred in the eastern part of the Kyrgyz ridge. The distribution of earthquake numbers and STD intensity is constructed. Zones of seismic activity and maximum intense Earth's crust deformation are identified. The Gutenberg – Richter law and provisions of nonextensive statistical physics were used to describe the energy distribution function of earthquakes.

KEYWORDS: earthquake; hypocenter; arrival time; hypocenter localization error; seismic trace; aftershock; representative sample; intensity STD; Tsallis q -parameter; nonextensive statistical physics

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Nailya A. Sycheva, nelya@ifz.ru

Received: March 18, 2021

Revised: November 16, 2021

Accepted: December 13, 2021

FOR CITATION: Sycheva N.A., 2022. Some Characteristics of the Earthquake Catalog and the Seismic Process According to the KNET Network. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (3), 0640. doi:10.5800/GT-2022-13-3-0640

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАЛОГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПО ДАННЫМ СЕТИ KNET

Н.А. Сычева

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия
Научная станция РАН в г. Бишкеке, 720049, Бишкек, Кыргызстан

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены некоторые характеристики каталога землетрясений и сейсмического процесса. Каталог получен на основе данных сети KNET (Kyrgyz network, KN – код в FSDN, International Federation of Digital Seismograph Networks, эксплуатируется Научной станцией РАН, ИС РАН) и содержит параметры более 10000 землетрясений, произошедших с 1994 по 2020 г. Характеристики каталога и сейсмичности определялись для всего каталога и для каталога, ограниченного координатами Бишкекского геодинамического полигона (БГП). Проведен статистический анализ времен прихода прямых P - и S -волн, зарегистрированных на станциях сети KNET. Максимум P - и S -волн зарегистрирован на станции ААК, минимум – на станции ULHL. Хорошей плотностью P -трасс покрыта территория БГП. Выполнен анализ ошибок локализации землетрясений – невязка наблюдаемых и расчетных времен вступления фронтов P - и S -волн (RMS), ошибка по горизонтали (ERH, эпицентрального положение) и ошибка по вертикали (ERZ, по глубине). Минимальные значения рассмотренных ошибок имеют землетрясения, произошедшие на территории БГП. Определена представительная выборка: для каталога она включает землетрясения с $K \geq 7.2$, а для каталога, ограниченного координатами БГП, – события с $K \geq 6.7$. Определены статистические характеристики представительной части каталога по времени и по глубине. Построено временное распределение землетрясений по энергетическим классам, отмечено отсутствие положительного или отрицательного тренда изменения числа событий. Построено пространственное распределение землетрясений по глубинам – 0–5, 5–10, 10–15 и более 15 км. Наименьшие ошибки определения глубины землетрясения имеют события, произошедшие на территории БГП. За время исследования произошло 46 землетрясений умеренной силы с $K \geq 12$. Основная часть этих событий произошла в Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей зоне. Выделено 22 события с $K \geq 10$, после которых произошли афтершоковые последовательности, и представлены некоторые характеристики афтершоков. Большая часть событий с афтершоками произошла в восточной части Киргизского хребта. Построено распределение количества землетрясений и интенсивности сейсмоструктурной деформации (СТД). Выделены зоны сейсмической активности и максимальных интенсивных деформаций земной коры. Для описания функции распределения землетрясений по энергии использовался закон Гутенберга – Рихтера, а также положения неэкстенсивной статистической физики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясение; гипоцентр; время прихода объемных волн; ошибка локализации гипоцентров; сейсмическая трасса; афтершок; представительная выборка; интенсивность СТД; параметр Тсаллиса q ; неэкстенсивная статистическая физика

1. ВВЕДЕНИЕ

Киргизская сейсмологическая сеть KNET была установлена на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) в августе – сентябре 1991 г. в результате совместных усилий ряда научных организаций: Института геофизики и планетарной физики при Калифорнийском университете в г. Сан-Диего (IGPP-UCSD), США, Киргизского института сейсмологии (КИС), российского Института высоких температур (ИВТАН), российского Института физики Земли (ИФЗ) и университета штата Индиана, США.

Под БГП понимается территория, которая лежит в пределах центрального сегмента Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей зоны и представляет собой зону сочленения Тянь-Шаньского орогена и Туранской плиты. Основными тектоническими структурами исследуемого района на неотектоническом этапе являются Киргизская мегантиклиналь (Киргизский хребет) и находящаяся севернее Чуйская впадина. Южнее Киргизского хребта располагаются Суусамырская, Кочкорская

и Джумгалская впадины, разделенные небольшими хребтами. Западнее находятся хребты Таласский, Большой и Малый Каратау, а восточнее – хребты Кунгей-Алатау и Терсей-Алатау с разделяющей их Иссык-Кульской межгорной впадиной.

Шесть станций KNET пространственно окружают столицу Киргизии г. Бишкек и расположены вдоль бортов Чуйской долины. Три из них установлены в зоне южных предгорий Чу-Илийских гор, а другие три расположены вдоль северных отрогов Киргизского хребта. И четыре южные станции охватывают территорию от Суусамырской впадины до юго-западного обрамления Иссык-Кульской депрессии (рис. 1). Техническое оснащение станций, организация работы сети в режиме реального времени, уровень сейсмического шума на станциях и другая информация более подробно описаны в работе [Sycheva et al., 2020].

Станции сети KNET позволяют регистрировать не только локальную сейсмичность, но и далекие сильные землетрясения. Для создания каталога землетрясений

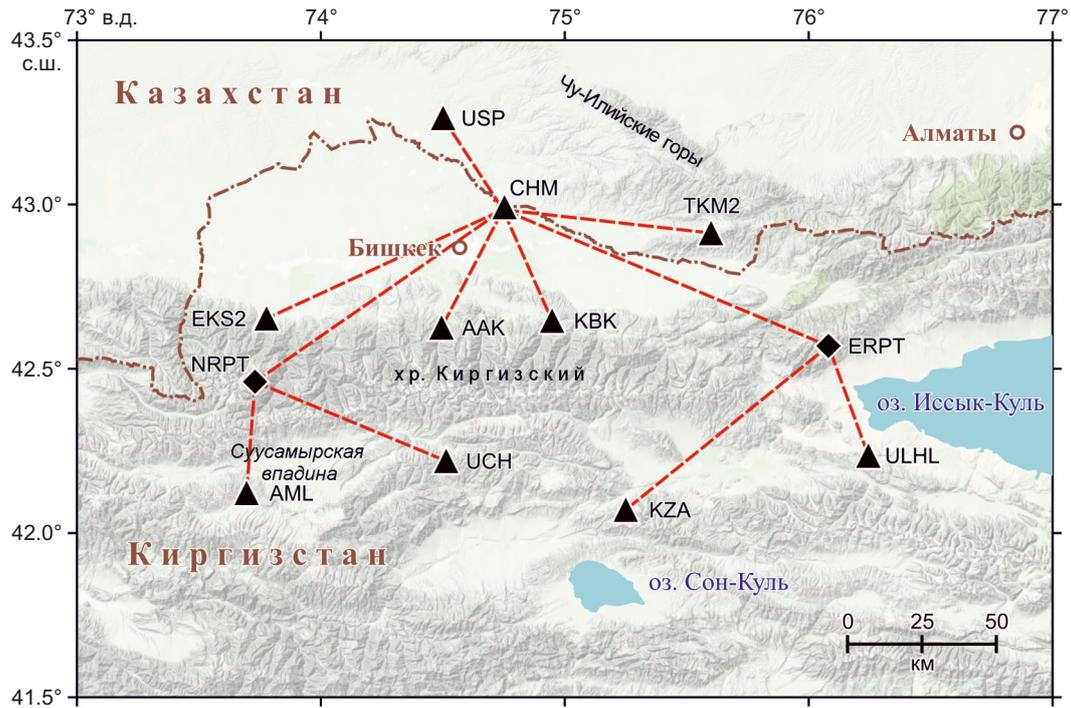


Рис. 1. Расположение станций сейсмологической сети KNET.

Треугольники – сейсмостанции, ромбы – ретрансляторы, пунктирные прямые линии – телеметрические связи между станциями и ретрансляторами для управления и передачи данных. Координаты карты ограничивают территорию БГП.

Fig. 1. The location of KNET seismological network stations.

Triangles – seismic stations, rhombs – repeaters, dotted straight lines – telemetry links between stations and repeaters for control and data transmission. Map coordinates limit the territory of BGP.

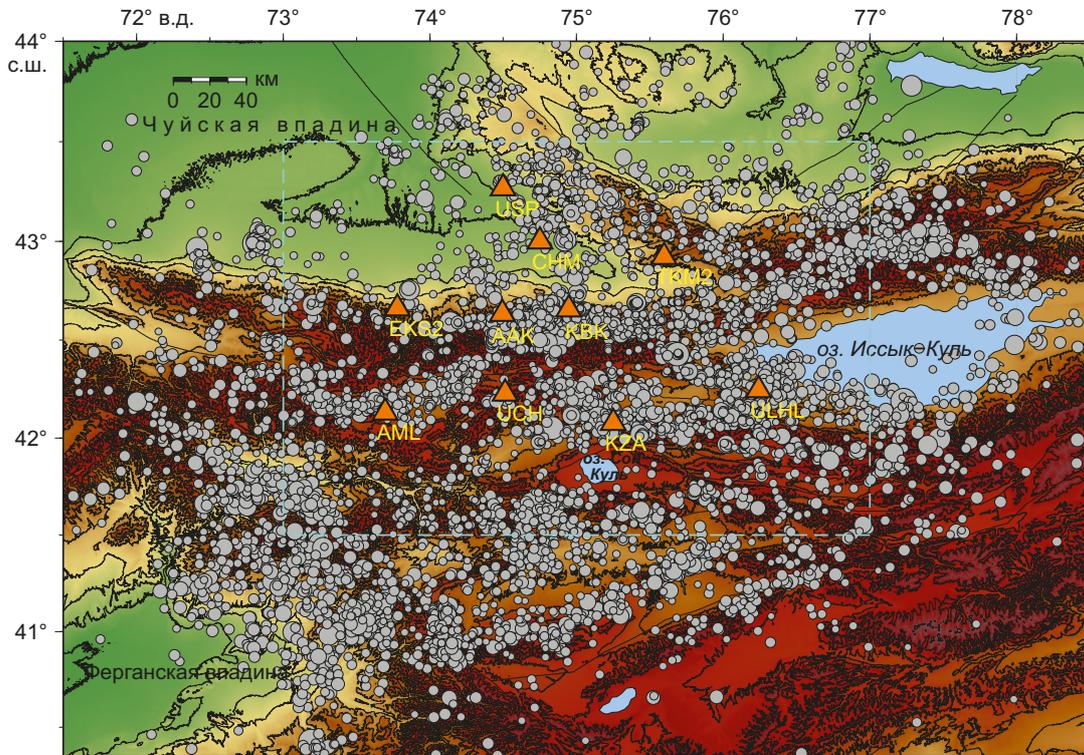


Рис. 2. Эпицентры землетрясений представительной части каталога по данным сети KNET за 1996–2020 гг. (6862 события). Треугольники – станции сети KNET. Прямоугольником отмечена территория БГП.

Fig. 2. Epicenters of earthquakes of the representative part of the catalog according to the KNET network data for 1996–2020 (6862 events). Triangles – stations of the KNET network. The rectangle marks the territory of the BGP.

обрабатываются те события, для которых разница между временем прихода P - и S -волны не превышает 20 с (не далее 600 км от станций сети). На настоящий момент каталог землетрясений по данным сети KNET включает в себя более 10000 сейсмических событий, которые произошли в период с 1994 по 2020 г. Обработка данных сети KNET началась в 1995 г., и потребовалось время для приобретения опыта локализации землетрясений, что отразилось на качестве данных каталога за 1994–1995 гг. Наиболее качественные данные в каталоге представлены с 1996 г.

В июле 1998 г. сеть начала работать в режиме реального времени, что привело к увеличению качества передачи данных (98–99 %). Непрерывные цифровые записи (с частотой 100 Гц) станций сети хранятся на НС РАН с 1999 г. До 1999 г. записи с частотой 40 Гц можно получить с сайта IRIS (Incorporated Research Institution for Seismology).

Эпицентры землетрясений представительной части каталога (которая обсуждается ниже) за 1996–2020 гг. показаны на рис. 2. Станции сети KNET позволяют регистрировать землетрясения, произошедшие на территории Северного и Центрального Тянь-Шаня.

Центральный Тянь-Шань занимает обширную территорию, окаймленную хребтами: Ферганским на западе, Заилийским, Киргизским, Таласским Алатау – на севере, Меридиональным на востоке и Кокшаал-Тоо – на юге [Burtman, 2012]. К Северному Тянь-Шаню принято относить Заилийский Алатау, Кунгей-Алатау, Кетмень и Киргизский Алатау (Киргизский хребет) [Burtman, 2012]. Киргизский хребет ограничивает Центральный Тянь-Шань с севера и относится, таким образом, одновременно к обоим регионам.

Целью данной работы является анализ каталога землетрясений, полученного по данным сети KNET, и сейсмического процесса, протекающего на территории, контролируемой сетью KNET.

2. МЕТОДЫ

Программа расчета параметров землетрясений.

Для расчета параметров гипоцентров землетрясений применяется программа Нуросентер [Lienert et al., 1986]. Подход определения местоположения землетрясения, заложенный в программе, сочетает в себе особенности двух известных алгоритмов – Нуро71 [Lee, Lahr, 1972] и Нуроinverse [Klein, 1978] – с новым методом, называемым адаптивным затуханием. Каждый столбец линеаризованной условной матрицы T , которая связывает

изменения времени вступления с изменениями в гипоцентральном положении, центрируется и масштабируется так, чтобы иметь нулевое среднее значение и норму, равную единице. Начальное время определяется как среднее время вступления минус среднее время прохождения. Три нормальных уравнения наименьших квадратов для координат гипоцентра с диагональными членами, равными единице, затем решаются итеративно, с добавлением перед инверсией переменного коэффициента затухания, θ^2 , к их диагональным определителям. Если остаточная сумма квадратов увеличивается, происходит возвращение к предыдущей итерации, увеличивается θ^2 , затем расчет выполняется снова. Эта процедура (адаптивное затухание) всегда приводит к невязкам, меньшим, чем остатки Нуро71 или Нуроinverse или равным им.

