

Геоинформационные критерии выделения квазилинейных цепочек миграции землетрясений в эпицентральных полях сложной геометрии и переменной плотности распределения толчков

© 2021 г. — А.А. Какоурова, А.В. Ключевский, В.М. Демьянович, А.А. Ключевская

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия; anna2015@crust.irk.ru; akluchev@crust.irk.ru

Поступила 18.12.2020 г.

Принята к печати 01.06.2021 г.

Ключевые слова: сейсмичность, эпицентры, цепочки землетрясений, имитационные события, геоинформационные критерии, Байкальская рифтовая система.

Аннотация: В рамках базовой модели мигрирующей сейсмичности численными методами определены основные геоинформационные критерии выделения квазилинейных цепочек землетрясений в эпицентральных полях сложной геометрии и переменной плотности распределения толчков. Развиваемая модель используется для исследования миграций очагов землетрясений и выявления зон скрытых сейсмоактивных разломов. Она дает статистические критерии присутствия квазилинейных цепочек сейсмомиграций и зон скрытых сейсмоактивных разломов в массивах различного объема сейсмологических данных как превышение на заданном уровне значимости средних чисел цепочек землетрясений, созданных случайным пространственно-временным распределением толчков. Установленные зависимости среднего числа выделенных цепочек случайных событий от размера выборки и формы площадки позволяют при заданных критериях «значимости», «представительности» и индекса сейсмомиграционной активности (ИСМА) выявить наличие сейсмомиграции и зон скрытых разломов. Разработанные методики, реализованные программы и патенты закладывают теоретическую и практическую основу ГИС-технологии выделения скрытых разломов и изучения миграций очагов землетрясений в литосфере Байкальской рифтовой системы. Поскольку основные закономерности формирования внутренней структуры континентальных разломных зон и сейсмичности определяются фундаментальными свойствами реализующейся в их пределах прогрессирующей деформации транспрессивного скалывания и являются едиными, развиваемые ГИС-технологии могут быть применены в других сейсмоактивных регионах.

Для цитирования: Какоурова А.А., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Геоинформационные критерии выделения квазилинейных цепочек миграции землетрясений в эпицентральных полях сложной геометрии переменной плотности распределения толчков // Геоинформатика. – 2021. – № 2. – С. 4–25. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-4-25.

Geoinformational criteria for distinguishing the quasi-linear chains of earthquake migration in epicentral fields of complex geometry and variable density of shocks distribution

© 2021 — А.А. Kakourova, A.V. Klyuchevskii, V.M. Dem'yanovich, A.A. Klyuchevskaya

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia; anna2015@crust.irk.ru; akluchev@crust.irk.ru

Received 18.12.2020

Accepted for publication 01.06.2021

Key words: *seismicity, epicenters, chains of earthquakes, simulation events, geoinformational criteria, Baikal rift system.*

Abstract: Within the framework of the basic model of migrating seismicity, the main geoinformation criteria for identifying quasi-linear chains of earthquakes in epicentral fields of complex geometry and variable density of shock distribution have been determined by numerical methods. The developed model is used to study the migrations of earthquake foci and identify zones of hidden seismically active faults: it provides statistical criteria for the presence of quasi-linear chains of seismicity migration and zones of hidden seismic faults in arrays of various volumes of seismological data as an excess at a given level of significance of the average numbers of chains of earthquakes, spatially temporal distribution of shocks. The established dependences of the average number of selected chains of random events on the sample size and site shape make it possible to reveal the presence of seismicity migration and zones of hidden faults under the given criteria of “significance”, “representativeness” and ISMA. The developed methods, implemented programs and patents lay the theoretical and practical basis for GIS technology for identifying hidden faults and studying the migrations of earthquake foci in the lithosphere of the Baikal rift system. Since the main laws governing the formation of the internal structure of continental fault zones and seismicity are determined by the fundamental properties of the progressive deformation of transpressive shearing realized within them and are uniform, the developed GIS technologies can be applied in other seismically active regions.

For citation: Kakourova A.A., Klyuchevskii A.V., Dem'yanovich V.M., Klyuchevskaya A.A. Geoinformational criteria for distinguishing the quasi-linear chains of earthquake migration in epicentral fields of complex geometry and variable density of shocks distribution. *Geoinformatika*. 2021;(2):4–25. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-4-25. In Russ.

Введение

Тектонические землетрясения являются следствием деформирования литосферы Земли. Верхняя часть литосферы представляет собой иерархическую систему хрупких жестких блоков, разделенных разломами и разломными зонами, находящуюся под воздействием геофизических полей различной природы и потоков флюида [51]. В условиях неоднородной разломно-блочной литосферы суперпозиция глобального напряжения сжатия с региональными и локальными полями напряжений приводит к градиентно-неоднородному деформированию геосреды со смещением блоков по зонам разломов и диссипацией сеймотектонической энергии в виде разрывных разрушений горных пород — землетрясений разных энергетических классов (магнитуд) — и в виде крипа. Полосы концентрации землетрясений чаще всего формируются в зонах контакта неоднородностей на границах крупных литосферных плит, но достаточно часто они наблюдаются вдали от границ плит в континентальных внутриплитных регионах, где системы разломов разной иерархии разделяют жесткие блоки литосферы и сохраняется наследственная геодинамическая связь с предыдущими тектоническими активизациями [42, 62]. На разных масштабных уровнях точечные элементы сейсмичности (эпицентры землетрясений) отражают фрактальную структуру разломно-блочной литосферы и градиентное перераспределение напряжений и деформаций, которые концентрируются на границах блоков в зонах разломов, инициируя и генерируя землетрясения: расположение полос эпицентров толчков позволяет выделить контуры границ литосферных плит Земли и контактов жестких блоков литосферы [61].

Современная компьютеризация позволяет получать, хранить и обрабатывать большие объемы инструментальных сейсмологических материалов, определять параметры очагов землетрясений и на их основе создавать и совершенствовать модели пространственно-временного и энергетического распределения землетрясений с целью развития фундаментальных представлений о природе и свойствах сейсмичности, о строении, тектонофизике и современной геодинамике литосферы. При этом многомерное пространство параметров очагов землетрясений диагностируется посредством ГИС-технологий путем совместного анализа моделей, феноменологии и экспериментальных материалов с использованием процедур и понятий скейлинга, самоподобия, пространственно-временной корреляции, откликов на возбуждение, когерентности, синхронизации, предсказуемости на различных масштабах и миграции очагов землетрясений [1, 44, 62]. Повышенное внимание к изучаемой нами проблеме миграции очагов землетрясений [15, 28] обусловлено тем, что в этом явлении имеется потенциальная возможность прогноза сильных землетрясений достаточно простыми методами мони-

торинга сейсмичности: локализация и динамика процесса миграции очагов землетрясений хорошо вписываются в рамки модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (модель ЛНТ) с подготовкой и реализацией сильного землетрясения [39].

Явление миграции очагов землетрясений стало широко известно после публикации Ч.Ф. Рихтера [50], в которой показано изменение положения эпицентров сильных землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома в Турции. В рамках этого явления сведения о квазилинейных цепочках последовательных во времени сильных толчков стали привлекаться для прогноза землетрясений, характеристики современной геодинамики литосферы и изучения медленных деформационных процессов [3, 5, 8, 9, 16, 30, 31, 34, 36, 40, 41, 43, 49, 55, 56, 58, 63]. В общем виде под цепочкой миграции землетрясений понимается квазилинейное одностороннее перемещение положения последовательных во времени эпицентров толчков на поверхности литосферы. В нашей работе используется термин «сейсмомиграция» [31, с. 225], отражающий явление пространственно-временной односторонней и статистически значимой направленности распространения последовательных во времени и пространстве сейсмических событий в межблочных средах иерархически упорядоченной литосферы Земли. С позиций тектонофизики и текущей геодинамики это явление можно связать с направленной генерацией очагов землетрясений вдоль зоны сеймотектонической деструкции геологической среды, обусловленной, как полагают [3, 7, 37, 54], прохождением по разломам медленных деформационных волновых фронтов и пакетов (солитонов) [4, 6, 35]. Поскольку область сеймотектонической деструкции является обычно квазилинейной разломной зоной, такое перемещение сейсмических событий может отражать поступательное направленное в одну сторону изменение расположения очагов землетрясений вдоль зоны разлома, вызванное продвижением фронта или пакета деформационного воздействия.

Современная компьютеризация и ГИС-технологии дают возможность детального изучения сейсмомиграций на большом фактическом материале, если представления о миграции, как о поступательном перемещении гипоцентров сейсмических событий вдоль зоны разлома, перенести на многочисленные слабые толчки. В этом случае необходимо решить проблему формализованного определения и выделения квазилинейных цепочек землетрясений, которую можно разделить на две части: а) задачу определения и выделения цепочки в эпицентральной поле землетрясений по материалам каталога землетрясений [29, 53]; б) задачу определения критериев выделения цепочек миграции при переменных и неоднородных входных данных и присущей реальной сейсмичности стохастичности (например, из-за случайного распределения погрешностей в определении координат эпицентров

толчков). В данной работе в рамках имитационной базовой модели мигрирующей сейсмичности определены основные геоинформационные критерии выделения цепочек землетрясений в эпицентральных полях различной геометрии и структуры распределения толчков Байкальской рифтовой системы относительно стохастического распределения «эпицентров» имитационных событий. В качестве прототипа пространственного распределения имитационных событий использована сейсмичность Байкальской рифтовой системы.

Основные свойства сейсмичности Байкальской рифтовой системы

Полноценная инструментальная регистрация землетрясений в Байкальском регионе началась во второй половине XX-го столетия после серии сильных и катастрофических землетрясений, потрясших Восточную Сибирь и Монголию (Мондинское, апрель 1950 г., магнитуда $M=7,0$; Муйское, июнь 1957 г., $M=7,6$; Гоби-Алтайское, декабрь 1957 г., $M=8,1$; Средне-Байкальское, август 1958 г., $M=6,8$). Созданная сеть региональных и опорных сейсмических станций с гальванометрической записью осуществляла регистрацию представителей землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 8$ с середины 1960-х гг. [60]. Условия мониторинга почти не изменялись до середины 1990-х гг., когда на смену аналоговым пришли цифровые системы регистрации, хранения и обработки сейсмологической информации [2]. Историческая сейсмичность региона достаточно высока, и в «Каталоге землетрясений Прибайкалья» с 1740 г. представлено более двухсот сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 5,0$. Можно отметить, что в Байкальском регионе сильные землетрясения имеют пониженный вес в распределении толчков по классам: наклон графика повторяемости имеет значение $\gamma \approx -0,51$ [21, 24], в то время как в соседней Монголии $\gamma \approx -0,45$ [12].

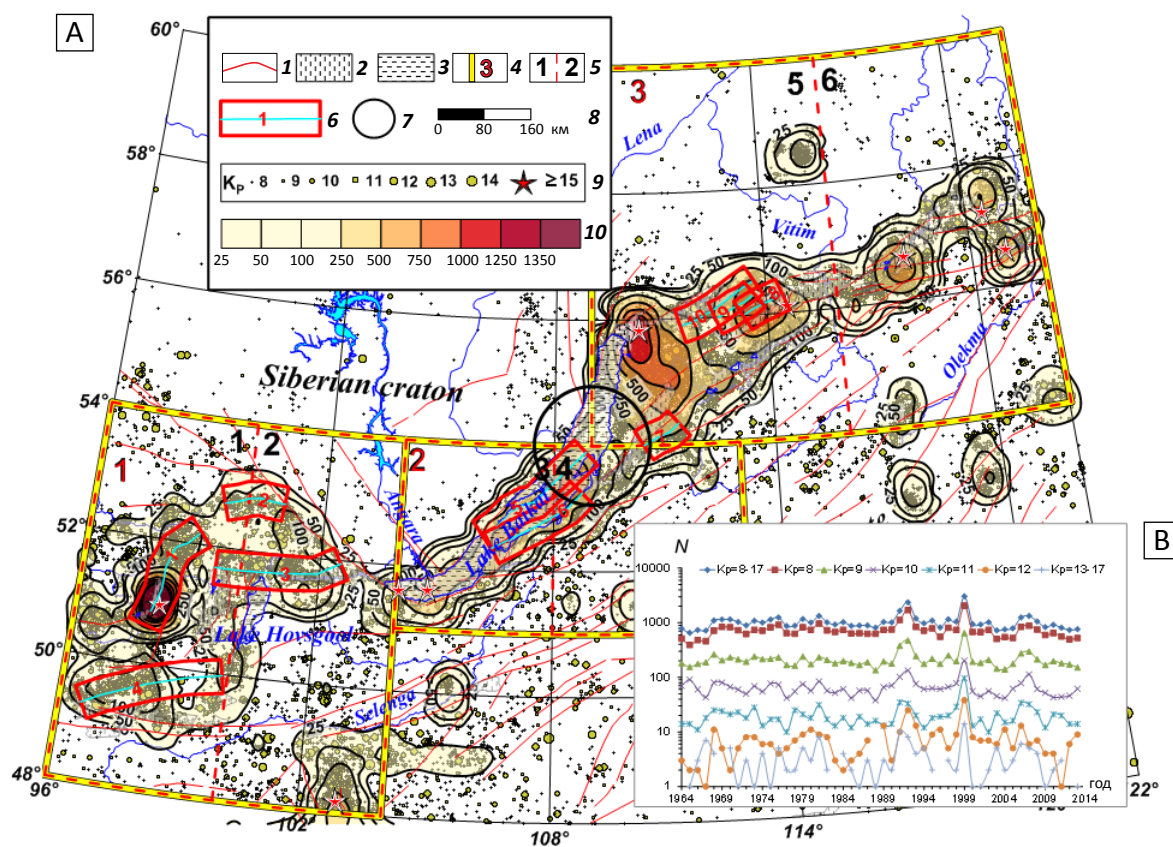
В процессе полувекового сейсмологического мониторинга было установлено, что основная масса землетрясений происходит в пределах Байкальской рифтовой системы, протянувшейся системой рифтовых впадин и обрамляющих их разломных структур из северо-западной Монголии вдоль оз. Байкал к южной Якутии на расстояние почти 2200 км. Как известно [32], Байкальская рифтовая система занимает Саяно-Байкальское поднятие, являющееся самой возвышенной частью восточно-сибирских и северо-монгольских нагорий и поднимающееся на флангах до 3000–3500 м над уровнем моря. Байкальская рифтовая система активно развивается с олигоцена, и ее контуры проявляются в распределении эпицентров землетрясений (рис. 1). На юго-западном фланге Байкальской рифтовой системы (район 1, $\varphi = 48,0^\circ - 54,0^\circ \text{ N}$, $\lambda = 96,0^\circ - 104,0^\circ \text{ E}$) эпицентры толчков рассеяны по территории, что подтверждается повышенным значением фрактальной клеточной размерности $D_0 \approx 1,60$ [26]. Такая

