

Геоинформатика. 2023. № 2. С. 36–48.
Geoinformatika. 2023;(2):36–48.

Моделирование геообъектов и геопроцессов

Научная статья

УДК 004.550

<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-2-36-48>

Пространственно-временной анализ распределения цепочек землетрясений в Байкальской рифтовой системе с целью выявления мигрирующей сейсмичности

© 2023 г. — А.А. Какоурова^{а)}, Е.В. Брыжак^{б)}, В.М. Демьянович^{в)}, А.А. Ключевская^{д)}

Институт земной коры СО РАН; Россия, Иркутск

^{а)}anna2015@crust.irk.ru, ^{б)}bryzhak@crust.irk.ru, ^{в)}vmdem@crust.irk.ru, ^{д)}annakl@crust.irk.ru

Аннотация: Изучению явления мигрирующей сейсмичности в эпицентральных полях различных сейсмоактивных регионов Земли посвящено множество работ. Цепочки «миграций» землетрясений выделяются с использованием различных методик и часто объясняются прохождением в литосфере Земли деформационных волн. В настоящей работе представлены результаты изучения пространственно-временного распределения квазилинейных цепочек землетрясений в Байкальском регионе с применением статистических подходов и большого объема исходных данных о землетрясениях представительных энергетических классов. Показано, что цепочки формируются преимущественно в пределах Байкальской рифтовой системы (БРС) и приурочены к зонам сеймотектонической деструкции литосферы. При исследовании длин цепочек землетрясений выявлены пять максимумов распределения цепочек, в трёх из которых возможно наличие сейсмомиграций.

Ключевые слова: *сейсмичность, пространственно-временное распределение землетрясений, цепочки землетрясений, Байкальская рифтовая система, геолого-геофизические процессы*

Для цитирования: Какоурова А.А., Брыжак Е.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Пространственно-временной анализ распределения цепочек землетрясений в Байкальской рифтовой системе с целью выявления мигрирующей сейсмичности // Геоинформатика. — 2023. — № 2. — С. 36–48. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-2-36-48>.

Geoinformation system

Original article

Spatiotemporal analysis of the distribution of earthquake chains in the Baikal rift system with the purpose of revealing migrating seismicity

© 2023 — А.А. Kakourova^{а)}, E.V. Bryzhak^{б)}, V.M. Dem'yanovich^{в)}, A.A. Kluchevskaya^{д)}

The Institute of Earth's crust SB RAS; Irkutsk, Russia

^{а)}anna2015@crust.irk.ru, ^{б)}bryzhak@crust.irk.ru, ^{в)}vmdem@crust.irk.ru, ^{д)}annakl@crust.irk.ru

Abstract: The study of the phenomenon of migrating seismicity in the epicentral fields of various seismically active regions of the Earth is the subject of many works. Chains of "migrations" of earthquakes are identified using various methods and are often explained by the passage of deformation waves in the Earth's lithosphere. This paper presents the results of studying the spatiotemporal distribution of quasi-linear chains of earthquakes in the Baikal region using statistical approaches and a large amount of initial data on earthquakes of representative energy classes. It is shown that the chains are formed mainly within the Baikal Rift System (BRS) and are confined to zones of seismotectonic destruction of the lithosphere. When studying the lengths of earthquake chains, five maxima of the distribution of chains were revealed, three of which correspond to possible geological and geophysical processes in the BRS lithosphere.

Key words: *seismicity, spatiotemporal distribution of earthquakes, earthquake chains, Baikal rift system, geological and geophysical processes*

For citation: Kakourova A.A., Bryzhak E.V., Dem'yanovich V.M., Kluchevskaya A.A. Spatiotemporal analysis of the distribution of earthquake chains in the Baikal rift system with the purpose of revealing migrating seismicity. *Geoinformatika*. 2023;(2):36–48. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-2-36-48>. In Russ.

Введение

Свойство землетрясений формировать цепочки последовательных во времени эпицентров изучается во многих сейсмоактивных регионах Земли на протяжении десятиков лет [7, 28, 38, 40] и часто объясняется прохождением в литосфере Земли деформационных волн [5, 8, 11]. Некоторые исследователи

объясняют явление «миграций» эпицентров землетрясений упругой и упруго-пластичной передачей напряжений в результате взаимодействия разломов [39]. Это свойство сейсмичности представляет значительный интерес в связи с потенциальной возможностью прогноза сильных землетрясений [9, 37]. Для выделения цепочек разработаны раз-

личные авторские неформализованные или формализованные в значительной мере методики [16, 29], а в качестве исходных данных чаще всего используются сильные или умеренные землетрясения. При этом выделенные цепочки обычно считают цепочками «миграций» сейсмических событий, т.е. обусловленными геофизическими процессами в недрах Земли. Так, формирование цепочек «миграций» многие исследователи связывают с прохождением в литосфере деформационных волн [8, 11]. Следует заметить, что возможность случайного формирования цепочек землетрясений рассматривается редко. Вопрос о возможном формировании случайных и неслучайных, обусловленных геолого-геофизическими процессами цепочек землетрясений рассмотрен в работе [18], в которой цепочки слабых землетрясений рассматриваются как характеристика быстрых деформаций Гармского района. При выделении цепочек для исключения случайных последовательностей введены ограничения на продолжительность, длину цепочки, а также на число событий в ней.

Явление «миграций» землетрясений в земной коре Байкальского региона исследовалось в работах [16, 22, 30 и др.]. В работах С.И. Шермана установлено, что «миграции» очагов землетрясений происходят вдоль квазилинейных зон динамического влияния разломов. Исследователи предполагают, что направленная активизация разломов может быть вызвана медленными деформационными волнами, генераторами которых могут быть межплитные и межблочные подвижки хрупкой литосферы [30]. По мнению авторов, деформационные волны нарушают метастабильное состояние зон разломов и стимулируют возникновение в зоне разлома подвижек и сейсмических событий при прохождении волны, а доказательством справедливости такого предположения служат «миграции» землетрясений вдоль зон разломов. Е.А. Левиной и В.В. Ружичем [16] выявлены три временных кластера «миграции» сейсмической энергии. Основной причиной сейсмомиграций данные авторы считают распространение деформационных волн в литосфере Земли. Процесс сейсмомиграций [16] предлагается рассматривать как проявление целого спектра деформационных волн, распространяющихся в литосфере с различными скоростями. А.В.Новопашина с коллегами обнаружили «миграции» сейсмической активности в БРС, происходящие вдоль активных разломов [22]. В работе [21] выявлены разносторонние направления возможной «миграции» вдоль и поперёк осей сгущения очагов некоторых небольших относительно БРС участков сейсмических структур. Длины цепочек «миграции» соответствуют длинам сегментов разломов, генерирующих землетрясения, и составляют на северо-восточном фланге БРС 50, 70, 160 ± 10 км, на юго-западном фланге — до 50 ± 10 км и в центральной части рифта — 30–100 км [22].

В работе [38] показано, что «миграции» сейсмической активности на северо-восточном фланге БРС распространяются как вдоль основных рифтовых структур и общей ориентации активных разломов северо-восток–юго-западного простирания, так и ортогонально к крупным разломам вдоль вторичной ориентации активных разломов северо-запад–юго-восточного простирания. Длины миграционных цепочек вдоль основных рифтовых структур составляют 25–60 км. В работе [26] установлена «миграция» эпицентров землетрясений в области Южно-Байкальского землетрясения (25.02.1999; $K_p = 14,6$, $M_w = 6,0$; $\varphi = 51,64^\circ$ с.ш., $\lambda = 104,82^\circ$ в.д.), начавшаяся в 1991 г. и являющаяся примером возможности существования сейсмомиграций в областях группирующейся сейсмичности.