В качестве входных данных программа использует два файла – `huro.param` и `arrival`-файл. В `huro.param` описываются начальные установки алгоритма расчета параметров землетрясений (RESET TEST), название и местоположение сейсмических станций (широта, долгота и высота станции) и скоростная модель среды с указанием количества слоев и отношения скорости V_p/V_s . В частности, в файле `huro.param` указана скоростная модель, полученная в работе [Roecker et al., 1993], которая представляет земную кору из шести слоев (табл. 1). Эта скоростная модель была выбрана как более предпочтительная на основе сравнительного анализа четырех самых известных скоростных моделей литосферы Центрального Тянь-Шаня [Sycheva, Kuzikov, 2012].

В файле `huro.param` начальная установка глубины расчета зависит от значения параметра TEST (40). Если оно установлено в 0.0, то это означает, что начало глубины находится на уровне моря, при этом первый слой скоростной модели расширен до максимальной станции возвышения. Глубины всех обнаруженных событий затем ограничиваются уровнем моря. Установка TEST (40) в единицу означает, что станция максимальной высоты в списке станций используется в качестве нулевой глубины как для глубины события, так и для скоростной модели. В нашем случае этот параметр установлен в 1.0.

`Arrival`-файл содержит данные, на основе которых вычисляется дата, время, гипоцентр, а также энергетическая характеристика землетрясения. В частности, в нем указано название станции, время прихода волны на станцию, идентификатор записи, дата, компонента

Таблица 1. Параметры скоростной модели литосферы Тянь-Шаня из работы [Roecker et al., 1993]

Table 1. Parameters of the velocity model of the Tien Shan lithosphere from [Roecker et al., 1993]

H , км	0	3	7	17	27	38	50
V_p , км/с	5.0	5.8	6.05	6.2	6.4	6.85	8.05
V_s , км/с	2.85	3.35	3.5	3.60	3.71	3.92	4.55

Примечание. H , км – глубина верхней границы слоя; V_p , V_s – скорости распространения P - и S -волн в слое, км/с.

Note. H , km – depth of the upper boundary of the layer; V_p , V_s – propagation velocities of P - and S -waves in the layer, km/s.

(E, N, Z), тип волны (P или S), амплитуда, период, знак волны и др.

При установке специалистами программа Нуросептер, классический вариант которой рассчитывает магнитуду, была адаптирована к пересчету магнитуды в класс землетрясения. При расчете параметров гипоцентра программа определяет дату, время, широту, долготу, глубину, класс, количество компонент, участвующих в расчете, минимальное расстояние до ближайшей станции и ошибки расчета. К последним относятся: невязка наблюдаемых и расчетных времен вступления фронтов P- и S-волн (RMS), согласно используемой скоростной модели (табл. 1), ошибка по горизонтали (ERH, эпицентральное положение) и ошибка по вертикали (ERZ, по глубине).

При пересчете класса, полученного программой, в магнитуду (если это необходимо) используется известное выражение, связывающее магнитуду и энергетический класс [Riznichenko, 1985]:

$$K=1.8 \cdot M+4. \tag{1}$$

Построение графика повторяемости и закон Гутенберга – Рихтера. Закон Гутенберга – Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944] выражает зависимость между величиной и общим количеством землетрясений в любой данной области и в определенный временной период. Этот закон описывается линейной функцией вида:

$$\lg N(M)=a-bM, \tag{2}$$

где $N(M)$ – число землетрясений с магнитудами (или классами) не менее M ; a и b – константы уравнения. Параметр a (a -value) формально описывает сейсмическую активность при $M=0$, а b (b -value) – угловой коэффициент линейной части графика частотного распределения землетрясений, определяющий скорость уменьшения относительного числа событий с ростом их магнитуды. Для построения распределения Гутенберга – Рихтера рассчитывается функция $N(M)$. График этой функции строится в логарифмическом масштабе по оси количества землетрясений $\lg N$. Затем определяется M_c – представительная магнитуда, M_{max} – максимальная магнитуда, для которой за исследованный период времени произошло достаточно событий для статистики. Затем участок ($M_c < x < M_{max}$) функции $y=\lg N(x)$ аппроксимируется функцией вида $y=a-b \cdot x$.

В терминах количества событий с магнитудой M , превышающей некоторое пороговое значение m (кумулятивное распределение), закон распределения землетрясений по энергиям принимает вид:

$$N(M>m) \sim 10^{-bm}, \tag{3}$$

где N – обозначает число событий для указанного фиксированного периода времени и в заданном географическом регионе, b – константа (b -value), в большинстве случаев принимает значение около 0.9 [Kasahara, 1985].

Представительная часть каталога землетрясений. Для корректного определения представительной

части каталога землетрясений был привлечен подход, описанный в работе [Sobolev, Ponomarev, 2003], который предполагает удаление афтершоков из каталога. Для выделения афтершоковых зависимостей была использована программа, разработанная В.Б. Смирновым, алгоритм которой реализует метод локального отношения интенсивностей (ЛОИ) разработанный Г.М. Молчан и О.Е. Дмитриевой [Molchan, Dmitrieva, 1991].

Интенсивность сейсмотектонической деформации (СТД). Методика расчета СТД представлена во многих работах, однако для понимания интенсивности СТД приведем основные выражения и преобразования. Тензор скорости СТД $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ [Yunga, 1990] определяется суммой тензоров сейсмических моментов, нормированных на время, объем и модуль сдвига:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}, \tag{4}$$

где μ – модуль сдвига; V – элементарный объем; T – период исследования; $M_0^{(\alpha)}$ – сейсмический момент землетрясения с номером (α) ($\alpha=1,2,\dots, N$); m_{ij} – направляющий тензор механизма.

Используя предположение о подобии СТД на разных масштабных уровнях (подобии подвижек на реальных определениях механизма очагов землетрясений в широком диапазоне энергий [Yunga, 2002]), это выражение можно преобразовать к виду:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} \cdot \sum_{\alpha=1}^N m_{ij}^{\alpha} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)} \cdot m_{ij}^{(\alpha)}}{\sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)}}, \tag{5}$$

где $w^{(\alpha)}$ – вес отдельного события, определяемый из весовой функции w , и I_{Σ} определяется выражением:

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} \tag{6}$$

и принимается за интенсивность сейсмотектонической деформации [Lukk, Yunga, 1979].

Неэкстенсивная статистическая физика. В основе концепции неэкстенсивной статистической физики лежит понятие энтропии Тсаллиса [Tsallis, 1988], являющейся обобщением энтропии Больцмана-Гиббса и часто используемой для описания сложных динамических систем, которые демонстрируют эффекты памяти, масштабную инвариантность, фрактальность и дальнедействующие корреляции:

$$S_q = k \frac{1}{q-1} \left(1 - \sum_{i=1}^N p_i^q \right); \sum_{i=1}^N p_i = 1, \tag{7}$$

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; q – параметр Тсаллиса, характеризующий степень неэкстенсивности. Статистика Больцмана соответствует пределу $q \rightarrow 1$:

$$S = -k \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i, \tag{8}$$

где k – постоянная Больцмана ($k=1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); N – число возможных состояний системы.

Случай $q < 1$ соответствует пределу по энергиям; $q > 1$ указывает на наличие дальних корреляций и памяти в неравновесной системе, когда аддитивность нарушается, а сам параметр Тсаллиса q может служить мерой отступления от аддитивности или мерой неэкстенсивности.

Основанная на этих принципах неэкстенсивная статистическая физика активно применяется в различных областях знаний (см. библиографию [Group..., 2021]).

Рассматривая частотно-магнитудное распределение сейсмичности, авторы в работе [Sotolongo-Costa, Posadas, 2004] предложили модель механизма генерации землетрясений (Fragment-Asperity Interaction Model for Earthquakes), учитывающую взаимодействие двух плоскостей разломов и фрагментов, заполняющих пространство между ними, где фрагменты образуются в результате локального разрушения материала, образующего плоскости разломов. Предполагается, что это взаимодействие модулирует запуск землетрясения. Используя подходы неэкстенсивной статистической физики, авторы продемонстрировали влияние распределения фрагментов по размерам на распределение энергии землетрясений и ввели функцию распределения землетрясений по энергиям, которая, как частный случай, сводится к закону Гутенберга – Рихтера. Детальное описание этого подхода дано авторами в работах [Silva et al., 2006; Telesca, 2011; Chelidze et al., 2018; Sychev, Sycheva, 2021].

В работе [Silva et al., 2006] авторы уточнили эту модель с использованием более реалистичной зависимости между энергией землетрясения и размерами фрагментов между плоскостями скольжения в соответствии со стандартной теорией масштабирования сейсмического момента с длиной разрыва.

Наконец, в работе [Telesca, 2012], с учетом связи энергии землетрясения с магнитудой, получено следующее

аналитическое выражение, описывающее обобщенный закон Гутенберга – Рихтера, которое связывает нормированное кумулятивное число землетрясений с магнитудой M , превышающей пороговое значение M_{th} с параметром Тсаллиса q :

$$\log \left(\frac{N(M > M_{th})}{N} \right) = \left(\frac{2-q}{1-q} \right) \log \left[1 - \left(\frac{1-q}{2-q} \right) \left(\frac{10^{M_{th}}}{a^{2/3}} \right) \right], \tag{9}$$

где $N(M > M_{th})$ – количество землетрясений с энергией больше порогового значения M_{th} и $M \sim \log(E)$; E – энергия землетрясения; N – полное количество землетрясений; a – константа пропорциональности между энергией землетрясения E и размером фрагмента блоков r^3 между разломами, имеющая размерность объемной плотности энергии [Silva et al., 2006; Telesca, 2011; Vallianatos et al., 2014; Chelidze et al., 2018].

По мнению многих авторов, значение параметра q можно использовать как меру стабильности активной тектонической зоны [Matcharashvili et al., 2011; Papadakis et al., 2015, 2016; Telesca, Chen, 2010; Valverde-Esparza et al., 2012; Vallianatos et al., 2014; Chelidze et al., 2018; Sychev, Sycheva, 2021]. Резкое увеличение параметра q указывает на усиление взаимодействия между разломными блоками и их фрагментами и связано с отклонением их от равновесного состояния [Chelidze et al., 2018].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Характеристики каталога

Количество зарегистрированных P- и S-волн. За исследуемый период обработано 10604 землетрясения. Каждому землетрясению соответствует свой arrival-файл. Фактически в настоящее время их количество – 9717. Разница обусловлена утерей arrival-файлов за 1995 г. и частично для землетрясений за 2011–2012 гг. Пример записи скорости смещения для землетрясения 2016.02.10 ($K=10.1$) с временной отметкой прихода P- и S-волн на станцию ААК представлен на рис. 3.

Проведен статистический анализ количества зарегистрированных прямых P- и S-волн по каждой станции сети, и результаты представлены в табл. 2. Количественные данные представлены в отсортированном

Таблица 2. Количество P- и S-волн, зарегистрированных станциями сети KNET за исследуемый период в отсортированном виде (1994–2020 гг.), которые были использованы в процессе локализации землетрясений

Table 2. The number of P- and S-waves recorded by KNET stations during the study period in sorted form (1994–2020), which were used in the process of earthquake localization

P-волны									
KBK	ААК	USP	TKM2	UCH	CHM	EKS2	AML	KZA	ULHL
8451	8236	7971	7676	7342	7146	6391	5872	5800	5538
S-волны									
ААК	KZA	KBK	CHM	UCH	USP	TKM2	AML	EKS2	ULHL
7537	7342	7314	6296	6249	6131	5800	4781	4338	4054
P+S-волны									
ААК	KBK	USP	UCH	TKM2	CHM	KZA	EKS2	AML	ULHL
15773	15765	14102	13591	13476	13442	13142	10729	10653	9592

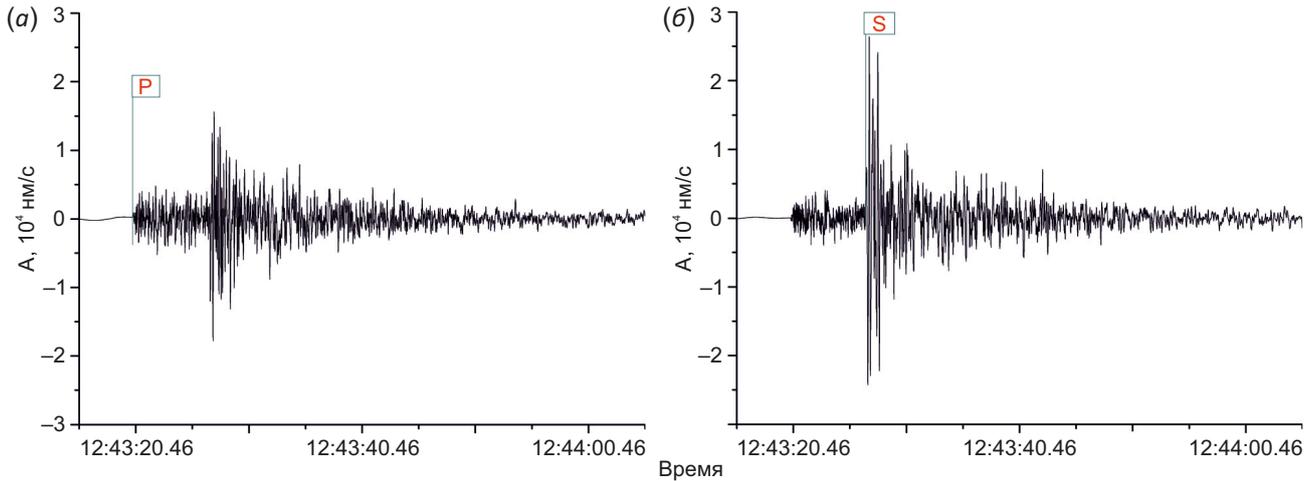


Рис. 3. Пример записи скорости смещения на станции ААК для землетрясения 2016.02.10, $K=10.1$, время в очаге – 12:43:00.95, эпицентральное расстояние 53.9 км: (а) – Z компонента; (б) – E компонента. Флажками отмечено время прихода волн на станцию.

Fig. 3. An example of recording the displacement velocity at the AAK station for the 2016.02.10 earthquake, $K=10.1$, the source time is 12:43:00.95, the epicentral distance is 53.9 km: (а) – Z component; (б) – E component. The checkboxes show the arrival time of the waves to the station.