«площадная» геометрия распределения толчков обусловлена сеймотектонической активизацией разломов субширотной и субдолготной ориентировки [32]. Эпицентрально поле центральной части (район 2, $\varphi = 51,0^\circ - 54,0^\circ \text{ N}$, $\lambda = 104,0^\circ - 113,0^\circ \text{ E}$) и северо-восточного фланга БРС (район 3, $\varphi = 54,0^\circ - 60,0^\circ \text{ N}$, $\lambda = 109,0^\circ - 122,0^\circ \text{ E}$) имеет вид широкой полосы, расположенной к юго-востоку и югу от Сибирской платформы в зоне контакта мощного кратона и Амурской плиты. Клеточная размерность сейсмичности этих территорий $D_0 < 1,5$ [26], что указывает на полосовую сжатость поля эпицентров. Такая «полосовая» геометрия распределения толчков обусловлена активизацией рифтогенных разломов северо-восточного субширотного простирания [38, 60]. С целью детальных исследований сейсмичности три района обычно делятся нами пополам по долготе $\lambda = 100,0^\circ$, $\lambda = 108,0^\circ$ и $\lambda = 116,0^\circ$ на шесть участков, нумерация которых начинается с юго-запада [18, 21]. Распределение эпицентров землетрясений по участкам характеризуется понижением клеточной размерности от первого участка $D_0 \approx 1,60$ к шестому $D_0 \approx 1,37$ [26], т.е. трансформацией поля эпицентров с юго-запада на северо-восток Байкальской рифтовой системы от рассеянной площадной геометрии к сжатой полосовой структуре. Детальный анализ показал, что эпицентры землетрясений формируют полосы, корреспондирующие с зонами основных сейсмогенных разломов, разделяющих блоки жесткой литосферы [38]. Полосы эпицентров толчков имеют преимущественно северо-восточную ориентировку, и такое генеральное распределение эпицентров землетрясений трактуется как ось зоны современной деструкции литосферы Байкальской рифтовой системы [63].

Одной из главных особенностей сейсмичности Байкальской рифтовой системы является группирование землетрясений с реализацией большого количества афтершоков и роевых толчков [25], оказывающих сильное влияние на картину пространственно-временного и энергетического распределения сейсмических событий. Пространственно-временные максимумы чисел землетрясений создаются либо афтершоками сильных землетрясений, либо продолжительными роевыми сериями толчков (см. рис. 1, 2): за время инструментальных наблюдений по количеству событий эти максимумы в несколько раз превышают среднегодовой уровень сейсмичности данной территории. Годовая скорость потока землетрясений высока на северо-востоке Байкальской рифтовой системы и примерно одинакова в центральной части и на юго-западе региона. Выделяющиеся на графиках (рис. 2) максимумы годовых чисел толчков в районе 1 и участке 1 (1991–1992 гг.), районе 2 и участке 3 (1999 г.), районе 3 и участке 5 (1999 г.) обусловлены афтершоками Бусийнгольского (27.12.1991; $K_p = 16,2$; магнитуда $M_{\text{ЛН}} = 6,5$; $\varphi = 50,98^\circ \text{ N}$, $\lambda = 98,08^\circ \text{ E}$), Южно-Байкальского (25.02.1999; $K_p = 14,5$; $M_{\text{ПСП}} = 6,0$; $\varphi = 51,64^\circ \text{ N}$,

Рис. 1. Карта эпицентров и изолиний плотности эпицентров 52700 землетрясений Байкальского региона с $K_p \geq 8$ (1964–2013 гг.) (А) Графики годовых чисел N землетрясений Байкальского региона с $K_p \geq 8$ и выборки толчков отдельных классов (В)

Fig. 1. Map of epicenters and isolines of epicenters density for 52700 earthquakes in the Baikal region with $K_p \geq 8$ (1964–2013) (A). Graphs of annual numbers N earthquakes of Baikal region with $K_p \geq 8$ and samples of shocks of individual classes (B)

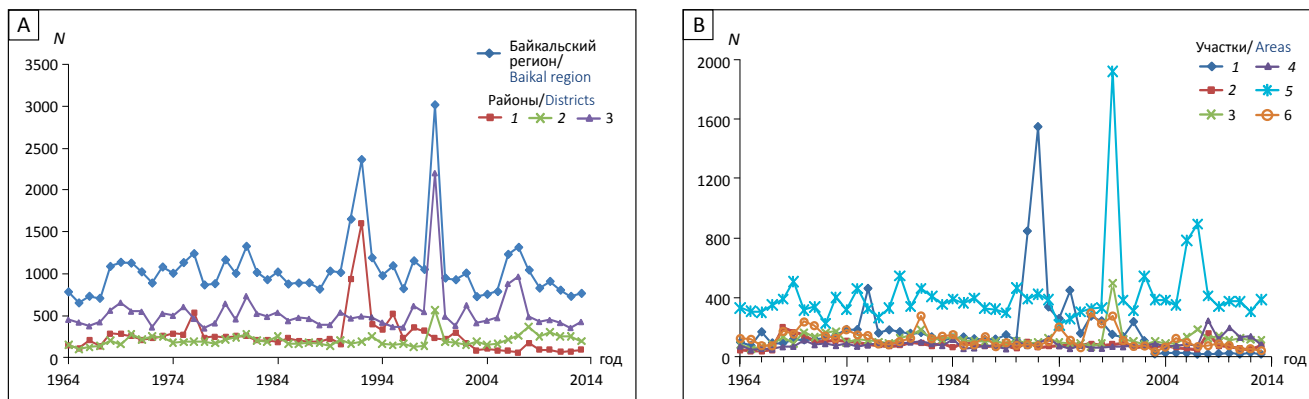


1 — основные разломы, 2 — впадины, 3 — озера, 4 — границы и номера районов, 5 — границы и номера участков, 6 — границы и номера десяти разломных зон, привлеченных для построения карты «аддитивной» сейсмичности, 7 — площадка круглой формы радиусом $R = 100$ км (центр круга имеет координаты $\varphi = 54,0^\circ$ N, $\lambda = 109,0^\circ$ E), 8 — масштабная линейка, 9 — эпицентры землетрясений представительных энергетических классов, 10 — шкала плотности эпицентров в площадках $0,2^\circ \times 0,3^\circ$

1 — main faults, 2 — depressions, 3 — lakes, 4 — boundaries and numbers of regions, 5 — boundaries and numbers of sections, 6 — boundaries and numbers of ten fault zones involved in constructing a map of “additive” seismicity, 7 — a round area radius $R = 100$ km (the center of the circle has coordinates $\varphi = 54,0^\circ$ N, $\lambda = 109,0^\circ$ E), 8 — scale bar, 9 — epicenters of earthquakes of representative energy classes, 10 — scale of density of epicenters in areas $0,2^\circ \times 0,3^\circ$

Рис. 2. Годовые скорости потока землетрясений в Байкальском регионе и трех районах (А), шести участках (В)

Fig. 2. Annual rates of earthquake flow in the Baikal region and three regions (A), six areas (B)



$\lambda=104,82^\circ$ E) и Кичерского (21.03.1999; $K_p=14,6$; $M_{\text{PSP}}=6,0$; $\varphi=55,83^\circ$ N, $\lambda=110,34^\circ$ E) землетрясений. Видно, что афтершоки этих землетрясений создают максимумы чисел толчков во всех диапазонах энергетических классов (см. рис. 1А).

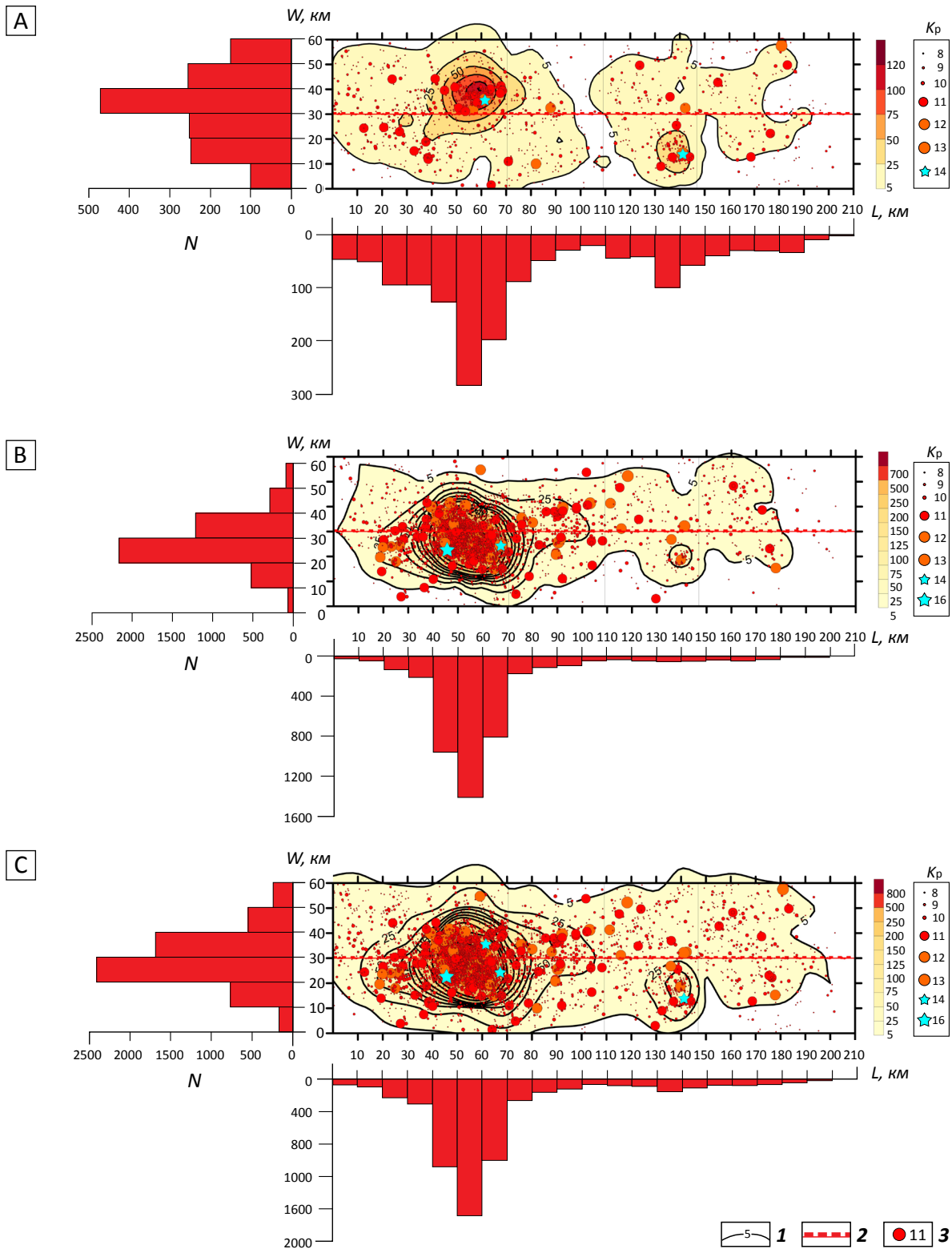
В зонах разломов и очаговых областях сильных землетрясений Байкальского региона обычно реализуется много афтершоков, что приводит к ускоренной релаксации геосреды [17, 19, 20, 22]. В разломных зонах серии афтершоков создают локальные максимумы плотности толчков согласно пространственно-временному распределению сильных землетрясений. Чтобы показать главные особенности изменения эпицентральных полей разломов с течением времени, на рис. 3 представлены три карты-схемы эпицентров и изолиний плотности эпицентров землетрясений с $K_p \geq 8$ в площадках 10×10 км², произошедших в зоне Белино-Бусийнгольского разлома за разные интервалы времени. Разлом расположен на юго-западном фланге Байкальской рифтовой системы, и сейсмичность зоны разлома изучена достаточно полно [11, 13, 17]. В 1991 г. здесь произошло землетрясение с магнитудой $M_{\text{ЛН}}=6,5$, афтершоки которого сильно изменили картину распределения толчков, создав ядро высокой плотности эпицентров в южной части разлома (см. рис. 1). Приведенные на рисунке 3 карты-схемы получены за два последовательных интервала времени — до и после сильного землетрясения 27.12.1991 г. (1964–1990 гг. (А), 1991–2013 гг. (В)), а также для сейсмичности за 1964–2013 гг. (С). Карты-схемы сейсмичности зоны разлома представлены в виде прямоугольной дизъюнктивной зоны, длина которой равна протяженности Белино-Бусийнгольского разлома ($L \sim 202$ км), а ширина составила $W=60$ км (± 30 км от линии сместителя на поверхности). Четыре сегмента Белино-Бусийнгольского разлома, немного различающиеся направленностью в географических координатах на рис. 1, в линейных координатах L и W собраны в один прямоугольник с соответствующим перерасчетом координат сегментов разлома и эпицентров толчков (см. рис. 3). На картах-схемах отсчет L и W ведется от юго-восточного угла разломной зоны. На рис. 3А видно, что плотность эпицентров землетрясений за 1964–1990 гг. невысока, толчки рассеяны по зоне разлома, а максимумы плотности обусловлены афтершоками достаточно сильных землетрясений 1974 ($K_p=14$, $\varphi=51,79^\circ$ N, $\lambda=98,47^\circ$ E) и 1976 ($K_p=14$, $\varphi=51,15^\circ$ N, $\lambda=97,97^\circ$ E) годов. Эти максимумы создают две зоны повышенной плотности эпицентров толчков, которые видны на гистограммах распределения чисел землетрясений N вдоль разлома (на вертикальных полосах 60×10 км²) на расстоянии 50–70 и 130–140 км. На остальной части разлома землетрясения рассредоточены на уровне около 50 толчков в полосах. Поперек зоны разлома (на горизонтальных полосах 202×10 км²) распределение чисел землетрясений N имеет близкий к нормальному