Закономерности пространственно-временного и энергетического распределения многочисленных цепочек землетрясений Байкальского региона с использованием статистического азимутального анализа большого количества землетрясений исследовались ранее [14]. Для этого была разработана формализованная методика определения и выделения цепочек землетрясений, описанная в формуле патента [26]. Установлено, что цепочки формируются в основном в пределах БРС, а их плотность и годовые количества возрастают с увеличением плотности и количества землетрясений в год [14]. Эти закономерности, а также результаты имитационного моделирования мигрирующей сейсмичности [15] указывают на то, что некоторая часть цепочек формируется при случайном пространственно-временном распределении землетрясений. Одним из способов оценить количество цепочек сейсмомиграций в общем количестве выделенных цепочек является использование индекса сейсмомиграционной активности, применение которого в работе [12] показало присутствие цепочек «миграций» в окрестностях структур-аттракторов рифтогенеза [35]. В настоящей работе произведено статистическое исследование закономерностей распределения времени и расстояний между землетрясениями в цепочках с целью поиска способов выявления возможных цепочек «миграций» землетрясений.

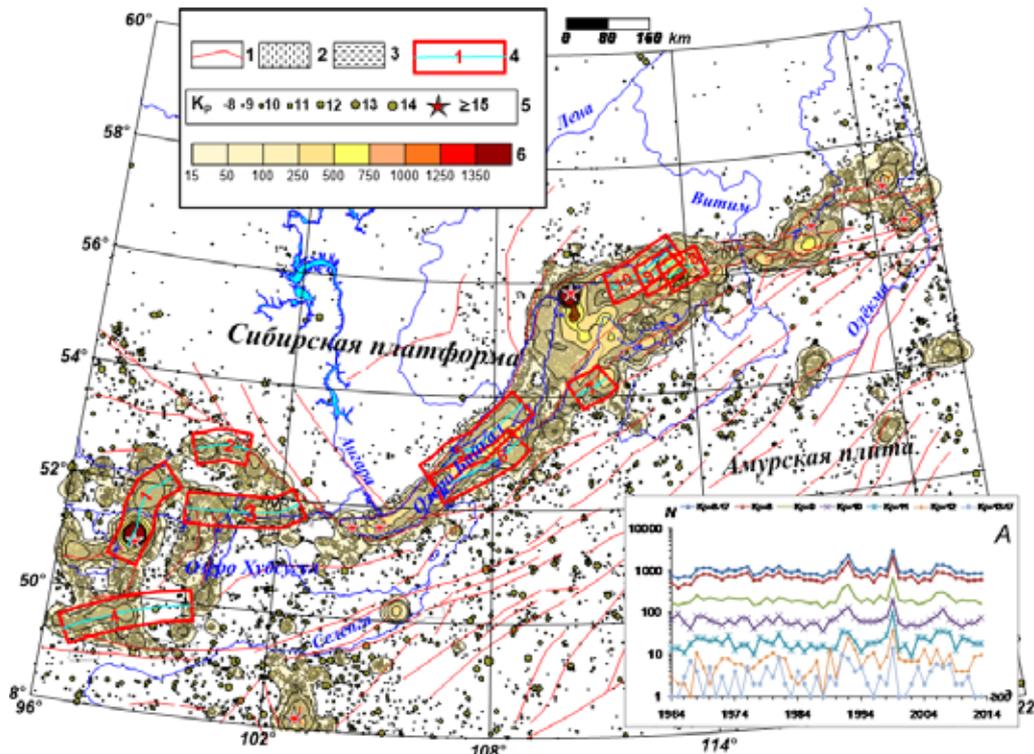
Исходные данные

Под Байкальским регионом будем иметь в виду территорию, ограниченную координатами $\varphi = 48\text{--}60^\circ$ с.ш., $\lambda = 96\text{--}122^\circ$ в.д., в пределах которой расположена опасная в сейсмическом отношении БРС. Помимо тектонических землетрясений, «Каталог землетрясений Прибайкалья» содержит информацию о многочисленных промышленных взрывах, производимых при народно-хозяйственном освоении региона. По сейсмограммам отличить промышленные взрывы от тектонических землетрясений затруднительно [10], а информация о времени и месте проведения взрывов не фиксировалась в

официальных документах. Поэтому в настоящее время не существует единой методики исключения взрывов из «Каталога землетрясений Прибайкалья», но известно, что промышленные взрывы концентрируются вблизи некоторых населённых пунктов и происходят в основном в дневное время [10, 25]. Основываясь на этих свойствах пространственно-временного распределения взрывов, а также учитывая изменение чисел событий во времени, нами исключены возможные взрывы из каталога. С учётом этого в настоящей работе для определения и выделения цепочек землетрясений в эпицентральном поле Байкальского региона используются данные о $N=52155$ землетрясениях энергетического класса $K_p \geq 8$, зарегистрированных на территории Байкальского региона в 1964–2013 гг. Байкальским [2] и Алтае-Саянским [1] филиалами Единой геофизической службы Российской академии наук. Для того, чтобы исключить выделение «ложных цепочек» землетрясений, из данной выборки удалены сейсмические события, произошедшие друг за другом и имеющие при этом одинаковые координаты эпицентров, и только первые из таких событий использовались в настоящем исследовании. После этого в выборке исходных данных осталось

$N=51811$ землетрясений. Концентрация эпицентров землетрясений преимущественно в пределах БРС наблюдается на карте эпицентров и изолиний плотности эпицентров землетрясений в указанные годы, приведённой на рис. 1. При более детальном рассмотрении рисунка видно, что землетрясения концентрируются в виде полос преимущественно северо-восток–юго-западного простирания, соответствующего ориентации основных разломов БРС. В результате характерной для БРС форшок-афтершоковой и роевой деятельности [23, 13, 19] формируются области повышенной плотности эпицентров сейсмических событий. На вставке А рис. 1. приведён график количества землетрясений в год N в различных диапазонах энергетических классов, где видно, что эти количества варьируют, принимая максимальные значения в 1991 и 1999 гг. Данные максимумы обусловлены группами Бусийнгольского (27.12.1991; $K_p=16,2$, $M_w=6,5$; $\varphi=50,98^\circ$ с.ш., $\lambda=98,08^\circ$ в.д.), Южно-Байкальского (25.02.1999; $K_p=14,6$, $M_w=6,0$; $\varphi=51,64^\circ$ с.ш., $\lambda=104,82^\circ$ в.д.) и Кичерского (21.03.1999; $K_p=14,5$, $M_w=5,7$; $\varphi=55,83^\circ$ с.ш., $\lambda=110,34^\circ$ в.д.) землетрясений и выделяются в различных диапазонах энергетических классов.

Рис. 1. Карта эпицентров и изолиний плотности эпицентров 52155 землетрясений Байкальского региона с $K_p \geq 8$ (1964–2013 годы)
Fig. 1. Map of epicenters and epicenters density isolines of 52155 earthquakes in the Baikal region with $K_p \geq 8$ (1964–2013)



1 — разломы, 2 — впадины, 3 — озёра, 4 — границы и номера зон основных разломов, 5 — эпицентры землетрясений пред-ставительных энергетических классов, 6 — шкала плотности эпицентров в площадках $0,2 \times 0,3^\circ$. На вставке А приведены графики количества N землетрясений региона в год с $K_p \geq 8$ и выборки толчков отдельных классов

1 — faults, 2 — trenches, 3 — lakes, 4 — boundaries and numbers of major fault zones, 5 — epicenters of earthquakes of representative energy classes, 6 — epicenter density scale in sites, $0,2 \times 0,3^\circ$. Inset A shows graphs of the number N of earthquakes in the region per year with $K_p \geq 8$ and samples of shocks of individual classes

Методы исследования

Для определения и выделения цепочек землетрясений использовалась разработанная ранее авторами настоящей статьи формализованная методика, основанная на статистическом азимутальном анализе большого количества землетрясений различных энергетических классов или магнитуд [26]. Для реализации этой методики была разработана компьютерная программа «Chain» на языке программирования Perl [23]. В качестве сектора допустимой нелинейности цепочки был выбран сектор $q = 10^\circ$. Используемая методика позволяет выделить все цепочки землетрясений в выборке, удовлетворяющие заданному сектору допустимой нелинейности, однако для идентификации цепочек «миграций» землетрясений требуется привлечение других подходов. В настоящей работе для этой цели изучался характер распределения расстояний между эпицентрами землетрясений в цепочках, а также время между событиями в цепочках.