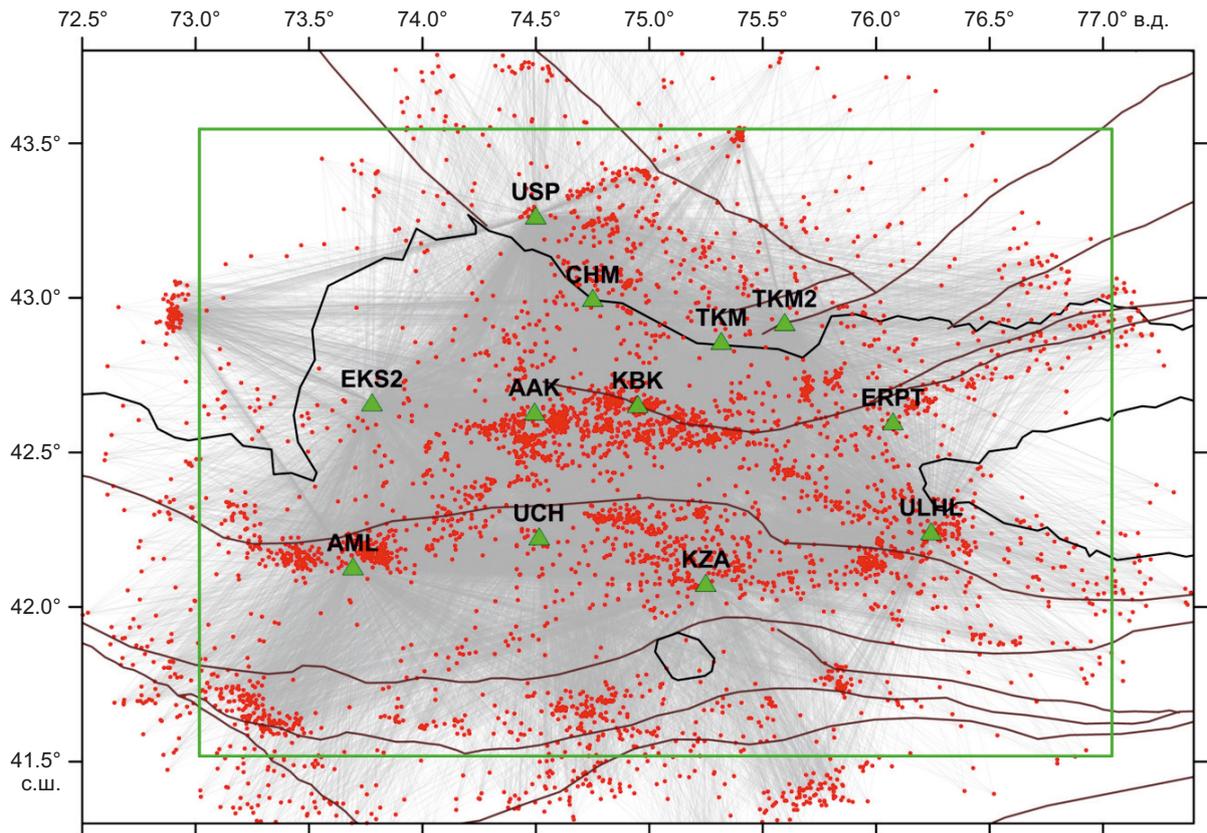


Рис. 4. Трассы сейсмических волн (по [Sychev et al., 2018]). Треугольники – положение сейсмических станций сети KNET. Точки – землетрясения, коричневые линии – региональные разломы, черная линия – северная граница Киргизии. Зеленым прямоугольником отмечена территория БГП.

Fig. 4. Seismic wave traces (after [Sychev et al., 2018]). Triangles – the position of seismic stations of the KNET network. Dots are earthquakes, brown lines are regional faults, black line is the northern border of Kyrgyzstan. The green rectangle marks the territory of the BGP.

виде, что дает возможность оценить максимальный и минимальный вклад станций сети при локализации землетрясений.

Максимальное количество P -волн зарегистрировано на станциях KBK, AAK и USP, минимальное – на станциях ULHL, KZA и AML. Максимальное количество S -волн отмечено на станциях AAK, KZA и KBK, минимальное – на станциях ULHL, EKS2 и KZA. По сумме волн ($P+S$) максимальное количество зарегистрировано на станциях AAK, KBK и USP, минимальное – на станциях ULHL, AML, EKS2. Станции AAK и KBK расположены в центральной части сети и позволяют максимально регистрировать события, произошедшие на территории, контролируемой сетью KNET. Станция USP является самой северной станцией, но при этом данные по этой станции, как показывают результаты (табл. 2), активно используются при локализации землетрясений. Станции AML и EKS расположены в крайней западной части, а станция ULHL – в крайней восточной части сети, что ограничивает регистрацию событий, происходящих в крайних противоположных областях. Отметим, что станция AAK находится в штольне (тихая станция), а станция ULHL – на юго-западном побережье озера Иссык-Куль (вероятно влияние ударов волн о береговые линии на уровень шума). При автоматической регистрации дискриминатор определяет отношение сигнал – шум и в случае, если это отношение не ниже 5, фиксируется время прихода P -волны. Вероятно, уровень шума на указанных станциях также отразился на результате, представленном в табл. 2.

Всего за исследуемый период по станциям сети получено 130265 времен прихода P - и S -волн: 70423

по P -волнам и 59842 по S -волнам. Времена прихода сейсмических волн могут быть использованы при решении различных сейсмологических задач: при расчете стационарных спектров землетрясений, сейсмического шума при сейсмической томографии, при расчете поля затухания, добротности и др. Однако этих данных недостаточно для исследования более глубоких слоев земной коры, так как локальные землетрясения происходят до глубины 30 км. В этом случае необходимо привлекать дополнительные данные от далеких землетрясений.

На рис. 4 в качестве примера представлены эпицентры землетрясений, положение станций сети KNET, а также трассы P -волн, которые были использованы в работе [Sychev et al., 2018] при построении поля затухания сейсмических волн, а также сейсмической томографии на территории БГП. Хорошей плотностью трасс P -волн покрыта вся территория БГП, отмеченная на карте зеленым прямоугольником.

Ошибка локализации гипоцентров. Выше было отмечено, что наиболее качественные данные в каталоге землетрясений по данным сети KNET представлены с 1996 г. При дальнейшем анализе характеристик каталога KNET и каталога, ограниченного координатами БГП, рассматривается период с 1996 по 2020 г.

Для того чтобы оценить количество землетрясений в зависимости от величины ошибки (RMS, ERH, ERZ), рассмотрены несколько диапазонов изменения этих параметров. В табл. 3 представлено количество землетрясений и процентное соотношение землетрясений, имеющих величину ошибки в конкретном диапазоне. Для 52 % землетрясений RMS имеет значение меньше

Таблица 3. Количество и процентное соотношение событий с разным уровнем ошибок, определяемых при локализации землетрясений для каталога KNET и каталога, ограниченного координатами БГП

Table 3. The number and percentage of events with different error levels determined during earthquake localization for the KNET catalog and the catalog limited by the BGP coordinates

RMS, с	Δt , с	0–0.1	0.1–0.2	0.2–0.3	0.3–0.5	0.5–1.0	>1	–
KNET	N	150	1592	3389	3696	974	19	–
	N (%)	1.5 %	16.2 %	34.5 %	37.6 %	9.9 %	0.2 %	–
БГП	N	131	1265	2377	1644	114	9	–
	N (%)	2.3 %	22.8 %	42.9 %	29.6 %	2.1 %	0.16 %	–
ERH, км	ΔL , км	0–0.5	0.5–1	1–2	2–3	3–5	5–10	>10
KNET	N	1322	2863	2680	1347	1019	518	71
	N (%)	13.4 %	29.1 %	27.3 %	13.7 %	10.3 %	5.3 %	0.7 %
БГП	N	1212	2403	1426	320	136	35	8
	N (%)	21.8 %	43.3 %	25.7 %	5.7 %	2.5 %	0.6 %	0.1 %
ERZ, км	ΔH , км	0–1	1–2	2–3	3–5	5–10	>10	–
KNET	N	1908	3311	1585	1647	1057	312	–
	N (%)	19.4 %	33.7 %	16.1 %	16.7 %	10.7 %	3.2 %	–
БГП	N	1391	2062	713	671	511	192	–
	N (%)	25.1 %	37.2 %	12.9 %	12.1 %	9.2 %	3.5 %	–

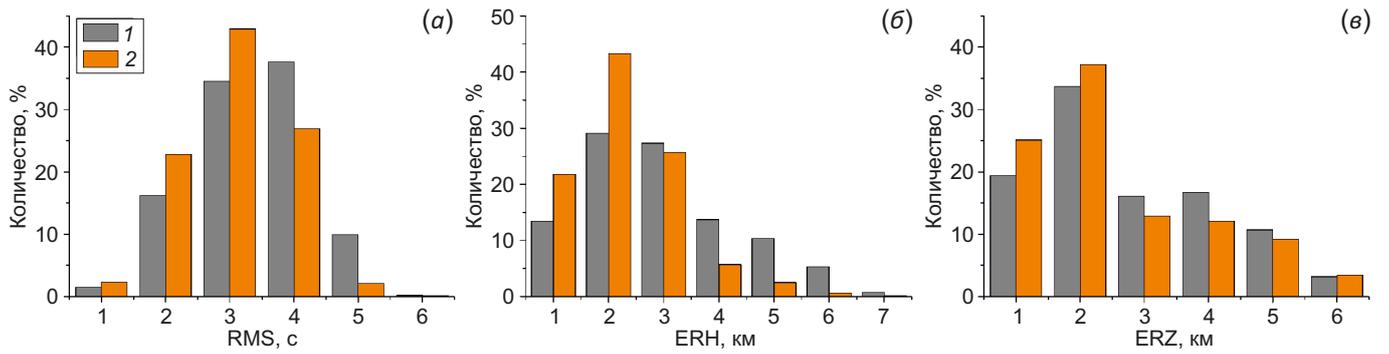


Рис. 5. Процентное соотношение ошибок (RMS, ERH, ERZ), определяемых при локации землетрясений каталога KNET (1) и каталога, ограниченного координатами БГП (2).

Fig. 5. Percentage ratio of errors (RMS, ERH, ERZ) determined by KNET catalog earthquake location (1) and and the catalog limited by BGP coordinates (2).

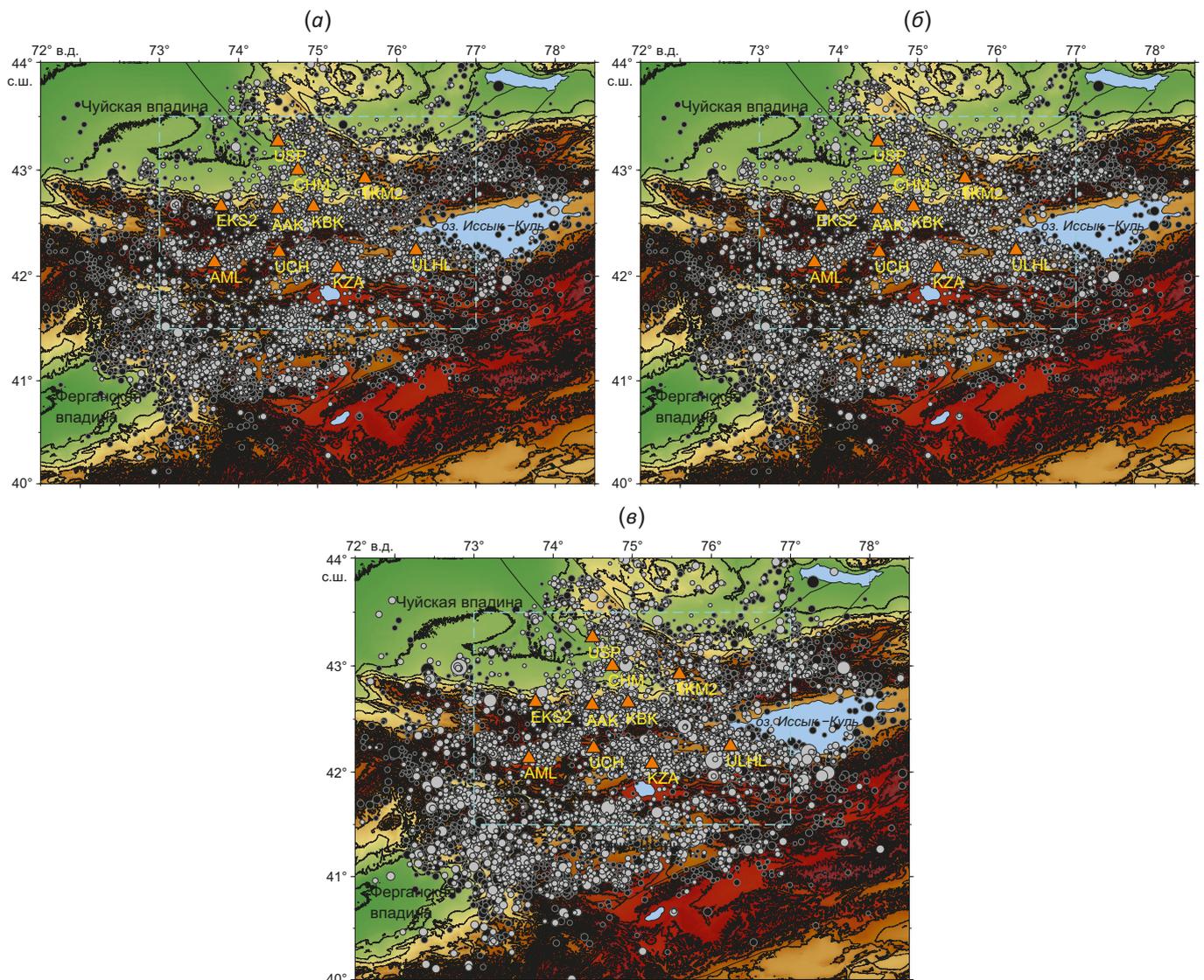


Рис. 6. Эпицентры землетрясений на фоне общей сейсмичности – 9820 событий (инверсный цвет). (а) – с $RMS \leq 0.3$ с (5131 событие); (б) – с $ERH \leq 2$ км, (6865 событий); (в) – с $ERZ \leq 3$ км (6804 события). Бирюзовым прямоугольником отмечена территория БГП.

Fig. 6. The earthquake epicenters against the background of general seismicity – 9820 events (inverse color). (a) – with $RMS \leq 0.3$ s (5131 events); (b) – with $ERH \leq 2$ km, (6865 events); (e) – with $ERZ \leq 3$ km (6804 events). The turquoise rectangle marks the territory of the BGP.

0.3 с, а для 90 % событий не превышает 0.5 с, что соответствует погрешности определения координат гипоцентров 1800–3000 м. Ошибка по горизонтали (ERH) для 70 % землетрясений составляет менее 2 км, а по глубине (ERZ) для 69 % событий имеет значение менее 3 км.