вид с максимумом около линии разлома. Во второй временной интервал (1991–2013 гг.) произошла существенная трансформация эпицентрального поля, и оно оказалось подчинено влиянию сильного землетрясения 27.12.1991 г., афтершоки которого сформировали максимум плотности эпицентров в южной части разлома (рис. 3В). На гистограммах видно, что максимум N в $40 \div 70$ км от южной границы разлома значительно превышает уровень чисел толчков в остальной зоне разлома. Распределение N поперек зоны разлома имеет близкий к нормальному вид. В распределении землетрясений за 1964–2013 гг. видно доминирование второго временного интервала с максимумом плотности чисел землетрясений в южной части разлома, который выделяется на гистограммах распределения чисел землетрясений N поперек и вдоль зоны разлома (рис. 3С). Поперек зоны разлома гистограмма имеет близкий к нормальному распределению вид с максимумом около линии разлома, а вдоль зоны разлома максимум N расположен в $40 \div 70$ км от южной границы разлома; относительно максимума N сейсмичность остальной части разломной зоны невысока.

Представленные на рис. 3 карты-схемы получены за 28, 22 и 50 лет инструментальных наблюдений, что существенно меньше сейсмического цикла юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы, равного $T \approx 360$ годам [23]. Поскольку даже внутри небольшого периода инструментальных наблюдений поле эпицентров значительно варьирует, то следует полагать, что карты-схемы распределения эпицентров землетрясений, полученные за полный сейсмический цикл, могут претерпеть изменения относительно современного вида. К сожалению, пока нет методики, чтобы адекватно воспроизвести основные черты поля эпицентров зоны разлома за сейсмический цикл при оптимально согласованной аппроксимации экспериментальных материалов. В качестве первого приближения решения этой задачи нами использована «аддитивная» сейсмичность, накопленная в зонах десяти основных сейсмоактивных разломов Байкальской рифтовой системы за 50 лет мониторинга (см. рис. 1, табл. 1). Применение подхода продиктовано тем, что при суперпозиции полей эпицентров стохастические проявления сейсмичности нивелируются, а регулярная компонента структуры разломной сейсмичности усиливается. Зона Белино-Бусийнгольского разлома (см. рис. 3С) взята за основу, на которую были последовательно добавлены эпицентры землетрясений из девяти прямоугольных зон разломов трех районов Байкальской рифтовой системы (см. рис. 1, табл. 1). Чтобы установить главные черты распределения разломной сейсмичности, мы устранили влияние разной длины разломов путем нормировки координат эпицентров толчков надлинукаждого разлома L , по оси W координаты не изменялись. Совмещение границ добавленных зон-прямоугольников осуществлено по юго-

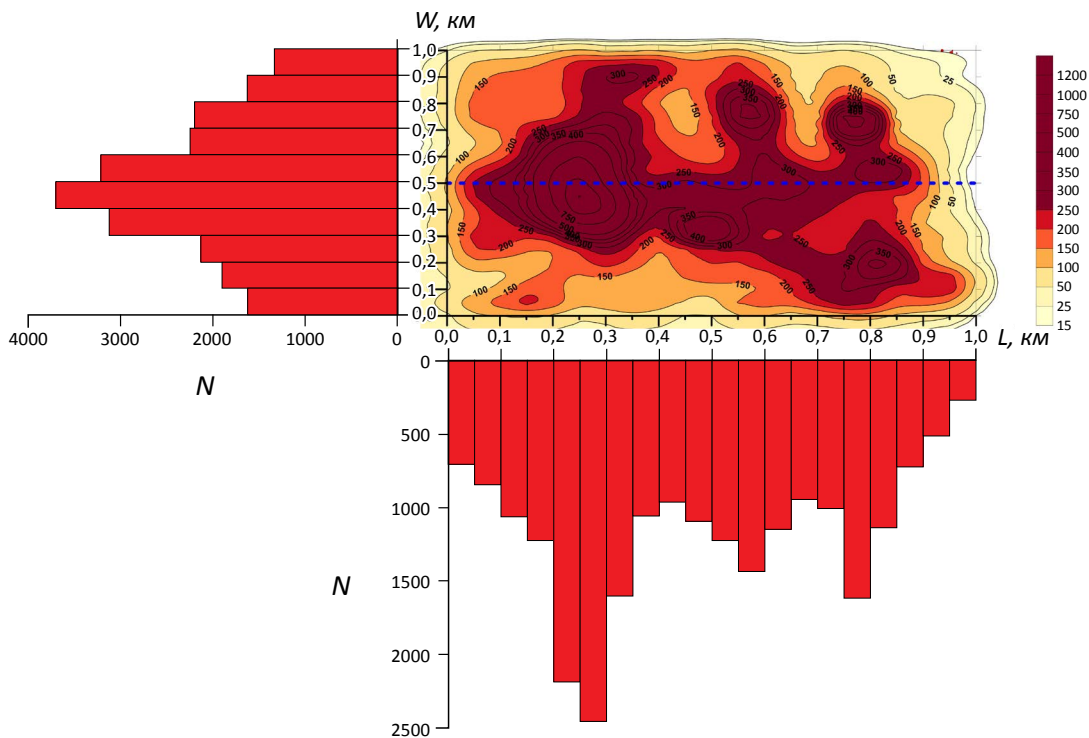
Рис. 3. Карты-схемы эпицентров и изолиний плотности эпицентров землетрясений с $K_p > 8$ в площадках $10 \times 10 \text{ км}^2$, произошедших в зоне Белино-Бусийнгольского разлома за 1964–1990 (А), 1991–2013 (В) и 1964–2013 (С) годы

Fig. 3. Schematic map of epicenters and isolines of epicenters density of earthquakes with $K_p > 8$ in areas $10 \times 10 \text{ km}^2$ occurred in the Belino-Busiynogolsky fault zone in 1964–1990 (A), 1991–2013 (B) and 1964–2013 (C)



1 — изолинии плотности эпицентров, **2** — линия разлома, **3** — эпицентры землетрясений.
 Гистограммы характеризуют распределение чисел землетрясений N вдоль и поперек зоны разлома в полосах шириной 10 км
1 — isolines of density of epicenters, **2** — fault line, **3** — epicenters of earthquakes.
 The histograms characterize the distribution of the numbers of earthquakes N along and across the fault zone in strips 10 km wide

Рис. 4. Карта-схема эпицентрального поля «аддитивной» сейсмичности разломной зоны
 Fig. 4. Schematic map of the epicentral field of the "additive" seismicity of the fault zone



Гистограммы характеризуют распределение чисел землетрясений N вдоль и поперек зоны разлома
 The histograms characterize the distribution of the number of earthquakes N along and across the fault zone

восточному углу разломной зоны при $L=0$ км, $W=0$ км. Построенная карта плотности эпицентров толчков показала (рис. 4), что в отличие от зоны одного Белино-Бусийнгольского разлома (см. рис. 3С), на карте-схеме «аддитивной» сейсмичности вдоль линии разлома имеется несколько максимумов плотности эпицентров, а на остальной территории поле эпицентров довольно равномерно рас-сеяно. На гистограмме видно, что в распределении чисел землетрясений вдоль зоны разлома различия в уровне N уменьшились и стали менее резкими. Так, отношение максимумов N уменьшилось до $2457/1614 \approx 1,5$, тогда как в зоне Белино-Бусийнгольского разлома оно равно $1693/153 \approx 11,1$ (см. рис. 3С). Отношение максимума к минимуму стало равно $2457/265 \approx 9,3$ при $1693/22 \approx 77$ в зоне Белино-Бусийнгольского разлома, а отношение максимума к среднему значению N равно $2457/1159 \approx 2,1$ и $1693/291 \approx 5,8$ соответственно. Поперек зоны разлома гистограмма имеет вид нормального распределения чисел землетрясений.

Методика исследований и программы

Из представленного выше описания пространственно-временного распределения землетрясений Байкальской рифтовой системы и разломных зон видно, что плотность эпицентров и скорость потока толчков значительно варьируют в площадках одной формы и размера. Кроме того,

в работах [14, 27, 29] показано, что число выделенных цепочек землетрясений зависит от количества толчков в используемой выборке данных, причем и в чисто случайной генерации модельных событий имеются цепочки «миграций». Эти две причины не позволяют осуществить непосредственное сопоставление параметров сейсмомиграций (число цепочек, плотность цепочек, азимуты цепочек и пр.) различных территорий как показателей-характеристик современной геодинамики литосферы. Для корректного сопоставления параметров сейсмомиграций разных территорий количество толчков N в выборках данных следует привести к «нормированному» виду, учитывающему критерии выделения цепочек. Пример такой «нормировки» данных имеется в работе [52], когда карты сейсмической активности строились по методу «постоянной точности» при сохранении постоянного количества землетрясений за счет изменения размеров используемых площадок осреднения. Современные ГИС-технологии позволяют развить аналог метода «постоянной точности» с целью сопоставления параметров сейсмомиграций, определенных на различных территориях и в разные отрезки времени, как показателей миграционной активности литосферы при заданных критериях выделения цепочек землетрясений. При численном решении этой задачи мы базируемся на двух модельных представлениях эпицентральных полей, описанных

Табл. 1. Разломы Байкальского региона, землетрясения зон которых использованы в карте «аддитивной» сейсмичности
 Tab. 1. Faults in the Baikal region, earthquakes in the zones of which were used in the map of “additive” seismicity

№ на карте (см. рис. 1)	Название разлома	Генетический тип	Длина L , км	Ориентировка	Обоснование активности
1	Белино-Бусийнгольский	Сбросо-сдвиг	200	ССВ	ПСС Бусийнгольская $M = 7,0$, землетрясение 1991 г., $M = 6,5$
2	Окинский	Сбросо-сдвиг	120	В	ПСС Окинские $M = 7,5$, ПСС Шулуи $M = 7,2$
3	Тункинский	Сбросо-сдвиг	200	В	Землетрясение 1950 г., $M = 7,0$: ПСС Аршан, Торы $M = 7,3$
4	Цэцэрлэгский	Взбросо-сдвиг	300	СВ	Землетрясение 1905 г., $M = 7,6$
5	Ольхонский	Сброс	180	СВ	Отдельные ПСД, землетрясения с $M = 6,5$
6	Морской	Сбросо-сдвиг	180	СВ	Землетрясение 1959 г., $M = 6,8$
7	Улан-Бургинский	Сброс	100	СВ	Отдельные ПСД
8	Уколкитский	Сбросо-сдвиг	140	СВ	ПСС Янчуканская $M = 7,2$
9	Ковоктинский	Сбросо-сдвиг	75	СВ	ПСС Ковокта $M = 7,5$, ПСС Итыкит $M = 7,1$
10	Муяканский	Сбросо-сдвиг	120	СВ	ПСС Муяканская $M = 7,5$