При изучении распределений расстояний между эпицентрами землетрясений в цепочках применялась комбинированный статистический тест на проверку отклонения от нормального распределения Д’Агостино–Пирсона [31, 32], обычно применяемый для выборок данных среднего и большого размера [31], и тест Шапиро-Уилка [42], обычно использующийся для небольших выборок данных [34]. Для детального исследования распределения длин цепочек использовалась ядерная оценка плотности, представляющая собой непараметрический способ оценки плотности случайной величины. Ширина окна выбиралась согласно правилу Скотта [41], но применялось несколько меньшее значение, поскольку для мультимодальных распределений данное правило имеет тенденцию приводить к излишне сглаженной оценке. В отличие от гистограммы распределения величины, ядерная оценка плотности не зависит от выбора количества и ширины столбцов, что исключает влияние этих параметров на вид распределения. Для аппроксимации распределения длин цепочек выбрана смесь гауссовских распределений (СГР) [43]. Для определения неизвестных параметров СГР применялся EM-алгоритм (expectation-maximization) [33, 4]. Количество аппроксимирующих гауссовских распределений задавалось таким образом, чтобы обеспечить наилучшее приближение, а полученная оценка согласуется с мультимодальным характером распределения, полученного методом ядерной оценки плотности.

Для исследования характера разностей времён между землетрясениями в цепочках использовался случайный стационарный поток Пуассона, в котором вероятность P появления следующего события определяется по формуле:

$$P = \mu e^{-\mu t} = \frac{1}{\mu^{-1}} e^{-\frac{t}{\mu^{-1}}},$$

где μ^{-1} — средний интервал времени между землетрясениями в цепочке, для оценки которого использовался метод максимального правдоподобия. Соответствие распределения времени между землетрясениями в цепочках предполагаемой модели проверялось с использованием критерия Колмогорова–Смирнова [36, 3], а также непараметрических критериев Андерсона–Дарлинга и Крамера–Мизеса–Смирнова [44, 17]. В работе приведены результаты, полученные хотя бы по двум из трёх критериев. Для проведения статистического анализа расстояний и времени между землетрясениями в цепочках были разработаны реализующие перечисленные подходы программы на языке программирования Python.

Результаты

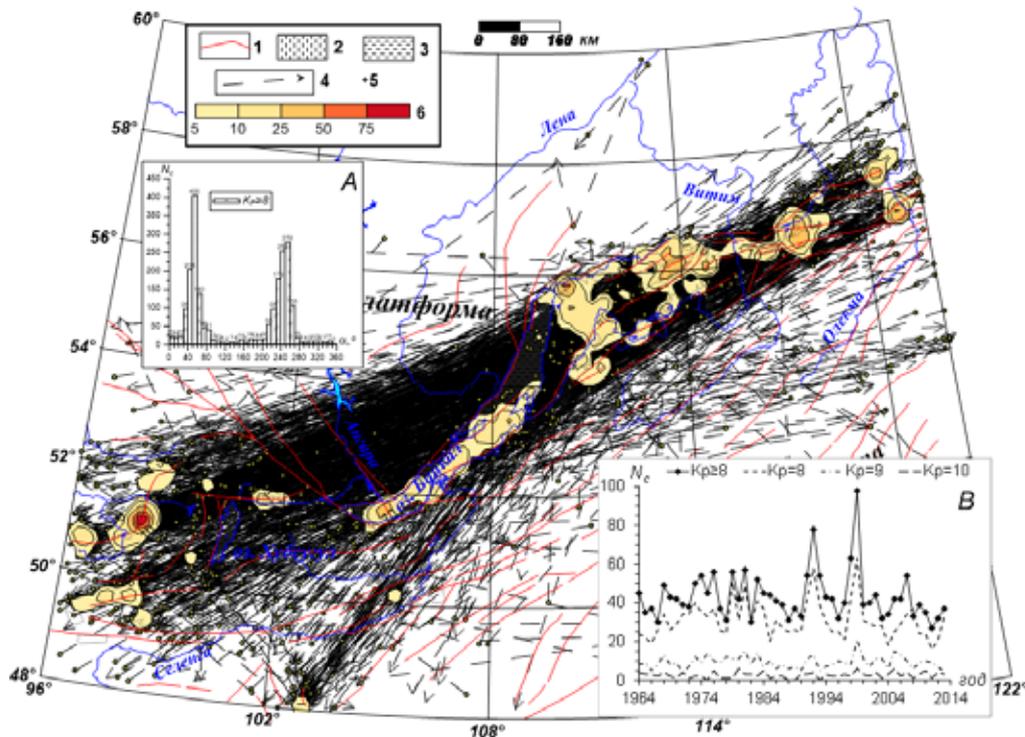
Пространственно-временные закономерности распределения цепочек землетрясений

В эпицентральной поле землетрясений Байкальского региона выделено $N_c = 2172$ квазилинейных цепочки, пространственно-временное распределение которых аналогично пространственно-временному распределению цепочек, выделенных без удаления взрывов из «Каталога землетрясений Прибайкалья» в работе [14]. Так, на карте расположения и ориентации выделенных цепочек, приведённой на рис. 2, видно, что цепочки в основном формируются в пределах БРС, а на гистограмме азимутального распределения цепочек (рис. 2, вставка А) значительно выделяются два максимума в азимутах $50-60^\circ$ и $250-260^\circ$. На графике количества цепочек в год (рис. 2, вставка В) видно, что форма этого графика соответствует графику количества землетрясений в год (см. рис. 1А), и максимумы количества землетрясений и цепочек в год наблюдаются в одни и те же годы. Большинство выделенных цепочек состоит из трёх сейсмических событий ($N_c = 2120$), однако, имеются относительно немногочисленные цепочки ($N_c = 52$), состоящие из четырёх толчков. Дальнейшие статистические исследования в настоящей работе проведены для цепочек, состоящих из трёх землетрясений.

Расстояния между землетрясениями в цепочках

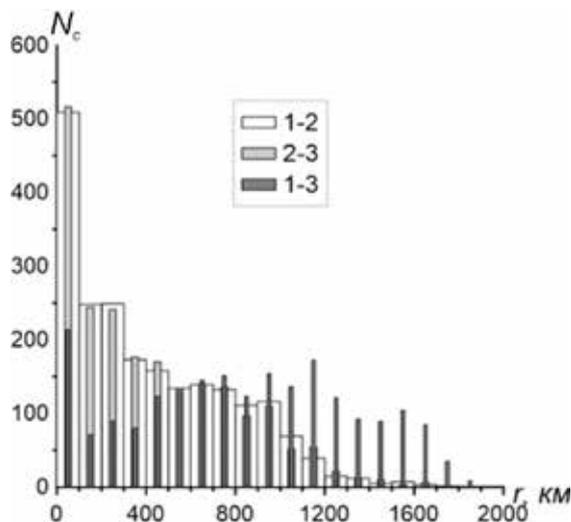
На рис. 3 приведена гистограмма распределения количества цепочек землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 8$, состоящих из трёх землетрясений и выделенных в эпицентральной поле Байкальского региона по расстояниям между эпицентрами сейсмических событий. Из рисунка видно, что для расстояний между первым и вторым r_{12} (1-2), а также вторым и третьим эпицентрами цепочек r_{23} (2-3) имеется единственный максимум в диапазоне $r = 0-100$ км, и количество цепочек уменьшается с возрастанием расстояния. Присутствие такого максимума, возможно, обусловлено ошибками определения координат эпицентров землетрясений, а также группирующей сейсмичностью. Гистограмма распределения расстояний r_{13} от

Рис. 2. Карта расположения и ориентации 2172 цепочек землетрясений в земной коре Байкальского региона
Fig. 2. Location and orientation map of 2172 earthquake chains in the earth's crust of the Baikal region



1 — разломы, **2** — впадины, **3** — озёра, **4** — «векторы» цепочек землетрясений, **5** — эпицентры первых землетрясений в цепочке с $K_p \geq 8$, **6** — шкала изолиний плотности эпицентров первых землетрясений в цепочках в площадках $0,2 \times 0,3^\circ$. На вставке А показано распределение количества цепочек землетрясений по азимутам. На вставке В приведены количества цепочек землетрясений в год
1 — faults, **2** — trenches, **3** — lakes, **4** — "vectors" of chains of earthquakes, **5** — epicenters of the first earthquakes in a chain with $K_p \geq 8$, **6** — scale of isolines of density of epicenters of the first earthquakes in chains in sites $0,2 \times 0,3^\circ$. Inset A shows the distribution of the number of earthquake chains by azimuth. Inset B shows the number of earthquake chains per year

Рис. 3. Гистограммы распределения количества цепочек землетрясений с $K_p \geq 8$, выделенных в Байкальском регионе, по расстояниям r между первым и вторым (1-2), вторыми и третьими (2-3) и первыми и третьими (1-3) событиями
Fig. 3. Distribution histograms of the number of earthquake chains with $K_p \geq 8$ in the Baikal region by distances r between the first and second (1-2), second and third (2-3) and first and third (1-3) events



первого до третьего землетрясения цепочки (1-3), указывает на другой вид распределения расстояний: кроме того же максимума $r=0-100$ км, в данном случае наблюдаются ещё четыре локальных максимума в диапазонах $r=200-300$ км, $r=700-800$ км, $r=1100-1200$ км и $r=1500-1600$ км. При представлении гистограммы в логарифмическом масштабе все распределения принимают бимодальный вид (рис. 4), за счёт вариативной ширины логарифмических корзин.