На рис. 5 процентное соотношение событий с указанным уровнем ошибок из табл. 3 представлено в графическом виде. Для величин ошибок, отмеченных розовым цветом, процентное соотношение количества событий для каталога KNET ниже, чем для каталога, ограниченного координатами БГП. С возрастанием уровня ошибок процентное соотношение землетрясений для каталога KNET становится выше, чем для БГП.

На рис. 6 представлены эпицентры землетрясений с $RMS \leq 0.3$ с (рис. 6, а), с $ERH \leq 2$ км (рис. 6, б) и $ERZ \leq 3$ км (рис. 6, в), отображенные инверсным цветом на фоне общей сейсмичности. Основная часть рассматриваемых событий расположена на территории БГП, которая отмечена на картах бирюзовым прямоугольником.

В табл. 4 приведены граничные значения всех параметров каталога. События, для которых какой-либо параметр RMS, ERH или ERZ превышает допустимые значения, включаются в каталог, и в примечании к этому событию указывается, что ошибка по какому-то параметру имеет недопустимую величину. Максимальная глубина событий, указанная в таблице, и максимальная

ошибка ее определения свидетельствуют о наличии отдельных таких событий в каталоге. Согласно [Yudakhin, 1983], на исследуемой территории события могут происходить до глубины 30 км.

В работе [Sycheva, 2005] было проведено сравнение параметров землетрясений, полученных разными авторами. Рассматривался каталог землетрясений, полученный по данным сети KNET (НС РАН), и каталог Института сейсмологии НАН КР. Было выбрано 970 локальных событий, которые произошли на территории Центрального Тянь-Шаня за 1996–2001 гг. Сравнение проводилось по трем параметрам: широте, долготе и классу землетрясения. Было определено, что среднее значение разницы определений по широте составляет ~2 км, по долготе ~200 м и по классу сейсмического события ~0.09. Расхождения в исследуемых параметрах могут вызвать следующие причины: разные скоростные модели среды, используемые в КИС и НС РАН, разные программы расчета гипоцентров и квалификация обработчика.

Представительная выборка каталога землетрясений. Выше было отмечено, что программа Нуросентер в качестве энергетической характеристики вычисляет класс землетрясения. На рис. 7 представлено распределение землетрясений по классу и магнитуде, пересчитанной из класса по выражению (1). Основную часть каталога составляют слабые события.

Таблица 4. Граничные характеристики параметров каталога по данным сети KNET
Table 4. Boundary characteristics of catalog parameters according to KNET network data

Параметры	Дата	φ , °с.ш.	λ , °в.д.	H , км	K	N_0	RMS, с	ERH, км	ERZ, км
Мин.	02.01.1996	38.89	70.72	0.0	5.02	4	0.02	0.0	0.0
Макс.	31.12.2020	44.85	78.90	50.5	14.83	20	6.35	90.23	99.9

Примечание. φ – широта; λ – долгота; H – глубина; K – класс; N_0 – количество компонент; RMS – невязка наблюденных и расчетных времен вступления фронтов P - и S -волн; ERH – ошибка по горизонтали; ERZ – ошибка по вертикали.
 Note. φ – latitude; λ – longitude; H – depth; K – class; N_0 – number of components; RMS – discrepancy between observed and calculated arrival times of P - and S -wave fronts; ERH – horizontal error; ERZ – vertical error.

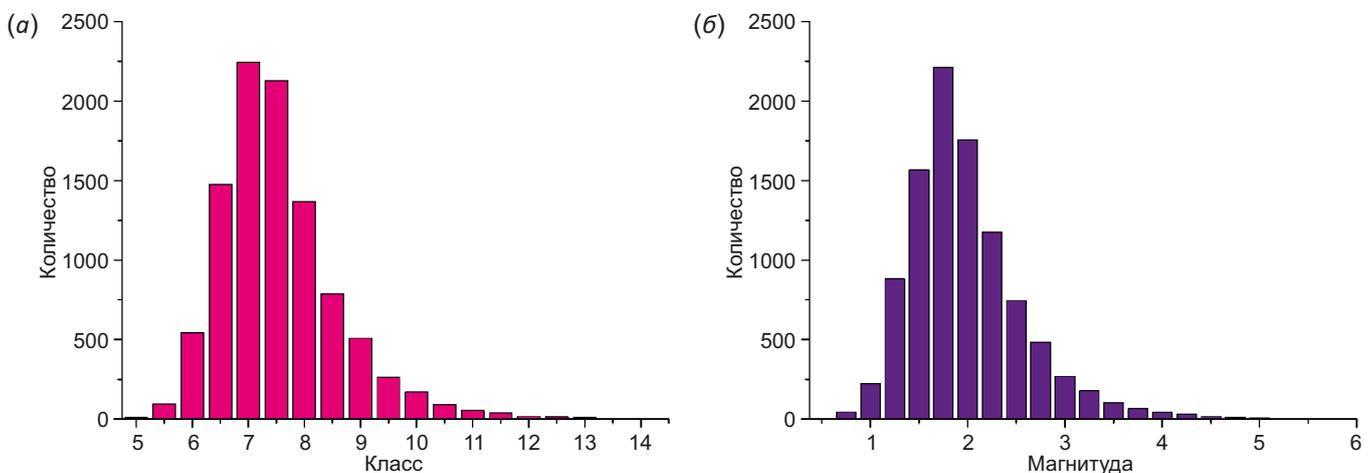


Рис. 7. Количественное распределение землетрясений по классу (а) и магнитуде (б).
Fig. 7. Quantitative distribution of earthquakes by class (а) and magnitude (б).

Для определения представительной выборки на основе подхода, предложенного в работе [Sobolev, Ponomarev, 2003], из каталога были удалены афтершоки и построен график повторяемости и кумулятивное распределение Гутенберга – Рихтера для каталога KNET и каталога, ограниченного координатами БГП. Эти же построения были выполнены и для каталога без удаления афтершоков.

При построении графика повторяемости было подсчитано количество землетрясений, попавших в некоторый диапазон энергетического класса, шаг изменения диапазона составлял 0.1. По кумулятивному распределению Гутенберга – Рихтера было получено уравнение линейной части, аппроксимация данных выполнена полиномами по методу наименьших квадратов в среде Matlab. На рис. 8 представлены графики повторяемости (верхний ряд) и кумулятивные распределения Гутенберга – Рихтера (нижний ряд) для трех каталогов – каталога KNET, каталога KNET без афтершоков и каталога KNET без афтершоков, ограниченного координатами БГП. Характеристики линейной аппроксимации кумулятивного распределения Гутенберга – Рихтера,

а также ошибки определения параметров линейного уравнения представлены в табл. 5.

Границы линейной части распределения Гутенберга – Рихтера в табл. 5 показывают, что представительными в каталоге являются землетрясения с $K \geq 7.2$ ($M \geq 1.8$). Если рассматривать каталог, ограниченный координатами БГП, то его представительность начинается с более слабых событий с $K \geq 6.7$ ($M \geq 1.5$). Сейсмологическая сеть KNET располагается внутри территории БГП и позволяет в полном объеме регистрировать события с $K \geq 6.7$, при удалении от границ БГП количество зарегистрированных слабых землетрясений уменьшается. В связи с этим при решении некоторых задач на основе каталога по данным сети KNET целесообразно ограничиваться территорией БГП, что дает возможность расширить класс исследуемых событий с $K \geq 6.7$.

Параметры линейной части распределения Гутенберга – Рихтера – a -value и b -value – относятся к важнейшим количественным характеристикам сейсмического режима. Наклон графика выражает соотношение между числом сильных и слабых сейсмических событий, или (уже в физической интерпретации) соотношение между

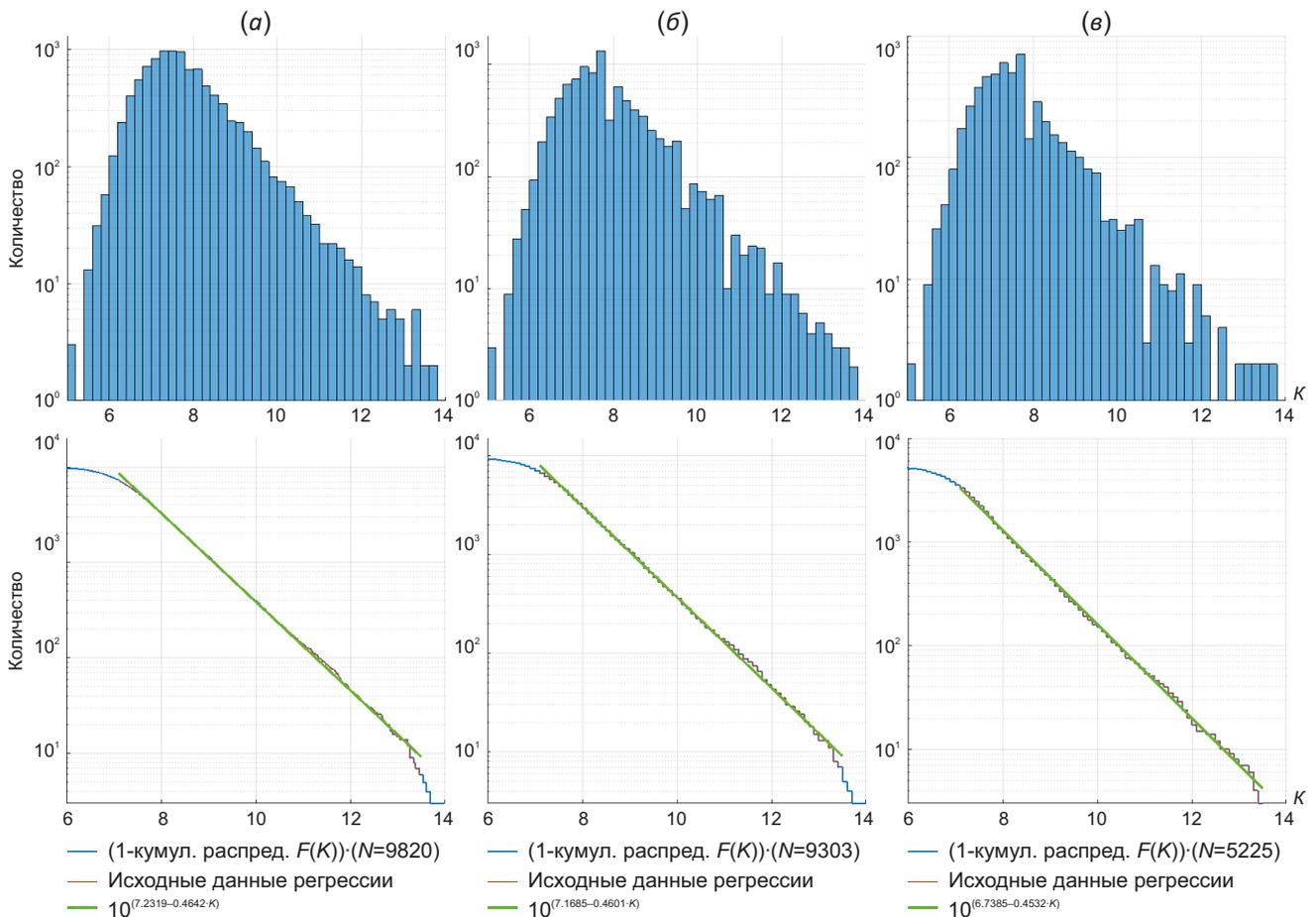


Рис. 8. График повторяемости и кумулятивное распределение Гутенберга – Рихтера для каталога KNET (а), для каталога KNET после удаления афтершоков (б) и каталога KNET после удаления афтершоков, ограниченного координатами БГП (е).

Fig. 8. The repeatability graph and the cumulative Gutenberg – Richter distribution for the KNET catalog (а), for the KNET catalog after aftershocks were removed (б) and the KNET catalog, limited by the BGP coordinates, after aftershocks were removed (е).

Таблица 5. Перечень исследуемых выборок каталога KNET, ошибки регрессии линейной части распределения Гутенберга – Рихтера, параметры линейной части и ошибки ее расчета**Table 5.** List of studied KNET catalog samples, regression errors of Gutenberg – Richter linear distribution, linear part parameters and errors of its calculation

Каталог	Ошибки регрессии			Параметры линейной части			
	Максимальное отрицательное отклонение	Максимальное положительное отклонение	RMS	a	a_{err}	γ	γ_{err}
а	0.2047	0.0595	0.0356	7.23	± 0.0049	0.46	± 0.0005
б	0.1575	0.0840	0.0346	7.17	± 0.0048	0.46	± 0.0005
в	0.1883	0.0886	0.0376	6.74	± 0.0052	0.45	± 0.0005

Примечание. а – каталог KNET; б – каталог KNET без афтершоков; в – каталог KNET без афтершоков, ограниченный координатами БГП. RMS – среднеквадратичное отклонение

Note. а – KNET catalog; б – the KNET catalog without aftershocks; в – the KNET catalog, limited by the BGP coordinates, without aftershocks RMS – standard deviation.

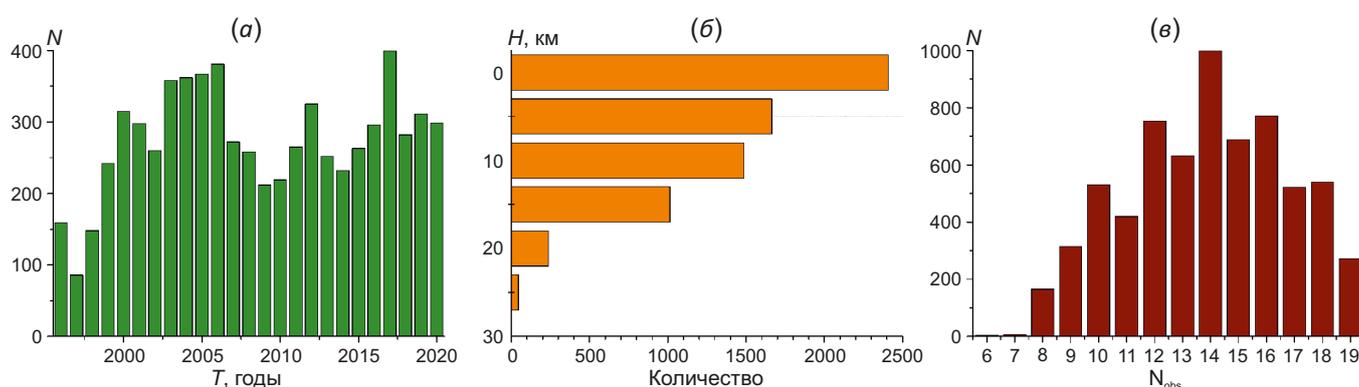


Рис. 9. Распределение землетрясений: (а) – по времени, (б) – по глубине, (в) – по количеству компонент, участвующих в локализации землетрясений.