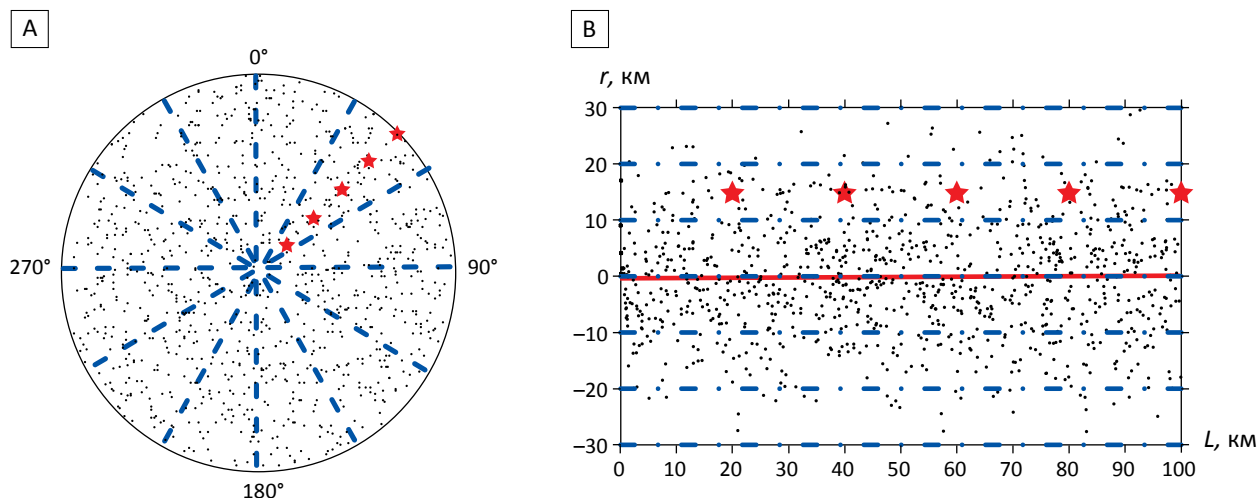
Примечание: ПСС — палеосейсмоструктура, ПСД — палеосейсмодислокация, M — магнитуда [10, 32]

выше и отражающих основные свойства пространственно-временного распределения сейсмичности Байкальской рифтовой системы. В первой модели на площадке круглой формы имитационные события имеют площадное, рассеянное по территории поле «эпицентров», как на юго-западном фланге Байкальской рифтовой системы. Эта модель в первом приближении отражает расположение эпицентров землетрясений, создаваемое совокупностью нескольких зон сейсмоактивных разломов разной ориентировки. Во второй модели на площадке прямоугольной формы имитационные события локализованы в центральной части площадки, там, где проходит «разлом». Такое распределение эпицентров землетрясений наблюдается в центральной части и на северо-восточном фланге Байкальской рифтовой системы, а также в большинстве разломных зон. Эта модель в первом приближении отражает структуру эпицентрального поля зоны одного сейсмоактивного разлома или единой зоны деструкции литосферы.

В общем виде под цепочкой миграции землетрясений понимается и исследуется явление квазилинейного одностороннего изменения расположения последовательных во времени эпицентров толчков на поверхности литосферы, происходящее под воздействием каких-то геофизических и/или геодинамических (например, при миграции флюида, изменении НДС) процессов. Исходя из этой формулировки и имеющихся в каталоге параме-

тров, нами разработан способ определения цепочек землетрясений [53]. Согласно формуле патента, по материалам из «Каталога землетрясений Прибайкалья» строится карта эпицентров землетрясений исследуемой территории и создается карта-схема векторов-азимутов эпицентров последовательных во времени толчков. По схеме векторов-азимутов в заданном угловом секторе азимутального анализа q° определяют число направленных в азимуте α последовательных во времени (друг за другом) землетрясений n . Если $n \geq 3$, то эту последовательность толчков определяют как цепочку землетрясений в эпицентральной зоне сейсмичности данной территории и вносят в каталог цепочек. Цепочками считаются внесенные в каталог совокупности из $n \geq 3$ последовательных во времени (друг за другом) землетрясений при условии нахождения толчков в заданном угловом секторе допустимой нелинейности $\pm q/2^\circ$ относительно азимута α .

Чтобы определить критерии выделения цепочек миграции в зависимости от объема N выборки толчков в площадке (блоке литосферы), количества n землетрясений в цепочке, размеров угла сектора допустимой нелинейности цепочки q по азимуту α миграции и расположения r цепочки в зоне разлома, разработана имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности [14, 27]. При численной реализации модели «эпицентры» синтезированных N событий генерируются на поверхности площадок круглой и прямоугольной формы. В круглой пло-

Рис. 5. Примеры модельных площадок, в которых сгенерированы $N = 1000$ событийFig. 5. Examples of model sites in which $N = 1000$ events were generated

А — площадка круглой формы, в которой события распределены случайно с постоянной плотностью вероятности. Площадка разделена на 12 секторов размером $q = 30^\circ$, в азимуте $\alpha = 45^\circ$ вставлена цепочка из $n = 5$ событий (показаны звездочками). В — площадка прямоугольной формы, в которой события распределены вдоль разлома (красная линия в середине площадки) случайно с постоянной плотностью вероятности, а поперек разлома — по нормальному закону. Площадка разделена на шесть полос шириной $h = 10$ км со вставленной цепочкой из $n = 5$ событий (показаны звездочками) на расстоянии $r = 15$ км от линии разлома

A — a round-shaped area in which events are distributed with a constant probability density. The site is divided into 12 sectors of size $q = 30^\circ$, in azimuth $\alpha = 45^\circ$ a chain of $n = 5$ events is inserted (shown by asterisks); B — rectangular area, in which events are distributed along the fault (red line in the middle of the area) with a constant probability density, and across the fault according to the normal law. The site is divided into six stripes $h = 10$ km wide with an inserted chain of $n = 5$ events (shown by asterisks) at a distance of $r = 15$ km from the fault line

щадке радиусом $R = 100$ км события генерируются в виде случайного поля с постоянной плотностью вероятности, и для последующих процедур площадка разбивается на секторы заданного углового размера q (рис. 5А). С целью определения критериев выделения цепочек в заданном азимуте α в сектор углового размера q вставляется имитационная цепочка последовательных событий (выборка размером $n \geq 3$), моделирующая миграцию очагов землетрясений вдоль зоны разлома; имеется возможность вставить несколько имитационных цепочек с разными азимутами, моделирующих сейсмомиграции вдоль зон нескольких разломов. В прямоугольной площадке длиной 100 и шириной 60 км (± 30 км от линии разлома, делящей продольно площадку пополам) N событий генерируются в виде случайного поля с постоянной плотностью вероятности, а поперек разлома задано нормальное распределение (рис. 5В). Поскольку погрешности определения координат эпицентров толчков в Байкальском регионе составляют около 10 км [59], то прямоугольная площадка делится продольно на шесть полос шириной 10 км. При определении критериев выделения цепочек в одну из полос на расстоянии $r = 5$ (15 или 25) км от линии разлома вставляется имитационная цепочка длиной $n \geq 3$ событий, моделирующая миграцию очагов землетрясений параллельно разлому.

При определении критериев выделения цепочек миграции для получения каждого решения

в анализе использовалось постоянное количество 10^5 событий, число событий в сериях генераций N изменялось от 10 до 10^3 . В программном цикле выполнены серии генераций (от $n_g = 100 = 10^5/10^3$ до $n_g = 10000 = 10^5/10$) наборов данных разной длины N_g , в эти массивы «точек-эпицентров» вставлены имитационные цепочки из $n = 3 \div 10$ событий и заданы величины α , q и r [47, 48]. В обосновании алгоритма лежит центральная предельная теорема теории вероятностей, согласно которой сумма достаточно большого количества независимых случайных величин примерно одинакового масштаба имеет распределение, близкое к нормальному виду. Результаты вычислений суммировались по секторам или полосам, были осуществлены необходимые статистические оценки и определены основные критерии выделения цепочки миграции. Критерий «значимости» выделения цепочек $\Delta p = (N_p - M)/\sigma$ определен как отношение разности количества накопленных событий N_p в секторе (или полосе) с цепочкой и математического ожидания M к стандартному отклонению σ и характеризует долю превышения разности $N_p - M$ в значениях σ . Критерий «представительности» определен как среднее число землетрясений $N_{пр}$, необходимых для выделения цепочек, и позволяет в неоднородном эпицентральной поле толчков реализовать выделение цепочки определенной длины n при заданном критерии «значимости» Δp .

При расчете частоты реализации цепочек для получения каждого решения использовалось постоянное количество 10^6 событий, число событий в сериях генераций N изменялось от 10^2 до 10^5 . В программном цикле выполнены серии генераций (от $n_g = 10 = 10^6/10^5$ до $n_g = 10000 = 10^6/10^2$) наборов данных разной длины N и осуществлена процедура определения и выделения цепочек миграций в секторе допустимой нелинейности $q = 10^\circ$ [46–48]. Для реализации алгоритмов на языке Perl и Fortran написаны четыре основные программы, все действия которых выполняются в циклах с задаваемым числом итераций: «Migrations», «Chain», «Migrations_fault_y» и «Azimut» [45–48]. Программы «Migrations» и «Migrations_fault_y» предназначены для определения критериев выделения цепочек в случайном поле эпицентров сейсмических и синтезированных событий в площадке круглой и прямоугольной формы. Для генерации случайно распределенных координат «эпицентров» модельных событий в обеих программах использовался генератор случайных чисел. При моделировании нормального распреде-

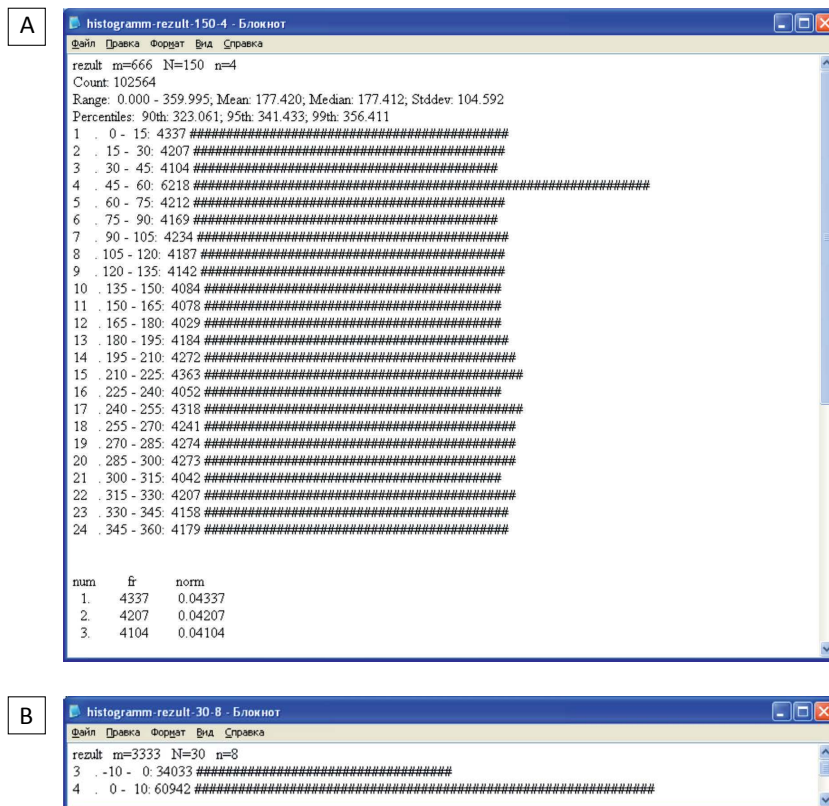
ления событий поперек прямоугольной площадки применялось преобразование Бокса – Мюллера [59] для координаты y генерируемых точек, конвертирующее случайно распределенную величину в нормальное распределение. По программе «Azimut» выполняется азимутальный анализ связей между координатами эпицентров последовательных во времени землетрясений. Программа «Chain» предназначена для определения и выделения цепочек сейсмических и синтезированных событий.

Результаты

Критерии «значимости» и «представительности» выделения цепочек

При определении критериев «значимости» и «представительности» выделения цепочек в круглой и прямоугольной площадке были сгенерированы эпицентральные поля из синтезированных 10^5 событий, в заданный сектор или полосу вставлены имитационные модельные цепочки из $n = 3 \div 10$ и проведены необходимые операции и расчеты.