Первый максимум, обусловленный группировкой сейсмичностью, симметричен для всех распределений, поэтому с использованием статистических тестов произведена проверка данного распределения на соответствие логнормальному. Тестирование показало, что распределения расстояний r_{12} и r_{23} статистически значимо отличаются от логнормальных: гипотеза о нормальности отклоняется на уровне значимости $\alpha=0,05$ в любом диапазоне расстояний $(0, r]$, где r меняется от 5 до 120 км. Такой результат, возможно, связан с ошибками определения координат эпицентров. Для распределения длин цепочек r_{13} установлено, что гипотеза о логнормальном распределении расстояний не мо-

жет быть отклонена на уровне значимости $\alpha=0,05$, а значения статистик K^2 Д’Агостино–Пирсона и W Шапиро–Уилка наиболее соответствуют теоретическому распределению при длине цепочки до 73 и 68 км соответственно (рис. 5). Эти значения являются статистическим критерием для того, чтобы отнести цепочку к группирующейся сейсмичности. Однако отметим, что цепочки с длиной более 30 км в данном распределении являются единичными. В этом случае распределение статистически значимо не отличается от логнормального в отличие от расстояний r_{12} и r_{23} , т.к. вся цепочка состоит из трёх землетрясений, и общая вероятность значительной ошибки определения эпицентров землетрясений снижается и оказывает меньшее влияние на форму распределения, хотя сама ошибка может возрастать.

Далее, из рассмотрения были исключены несимметричные цепочки и проведены те же самые статистические тесты для расстояний r_{13} . Исключение несимметричных цепочек произведено путём ограничения расстояний r_{12} и r_{23} . Распределение длин цепочек r_{13} статистически значимо не отличается от логнормального в диапазоне расстояний, и

Рис. 4. Гистограммы распределения количества цепочек землетрясений с $K_p \geq 8$, выделенных в Байкальском регионе, по расстояниям r и их осредняющие кривые в логарифмическом масштабе. А — для расстояния от первого до второго землетрясения (1-2) и от второго до третьего (2-3), В — от первого до третьего толчка цепочки (1-3), С — обобщенная гистограмма

Fig. 4. Distribution histograms of the number of earthquake chains with $K_p \geq 8$ in the Baikal region by distances r and their averaging curves on a logarithmic scale. A — for the distance from the first to the second earthquake (1-2) and from the second to the third (2-3), B — from the first to the third shock of the chain (1-3), C — generalized histogram

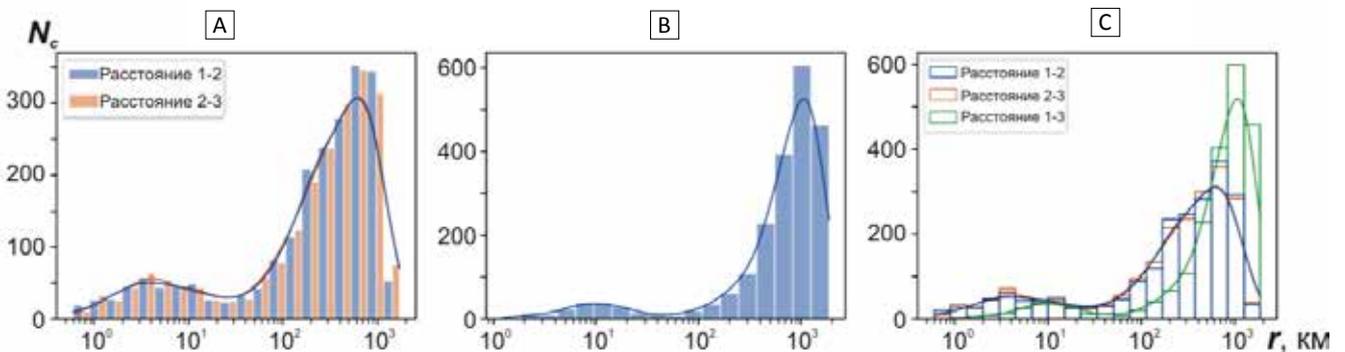
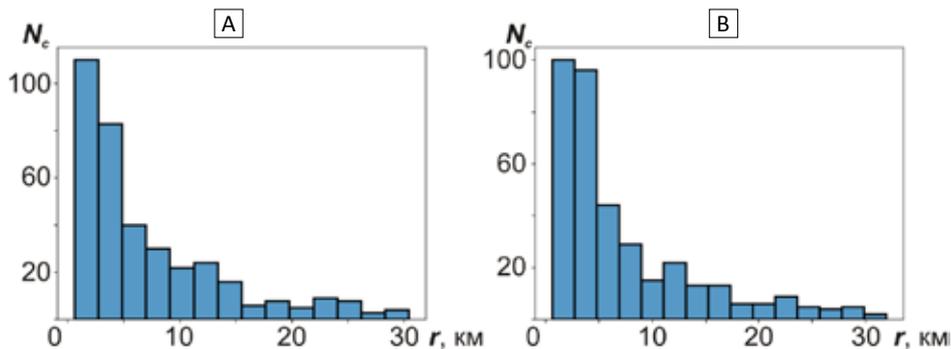


Рис. 5. Гистограммы распределения количества цепочек землетрясений $K_p \geq 8$ N_c по расстояниям r . А — расстояния от первого до второго землетрясения, В — от второго до третьего

Fig. 5. Histograms of the distribution of the number of earthquake chains $K_p \geq 8$ N_c by distances r . A is the distance from the first to the second earthquake, B is from the second to the third



наилучшее соответствие наблюдается при расстоянии между землетрясениями $r_{12}, r_{23} < 64$ км для критерия Д’Агостино–Пирсона и $r_{12}, r_{23} < 55$ км для критерия Шапира–Уилка при общей длине цепочки r_{13} 80 км и 70 км соответственно (рис. 6). Полученные результаты в целом соответствуют и значениям, когда критерием служит длина цепочки. Установленные критерии в дальнейшем используются для выделения группирующейся сейсмичности, а наиболее вероятная длина цепочек группирующихся землетрясений составляет 4–24 км при 68% доверительном интервале для обоих статистических тестов.

Далее, на основании критериев выделения цепочек группирующейся сейсмичности, из распределения исключены цепочки длиной $r_{13} < 30$ км, а оставшееся распределение представлено в виде ядерной оценки плотности (рис. 7). Из рис. 7 видно,

что распределение имеет мультимодальный характер, поэтому оно представлено в виде смеси гауссовских распределений (СГР). Расчёты, проведённые для распределения r_{13} , показали, что для длин цепочек выявлены четыре основных распределения цепочек, имеющих математические ожидания $\mu_1 = 188$ км, $\mu_2 = 577$ км, $\mu_3 = 1111$ км, $\mu_4 = 1594$ км и стандартные отклонения $\sigma_1 = 82$ км, $\sigma_2 = 196$ км, $\sigma_3 = 233$ км, $\sigma_4 = 109$ км. При сравнении полученных параметров с формой гистограммы для r_{13} (см. рис. 3) видно, что их значения и значения максимумов на этой гистограмме в целом совпадают, а появление цепочек с такими длинами может быть обусловлено геолого-геофизическими процессами в литосфере БРС. Помимо четырёх основных распределений, создающих главные пики в распределении длин цепочек, существуют смешанные распределения, создающие дополнительные пики.