Fig. 9. Distribution of earthquakes: (а) – in time, (б) – in depth, (в) – by the number of components involved in the localization of earthquakes.

числом больших и малых разрывов геологической среды. Уровень графика характеризует сейсмическую активность – суммарную интенсивность сейсмических проявлений на рассматриваемой сейсмоактивной территории. Эти параметры входят в основу метода количественного сейсмического районирования.

Статистические характеристики. Некоторые статистические характеристики представительной части каталога представлены на рис. 9. События во времени распределены неравномерно, наиболее сейсмически активным является период с 2003 по 2006 г., а также 2017 г. (рис. 9, а). Основная часть землетрясений произошла на глубине 0–15 км (рис. 9, б). Параметры 85 % землетрясений в каталоге определены по 12–16 компонентам (времена прихода $P+S$ -волн), максимальное возможное количество при заданной конфигурации сети может быть равно 20 (10 станций, P - и S -волны) (рис. 9, в).

3.2. Характеристики сейсмичности

Количественное распределение землетрясений по классам во времени. Распределения, аналогичные представленному на рис. 9, а, построены для отдельных выборок событий, сформированных в зависимости от

класса землетрясения (рис. 10). Для слабых событий с $7.2 \leq K < 8$ максимальное количество приходится на период 2003–2006 гг. (около 200 землетрясений в год). В остальные годы их количество варьируется от 150 до 200. Для событий с $8 \leq K < 9$ и $9 \leq K < 10$ гистограммы имеют близкий характер распределения. Наблюдается два периода, когда уровень этих событий падает до минимального значения – 2008–2011 и 2013–2014 гг. Максимальное количество землетрясений в рассматриваемых выборках произошло в 2017 г.

Максимальное количество землетрясений с $10 \leq K < 11$ произошло в 2006 (24 события) и 2017 гг. (25 событий), минимальное – в 2010 г. (менее 5 событий). В среднем землетрясения с $11 \leq K < 12$ происходят 2–6 раз в год. Максимальное число таких событий выпало на 2003 г. (9 событий) и на 2020 г. (14 событий).

Максимальное число землетрясений с $12 \leq K < 13$ произошло в 2005 и 2007 гг. (по 5 событий). В отдельные годы землетрясения такого класса не происходят, а в остальные годы их количество находится в пределах 1–2 землетрясения в год. Реже происходят события с $13 \leq K < 14$. В 2004 и 2015 гг. произошло по два землетрясения, а в период с 2006 по 2009 г. – по одному землетрясению.

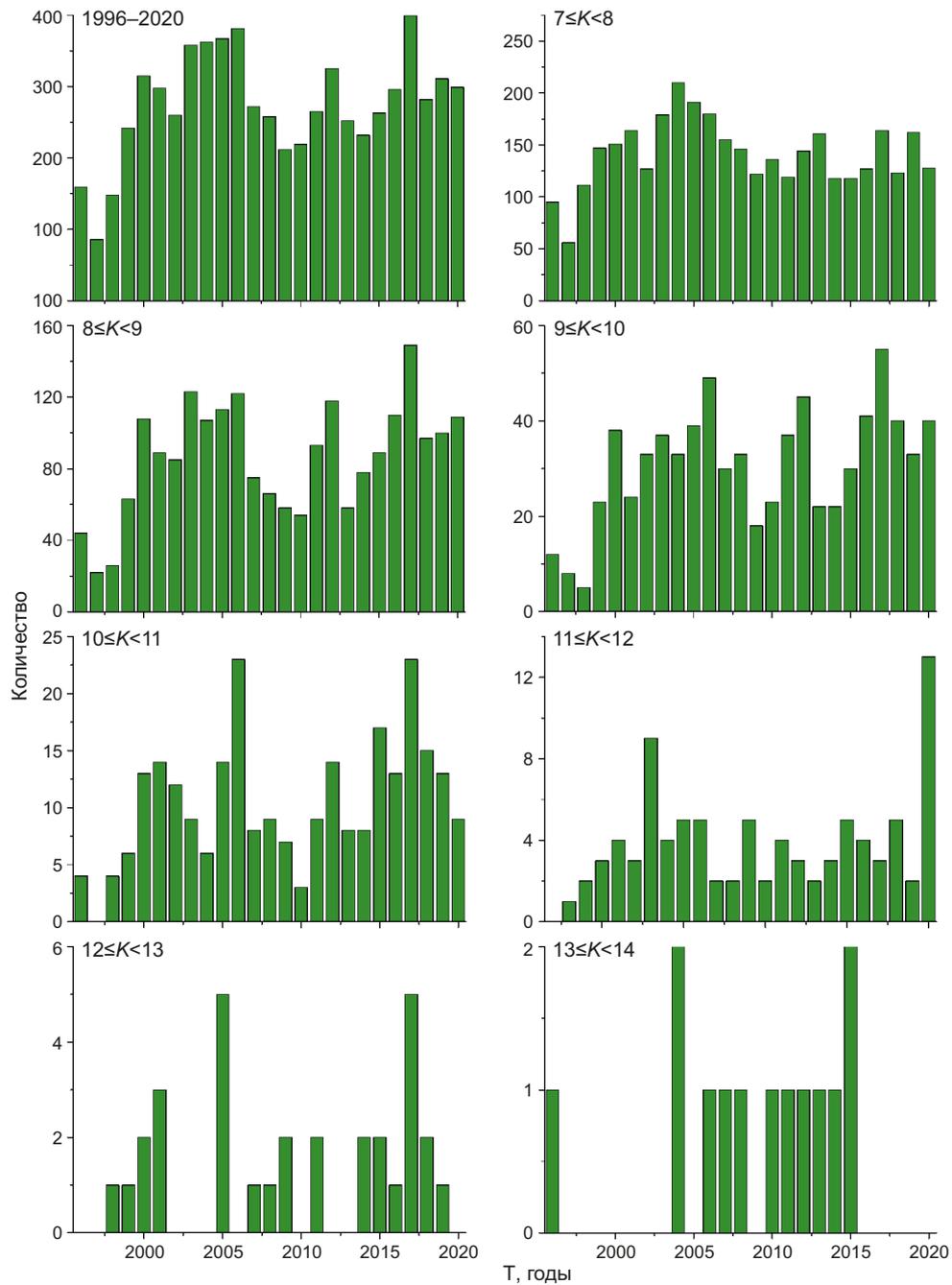


Рис. 10. Гистограммы распределения количества землетрясений по годам для выборок, сформированных в зависимости от класса землетрясения.

Fig. 10. Histograms of the distribution of the earthquake number by year for samples formed depending on the earthquake class.

При визуальном анализе полученных распределений не отмечен положительный или отрицательный тренд изменения количества событий с заданной энергетической характеристикой.

Распределение землетрясений по глубине. На рис. 11 показано площадное распределение землетрясений на глубинах, соответствующих рис. 9, б, но землетрясения, произошедшие ниже 15 км, рассматривались в одной выборке.

На глубине 0–5 км (рис. 11, а) наблюдается отсутствие землетрясений на территории расположения станций

сети KNET, а основная часть событий происходит вдоль бортов Иссык-Кульской впадины и Таласо-Ферганского разлома (за пределами сети). Такая конфигурация приповерхностной сейсмичности под станциями сети, скорее всего, частично связана с артефактами вычислительного процесса. Для полного понимания распределения приповерхностной сейсмичности требуется проведение дополнительных исследований. Для глубин 5–10 (рис. 11, б) и 10–15 км (рис. 11, в) рисунок распределения сейсмичности, которая в основном сосредоточена внутри сети и по ее окраинам, меняется мало, не

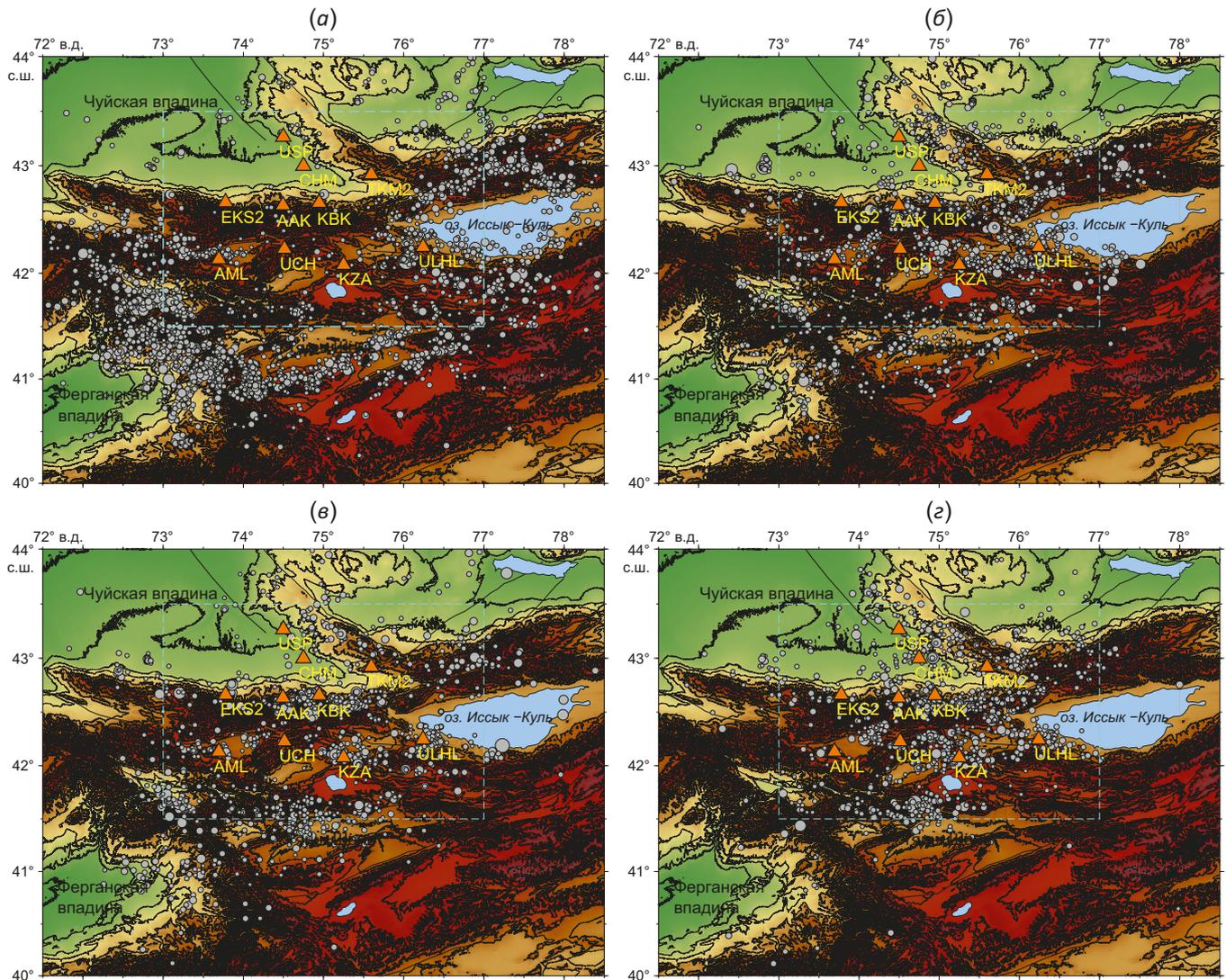


Рис. 11. Эпицентральное расположение землетрясений представительной части каталога по данным сети KNET на различных глубинах: (а) – 0–5 км (2419 событий), (б) – 5–10 км (1672), (е) – 10–15 км (1478), (з) – более 15 км (1293). Треугольниками обозначены станции сети KNET.

Fig. 11. The epicentral earthquake location of the representative part of the catalog according to the KNET network at various depths: (а) – 0–5 km (2419 events), (б) – 5–10 km (1672), (е) – 10–15 km (1478), (з) – more than 15 km (1293). Triangles indicate the stations of the KNET network.

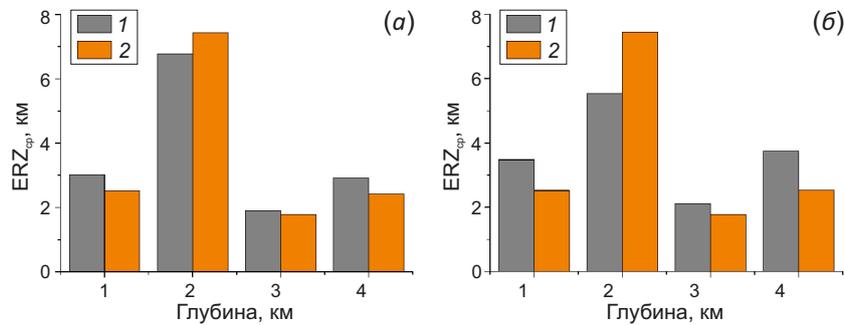


Рис. 12. Среднее значение ERZ для различных глубин расположения землетрясений: (а) – для каталога KNET (1) и для каталога KNET, ограниченного координатами БГП (2), (б) – для каталога KNET за пределами координат БГП (1) и для каталога KNET, ограниченного координатами БГП (2).

Fig. 12. The average ERZ value for different depths of the earthquake location: (а) – for the KNET catalog (1) and for the KNET catalog, limited by the BGP coordinates (2), (б) – for the KNET catalog outside the BGP coordinates (1) and for the KNET catalog limited by the BGP coordinates (2).

считая плотность расположения событий. На глубине более 15 км основная часть событий происходит на территории, ограниченной координатами краевых станций сети (Северо-Тянь-Шаньская сейсмогенерирующая зона), вдоль Чу-Илийских гор (см. рис. 1) и на хребте Молдо Тоо. Согласно полученным результатам, на глубины 5–15 км приходится ~50 % землетрясений.

На рис. 12 представлено распределение среднего значения ERZ в зависимости от глубины: слева – для всего каталога и для каталога, ограниченного координатами БГП; справа – для каталога, ограниченного координатами БГП, и для землетрясений за границами БГП. Во всех случаях среднее значение ERZ для БГП ниже, за исключением глубины 5–10 км.

Умеренные землетрясения. За исследуемое время зарегистрировано 46 землетрясений умеренной величины с $K \geq 12$ ($M \geq 4.4$, рис. 13). Основная часть этих землетрясений сосредоточена вдоль Таласо-Ферганского разлома, по юго-восточным бортам Ферганской впадины и в Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей зоне. Наибольшая плотность этих событий отмечена в восточной части Киргизского хребта.