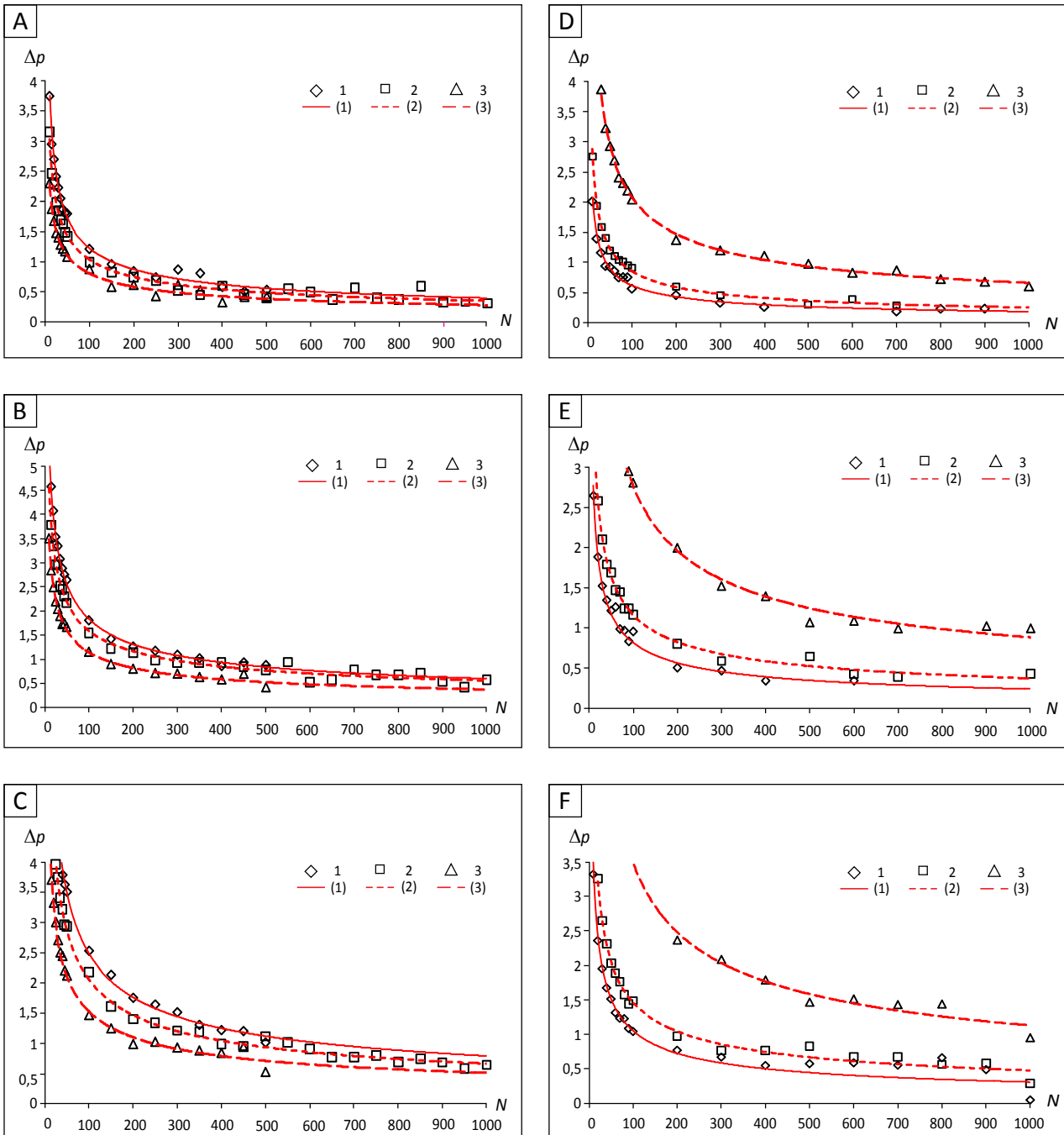
Рис. 6. Гистограммы распределения чисел событий
 Fig. 6. Histograms of the distribution of the numbers of events



В круглой и прямоугольной площадке имитационная цепочка формирует в итоге значимое превышение чисел событий N_p (6218 и 60942) над средним уровнем $M \approx 4200$ (A) и над значением 34033 в сопряженной полосе (B)
 In a round and rectangular area, the simulation chain eventually forms a significant excess of the numbers of events N_p (6218 u 60942) over the average level $M \approx 4200$ (A) and over the value 34033 in the conjugate band (B)

Рис. 7. Значения и тренды зависимости критерия «значимости» $\Delta\rho$ выделения цепочек длиной $n=3$ (A, D), $n=4$ (B, E) и $n=5$ (C, F) от размера выборки событий N для круглой (A–C) и прямоугольной площадки (D–F)

Fig. 7. Values and trends of the dependence of the “significance” criterion $\Delta\rho$ for identifying chains of length $n=3$ (A, D), $n=4$ (B, E) and $n=5$ (C, F) on the size of the event sample N for round (A–C) and a rectangular area (D–F)



A–C — круглая площадка: 1, 2 и 3 — сектора размером $q = 10^\circ; 15^\circ$ и 30° соответственно; D–F — прямоугольная площадка: 1, 2 и 3 — полосы шириной 10 км с центрами на расстоянии $r = 5; 15$ и 25 км от линии разлома соответственно

A–C — circular area: 1, 2 and 3 — sectors of size $q=10^\circ; 15^\circ$ and 30° , respectively; D–F — rectangular area: 1, 2 and 3 — stripes 10 km wide with centers at a distance of $r=5; 15$ u 25 km from the fault line, respectively

Табл. 2. Уравнения корреляции Δp и N при различных значениях q , r и n

Tab. 2. Correlation equations for Δp and N for different values of q , r and n

n	$q = 10^\circ$	$q = 15^\circ$	$q = 30^\circ$
3	$\Delta p \approx 11,46N^{-0,48}, \rho \approx 0,98$	$\Delta p \approx 8,84N^{-0,46}, \rho \approx 0,96$	$\Delta p \approx 6,46N^{-0,45}, \rho \approx 0,96$
4	$\Delta p \approx 17,13N^{-0,48}, \rho \approx 1$	$\Delta p \approx 12,95N^{-0,45}, \rho \approx 0,96$	$\Delta p \approx 10,62N^{-0,48}, \rho \approx 0,98$
5	$\Delta p \approx 24,29N^{-0,49}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 19,71N^{-0,49}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 13,59N^{-0,47}, \rho \approx 0,97$
n	$r = 5 \text{ км}$	$r = 15 \text{ км}$	$r = 25 \text{ км}$
3	$\Delta p \approx 6,96N^{-0,53}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 9,73N^{-0,53}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 20,48N^{-0,50}, \rho \approx 0,99$
4	$\Delta p \approx 9,40N^{-0,53}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 11,22N^{-0,49}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 27,09N^{-0,50}, \rho \approx 0,99$
5	$\Delta p \approx 12,49N^{-0,54}, \rho \approx 0,85$	$\Delta p \approx 14,00N^{-0,49}, \rho \approx 0,95$	$\Delta p \approx 33,49N^{-0,49}, \rho \approx 0,96$

Круглая площадка разбивалась на секторы $q = 10^\circ$; 15° и 30° и в один из секторов вставлялась имитационная цепочка. Прямоугольная площадка делилась на 6 полос шириной $h = 10$ км и в одну из полос на расстоянии $r = 5; 15$ и 25 км от линии разлома вставлялась имитационная цепочка. Результаты одного полного цикла расчетов представлены на рис. 6 А, В в виде гистограмм событий, суммированных в 24 секторах площадки круглой формы (А, $q = 15^\circ$) и в двух полосах шириной ± 10 км около линии разлома в прямоугольной площадке (В). Видно, что сектор и полоса со вставленной модельной цепочкой (N_p) значительно выделяются на фоне осредненного уровня чисел событий в других секторах и полосах (M), позволяя определить критерий «значимости» $\Delta p = (N_p - M) / \sigma$.

Результаты проведенных вычислений представлены на рис. 7 в виде значений и трендов зависимости критерия «значимости» Δp выделения цепочек длиной $n = 3; 4$ и 5 от размера выборки N в круглой (А–С) и прямоугольной площадке (D–F). Видно, что критерий «значимости» выделения цепочки в круглой площадке возрастает при уменьшении размера углового сектора q и увеличении длины цепочки n и не зависит от положения сектора, содержащего цепочку. Критерий «значимости» выделения цепочки в прямоугольной площадке возрастает при увеличении длины цепочки n и расстояния r до разлома. В целом это указывает, что длинные цепочки будут выделяться более уверенно, чем короткие, а с увеличением размеров выборки значимость выделения цепочек одной длины понижается. Уравнения корреляции Δp и N , полученные для различных значений q , r и n , приведены в таблице (табл. 2).

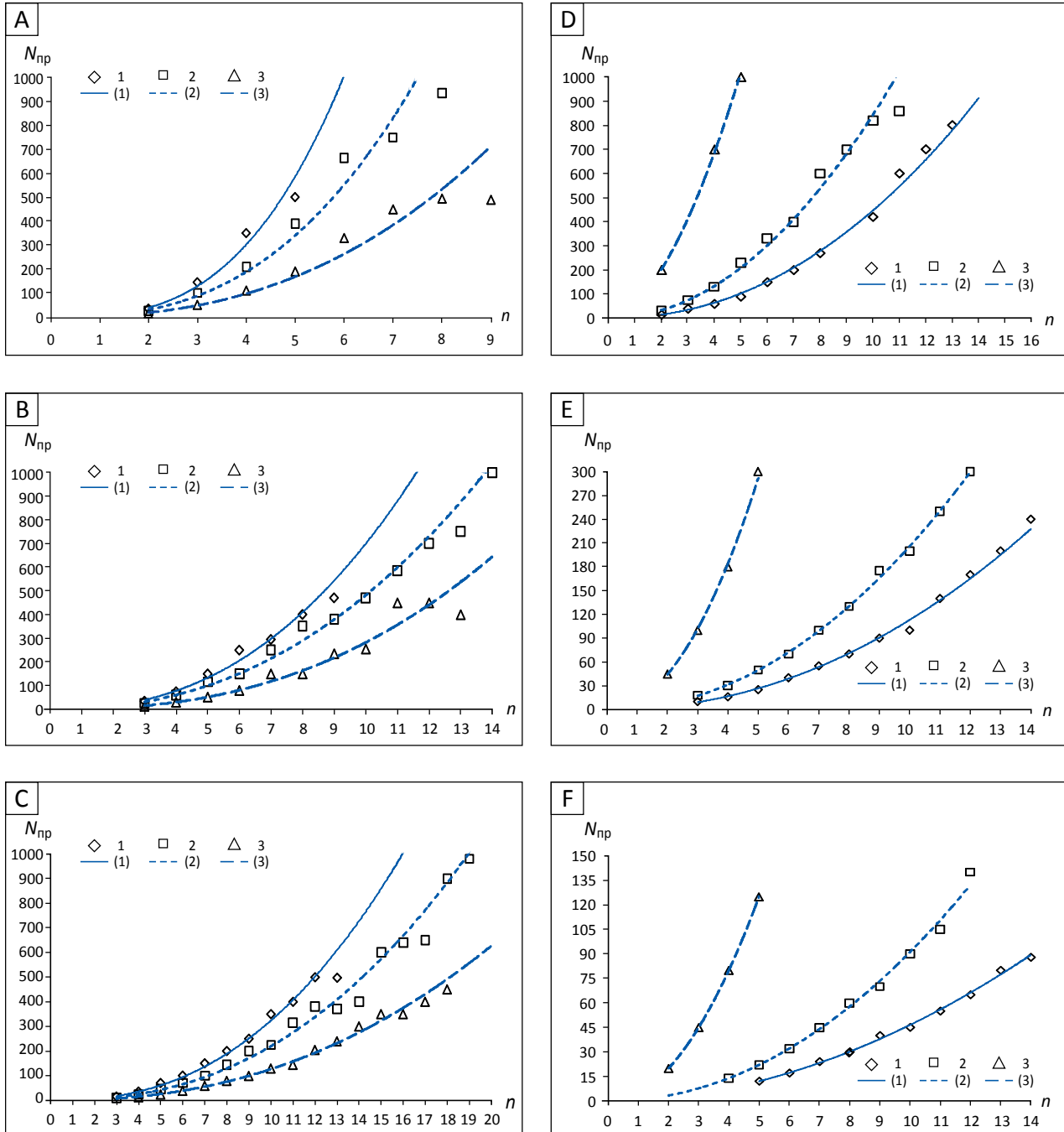
На рис. 8 представлены значения и тренды зависимости критерия «представительности» N_{pp} выделения цепочек на уровне «значимости» $\Delta p = 1$

(рис. 8 А, D), $\Delta p = 2$ (B, E) и $\Delta p = 3$ (C, F) от длины цепочки n для круглой (А–С) и прямоугольной (D–F) площадки. Видно, что в площадке круглой формы критерий «представительности» растет с уменьшением углового сектора q и уровня значимости Δp . В площадках прямоугольной формы критерий «представительности» повышается при увеличении расстояния до разлома r и уменьшении уровня значимости Δp . В целом это указывает, что для выделения длинной цепочки нужно больше данных, чем для короткой цепочки, а низкий критерий «значимости» требует меньше данных для ее выделения. Уравнения корреляции N_{pp} и n , полученные для различных значений q , r и Δp , приведены в таблице (табл. 3).

Представленные в табл. 2, 3 уравнения корреляции имеют степенной характер поведения с изменяющимися показателями степени и высокими коэффициентами корреляции ρ . Согласно уравнениям, критерий «значимости» Δp можно принять пропорциональным корню квадратному из размера выборки N . Критерий «представительности» N_{pp} пропорционален длине цепочки n в степени $2,3 \div 3$ для круглой и $1,8 \div 2,1$ для прямоугольной площадки. Определение критериев является важным результатом данного исследования, т.к. показывает минимальный размер выборки N , при анализе которой на заданном уровне значимости Δp в условиях стохастичности толчков выделится в среднем одна цепочка миграции длиной n землетрясений. В табл. 4 приведены вычисленные значения этого критерия для цепочек длиной $n = 3, 4$ и 5 при $\Delta p = 1, 2$ и 3 . Видно, что в площадке круглой формы критерий «представительности» повышается с уменьшением углового сектора q и уровня Δp . В площадках прямоугольной формы критерий «представительности» повышается при увеличении расстояния до разлома r и уменьшении Δp .