Рис. 6. Гистограммы распределения количества цепочек землетрясений с $K_p \geq 8 N_c$ по расстояниям r_{13} (от первого до третьего землетрясения цепочки). А — при длине цепочки до 73 км, В — при расстоянии между землетрясениями в цепочке до 64 км
 Fig. 6. Histograms of the distribution of the number of earthquake chains with $K_p \geq 8 N_c$ by distances r_{13} (from the first to the third earthquake in the chain). А — for a chain length of 73 km or less, В — for a distance between earthquakes in a chain of 64 km or less

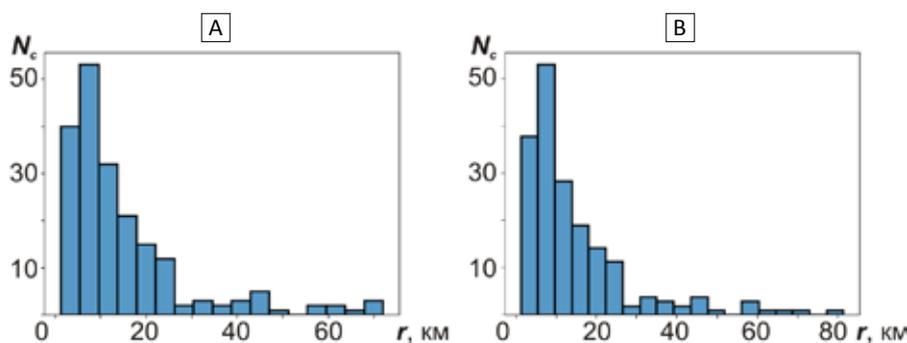
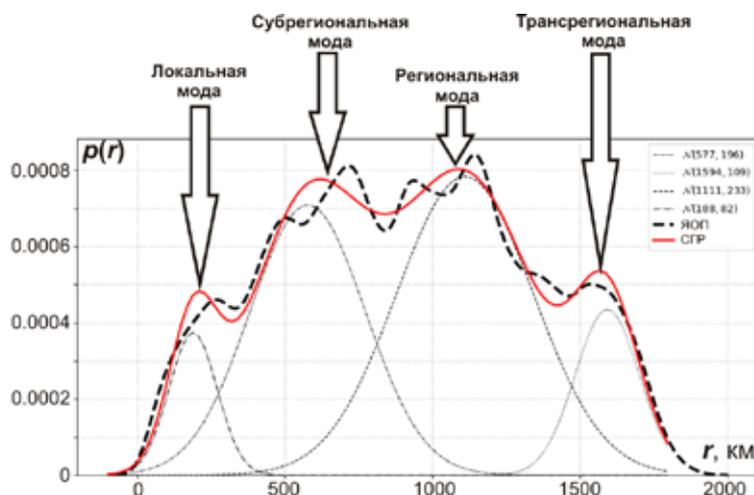


Рис. 7. Ядерная оценка плотности (ЯОП, жирная пунктирная линия) распределения количества цепочек землетрясений N_c по эпицентральному расстояниям r_{13} (от первого до третьего землетрясения цепочки), аппроксимация данных смесью гауссовских распределений (СГР, сплошная жирная линия) и гауссовы распределения, составляющие СГР ($N(\mu, \sigma)$, тонкие линии)

Fig. 7. Kernel density estimate (ЯОП, thick dotted line) of the distribution of the earthquake chains number N_c by epicentral distances r_{13} (from the first to the third earthquake of the chain), data approximation by a mixture of Gaussian distributions СГР, solid thick line) and Gaussian distributions that make up the СГР ($N(\mu, \sigma)$, thin lines)



Время между землетрясениями в цепочках

Гистограммы распределения цепочек по времени приведены на рис. 8. Из рисунка видно, что с увеличением временного промежутка между землетрясениями количество цепочек уменьшается, а распределения времени t_{12} между первым и вторым событиями практически идентично времени t_{23} между вторым и третьим событиями в цепочке. Это объясняется тем, что эти времена характеризуются выборками событий из одной и той же совокупности данных. Для времён t_{12} и t_{23} наблюдается больший наклон левой части экспериментальной гистограммы по сравнению с распределением всего времени реализации цепочки t_{13} . Форма гистограммы продолжительности цепочки t_{13} схожа с формой гистограмм времён между последовательными событиями цепочек, однако, наклон левой части этой гистограммы значительно меньше.

Более детальное изучение распределения времени между землетрясениями в цепочках с использованием стационарного потока Пуассона показало, что среднее время μ^{-1} между первым и вторым и между вторым и третьим событиями составляет 8,7 и 9,2 ч. соответственно, а средняя продолжительность цепочки составляет 17,9 ч. Проверка эмпирических распределений времени на соответствие экспоненциальному закону распределения с использованием критерия Колмогорова–Смирнова показала, что гипотеза о данном виде распределения отвергается на уровне значимости $\alpha=0,05$ для распределений — t_{12} , t_{23} , t_{13} . Возможно, это несоответствие связано с высокой частотой возникновения землетрясений в результате группирования.

Для дальнейшего изучения характера распределения времени из рассмотрения исключены цепочки группирующихся землетрясений. Для этого

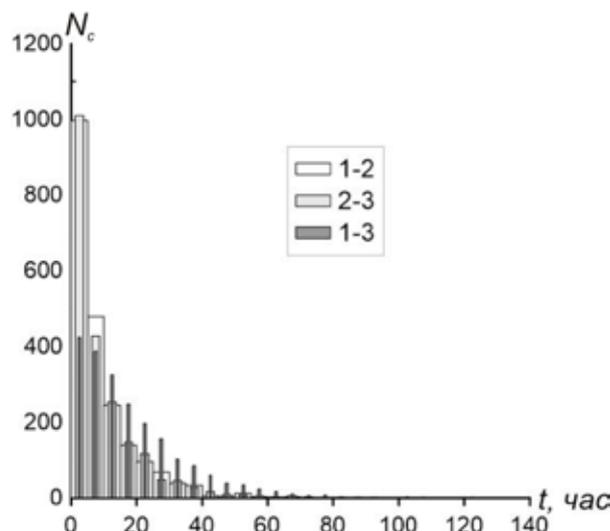
использовались критерии, полученные при изучении распределения расстояний между землетрясениями в цепочках. Применение описанных выше критериев согласия показало соответствие экспоненциальному закону распределений t_{12} и t_{23} . Наибольшее соответствие статистик упомянутых критериев экспоненциальному закону распределения наблюдается при исключении цепочек, в которых хотя бы одно расстояние между событиями составляет менее 60 км для распределения t_{12} и 61 км для распределения t_{23} . Значение параметра μ^{-1} для распределений t_{12} и t_{23} Байкальского региона при таких ограничениях составило 10,12 ч и 10,68 ч. Распределение времени продолжительности цепочек t_{13} не соответствует экспоненциальному закону распределения из-за значительного уменьшения количества цепочек продолжительностью менее 5 ч.

Обсуждение

Изучение распределения квазилинейных цепочек землетрясений и сопоставление полученных результатов с пространственно-временным и энергетическим распределением многочисленных землетрясений в Байкальском регионе показало их тесную взаимосвязь. В настоящей работе сделана попытка очистки исходных данных от промышленных взрывов, в отличие от предыдущих работ тех же авторов, однако в целом это не привело к изменению полученных результатов. Это объясняется достаточно малым количеством удалённых промышленных взрывов относительно размера выборки землетрясений, зарегистрированных в Байкальском регионе за выбранных временной период (удалено более 1000 взрывов из выборки размером более 50000 событий), а также пропорциональной зависимостью количества цепочек от размера выборки сейсмологических данных.