К наиболее значимым землетрясениям можно отнести Кочкорское (25.12.2006 г., $m_b=5.5$ (ISC), $K=14.8$) и Луговское (22.05.2003 г., $m_b=5.5$ (ISC), $K=14.2$). Последнее сильное землетрясение в исследуемом регионе – Суусамырское 19.08.1992 г. с $M_s=7.3$ [Seismological Bulletin..., 1992] (рис. 13, малиновый цвет).

Афтершоки. В работе [Mukhamadeeva, Sycheva, 2018] было отмечено, что события с $K \geq 10$ могут сопровождаться афтершоками, а у событий с $K \geq 12$ они могут отсутствовать. В этой связи поиск афтершоков в каталоге осуществлялся для событий с $K \geq 10$. За рассматриваемый период каталог содержит 401 событие с $K \geq 10$, 214 из них произошло на территории БГП.

Выделено 22 землетрясения, которые сопровождались афтершоками. Если исходный каталог по данным сети KNET включает в себя 9820 событий, то после удаления афтершоков число событий уменьшается до 9303. Доля афтершоков составляет ~5 % от общего числа событий. В табл. 6 представлены некоторые характеристики главных событий, после которых произошли афтершоки, количество афтершоков N_{aft} , их длительность T_{aft} . N_{aft} включает в себя все афтершоки, определенные программой, а N_{aft} (представит.) включает события только представительной выборки. Максимальное количество афтершоков последовало после событий 21.04.2017 г. ($K=12.1$) и 22.05.2003 г. ($K=14.2$) – 72 и 70 афтершоков соответственно. Минимальное количество афтершоков (4 события) соответствует землетрясению 05.02.2012 г. ($K=13.2$). Упомянутые события можно отнести к землетрясениям умеренной величины, и отмеченное количество афтершоков показывает, что оно слабо зависит от класса события. Коэффициент корреляции между классом землетрясения и количеством афтершоков из табл. 6 составляет $k=0.35$ ($k=0.40$, по представительной

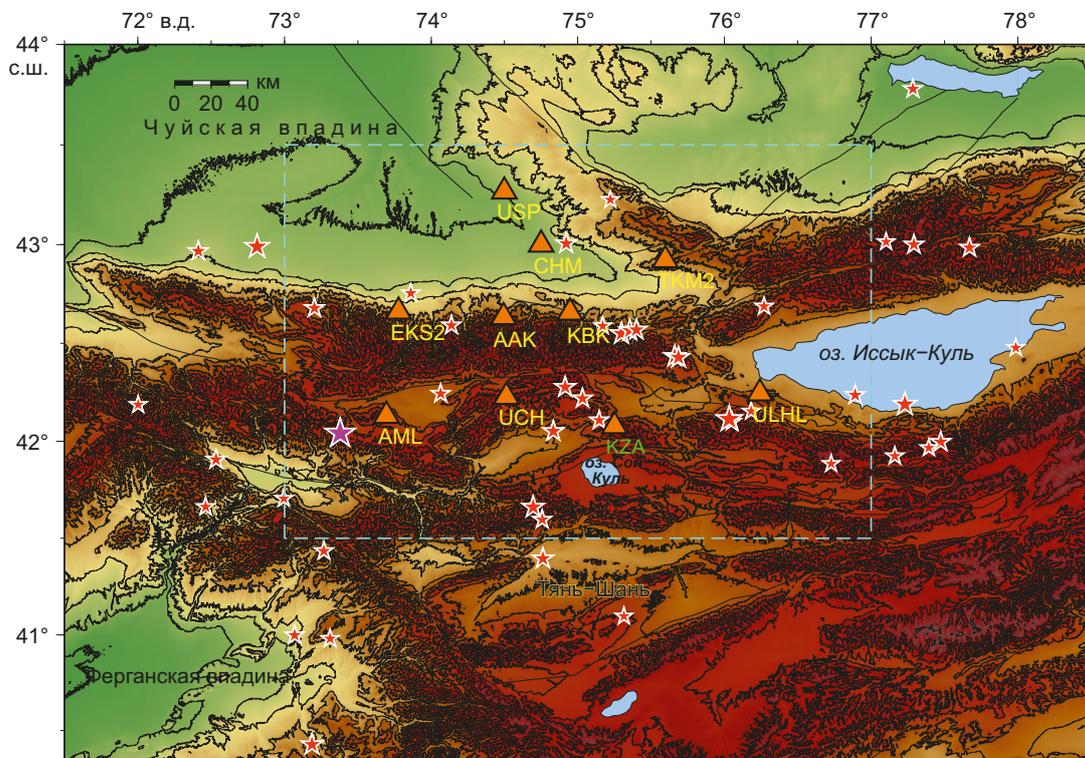


Рис. 13. Эпицентры землетрясений умеренной величины с $K \geq 12$ (красные звездочки) и Суусамырского землетрясения 19.08.1992 г. (малиновая звездочка).

Fig. 13. Epicenters of moderate magnitude earthquakes with $K \geq 12$ (red asterisks) and the Suusamyr earthquake of 19.08.1992 (crimson asterisk).

Таблица 6. Некоторые характеристики главных событий и афтершоковых последовательностей
Table 6. Some characteristics of the main events and aftershock sequences

№	Дата	Время	Место	ϕ , ° с.ш.	λ , ° в.д.	Н, км	K	N_{aft}	N_{aft} (представ)	T_{aft}
1	14.05.1996 г.	12:45:27	БГП	41.54	74.97	21	11.5	14	8	169
2	16.06.1996 г.	19:39:14	КНЕТ	42.50	72.91	9	10.4	25	15	359
3	27.02.1999 г.	17:15:14	БГП	41.27	76.60	0	11.7	13	10	11
4	24.05.1999 г.	07:39:21	БГП	42.66	75.04	6	10.6	15	15	139
5	22.05.2003 г.	18:11:55	БГП	42.99	72.81	7	14.3	70	68	1267
6	16.01.2004 г.	09:06:17	БГП	42.55	75.30	14	13.7	30	28	602
7	13.05.2004 г.	22:37:09	БГП	42.61	74.62	12	10.2	24	23	272
8	05.07.2005 г.	03:07:24	БГП	41.60	74.76	18	12.5	14	14	566
9	07.07.2005 г.	19:22:05	БГП	42.66	74.84	11	10.9	12	12	207
10	27.12.2005 г.	00:55:30	БГП	42.71	75.89	6	11.6	13	13	300
11	28.12.2005 г.	01:52:48	БГП	42.69	75.41	12	11.9	13	11	19
12	08.11.2006 г.	02:21:26	БГП	42.57	75.36	18	13.4	34	32	705
13	25.12.2006 г.	20:00:58	БГП	42.11	76.03	0	14.8	53	53	1243
14	02.03.2010 г.	01:55:36	БГП	42.43	75.66	19	13.3	30	29	896
15	05.02.2012 г.	07:10:15	БГП	41.40	74.76	13	13.2	4	4	142
16	14.10.2012 г.	16:30:08	КНЕТ	40.90	74.14	0	10.4	15	8	346
17	23.11.2013 г.	09:42:06	БГП	42.42	75.68	11	13.0	15	14	91
18	10.07.2015 г.	00:31:56	КНЕТ	41.06	74.06	0	11.4	17	16	301
19	04.10.2015 г.	21:43:17	БГП	42.55	75.17	14	10.1	34	34	177
20	17.11.2015 г.	17:29:36	КНЕТ	40.43	73.19	3	13.5	17	17	368
21	08.02.2016 г.	10:24:12	БГП	42.59	75.15	10	10.2	33	32	285
22	21.04.2017 г.	00:55:43	БГП	42.59	75.17	12	12.1	72	67	6

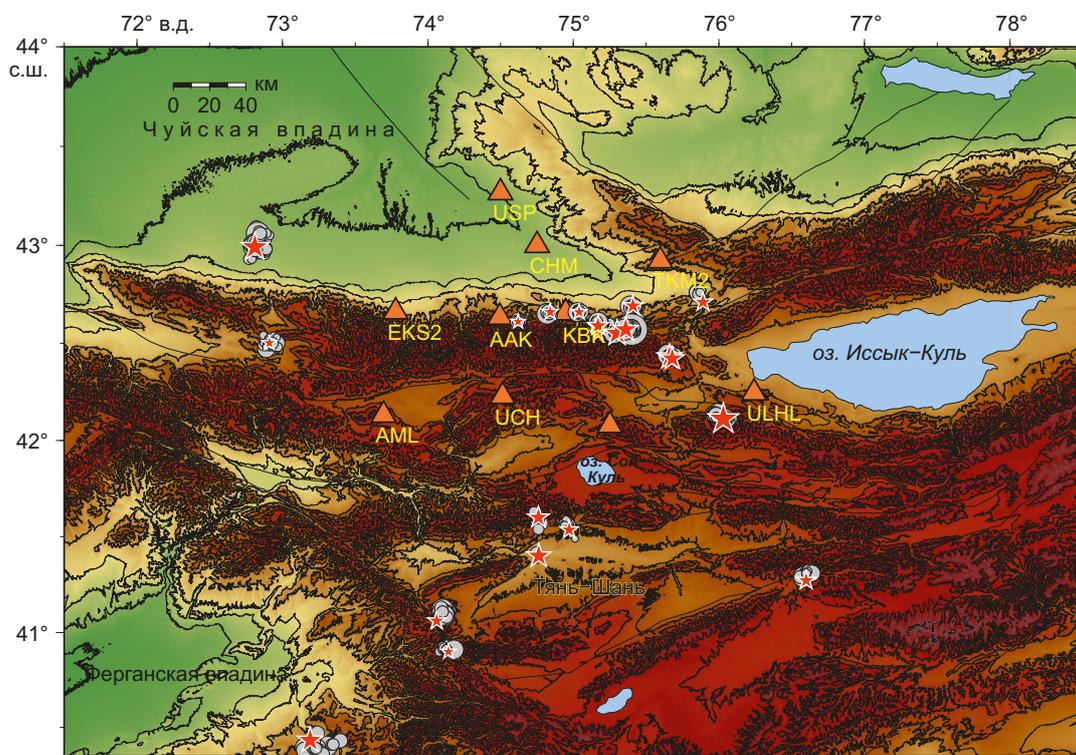


Рис. 14. Эпицентры землетрясений из табл. 6 (22 землетрясения, $K \geq 10$, звездочки) и их афтершоков.
Fig. 14. Epicenters of earthquakes from Table 6 (22 earthquakes, $K \geq 10$, asterisks) and their aftershocks.

части афтершоков), что указывает на отсутствие связи между этими параметрами. Это явление также отмечено в работе [Marsan, Helmstetter, 2017]. Максимальная длительность афтершоков (1267 дней) соответствует событию 22.05.2003 г. ($K=14.2$), минимальная (11 дней) – событию 27.02.1999 г. ($K=11.7$). К примеру,

после Суусамырского землетрясения произошло более 2500 афтершоков в течение более шести лет. Коэффициент корреляции между классом землетрясения и длительностью афтершоков из табл. 6 составляет $k=0.65$, что говорит о наличии слабой связи между этими параметрами. Наиболее глубокий анализ афтершоков,

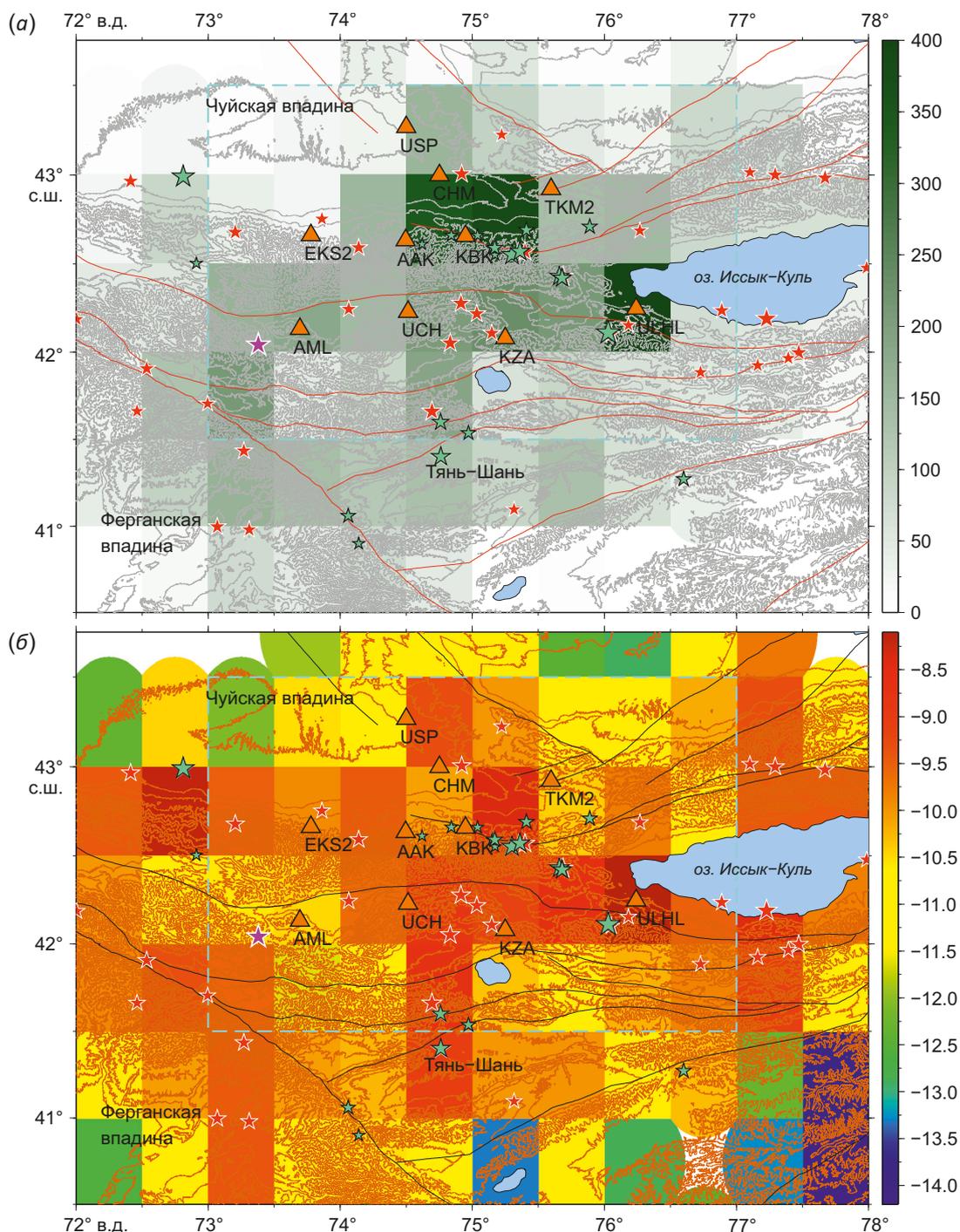


Рис. 15. Распределение количества землетрясений (а) и логарифма интенсивности STD (б). Красными звездочками отмечены землетрясения с $K \geq 12$ ($M \geq 4.4$), зелеными – главные события из табл. 6, после которых последовали афтершоки. Треугольниками обозначены станции сети KNET. Прямоугольником обозначена территория БГП.