Рис. 8. Значения и тренды зависимости критерия «представительности» N_{np} выделения цепочек на уровне «значимости» $\Delta\rho = 1$ (A, D), $\Delta\rho = 2$ (B, E) и $\Delta\rho = 3$ (C, F) от длины цепочки n для круглой (A–C) и прямоугольной площадки (D–F)

Fig. 8. Values and trends of the dependence of the “representativeness” criterion N_{np} for the selection of chains at the level of “significance” $\Delta\rho = 1$ (A, D), $\Delta\rho = 2$ (B, E) and $\Delta\rho = 3$ (C, F) on the length of the chain n for round (A–C) and rectangular platforms (D–F)



A–C — круглая площадка: 1, 2 и 3 — секторы размером $q = 10^\circ$; 15° и 30° соответственно; D–F — прямоугольная площадка: 1, 2 и 3 — полосы шириной 10 км с центрами на расстоянии $r = 5$; 15 и 25 км от линии разлома соответственно

A–C — circular area: 1, 2 and 3 — sectors of size $q = 10^\circ$; 15° and 30° , respectively; D–F — rectangular area: 1, 2 and 3 — stripes 10 km wide with centers at a distance of $r = 5$; 15 and 25 km from the fault line, respectively

Табл. 3. Уравнения корреляции N_{np} и n при различных значениях q , r и $\Delta\rho$

Tab. 3. Correlation equations for N_{np} and n for different values of q , r and $\Delta\rho$

$\Delta\rho$	$q = 10^\circ$	$q = 15^\circ$	$q = 30^\circ$
1	$N_{np} \approx 4,95n^{2,97}, \rho \approx 0,98$	$N_{np} \approx 4,7n^{2,65}, \rho \approx 0,98$	$N_{np} \approx 3,21N^{2,46}, \rho \approx 0,96$
2	$N_{np} \approx 2,80n^{2,40}, \rho \approx 0,98$	$N_{np} \approx 2,55n^{2,28}, \rho \approx 0,99$	$N_{np} \approx 0,99n^{2,46}, \rho \approx 0,98$
3	$N_{np} \approx 1,26n^{2,41}, \rho \approx 0,99$	$N_{np} \approx 1,01n^{2,33}, \rho \approx 0,99$	$N_{np} \approx 0,63n^{2,31}, \rho \approx 1$
	$r = 5 \text{ км}$	$r = 15 \text{ км}$	$r = 25 \text{ км}$
1	$N_{np} \approx 3,37n^{2,12}, \rho \approx 0,99$	$N_{np} \approx 8,09n^{2,02}, \rho \approx 0,99$	$N_{np} \approx 59,01n^{1,77}, \rho \approx 0,98$
2	$N_{np} \approx 0,93n^{2,08}, \rho \approx 0,99$	$N_{np} \approx 1,82n^{2,05}, \rho \approx 0,99$	$N_{np} \approx 10,61n^{2,06}, \rho \approx 0,99$
3	$N_{np} \approx 0,54n^{1,94}, \rho \approx 0,85$	$N_{np} \approx 0,83n^{2,04}, \rho \approx 0,99$	$N_{np} \approx 5n^2, \rho \approx 1$

Табл. 4. Критерий N_{np} при различных значениях $\Delta\rho$, n , q и r

Tab. 4. Criterion N_{np} for different values of $\Delta\rho$, n , q and r

$\Delta\rho$	n	Круглая площадка, q , градусы			Прямоугольная площадка, r , км		
		10°	15°	30°	5 км	15 км	25 км
		N_{np}	N_{np}	N_{np}	N_{np}	N_{np}	N_{np}
1	3	129	87	48	35	74	413
	4	304	188	97	64	133	686
	5	590	339	168	102	209	1019
2	3	39	31	15	9	17	102
	4	78	60	30	17	31	184
	5	133	100	52	26	49	292
3	3	18	13	8	5	8	45
	4	36	26	15	8	14	80
	5	61	43	26	12	22	125

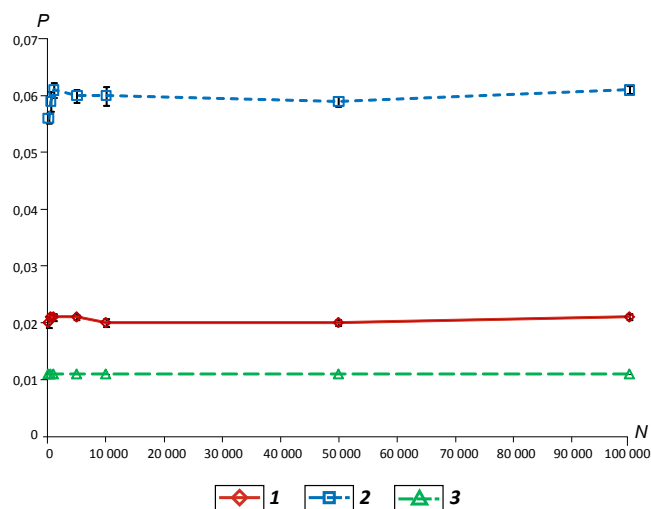
Частота реализации цепочек

При определении частоты реализации цепочек в круглой и прямоугольной площадках были сгенерированы эпицентральные поля синтезированных 10^6 событий. В программном цикле выполнены серии генераций наборов данных разной длины N и осуществлена процедура выделения цепочек миграции в круглой и прямоугольной площадках, а также в полосе 0–10 км от линии «разлома» прямоугольной площадки. Частота реализации цепочек определена как отношение суммы чисел событий во всех выделенных цепочках к размеру используемой выборки N . По совокупностям выборок одного размера N_i были рассчитаны средние значения

частот и стандартные отклонения. Результаты расчетов представлены на графиках зависимости средней частоты реализации цепочек P (рис. 9) и среднего числа выделенных цепочек M (рис. 10) от размера выборки N . На рис. 9 видно, что частоты реализации цепочек в круглой и прямоугольной площадке не зависят от объема N выборок данных. Частота реализации цепочек максимальна в полосе 0 ± 10 км зоны разлома ($P \approx 0,06$), а минимальна для круглой площадки ($P \approx 0,01$). В прямоугольной площадке (зона разлома) $P \approx 0,02 \approx 0,06/3$, что указывает на обусловленность отличий заданием нормального распределения событий поперек зоны разлома. Можно полагать, что различие частот в круглой ($P \approx 0,01$)

Рис. 9. Зависимость средней частоты реализации цепочек миграции P от размера выборки N

Fig. 9. Dependence of the average frequency of realization of migration chains P on the sample size N



Графики (1–3): 1 — разлом (для прямоугольной площадки), 2 — полоса 0–10 км (для полосы 0–10 км прямоугольной площадки), 3 — круг (для круглой площадки)

Graphs (1–3): 1 — fault (for rectangular area), 2 — strip 0–10 km (strip 0–10 km for rectangular area), 3 — circle (for round area)

и прямоугольной ($P \approx 0,02$) площадках также вызвано этой причиной.

На рис. 10 представлены графики зависимости среднего числа выделенных цепочек M от размера выборки N в круглой и прямоугольной площадке. Для лучшего представления на вставке показан интервал значений M при $N \leq 1000$ событий. Видно, что при случайном распределении событий число выделенных цепочек пропорционально объему выборки данных. Совпадение графиков для прямоугольной площадки и полосы 0–10 км обусловлено одним видом, а отличие от графика круглой площадки — разным видом распределения событий.

Пример реализации методики

В качестве примера применения методики для 950 толчков с энергетическим классом $K_p = 8$, произошедших в зонах нескольких крупных разломов в центральной части Байкальской рифтовой системы с 1980 по 2004 г. (рис. 11А), осуществлено определение и выделение цепочек землетрясений. Карта-схема эпицентров землетрясений представлена в форме круга радиусом $R = 100$ км, координаты центра круга $\varphi = 54,0^\circ \text{N}$, $\lambda = 109,0^\circ \text{E}$ (см. рис. 1). На рис. 11 А, В видно, что эпицентры землетрясений занимают определенную часть круга, отражая факт реализации на разломах — выделяются полосы повышенной концентрации эпицентров толчков, совпадающие с субпараллельными зонами разломов северо-восток — юго-западной ориентировки. В качестве тестового модельного примера приведем

Рис. 10. Зависимость среднего числа цепочек событий M от размера выборки N

Fig 10. Dependence of the average number of chains of events M on the sample size N

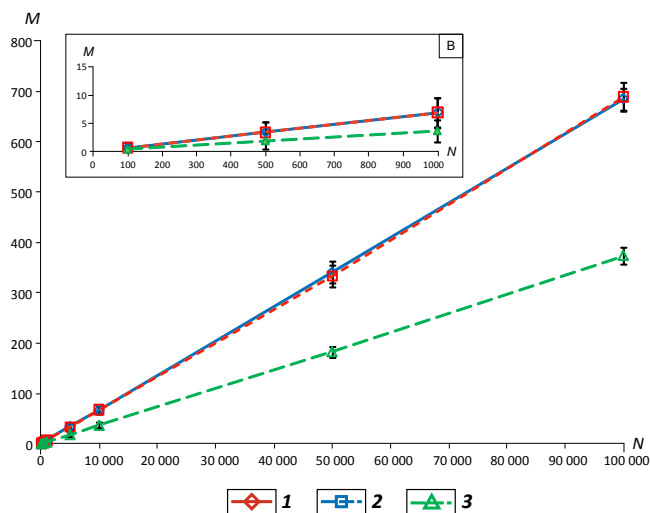


График M для $N \leq 1000$ событий (В)
Усл. обозначения см. на рис. 9

*A graph of M for $N \leq 1000$ events (B)
For Legend see Fig. 9*

результаты выделения цепочек в поле 950 сгенерированных событий, распределенных случайным образом с постоянной плотностью вероятности на поверхности площадки круглой формы радиусом $R = 100$ км (рис. 11В). Модельные события довольно равномерно распределены на поверхности круга, и на рис. 11 В нет зон повышенной концентрации.

При азимутальном анализе в угловом секторе размером $q = 10^\circ$ ($\Delta q = \pm 5^\circ$ от азимутального направления) полей эпицентров получены следующие результаты:

1. Среди 950 землетрясений выделены $M = 22$ цепочки миграций из $n = 3$ толчков (рис. 12А). Виден системный характер распределения цепочек по расположению и азимуту ориентировки. Расположение цепочек соответствует зонам повышенной плотности эпицентров землетрясений на рис. 11А, и почти все цепочки имеют северо-восток — юго-западную направленность.

2. Среди модельных 950 событий выделены $M = 12$ цепочек из $n = 3$ элементов (рис. 12В). Можно отметить бессистемный характер распределения цепочек по месту положения и азимуту ориентировки, обусловленный генерацией событий случайным образом.

Согласно табл. 4, для выделения цепочки из $n = 3$ элементов на уровне значимости $\Delta p = 1$ число событий в выборке должно быть $N_{\text{пр}} = 129$. Отношение $950/129 \approx 7 \div 8$ показывает, что в выборке 950 событий должно выделиться в среднем

Рис. 11. Карта-схема эпицентров 950 землетрясений с $K_p=8$ (А) и 950 модельных событий (В) в площадках круглой формы
Fig. 11. A schematic map of the epicenters of 950 earthquakes with $K_p=8$ (A) and 950 model events (B) in circular areas