Рис. 8. Гистограммы распределения количества цепочек землетрясений с $K_p \geq 8$ по времени. 1–2 — времена между первым и вторым, 2–3 — времена между вторым и третьим, 1–3 — времена между первым и третьим землетрясениями цепочек

Fig. 8. Histograms of the distribution of the number of earthquake chains with $K_p \geq 8$ over time. 1–2 are the time intervals between the first and second, 2–3 are the time intervals between the second and third, 1–3 are the time intervals between the first and third earthquakes in the chains



Приуроченность цепочек землетрясений к зонам деструкции земной коры указывает на то, что цепочки могут маркировать эти зоны. Однако иногда цепочки землетрясений формируются там, где разломы не выявлены, или частично либо полностью продолжают линию простираения разлома. Это свойство ранее было отмечено в работе [18], в которой распределение цепочек слабых землетрясений изучалось в пределах Гармского района. Такое расположение цепочек землетрясений может быть применено в качестве одного из инструментов поисков «скрытых» разломов [6] и уточнения строения земной коры сейсмически активных регионов. Формализованное выделение многочисленных цепочек расширяет возможности применения такого подхода и делает его более надёжным.

В настоящее время исследователями мигрирующей сейсмичности не решена задача отделения цепочек «миграций» землетрясений от цепочек, формирующихся при случайном пространственно-временном распределении сейсмических событий, из-за малочисленности работ, в которых рассматривается вопрос о случайном формировании цепочек и ставится вопрос разделения этих двух видов последовательностей. Приблизить решение этой задачи позволит проведённый в настоящей работе анализ распределений расстояний и времён между землетрясениями в цепочках. При изучении расстояний и, возможно, времён между землетрясениями в цепочках выделяется максимум небольших значений, который, скорее всего, соответствует цепочкам, образованным землетрясениями групп. Формирование такого типа цепочек может быть обусловлено изменениями напряжённо-деформированного состояния в той области земной коры, где происходит группа толчков. Исследование распределения расстояний между первым и третьим событиями цепочек после исключения цепочек группирующей сейсмичности показало выделение ещё четырёх распределений данного параметра. Первое распределение, условно названное «локальным», имеет наиболее вероятные расстояния между первым и третьим эпицентрами $r_{13} = 188 \pm 82$ км при 68% доверительном интервале, сопоставимые с длиной генерального разлома в Байкальском регионе (80 км и более) [30] и с размерами блоков земной коры БРС [20]. Второе распределение, представленное расстояниями $r_{13} = 577 \pm 196$ км, сопоставимыми, например, с линейными размерами северо-восточного фланга БРС или Байкальской котловины, условно назовём «субрегиональным». Чтобы ответить на вопрос, могут ли присутствовать цепочки «миграций» землетрясений среди цепочек этих трёх типов, требуется детальное изучение пространственно-временных распределений этих цепочек. Ещё одно распределение с наиболее вероятными расстояниями в цепочках $r_{13} = 1111 \pm 233$ км названо «региональным» из-за соответствия региональному уровню. В цепочках этого уровня землетрясе-

ния последовательно происходят, например, на одном из флангов и в центральной части БРС. Последнее распределение с вероятным расстоянием $r_{13} = 1594 \pm 109$ км, сопоставимым с размерами рассматриваемого региона, первое и последнее землетрясения в которой происходят на разных флангах БРС, назовем «трансрегиональным». Распределения, соответствующие «региональной» и «трансрегиональной» моде, в настоящее время обоснованы только математическими закономерностями, обусловленными пространственными размерами области, где происходят землетрясения в цепочке. Оснований полагать, что среди региональных и трансрегиональных цепочек существуют цепочки «миграций» землетрясений, в настоящее время нет. Помимо выделенных пяти типов, существуют цепочки смешанного вида. Такие цепочки нарушают форму выделенных распределений, создавая дополнительные пики.

Заключение

Применение формализованного подхода позволяет расширить возможности исследования закономерностей пространственно-временного распределения цепочек землетрясений в эпицентральном поле сейсмических событий. В настоящей работе выявлено соответствие пространственно-временных распределений эпицентрального поля землетрясений и сформированных в нём цепочек. При исследовании распределений расстояний между землетрясениями в цепочках выделены пять типов цепочек, в трёх из которых возможно присутствие цепочек «миграций» землетрясений, обусловленных геолого-геофизическими процессами на разных масштабных уровнях земной коры Байкальского региона. Изучение распределения времени между событиями в цепочках показало соответствие экспоненциальному закону времён между последовательными событиями цепочек при исключении цепочек группирующей сейсмичности.

Благодарности

Авторы выражают благодарность кандидату геолого-минералогических наук Н.А. Радзиминович за консультации по вопросам данного исследования.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44011. В работе задействовано оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682. В работе использованы данные, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список источников

1. *Алтае-Саянский филиал ФГБУ ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук»* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.asgsr.ru> (дата обращения: 03.03.2022).
2. *Байкальский филиал ФГБУ ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук»* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.seis-bykl.ru> (дата обращения: 13.03.2022).
3. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. – М. : Наука, 1983. – 417 с.
4. *Бояров А.А.* Рандомизированный алгоритм стохастической аппроксимации для кластеризации смеси гауссовых распределений при разреженных параметрах // *Стохастическая оптимизация в информатике*. – 2019. – Т. 15. – № 1. – С. 3–19.
5. *Быков В.Г.* Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // *Геология и геофизика*. – 2005. – Т. 46. – № 11. – С. 1176–1190.
6. *Быков В.Г., Меркулова Т.В.* Миграции сейсмичности и скрытые разломы в Приамурье // *Тихоокеанская геология*. – 2020. – Т. 39. – № 4. – С. 38–52. DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-4-38-52.
7. *Викулин А.В.* Физика волнового сейсмического процесса. – Петропавловск-Камчатский : КГПУ, 2003. – 151 с.
8. *Викулин А.В., Акманова Д.Р., Викулина С.А., Долгая А.А.* Миграция сейсмической и вулканической активности как проявление волнового геодинамического процесса // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2012. – Т. 3. – № 1. – С. 1–18. DOI: 10.5800/GT-2012-3-1-0058.
9. *Вилькович Е.В., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И.* Волны тектонических деформаций на крупных разломах // *Доклады АН СССР*. – 1974. – Т. 219. – № 1. – С. 77–80.
10. *Голенецкий С.И.* Землетрясения юга Сибирской платформы по инструментальным сейсмологическим наблюдениям // *Вулканология и сейсмология*. – 2001. – № 6. – С. 68–77.
11. *Губерман Ш.А.* Землетрясения, неравномерность вращения Земли и D-волны // *Доклады АН СССР*. – 1976. – Т. 230. – № 6. – С. 1314–1317.
12. *Какоурова А.А., Ключевский А.В.* Мигрирующая сейсмичность в литосфере Байкальской рифтовой зоны: пространственно-временное и энергетическое распределение цепочек землетрясений // *Геология и геофизика*. – 2020. – Т. 61. – № 11. – С. 1577–1594. DOI: 10.15372/GiG2019164.
13. *Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А., Зуев Ф.Л., Какоурова А.А., Черных Е.Н., Брыжак Е.В.* Группирующаяся сейсмичность Прибайкалья // *Актуальные проблемы науки Прибайкалья* / отв. ред. И.В. Бычков, А.Л. Казаков. – Вып. 1. – Иркутск: ИГ СО РАН, 2015. – С. 139–143.
14. *Ключевский А.В., Какоурова А.А.* Исследование мигрирующей сейсмичности в литосфере Байкальской рифтовой зоны // *Доклады Академии наук*. – 2019. – Т. 488. – № 3. – С. 83–88. DOI: 10.31857/S0869-56524883313-318.
15. *Ключевский А.В., Какоурова А.А.* Основные критерии выделения цепочек землетрясений в литосфере Байкальского региона // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. – 2018. – Т. 23. – С. 64–73. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.64.
16. *Левина Е.А., Ружич В.В.* Изучение миграций сейсмической активности с помощью построения пространственно-временных диаграмм // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2015. – Т. 6. – № 2. – С. 225–244. DOI:10.5800/GT-2015-6-2-0178.
17. *Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б.* Модели распределений статистик непараметрических критериев согласия при проверке сложных гипотез с использованием оценок максимального правдоподобия. Ч. I // *Измерительная техника*. – 2009. – № 6. – С. 3–11.
18. *Луки А.А.* Пространственно-временные последовательности слабых землетрясений Гармского района // *Физика Земли*. – 1978. – № 2. – С. 25–37.
19. *Мельникова В.И., Середкина А.И., Гилева Н.А.* Пространственно-временные закономерности развития крупных сейсмических активизаций (1999–2007 гг.) в Северном Прибайкалье // *Геология и геофизика*. – 2020. – Т. 61. – № 1. – С. 119–134. DOI: 10.15372/GiG2019103.
20. *Мишарина Л.А., Солоненко А.В.* Влияние блоковой делимости земной коры на распределение сейсмичности в Байкальской рифтовой зоне // *Сейсмичность Байкальского рифта. Прогностические аспекты* / Отв. ред. О.В. Павлов, Л.А. Мишарина. – Новосибирск : Наука, 1990. – С. 70–78.
21. *Новопашина А.В.* Методика выявления миграции сейсмичности Прибайкалья средствами ГИС // *Геоинформатика*. – 2013. – № 1. – С. 33–36.
22. *Новопашина А.В., Саньков В.А.* Скорости медленных миграций сейсмической активности в Прибайкалье // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2010. – Т. 1. – № 2. – С. 197–203. DOI: 10.5800/GT-2010-1-2-0015.
23. *Программа для ЭВМ «Chain»*: свидетельство о гос. регистрации 2016661616 Рос. Федерация / А.А. Какоурова, А.В. Ключевский; заявитель и правообладатель ФГБУН ИЗК СО РАН. – № 2016519051; заявлено 24.08.2016; опубликовано 14.10.2016.
24. *Радзиминович Н.А., Очковская М.Г.* Выделение афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений Байкальской рифтовой зоны // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2013. – Т. 4. – № 2. – С. 169–186. DOI: 10.5800/GT-2013-4-2-0096.
25. *Семинский К.Ж., Радзиминович Я.Б.* Сейсмичность юга Сибирской платформы: пространственно-временная характеристика и генезис // *Физика Земли*. – 2007. – № 9. – С. 18–30. DOI: 10.1134/S1069351307090029.
26. *Способ определения цепочек землетрясений в эпицентральной поле сейсмичности*: патент на изобретение 2659334 Рос. Федерация / А.В. Ключевский, А.А. Какоурова, А.А. Ключевская, В.М. Демьянович, Е.Н. Черных; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИЗК СО РАН. – № 2017131805; заявлено 09.11.2017; опубликовано 29.06.2018. – Бюллетень № 19.
27. *Татьков Г.И., Тубанов Ц.А.* Развитие сейсмического процесса и мониторинг в близреальном времени зоны Южнобайкальского землетрясения 1999 года // *Вестник Бурятского государственного университета. Биология. География*. – 2004. – № 3. – С. 35–46.

28. Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. – 1993. – № 4. – С. 43–53.
29. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П. О сейсмогеодинамике линейных структур горного обрамления Скифско-Туранской плиты // Физика Земли. – 2006. – № 7. – С. 17–33. DOI: 10.1134/S1069351306070032.
30. Шерман С.И. Избранные труды. Тектонофизика разломообразования и сопутствующих процессов в литосфере. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2017. – 1476 с.
31. D'Agostino R.B. An omnibus test of normality for moderate and large sample size // *Biometrika*. – 1971. – Vol. 58. – Iss. 2. – pp. 341–348.
32. D'Agostino R., Pearson E.S. Tests for departure from normality. Empirical results for the distributions of b_2 and v_{b1} // *Biometrika*. – 1973. – Vol. 60. – Iss. 3. – pp. 613–622.
33. Dempster A.P., Laird N.M., Rubin D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm // *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. – 1977. – Vol. 39. – Iss. 1. – pp. 1–22.
34. King A.P., Eckersley R.J. *Statistics for Biomedical Engineers and Scientists. How to Visualize and Analyze Data*. – London : Academic Press, 2019. – 249 p.
35. Klyuchevskii A.V. Rifting Attractor Structures in the Baikal Rift System: Location and Effects // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2014. – Vol. 88. – pp. 246–256. DOI: 10.1016/j.jseae.2014.03.009.
36. Kolmogorov A.N. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione // *Giornale dell' Istituto Italiano degli Attuari*. – 1933. – Vol. 4. – No. 1. – pp. 83–91.
37. Mogi K. Migration of seismic activity // *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. – 1968. – Vol. 46. – pp. 53–74.
38. Novopashina A.V., Lukhneva O.F. The propagation velocity of seismic activity migrating along the directions of the geodynamic forces prevailing in the northeastern Baikal rift system, Russia // *Annals of geophysics*. – 2021. – Vol. 64. – Iss. 4. – SE436. DOI: 10.4401/ag-8654
39. Pollitz F., Vergnolle M., Calais E. Fault interaction and stress triggering of twentieth century earthquakes in Mongolia // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2003. – Vol. 108. – Iss. B10. – P. 2503. DOI:10.1029/2002JB002375.
40. Richter C.F. *Elementary Seismology*. – London : Freeman, 1958. – 768 p.
41. Scott D.V. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*. – New York : John Wiley & Sons, 1992. – 352 p.
42. Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*. – 1965. – Vol. 52. – No. 3/4. – pp. 591–611. DOI: 10.2307/2333709.
43. Titterton D.M., Smith A.F.M., Makov U.E. *Statistical Analysis of Finite Mixture Distributions*. Chichester : Wiley, 1987. – 243 p.
44. Wilcox R.R. *Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing*. Waltham : Academic Press, 2022. – 689 p.

References

1. Altae-Sayanskii filial FGBU FITS «Edinaya geofizicheskaya sluzhba Rossiiskoi akademii nauk» [Altai-Sayan Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”]. Available at: <http://www.asgsr.ru> (accessed 03.13.2022).
2. Baikal'skii filial FGBU FITS «Edinaya geofizicheskaya sluzhba Rossiiskoi akademii nauk» [Baikal Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”]. Available at: <http://www.seis-bykl.ru> (accessed 13.13.2022).
3. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Mathematical statistics tables]. Moscow: Nauka; 1983. 417 p.
4. Boyarov A.A. Randomizirovannyi algoritim stokhasticheskoi approksimatsii dlya klasterizatsii smesi gaussovykh raspredelenii pri razrezhenykh parametrah [Randomized Stochastic Approximation Algorithm for Clustering a Mixture of Gaussian Distributions with Sparse Parameters]. *Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike*. 2019;15(1):3–19.
5. Bykov V.G. Strain waves in the Earth: theory, field data, and models. *Russian Geology and Geophysics*. 2005;46(11):1176–1190.
6. Bykov V.G., Merkulova T.V. Earthquake migration and hidden faults in the Priamurye region. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2020;14(4):326–339. DOI: 10.1134/S1819714020040028.
7. Vikulin A.V. *Physics of wave seismic process*. Petropavlovsk-Kamchatsky: KGPU; 2003. 150 p.
8. Vikulin A.V., Akmanova D.R., Vikulina S.A., Dolgaya A.A. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012;3(1):1–18. DOI:10.5800/GT-2012-3-1-0058.
9. Vil'kovich E.V., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I. Volny tektonicheskikh deformatsii na krupnykh razlomakh [Tectonic deformation waves at large faults]. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR*. 1974;219(1):77–80.
10. Golenetskii S.I. Zemletryaseniya yuga Sibirskoi platformy po instrumental'nym seismologicheskim nablyudeniym [Earthquakes in the South of the Siberian Platform Based on Instrumental Seismological Observations]. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2001;(6):68–77.
11. Guberman Sh.A. Zemletryaseniya, neravnomenost' vrashcheniya Zemli i D-volny [Earthquakes, uneven rotation of the Earth and D-waves]. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR*. 1979;230(6):1314–1317.
12. Kakourova A.A., Kluchevskii A.V. Migrating seismicity in the lithosphere of the Baikal rift zone: spatial-temporal and energy distribution of earthquake chains. *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(11):1298–1312. DOI: 10.15372/GiG2019164.
13. Klyuchevskii A.V., Dem'yanovich V.M., Klyuchevskaya A.A., Zuev F.L., Kakourova A.A., Chernykh E.N., Bryzhak E.V. Gruppирование сейсмичности Прибайкалья [Grouping Seismicity of the Baikal Region]. In: *Aktual'nye problemy nauki Priбайкалья*. Bychkov I.V., Kazakov A.L., eds. Iss. 1. Irkutsk: IG SO RAN; 2015. pp. 139–143.
14. Klyuchevskii A.V., Kakourova A.A. Investigation of migrating seismicity in the lithosphere of the Baikal rift zone. *Doklady Earth sciences*. 2019;488(1):1128–1133. DOI: 10.1134/S1028334X19090265.
15. Klyuchevskii A.V., Kakourova A.A. The main criteria for allocating earthquake chains in the Baikal Region lithosphere. // *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2018;23:64–73. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.64.