Fig. 15. Distribution of the number of earthquakes (a) and the logarithm of the STD intensity (b). Red asterisks mark earthquakes with $K \geq 12$ ($M \geq 4.4$), green main events from Table 6, followed by aftershocks. The triangles indicate the stations of the KNET network. The rectangle marks the territory of the BGP.

в том числе из табл. 6, выполнен в работе [Mukhamadeeva, Sycheva, 2018]. В работах [Sychev et al., 2019; Sychev, Sycheva, 2019, 2021] афтершоковые последовательности, в том числе и Суусамырского землетрясения, рассмотрены с позиций неэкстенсивной статистической физики (параметры q и a).

На рис. 14 представлены эпицентры землетрясений из табл. 6 (отмечены звездочкой) и их афтершоков. Основная часть этих событий отмечена в восточной части Киргизского хребта и западной части Иссык-Кульской впадины.

Количественное распределение сейсмичности и интенсивность СТД. Расчет количественного распределения сейсмических событий и распределения интенсивности СТД по территории проводился по ячейкам размером $0.5 \times 0.5^\circ$. Результаты построений представлены на рис. 15. На эти же карты вынесены землетрясения умеренной величины и события, сопровождающиеся афтершоками (табл. 6). Прямоугольником на рисунке отмечены границы БГП. Значительная часть умеренных землетрясений и событий, после которых последовали афтершоки, относятся к территории БГП, что связано с активностью Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей зоны, на территории которой выделен Бишкекский геодинамический полигон.

На рис. 15, б, представлено распределение логарифма интенсивности СТД. Интенсивность СТД изменяется в пределах $6 \cdot 10^{-15} - 6.5 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹. Основная часть событий умеренной величины и отмеченных в табл. 6 расположена в ячейках, где $\lg I_z$ составляет 10^{-9} год⁻¹. Максимум интенсивности наблюдается в восточной части Киргизского хребта, где произошло несколько землетрясений, сопровождающихся афтершоками, и в юго-восточной части Кочкорской впадины, где произошло Кочкорское землетрясение 25.12.2006 г. Согласно рис. 15, а, в этих областях за время наблюдений произошло максимальное число землетрясений (400 событий).

В области Луговского землетрясения интенсивность СТД составляет $6.5 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹, а количество землетрясений соответствует 90 событиям (70 из них афтершоки землетрясения). В области Суусамырского землетрясения интенсивность СТД составляет $2.5 \cdot 10^{-11}$ год⁻¹, а количество землетрясений соответствует 160 событиям, которые большей частью являются афтершоками Суусамырского землетрясения. Наиболее интенсивные деформации земной коры происходят в северных предгорьях восточной части Киргизского хребта, в горах Сындык и Кызарт, находящихся южнее Киргизского хребта, вдоль Таласо-Ферганского разлома и на хребте Молдо-Тоо.

Неэкстенсивная статистическая физика. Применение модели землетрясения, в основе которой лежат принципы неэкстенсивной статистической физики (9), показано на рис. 16. Построено нормированное распределение кумулятивной магнитуды сейсмичности каталога сети KNET (рис. 16, а), а также для территории БГП (рис. 16, б) для всего диапазона магнитуд выше некоторого порога. Параметры Тсаллиса q и a найдены методом нелинейной регрессии. Модель достаточно хорошо описывает построенное распределение магнитуд со следующими параметрами: для всего каталога сети KNET $q=1.504 \pm 0.005$, $a=963.13 \pm 130.74$, для территории БГП $q=1.512 \pm 0.005$, $a=582.91 \pm 86.08$. На этом же рисунке показана традиционная аппроксимация законом Гутенберга – Рихтера (2): для всего каталога сети KNET $b=0.829 \pm 2.29 \cdot 10^{-5}$ и для территории БГП $b=0.852 \pm 7.79 \cdot 10^{-5}$.

Аналогичные построения выполнены и для представительной части каталога. Результат представлен на рис. 17. Модель так же достаточно хорошо описывает построенное распределение магнитуд со следующими параметрами: для всего каталога сети KNET $q=1.499 \pm 0.005$, $a=1981.87 \pm 275.09$, для территории БГП $q=1.508 \pm 0.006$, $a=1341.31 \pm 208.16$. Параметры закона

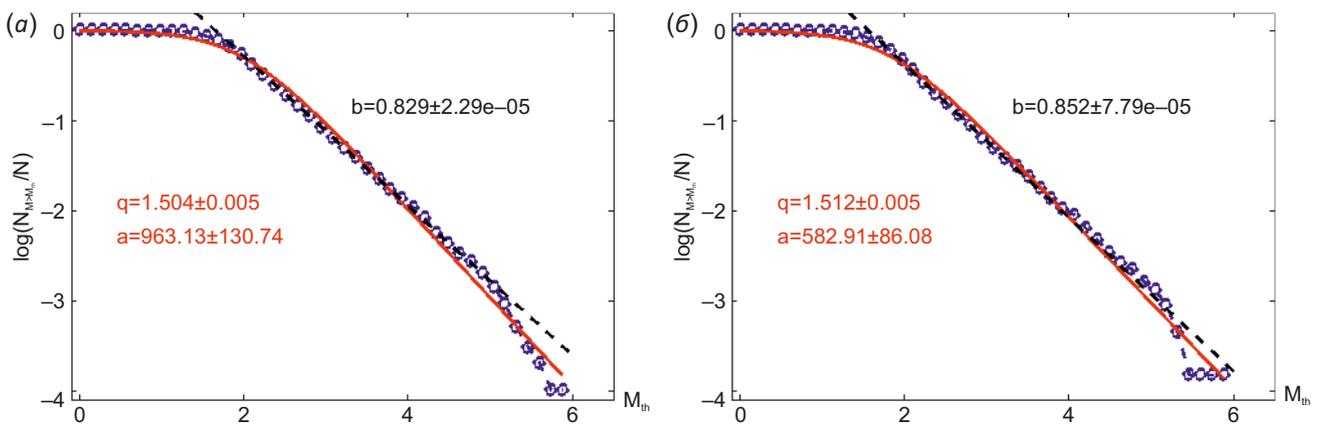


Рис. 16. Распределение относительного количества землетрясений с магнитудой $M > M_{th}$ в зависимости от магнитуды (синий цвет) для землетрясений по всему каталогу (а) и произошедших на территории БГП (б). Красным цветом обозначена его аппроксимация на основе выражения (9), черный цвет – закон Гутенберга – Рихтера (выражение (2)).

Fig. 16. Distribution of the relative number of earthquakes with magnitude $M > M_{th}$, depending on the magnitude (blue), for earthquakes throughout the catalog (a) and those that occurred on the territory of BGP (b). Red color denotes its approximation based on expression (9), black color – Gutenberg – Richter law, (expression (2)).

Гутенберга – Рихтера следующие: для всего каталога сети KNET $b=0.829\pm 2.29\text{e-}05$ и для территории БГП $b=0.852\pm 7.79\text{e-}05$.

Видно, что такое согласие между моделью (9) и наблюдаемой сейсмичностью является хорошим показателем пригодности модели землетрясений, основанной на принципах неэкстенсивной статистической физики в восстановлении основных характеристик динамики землетрясений. Рассчитанное значение параметра

Тсаллиса q также характеризует исследуемый регион как сейсмоактивный и хорошо согласуется со значениями $q\approx 1.5$, полученными для других сейсмоактивных регионов и представленных в работах [Silva et al., 2006; Telesca, Chen, 2010; Telesca, 2011; Vallianatos et al., 2014; Chelidze et al., 2018; Papadakis et al., 2015, 2016; и др.]. Значение параметра Тсаллиса q выше для землетрясений, произошедших на территории БГП, чем для всего каталога (см. рис. 16 и 17). Это вполне логично,

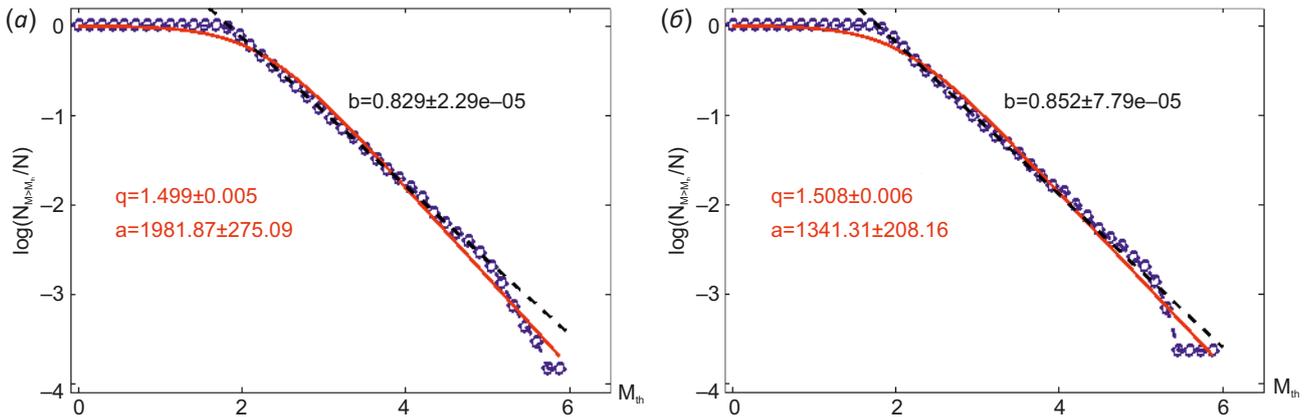


Рис. 17. Распределение относительного количества землетрясений с магнитудой $M > M_{th}$ в зависимости от магнитуды (синий цвет) для землетрясений по представительной части каталога (а) и произошедших на территории БГП (б). См. пояснение к рис. 16.

Fig. 17. Distribution of the relative number of earthquakes with a magnitude $M > M_{th}$, depending on the magnitude (blue), for earthquakes in the representative part of the catalog (a) and that occurred on the territory of the BGP (b). See explanation for Fig. 16.

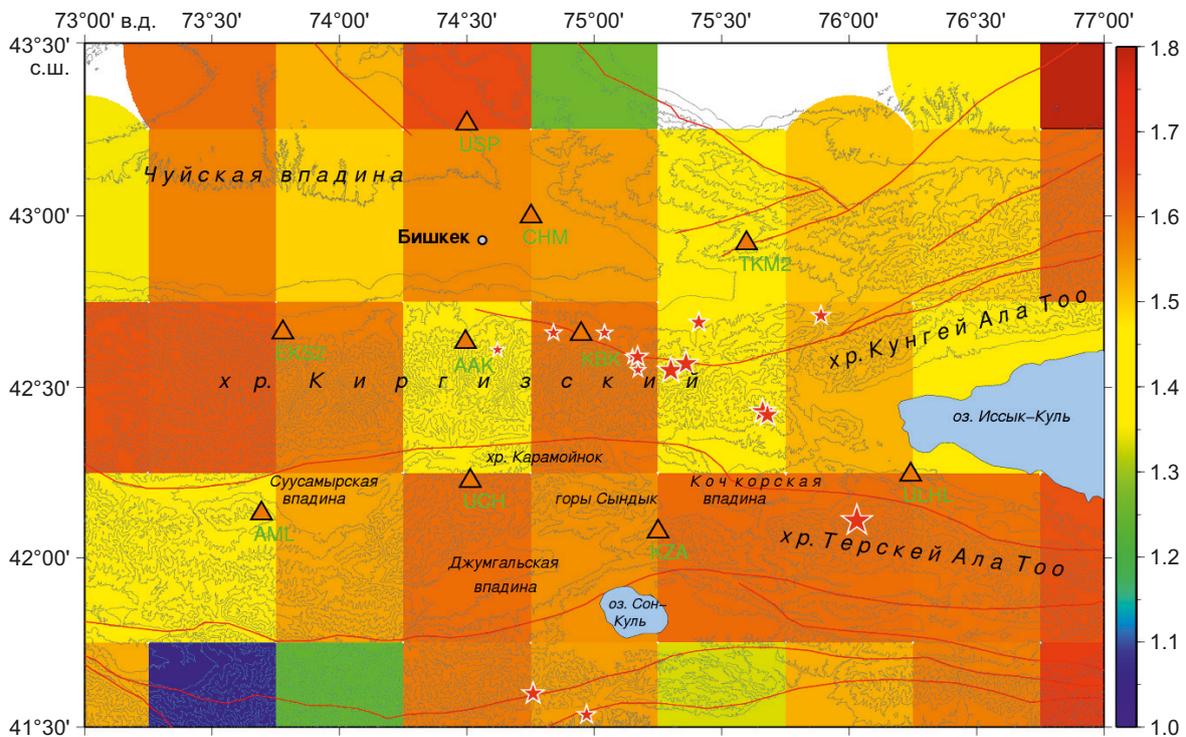


Рис. 18. Распределение параметра Тсаллиса q на территории БГП по данным сети KNET (представительная часть каталога за 1996–2020 гг.). Звездочками обозначены главные события из табл. 6, после которых последовали афтершоки.

Fig. 18. Distribution of the Tsallis q parameter on BGP territory according to the KNET network data (a representative part of the catalog 1996–2020). Asterisks denote the main events from Table 6, which were followed by aftershocks.

так как на территории БГП плотность землетрясений выше (см. рис. 2), и стабильность активной тектонической зоны на отдельно взятой территории БГП оказывается ниже, чем всей исследуемой территории Северного и Центрального Тянь-Шаня в целом.

На рис. 18 представлено площадное распределение параметра Тсаллиса q для территории БГП для каждой рассматриваемой ячейки пространства. Вычисление параметра Тсаллиса q проводилось по ячейкам размером $0.5 \times 0.5^\circ$. Отмечается неоднородность исследуемого параметра. Минимальное значение этого параметра на исследуемой территории составляет $q=1.0$, максимальное $q=1.8$. Основная часть событий, сопровождающихся афтершоковыми процессами (см. рис. 14; табл. 6), произошла в областях, где значение $q \geq 1.6$. Повышенные значения параметра Тсаллиса q могут означать, что в этих областях сохраняется нестабильное состояние, активный сейсмический процесс продолжается, а сейсмогенерирующие зоны еще не вернулись в состояние относительного равновесия во время следования афтершоков.