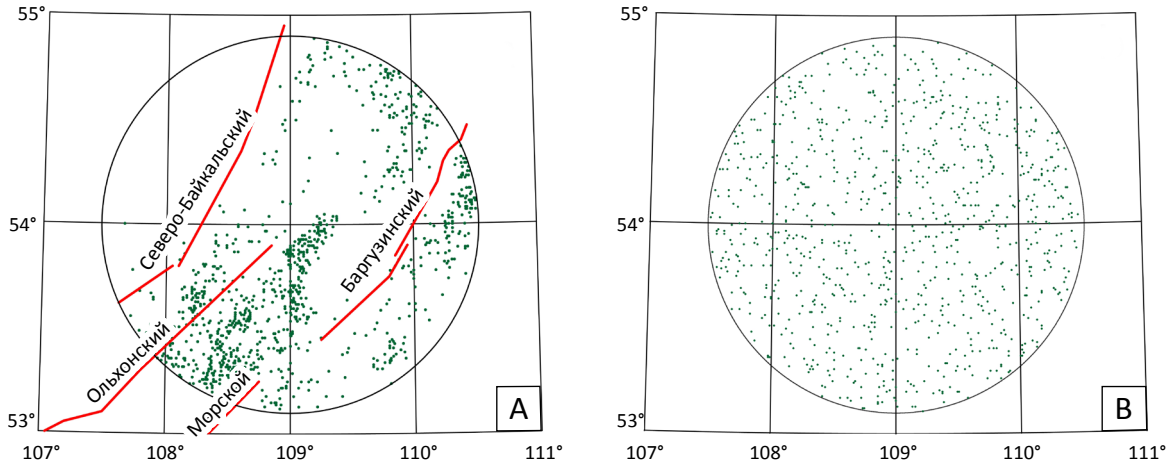
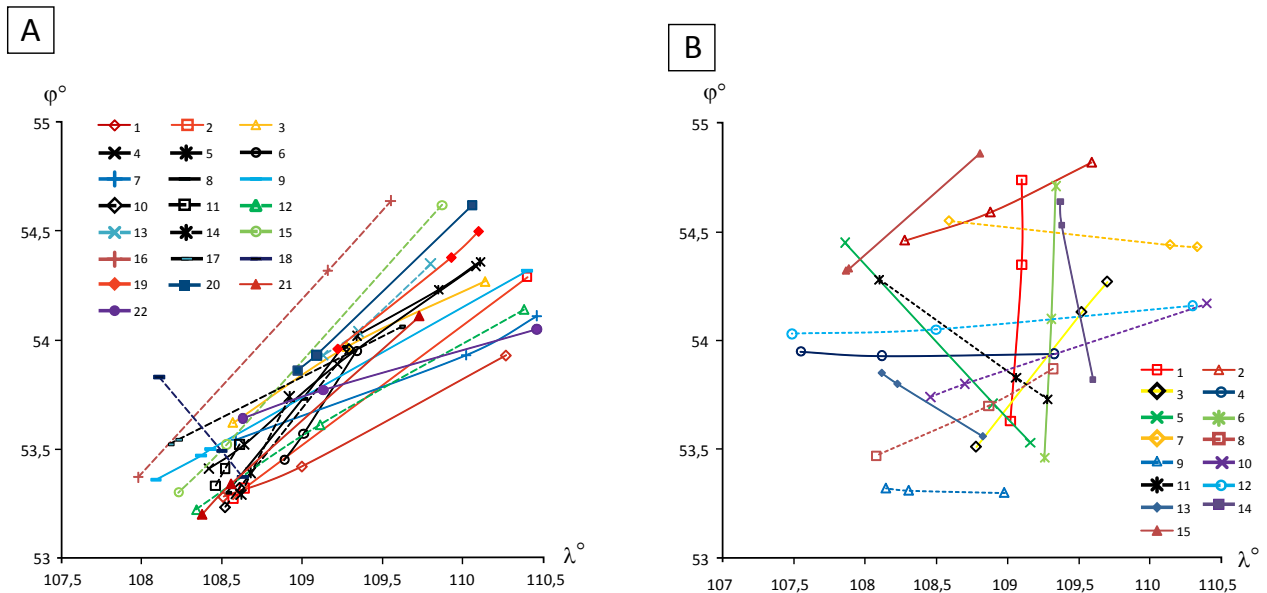


Рис. 12. Выделенные цепочки землетрясений (А) и модельных событий (В)
Fig. 12. Identifying chains of earthquakes (A) and model events (B)



около 8 случайных цепочек из $n=3$ элементов. В нашем случае выделено 12 случайных цепочек и для объяснения этого расхождения следует обратиться к рис. 10 (вставка). На вставке видно, что при 950 событиях среднее число выделенных цепочек равно примерно 8, а 12 случайных цепочек будут выделены на уровне значимости в 2 стандартных отклонения. Это указывает на возможность значительных флуктуации в распределениях эпицентров сгенерированных полей случайных событий и свидетельствует о практической ценности графиков на рис. 10, где представлены как средние значения $N_{пр}$, так и стандартные отклонения, характеризующие рассеяние результатов. Отношение числа цепочек землетрясений к среднему числу цепочек случайных событий мы определяем как критерий сейсмомиграционной актив-

ности $ИСМА = M/N_{пр} \approx 22/8 \approx 2,8$ и используем его для характеристики миграционных свойств сейсмичности исследуемой территории [15, 28]. При $ИСМА > 1$ на исследуемой территории имеются цепочки миграции землетрясений, и нужно решить задачу отделения цепочек миграции землетрясений от цепочек случайного распределения толчков (цепочек псевдомиграции). Уровень $ИСМА \approx 2,8$ свидетельствует о высокой миграционной активности сейсмичности в площадке на рис. 11А.

Проведенные исследования показывают, что в поле случайно распределенных событий имеются псевдо-миграции, цепочки которых определяются и выделяются по используемой методике. Поэтому для корректного изучения сейсмомиграций по статистике сейсмичности активных регионов

или разломных зон, содержащей в себе случайный пространственно-временной набор землетрясений и детерминированную компоненту миграции, необходимо было разработать формализованную методику выделения цепочек землетрясений и определить критерии, по которым сейсмомиграции можно выделить на фоне случайного поля событий. В результате проведенных исследований получены геоинформационные критерии, дающие возможность сопоставить случайный фон сейсмичности и детерминированную компоненту миграции на определенном уровне значимости. Определены частоты реализации цепочек в случайном поле N событий и получены зависимости числа выделенных цепочек от размера выборки событий. Представленные в виде таблиц критерии «значимости» и «представительности» позволяют оценить наличие сейсмомиграций в массивах сейсмологических данных различного объема как превышение на заданном уровне значимости средних чисел цепочек землетрясений, созданных случайным пространственно-временным распределением землетрясений в эпицентральной поле сейсмичности и в зоне разлома. Превышение фонового уровня псевдо-цепочек будет характеризовать пространственно-временную миграционную активность исследуемой территории или зоны разлома с помощью критерия ИСМА. Этот критерий используется для непосредственного сопоставления миграционной активности различных территорий и характеристики современной геодинамики и тектонофизики литосферы Байкальской рифтовой системы [15, 28].

Заключение

С целью изучения миграции очагов землетрясений и обнаружения зон скрытых разломов раз-

работана формализованная методика выделения цепочек землетрясений и выработаны геоинформационные критерии выделения цепочек на фоне поля случайно распределенных толчков-событий. При решении этих задач учтены особенности геометрии и основные свойства сейсмичности Байкальской рифтовой системы. В результате проведенных исследований определены основные критерии выделения, дающие возможность сопоставить случайный фон сейсмичности и детерминированную компоненту миграции на определенном уровне значимости. Определены частоты реализации цепочек в случайном поле N событий и получены зависимости числа выделенных цепочек M от размера выборки событий. Критерии «значимости», «представительности» и ИСМА дают возможность параметризовать процедуру выделения цепочек миграции землетрясений с целью получения информации для непосредственного сопоставления миграционной активности различных территорий, поиска скрытых разломов и характеристики современной геодинамики и тектонофизики литосферы.

Разработанные методики и патенты, реализованные программы и полученные результаты закладывают теоретическую и практическую основу ГИС-технологии изучения миграции очагов землетрясений в Байкальской рифтовой системе. Поскольку основные закономерности формирования внутренней структуры континентальных разломных зон и сейсмичности определяются фундаментальными свойствами реализующейся в их пределах прогрессирующей деформации транспрессивного скалывания и являются едиными [21, 57], развиваемая технология может быть реализована в других сейсмоактивных регионах.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-05-00308_a, 17-57-44006), РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44011.

This study was partial funded by RFBR (project 14-05-00308_a, project 17-57-44006), RFBR and MECSS, project number 20-55-44011.

Литература

1. Анализ геодинамических и сейсмических процессов / Под ред. В.И. Кейлис-Борока, Г.М. Молчана // Вычислительная сейсмология. Вып. 35. – М.: ГЕОС, 2004. – 329 с.
2. Байкальский филиал «Единой геофизической службы Российской Академии наук» [Электронный ресурс]. – 2017 – Режим доступа: <http://www.seis-bykl.ru> (дата обращения 27.11.2019).
3. Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46. – № 11. – С. 1176–1190.
4. Быков В.Г. Нелинейные волны и солитоны в моделях разломно-блоковых геологических сред // Геология и геофизика. – 2015. – Т. – № 5. – С. 1008–1024. DOI: 10.15372/GiG20150510.
5. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. – Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. – 150 с.
6. Викулин А.В., Долгая А.А., Герус А.И. О волновом геодинамическом процессе в рамках модели блоковой геосреды коры // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. – М.: Институт физики Земли РАН, 2016. – Т. 1. – С. 451–455.
7. 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.

8. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 5–22.
9. Губерман Ш.А. D-волны и землетрясения. Теория и анализ сейсмических наблюдений // Вычислительная сейсмология. – 1979. – № 12. – С. 158–188.
10. Демьянович В.М., Демьянович М.Г., Ключевский А.В. Основные разломы Байкальской рифтовой зоны и формируемая ими сейсмичность. // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. – Иркутск : Институт земной коры СО РАН, 2007. – Т. 1. – С. 108–116.
11. Демьянович В.М., Ключевский А.В., Черных Е.Н. Напряженно-деформированное состояние литосферы и сейсмичность в зоне Белино-Бусийнгольского разлома (Южное Прибайкалье) // Вулканология и сейсмология. – 2008. – Т. 2. – № 1. – С. 46–61. DOI: 10.1007/s11711-008-1004-у.
12. Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. – Иркутск : Институт земной коры СО РАН, 2009. – 420 с.
13. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 1. – С. 49–64.
14. Какоурова А.А., Ключевский А.В. Имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности: зона разлома // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 6 (125). – С. 49–59. DOI:10.21285/1814-3520-2017-6-49-59.
15. 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.
16. Касахара К. Механика землетрясений. – М. : Мир, 1985. – 264 с.
17. Ключевский А.В. Кинематика и динамика афтершоков Бусийнгольского землетрясения 1991 г. // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 4. – С. 65–78.
18. Ключевский А.В. Сейсмичность в условиях самоорганизации Байкальской рифтовой системы // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 403. – № 1. – С. 96–100.
19. Ключевский А.В. Кинематика и динамика толчков в Ангараканской и Амутской сериях землетрясений Байкальского региона // Физика Земли. – 2005. – № 1. – С. 3–18.
20. Ключевский А.В. Кинематика и динамика афтершоков Южно-Якутского землетрясения // Вулканология и сейсмология. – 2005. – № 4. – С. 63–78.
21. Ключевский А.В. Напряжения и сейсмичность на современном этапе эволюции литосферы Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли. – 2007. – № 12. – С. 14–26. DOI:10.1134/S1069351307120026.
22. Ключевский А.В., Демьянович В.М. Объемное сейсмотектоническое течение геологических масс в литосфере Байкальской рифтовой зоны // Вулканология и сейсмология. – 2015. – № 1. – С. 56–74. DOI:10.7868/S0203030615010046.
23. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Баяр Г. Оценка рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений Байкальского региона и Монголии // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46. – № 7. – С. 746–762.
24. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Энергетическая структура сейсмичности юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 464. – № 5. – С. 611–617. DOI: 10.7868/S0869565215290216.
25. 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. – Иркутск : Издательство Института географии СО РАН, 2015. – С. 139–143.
26. Ключевский А.В., Зуев Ф.Л. Структура поля эпицентров землетрясений Байкальского региона // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 415. – № 5. – С. 682–687. DOI:10.1134/S1028334X07060268.
27. Ключевский А.В., Какоурова А.А. Имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 8 (115). – С. 74–84. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-74-84.
28. 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: 10.1134/S1028334X19090265.
29. Ключевский А.В., Какоурова А.А., Демьянович В.М. Цепочки миграций землетрясений в литосфере Байкальского региона // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). – Иркутск : Институт земной коры СО РАН, 2017. – Вып. 15. – С. 122–123.
30. Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. – 2012. – № 1. – С. 3–19. DOI: 10.1134/S1069351312010089.
31. Левина Е.А., Ружич В.В. Изучение миграций сейсмической активности с помощью построения пространственно-временных диаграмм // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. – Т. 6. – № 2. – С. 225–240. DOI: 10.5800/GT-2015-6-2-0178.
32. Литосфера Центральной Азии / Под ред. Н.А. Логачева. – Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1996. – 240 с.
33. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 5. – С. 91–106.
34. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспектива прогноза разрушения // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. – № 5. – С. 97–112.
35. Макаров П.В., Перышкин А.Ю. Моделирование “медленных движений” – автоволн неупругой деформации в пластичных и хрупких материалах и средах // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19. – № 2. – С. 32–46.
36. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Периодичность Памиро-Гиндукушских землетрясений и тектонические волны в субдукцированных литосферных плитах // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 269. – № 6. – С. 1075–1078.