16. Levina E.A., Ruzhich V.V. The seismicity migration study based on space-time diagrams. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015;6(2):225–244. DOI: 10.5800/GT-2015-6-2-0178.
17. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B. Distribution models for nonparametric tests for fit in verifying complicated hypotheses and maximum-likelihood estimators. Part 1. *Measurement techniques*. 2009;52(6):555–565. DOI: 10.1007/s11018-009-9330-3.
18. Lukk A.A. Prostranstvenno-vremennye posledovatel'nosti slabykh zemletryaseni Garm'skogo raiona [Spatiotemporal sequences of weak earthquakes in the Garm Region]. *Fizika Zemli*. 1978;(2):25–37.
19. Melnikova V.I., Seredkina A.I., Gileva N.A. Spatio-temporal patterns of the development of strong seismic activations (1999–2007) in the northern Baikal area. *Russian geology and geophysics*. 2020;61(1):96–109. DOI: 10.15372/RGG2019103.
20. Misharina L.A., Solonenko A.V. Vliyaniye blokovoi delimosti zemnoi kory na raspredeleniye seismichnosti v Baikal'skoi riftovoi zone [Influence of the block divisibility of the earth's crust on the distribution of seismicity in the Baikal rift zone]. In: *Seismichnost' Baikal'skogo rifta. Prognosticheskie aspekty*. Pavlov O.V., Misharina L.A., eds. Novosibirsk: Nauka; 1990. p. 70–78.
21. Novopashina A.V. Technique of the Cis-Baikal seismic activity migration isolation by GIS. *Geoinformatika*. 2013;(1):33–36.
22. Novopashina A.V., San'kov V.A. Velocities of slow migration of seismic activity in Cis-Baikal region. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010;1(2):197–203. DOI: 10.5800/GT-2010-1-2-0015.
23. Computer program Chain": certificate of state registration 2016661616 Rus. Federation. A.A. Kakourova, A.V. Kluchevskii; applicant and copyright holder: the Institute of the Earth's crust SB RAS. No. 2016519051; claimed 24.08.2016; published 14.20.2016.
24. Radziminovich N.A., Ochkovskaya M.G. Identification of earthquake aftershock and swarm sequences in the Baikal rift zone. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013;4(2):169–186. DOI: 10.5800/GT-2013-4-2-0096.
25. Seminskii K.Zh., Radziminovich Ya.B. Seismicity of the southern Siberian platform: spatiotemporal characteristics and genesis. *Izvestia, Physics of the Solid Earth*. 2007;43(9):726–737. DOI: 10.1134/S1069351307090029.
26. Sposob opredeleniya tsepochek zemletryaseni v eh pitsentral'nom pole seismichnosti [Method for determining earthquake chains in an epicentral seismicity field]: patent 2659334 Rus. Federation. A.V. Klyuchevskii, A.A. Kakourova, A.A. Klyuchevskaya, V.M. Dem'yanovich, E.N. Chernykh; applicant and patentee: the Institute of the Earth's crust SB RAS. No. 2017131805. Claimed 09.11.2017; published on 29.07.2018. Bulletin No. 19.
27. Tat'kov G.I., Tubanov Ts.A. Razvitiye seismicheskogo protsessa i monitoring v blizreal'nom vremeni zony Yuzhnobaikal'skgo zemletryaseniya 1999 goda [Development of the seismic process and monitoring in near real time of the zone of the South Baikal earthquake of 1999]. *Buryat State University Bulletin. Biology. Geography*. 2004;(3):35–46.
28. Ulomov V.I. Volny seismogeodinamicheskoi aktivizatsii i dolgosrochnyi prognoz zemletryaseni [Seismogeodynamic activation waves and longtermforecast of earthquakes]. *Fizika Zemli*. 1993;(4):43–53.
29. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P. Seismogeodynamics of lineament structures in the mountainous regions bordering the Scythian-Turan plate. *Izvestia, Physics of the Solid Earth*. 2006;42(7):551–566. DOI: 10.1134/S1069351306070032.
30. Sherman S.I. Izbrannyye trudy. Tektonofizika razlomoobrazovaniya i soputstvuyushchikh protsessov v litosfere [Selected works. Tectonophysics of Faulting and Associated Processes in the Lithosphere]. Irkutsk: IZK SO RAN; 2017. 1476 p.
31. D'Agostino R.B. An omnibus test of normality for moderate and large sample size. *Biometrika*. 1971;58(2):341–348.
32. D'Agostino, R., Pearson E.S. Tests for departure from normality. *Biometrika*. 1973;60(3):613–622.
33. Dempster A.P., Laird N.M., Rubin D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1977;39(1):1–22.
34. King A.P., Eckersley R.J. *Statistics for Biomedical Engineers and Scientists. How to Visualize and Analyze Data*. London: Academic Press; 2019. 249 p.
35. Klyuchevskii A.V. Rifting Attractor Structures in the Baikal Rift System: Location and Effects. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2014;88:246–256. DOI: 10.1016/j.jseaes.2014.03.009.
36. Kolmogorov A.N. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Giornale dell' Istituto Italiano degli Attuari*. 1933;4(1):83–91.
37. Mogi K. Migration of seismic activity. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. 1968;46:53–74.
38. Novopashina A.V., Lukhneva O.F. The propagation velocity of seismic activity migrating along the directions of the geodynamic forces prevailing in the northeastern Baikal rift system, Russia. *Annals of geophysics*. 2021;64(4):SE436. DOI: 10.4401/ag-8654.
39. Pollitz F., Vergnolle M., Calais E. Fault interaction and stress triggering of twentieth century earthquakes in Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003;108(B10):2503.
40. Richter C.F. *Elementary Seismology*. London: Freeman; 1958. 768 p.
41. Scott D.V. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*. New York: Wiley; 1992. 352 p.
42. Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*. 1965;52(3/4):591–611. DOI: 10.2307/2333709.
43. Titterton D.M., Smith A.F.M., Makov U.E. *Statistical Analysis of Finite Mixture Distributions*. Chichester: Wiley; 1987. 243 p.
44. Wilcox R.R. *Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing*. Waltham: Academic Press, 2022. 689 p.

Статья поступила в редакцию 16.12.2022, одобрена после рецензирования 20.03.2023, принята к публикации 01.04.2023.
The article was submitted 16.12.2022; approved after reviewing 20.03.2023; accepted for publication 01.04.2023.

Информация об авторах

Какоурова Анна Александровна

Кандидат геолого-минералогических наук
Младший научный сотрудник
ФГБУН Институт земной коры СО РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: anna2015@crust.irk.ru
Web of Science ResearcherID: ABG-2692-2020

Брыжак Евгений Вадимович

Кандидат геолого-минералогических наук
Старший научный сотрудник, заведующий лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмогеологии
ФГБУН Институт земной коры СО РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: bryzhak@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0001-7550-4447, SPIN-код: 3053-8213

Демьянович Владимир Михайлович

Ведущий инженер
ФГБУН Институт земной коры СО РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: vmdem@crust.irk.ru

Ключевская Анна Анатольевна

Кандидат биологических наук
Ведущий инженер
ФГБУН Институт земной коры СО РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: annakl@crust.irk.ru

Information about authors

Anna A. Kakourova

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences
Junior Researcher
The Institute of the Earth's crust SB RAS
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: anna2015@crust.irk.ru
Web of Science ResearcherID: ABG-2692-2020

Evgenii V. Bryzhak

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences
Senior Researcher, Head of the Laboratory of Engineering Seismology and Seismogeology
The Institute of the Earth's crust SB RAS
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: bryzhak@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0001-7550-4447, SPIN-код: 3053-8213

Vladimir M. Dem'yanovich

Lead Engineer
The Institute of the Earth's crust SB RAS
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: vmdem@crust.irk.ru

Anna A. Klyuchevskaya

Candidate of Biological Sciences
Lead Engineer
The Institute of the Earth's crust SB RAS
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: annakl@crust.irk.ru