Для определения связи между параметром Тсаллиса q и характеристиками, представленными на рис. 15 (количество землетрясений и интенсивность деформации), рассчитан коэффициент корреляции. Для количества землетрясений он составил $k=0.25$, что указывает на отсутствие связи между этими характеристиками, и $k=0.73$ для интенсивности STD. По величине параметра q для сейсмоактивного региона можно оценить области неустойчивого состояния. Ячейки, в которых параметр q имеет повышенные значения (менее устойчивое состояние), характеризуются также значительными величинами интенсивности STD.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Киргизская сейсмологическая сеть KNET, установленная в августе – сентябре 1991 г., позволяет регистрировать землетрясения, происходящие на территории Северного и Центрального Тянь-Шаня. За время работы сети зарегистрировано более 10000 землетрясений, которые произошли с 1994 по 2020 г. За этот период при локализации землетрясений получено 130265 времен прихода P - и S -волн: 70423 по P -волне и 59842 по S -волне. Наиболее активно при локализации землетрясений используется станция ААК, которая находится в штольне, реже – станция ULHL, расположенная вблизи озера Иссык-Куль. Хорошей плотностью трасс P -волн покрыта территория БГП. Времена прихода P - и S -волн могут быть использованы при решении различных сейсмологических задач. Рассмотрены различные характеристики каталога, полученного по данным сети KNET в период с 1996 по 2020 г. Анализ ошибок локализации землетрясений (RMS, ERH, ERZ) показал, что для 52 % землетрясений RMS составляет меньше 0.3 с, а для 90 % событий не превышает 0.5 с. Ошибка по горизонтали (ERH) для 70 % землетрясений составляет менее 2 км, а по глубине (ERZ) для 69 % событий имеет значение менее 3 км. Основная часть

землетрясений с минимальными значениями ошибок произошла на территории БГП. После удаления афтершоков из каталога построены графики повторяемости землетрясений и распределение Гутенберга – Рихтера для каталога KNET и каталога KNET, ограниченного координатами БГП. Определена представительная выборка каталога KNET, которая включает землетрясения с $K \geq 7.2$ ($M \geq 1.8$). Каталог KNET, ограниченный координатами БГП, расширяет представительную выборку до событий с $K \geq 6.7$ ($M \geq 1.5$). По представительной части каталога KNET определены некоторые характеристики сейсмичности: наиболее сейсмически активным является период с 2003 по 2006 г., а также 2017 г., и основная часть землетрясений произошла на глубине 0–15 км. Получены временные распределения землетрясений, сформированных в зависимости от класса события, в которых не отмечен положительный или отрицательный тренд изменения количества событий с заданной энергетической характеристикой. Построено площадное распределение землетрясений по глубинам: 0–5, 5–10, 10–15 и более 15 км. Анализ среднего значения ERZ по каждому диапазону глубин показал, что наиболее надежными определениями глубины характеризуются землетрясения, произошедшие на территории Бишкекского геодинамического полигона.

С 1996 по 2020 г. зарегистрировано 46 землетрясений умеренной величины с $K \geq 12$. К наиболее сильным землетрясениям за рассматриваемый период можно отнести Кочкорское (25.12.2006 г., $M=6$, $K=14.8$) и Луговское (22.05.2003 г., $M=5.6$, $K=14.2$).

Из каталога землетрясений были выделены 22 события с $K \geq 10$, которые сопровождались афтершоками. Максимальное количество афтершоков – 72, минимальное – 4, максимальная длительность афтершокового процесса – 1267 дней, минимальная – 11 дней.

Построены распределения количества землетрясений и распределения интенсивности STD на территории, контролируемой станциями сети KNET. Максимум сейсмичности (более 400 землетрясений) приходится на восточную часть северных предгорий Киргизского хребта и юго-восточный борт Иссык-Кульской впадины. Максимальная интенсивность STD на исследуемой территории составляет 10^{-9} год⁻¹. Наиболее интенсивные деформации земной коры происходят в северных предгорьях восточной части Киргизского хребта, в горах Сындык и Кызарт, находящихся южнее Киргизского хребта, вдоль Таласо-Ферганского разлома и на хребте Молдо-Тоо.

Отмечено хорошее согласие между моделью частотно-магнитудного распределения сейсмичности (Fragment-Asperity Interaction Model for Earthquakes), основанной на принципах неэкстенсивной статистической физики, и наблюдаемой сейсмичностью. Эта модель землетрясений может также служить для восстановления основных характеристик динамики землетрясений. Значение параметра Тсаллиса q выше для землетрясений, произошедших на территории БГП, чем для

всего каталога, и это может означать, что стабильность активной тектонической зоны на отдельно взятой территории БГП оказывается ниже, чем всей исследуемой территории Северного и Центрального Тянь-Шаня в целом.

Распределение параметра Тсаллиса q по территории БГП демонстрирует, что области землетрясений с афтершоками характеризуются повышенными значениями параметра Тсаллиса, и это может свидетельствовать, что эти области являются менее стабильными по отношению ко всему региону. Повышенные значения параметра Тсаллиса q наблюдаются в областях, характеризующихся значительными величинами интенсивности СТД.

Анализ различных характеристик каталога позволил сделать вывод, что его можно использовать для решения разнообразных сейсмологических задач, а при ограничении каталога координатами БГП класс анализируемых слабых событий может быть расширен.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор статьи выражает благодарность А.Н. Мансурову за программу расчета кумулятивного распределения Гутенберга – Рихтера.

6. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Автор заявляет об отсутствии у него конфликта интересов. Автор прочитал и согласен с опубликованной версией рукописи.

The author has no conflicts of interest to declare. The author has read and agreed to the published version of the manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Burtman V.S., 2012. Tien Shan and High Asia: Geodynamics in the Cenozoic. GEOS, Moscow, 186 p. (in Russian) [Буртман В.С. Тянь-Шань и Высокая Азия: Геодинамика в кайнозое. М.: ГЕОС, 2012. 186 с.].

Chelidze T., Vallianatos F., Telesca L. (Eds), 2018. Complexity of Seismic Time Series. Measurement and Application. Elsevier, Amsterdam, 548 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04546-1>.

Group of Statistical Physics, 2021. Nonextensive Statistical Mechanics and Thermodynamics. Available from: <http://tsallis.cat.cbpf.br/biblio.htm> (Last Accessed March 4, 2021).

Gutenberg B., Richter C.F., 1944. Frequency of Earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America 34 (4), 185–188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>.

Kasahara K., 1985. Mechanics of Earthquakes. Mir, Moscow, 264 p. (in Russian) [Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.].

Klein R.W., 1978. Hypocenter Location Program HYPO-INVERSE. USGS Open-File Report 78–694, 113 p. <https://doi.org/10.3133/ofr78694>.

Lee W.H.K., Lahr J.C., 1972. HYPO71: A Computer Program for Determining Hypocenter, Magnitude, and First

Motion Pattern of Focal Earthquakes. USGS Open-File Report 72–224, 100 p. <https://doi.org/10.3133/ofr72224>.

Lienert B.R., Berg E., Neil F.L., 1986. HYPOCENTER: An Earthquake Location Method Using Centered, Scaled, and Adaptively Damped Least Squares. Bulletin of the Seismological Society of America 76 (3), 771–783. <https://doi.org/10.1785/BSSA0760030771>.

Lukk A.A., Yunga S.L., 1979. Seismotectonic Deformation of the Garm Region. Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth 10, 24–43 (in Russian) [Лукк А.А., Юнга С.Л. Сейсмотектоническая деформация Гармского района // Известия АН СССР. Физика Земли. 1979. № 10. С. 24–43].

Marsan D., Helmstetter A., 2017. How Variable Is the Number of Triggered Aftershocks? Journal Geophysical Research: Solid Earth 122 (7), 5544–5560. <https://doi.org/10.1002/2016JB013807>.

Matcharashvili T., Chelidze T., Javakishvili Z., Jorjia-shvili N., Paleo U.F., 2011. Non-Extensive Statistical Analysis of Seismicity in the Area of Javakheti, Georgia. Computers & Geosciences 37 (10), 1627–1632. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.12.008>.

Molchan G.M., Dmitrieva O.E., 1991. Identification of Aftershocks. Overview and New Approaches. Computational Seismology 24, 19–50 (in Russian) [Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С. 19–50].

Mukhamadeeva V.A., Sycheva N.A., 2018. Aftershock Processes Supporting Moderate and Weak Earthquakes in the Area of the Bishkek Geodynamic Test Site and in Its Vicinity. Geosystems of Transition Zones 2 (3), 165–180 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.165-180>.

Papadakis G., Vallianatos F., Sammonds P., 2015. A Non-extensive Statistical Physics Analysis of the 1995 Kobe, Japan Earthquake. Pure and Applied Geophysics 172, 1923–1931. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0876-x>.

Papadakis G., Vallianatos F., Sammonds P., 2016. Non-extensive Statistical Physics Applied to Heat Flow and the Earthquake Frequency-Magnitude Distribution in Greece. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications 456, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.03.022>.

Riznichenko Yu.V., 1985. Problems of Seismology. Nauka, Moscow, 408 p. (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.].

Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L., 1993. Three-Dimensional Elastic Wave Velocity Structure of the Western and Central Tien-Shan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 98 (B9), 15779–15795. <https://doi.org/10.1029/93JB01560>.

Seismological Bulletin, 1992. August 11–20, 1992. Experimental-Methodical Expedition IPE RAS, Obninsk, p. 59–69

(in Russian) [Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) 11–20 августа 1992 г. Обнинск: ОМЭ ИФЗ РАН, 1992. С. 59–69].

Silva R., Franca G.S., Vilar C.S., Alcanis J.S., 2006. Nonextensive Models for Earthquakes. *Physical Review E* 73 (2), 026102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.026102>.

Sobolev G.A., Ponomarev A.V., 2003. *Physics of Earthquakes and Precursors*. Nauka, Moscow, 270 p. (in Russian) [Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.].

Sotolongo-Costa O., Posadas A., 2004. Fragment-Asperity Interaction Model for Earthquakes. *Physical Review Letters* 92 (4), 048501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.048501>.

Sychev I.V., Koulakov I., Sycheva N.A., Koptev A., Medved I., El Khrepy S., Al-Arifi N., 2018. Collisional Processes in the Crust of the Northern Tien Shan Inferred from Velocity and Attenuation Tomography Studies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123 (2), 1752–1769. <https://doi.org/10.1002/2017JB014826>.

Sychev V.N., Sycheva N.A., 2019. The Earthquakes Aftershock Processes of the Tien Shan and Its Surrounding Area. In: *Geodynamical Processes and Natural Hazards. Proceedings of the III National Scientific Conference with Foreign Participants (May 27–31, 2019, Yuzhno-Sakhalinsk)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 324, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012003>.

Sychev V.N., Sycheva N.A., 2021. Nonextensive Analysis of Aftershocks Following Moderate Earthquakes in Tien Shan and North Pamir. *Journal of Volcanology and Seismology* 15, 58–711. <https://doi.org/10.1134/S0742046321010127>.

Sychev V.N., Sycheva N.A., Imashev S.A., 2019. Study of the Aftershock Sequence of the Suusamyр Earthquake. *Geosystems of Transition Zones* 3 (1), 35–43 (in Russian) [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>.

Sycheva N.A., 2005. *Study of the Peculiarities of the Mechanisms of Earthquake Centers and Seismotectonic Deformations of the Northern Tien Shan According to the Data of the Digital Seismic Network KNET*. PhD Thesis (Candidate of Physics and Mathematics). Moscow, 176 p. (in Russian) [Сычева Н.А. Исследование особенностей механизмов очагов землетрясений и сеймотектонических деформаций Северного Тянь-Шаня по данным цифровой сейсмической сети KNET: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2005. 176 с.].

Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I., 2020. *Computational Technologies in Seismological Research (on the Example of KNET, Northern Tian Shan)*. IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, 358 p. (in Russian) [Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере KNET, Северный Тянь-Шань). Южно-Сахалинск: ИМГиГ

ДВО РАН, 2020. 358 с.]. <https://doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2>.

Sycheva N.A., Kuzikov S.I., 2012. Analysis of Velocity Model for the Tien-Shan Lithosphere and the Double-Difference Method for Hypocenters Location Using Seismic Network KNET Data. *Geophysical Research* 13 (2), 5–22 (in Russian) [Сычева Н.А., Кузиков С.И. Анализ скоростных моделей литосферы Тянь-Шаня и метод двойных разностей при определении положения гипоцентров землетрясений по данным сейсмологической сети KNET // Геофизические исследования. 2012. Т. 13. № 2. С. 5–22].

Telesca L., 2011. Tsallis-Based Nonextensive Analysis of the Southern California Seismicity. *Entropy* 13 (7), 127–1280. <https://doi.org/10.3390/e13071267>.

Telesca L., 2012. Maximum Likelihood Estimation of the Nonextensive Parameters of the Earthquake Cumulative Magnitude Distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America* 102 (2), 886–891. <https://doi.org/10.1785/0120110093>.

Telesca L., Chen C.C., 2010. Nonextensive Analysis of Crustal Seismicity in Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (6), 1293–1297. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1293-2010>.

Tsallis C., 1988. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics. *Journal of Statistical Physics* 52, 479–487. <https://doi.org/10.1007/bf01016429>.

Vallianatos F., Michas G., Papadakis G., 2014. Non-Extensive and Natural Time Analysis of Seismicity before the Mw6.4, October 12, 2013 Earthquake in the South West Segment of the Hellenic Arc. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 414, 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., 2012. Non-Extensivity Analysis of Seismicity within Four Subduction Regions in Mexico. *Acta Geophysica* 60, 833–845. <https://doi.org/10.2478/s11600-012-0012-1>.

Yudakhin F.N., 1983. *Geophysical Fields, Deep Structure and Seismicity of the Tien Shan*. Ilim, Frunze, 246 p. (in Russian) [Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1983. 246 с.].

Yunga S.L., 1990. *Methods and Results of Seismotectonic Deformation Studies*. Nauka, Moscow, 191 p. (in Russian) [Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.].

Yunga S.L., 2002. *Study of Surface Movements and Deformation of the Crust in the Central Tien Shan, Kazakh Platform and Altai; Creation of Seismological Data Processing Software, and Data Processing*. Scientific Research Report. Obninsk, 41 p. (in Russian) [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 научно-исследовательской работе. Обнинск, 2002. 41 с.].