37. Михайлов Д.Н., Николаевский В.Н. Тектонические волны ротационного типа с излучением сейсмических сигналов // Физика Земли. – 2000. – № 11. – С. 3–10.
38. Мишарина Л.А., Солоненко А.В. Влияние блоковой делимости земной коры на распределение сейсмичности в Байкальской рифтовой зоне // Сейсмичность Байкальского рифта. Прогностические аспекты. – Новосибирск : Наука, 1990. – С. 70–78.
39. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. – М. : Наука, 1975. – С. 6–29.
40. Невский М.В., Артамонов А.М., Ризниченко О.Ю. Волны деформаций и энергетика сейсмичности // Доклады АН СССР. – 1991. – Т. 318. – № 2. – С. 316–320.
41. Николаевский В.Н. Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Доклады РАН. – 1995. – Т. 341. – № 3. – С. 403–405.
42. Новая глобальная тектоника : сб. статей / Пер. с англ. К.Л. Волковича, Г.И. Денисовой; под ред. Л.П. Зоненшайна, А.А. Ковалева. – М. : Мир, 1974. – 472 с.
43. Новопашина А.В. Методика выявления миграций сейсмической активности Прибайкалья средствами ГИС // Геоинформатика. – 2013. – № 1. – С. 33–36.
44. Проблемы динамики литосферы и сейсмичности / Под ред. Г.М. Молчан, Б.М. Наймарк, А.Л. Левшина // Вычислительная сейсмология. Вып. 32. – М. : ГЕОС, 2001. – 303 с.
45. Программа для ЭВМ “Azimut” Рос. Федерация №2016662608 / Демьянович В.М., Ключевский А.В.; заявл. 05.07.2016; опубл. 16.11.2016.
46. Программа для ЭВМ “Chain” Рос. Федерация №2016661616 / Какоурова А.А., Ключевский А.В.; заявл. 24.08.2016; опубл. 14.10.2016.
47. Программа для ЭВМ “Migrations_fault_y” Рос. Федерация №201761912 / Какоурова А.А., Ключевский А.В.; заявл. 04.07.2017; опубл. 28.08.2017.
48. Программа для ЭВМ “Migrations” Рос. Федерация №2016661511 / Ключевский А.В., Какоурова А.А.; заявл. 23.05.2016; опубл. 12.10.2016.
49. Псахье С.Г., Ружич В.В., Смекалин О.П., Шилько Е.В. Режимы отклика геологических сред при динамических воздействиях // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4. – № 1. – С. 67–71.
50. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. – М. : Изд-во Ин. литература, 1963. – 670 с.
51. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М. : Наука, 1987. – 101 с.
52. Сейсмическое районирование СССР / Под ред. С.В. Медведева. – М. : Наука, 1968. – 476 с.
53. Способ определения цепочек землетрясений в эпицентральной поле сейсмичности: пат. 2659334 Рос. Федерация. №2017131805 / Ключевский А.В., Какоурова А.А., Ключевская А.А., Демьянович В.М., Черных Е.Н.; заявл. 09.11.2017; опубл. 29.06.2018, бюл. № 19.
54. Уломов В.И. Очаговая сейсмичность и долгосрочный прогноз землетрясений // Проблемные вопросы сейсмологии Средней Азии. – Ташкент : ФАН, 1988. – С. 32–87.
55. Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. – 1993. – № 4. – С. 43–53.
56. Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм активизации разломов в сейсмических зонах континентальной литосферы / Геодинамика и тектонофизика. – 2013. – Т. 4. – № 2. – С. 83–117. DOI: 10.5800/GT2013420093.
57. Шерман С.И. Избранные труды. Тектоника разломообразования и сопутствующих процессов в литосфере. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2017. – 1476 с.
58. Шерман С.И., Горбунова Е.А. Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 115–122.
59. Vox G.E.P., Muller M.E. A Note on the Generation of Random Normal Deviates // The Annals of Mathematical Statistics. – 1958. – Vol. 29. – № 2. – P. 610–611.
60. Golenetsky S.I. Problems of seismicity of the Baikal rift zone // Journal of Geodynamics. – 1990. – № 11. – P. 293–307.
61. Isack B., Oliver J., Sykes L.R. Seismology and the new global tectonics // Journal of Geophysical Research. – 1968. – № 73. – P. 5855–5899.
62. International handbook of earthquake and engineering seismology / Ed. by W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger. – Amsterdam; Boston; New York; Tokyo : Academic Press, 2002. – Part A. – 934 p.
63. Mogi K. Migration of seismic activity // Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University. – 1968. – № 46. – P. 53–74.
64. Sherman S.I., Dem'yanovich V.M., Lysak S.V. Active faults, seismicity and fracturing in the lithosphere of the Baikal rift system // Tectonophysics. – 2004. – Vol. 380. – № 3–4. – P. 261–272. DOI: 10.1016/j.tecto.2003.09.023.

References

1. Keilis-Borok V.I., Molchan G.M. (eds.) Analiz geodinamicheskikh i seismicheskikh protsessov [Analysis of geodynamic and seismic processes]. In: Computational Seismology. Iss. 35. Moscow: GEOS; 2004. 329 p. [In Russian].
2. Baikal'skii filial “Edinoi geofizicheskoi sluzhby Rossiiskoi Akademii nauk” [Baikal Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”]. 2017. Available at: <http://www.seis-bykl.ru> (accessed 27.11.2019). [In Russian].
3. Bykov V.G. Strain waves in the Earth: theory, field data, and models. *Russian Geology and Geophysics*. 2005;46(11):1176–1190. [In Russian].
4. Bykov V.G. Nonlinear waves and solitons in models of fault block geological media. *Russian Geology and Geophysics*. 2015;56(5):793–803. DOI: 10.15372/GiG20150510. [In Russian].

5. *Vikulin A.V.* The Physics of Wave Seismic Process. Petropavlovsk-Kamchatsky: KGPU; 2003. 150 p. [In Russian].
6. *Vikulin A.V., Dolgaya A.A., Gerus A.I.* O volnovom geodinamicheskom protsesse v ramkakh modeli blokovoï geosredy kory [On the wave geodynamic process within the framework of the model of the block geoenvironment of the crust]. In: *Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle*. Moscow: Institute of Physics of the Earth RAS, 2016. V. 1. pp. 451–455. [In Russian].
7. *Vilkovich E.V., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I.* Volny tektonicheskikh deformatsii na krupnykh razlomakh [Waves of tectonic deformation at major faults]. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences*. 1974;219(1):77–80. [In Russian].
8. *Goldin S.V.* Lithosphere destruction and physical mesomechanics. *Physical Mesomechanics*. 2002;5(5–6):5–20.
9. *Guberman Sh.A.* D-volny i zemletryaseniya. Teoriya i analiz seismicheskikh nablyudenii [D-waves and earthquakes. Theory and analysis of seismological observations]. *Computational Seismology*. 1979;12:158–188. [In Russian].
10. *Demyanovich V.M., Demyanovich M.G., Klyuchevskii A.V.* Osnovnye razlomy Baikal'skoi riftovoi zony i formiruemaya imi seismichnost' [The main faults of the Baikal rift zone and the seismicity formed by them]. In: *Problemy sovremennoi seismogeologii i geodinamiki Tsentral'noi i Vostochnoi Azii*. Irkutsk: The Institute of the Earth's crust SB RAS, 2007. V. 1. pp. 108–116.
11. *Demyanovich V.M., Klyuchevskii A.V., Chernykh E.N.* Lithospheric stress and strain and seismicity in the Belin-Busiingol fault zone, southern Baikal region. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2008;2(1):40–54. DOI: 10.1007/s11711-008-1004-y.
12. *Dzhurik V.I., Klyuchevskiy A.V., Serebrennikov S.P., Demyanovich V.M., Batsaykhan Ts., Bayaraa G.* Seismichnost' i raionirovanie seismicheskoi opasnosti territorii Mongolii [Seismicity and zoning of seismic hazard in the territory of Mongolia]. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS; 2009. 420 p. [In Russian].
13. *Emanov A.F., Emanov A.A., Filina A.G., Leskova E.V.* Spatio-temporal features of seismicity of the Altai-Sayan folded area. *Physical Mesomechanics*. 2005;8(1):49–64. [In Russian].
14. *Kakourova A.A., Klyuchevskii A.V.* Simulation base model of migration seismicity: fault zone. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(6(125)):49–59. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-6-49-59. [In Russian].
15. *Kakourova A.A., Klyuchevskii A.V.* Migrating Seismicity in the Lithosphere of the Baikal Rift Zone: Spatiotemporal and Energy Distribution of Earthquake Chains. *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(11):1298–1312. DOI: 10.15372/RGG2019164.
16. *Kasahara K.* Earthquake mechanics. Cambridge: Cambridge University Press; 1981. – 248 p.
17. *Klyuchevskii A.V.* Aftershocks kinematics and dynamics of the 1991 Busiingol earthquake. *Journal of volcanology and seismology*. 2003;4:65–78. [In Russian].
18. *Klyuchevskii A.V.* Seismicity under conditions of the self-organization of the Baikal Rift System. *Doklady Earth Sciences*. 2005;403(5):785–788.
19. *Klyuchevskii A.V.* Kinematics and dynamics of shocks in the Angarakan and Amut earthquake sequences of the Baikal region. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2005;41(1):1–16.
20. *Klyuchevskii A.V.* Kinematics and dynamics of aftershocks following the South Yakutia earthquake. *Journal of volcanology and seismology*. 2005;4:63–78. [In Russian].
21. *Klyuchevskii A.V.* Stresses and seismicity at the present stage of evolution of the Baikal rift zone lithosphere. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2007;43(12):992–1004. DOI:10.1134/S1069351307120026.
22. *Klyuchevskii A.V., Dem'yanovich V.M.* The 3D Seismotectonic Flow of Geological Masses in the Lithosphere of the Baikal Rift Zone. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2015;9(1):48–64. DOI: 10.1134/S0742046315010042.
23. *Klyuchevskii A.V., Dem'yanovich V.M., Bayar G.* Large earthquakes in the Baikal region and Mongolia: Recurrence time and probability. *Russian Geology and Geophysics*. 2005;46(7):731–745.
24. *Klyuchevskii A.V., Dem'yanovich V.M., Klyuchevskaya A.A.* Energy structure of seismicity at the Southwestern flank of the Baikal Rift System. *Doklady Earth Sciences*. 2015;464(2):1069–1074. DOI: 10.1134/S1028334X15100141.
25. *Klyuchevskii A.V., Dem'yanovich V.M., Klyuchevskaya A.A., Zuev F.L., Kakourova A.A., Chernykh E.N., Bryzhak E.V.* Gruppированная сейсмичность Прибайкалья [Grouping Seismicity of the Baikal Region]. In: *Aktual'nye problemy nauki Priбайкалья*. Bychkov I.V., Kazakov A.L., eds. Irkutsk: Institute of Geography SB RAS; 2015. pp. 139–143. [In Russian].
26. *Klyuchevskii A.V., Zuev F.L.* Structure of the epicenter field of earthquakes in the Baikal region. *Doklady Earth Sciences*. 2007;415(2):944–949. DOI: 10.1134/S1028334X07060268.
27. *Klyuchevskii A.V., Kakourova A.A.* Base simulation model of migrating seismicity. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;8(115):74–84. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-74-84. [In Russian].
28. *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.
29. *Klyuchevskii A.V., Kakourova A.A., Dem'yanovich V.M.* Tsepochki migratsii zemletryaseniï v litosfere Baikal'skogo regiona [Chains of earthquake migrations in the lithosphere of the Baikal region]. In: *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS; 2017. Issue 15. pp. 122–123. [In Russian].
30. *Kuz'min Yu.O.* Deformation Autowaves in Fault Zones. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2012;48(1):1–16. DOI: 10.1134/S1069351312010089.
31. *Levina E.A., Ruzhich V.V.* The seismicity migration study based on space-time diagrams. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015;6(2):225–240. DOI: 10.5800/GT-2015-6-2-0178.
32. *Logachev N.A.* (ed.) Lithosphere of Central Asia. Novosibirsk :Nauka, Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN; 1996. 240 p.
33. *Logachev N.A.* History and geodynamics of the Baikal rift. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(5):391–406.
34. *Makarov P.V.* Self-organized criticality of deformation and prospects for fracture prediction. *Physical Mesomechanics*. 2010;13(5–6):292–305.

35. Makarov P.V., Peryshkin A.Yu. Modeling of "slow movements" or inelastic deformation autowaves in ductile and brittle materials and media. *Physical Mesomechanics*. 2016;19(2):32–46. [In Russian].
36. Malamud A.S., Nikolaevsky V.N. Periodichnost' Pamiro-Gindukushskikh zemletryasenii i tektonicheskie volny v subduktsirovannykh litosferykh plitakh [Periodicity of the Pamir – HinduKush earthquakes and tectonic waves in subducted lithospheric plates]. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences*. 1983;269(6):1075–1078. [In Russian].
37. Mikhailov D.N., Nikolaevskii V.N. Rotational tectonic waves with emission of seismic signals. *Izvestia. Physics of the Solid Earth*. 2000;11:895–903.
38. 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 seismicity distribution in the Baikal Rift Zone]. In: Seismichnost' Baikal'skogo rifta. Prognosticheskie aspekty. Novosibirsk: Nauka; 1990. pp. 70–78. [In Russian].
39. Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. Osnovy fiziki ochaga i predvestniki zemletryasenii [Fundamentals of source physics and earthquake precursors]. In: Fizika ochaga zemletryaseniya. Moscow: Nauka; 1975. pp. 6–29. [In Russian].
40. Nevskii M.V., Artamonov A.M., Riznichenko O.Yu. Volny deformatsii i energetika seismichnosti [Deformation waves and seismicity energetics]. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences*. 1991;318(2.):316–320. [In Russian].
41. Nikolaevskii V.N. Mathematical modeling of solitary deformation and seismic waves. *Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences*. 1995;341(3):403–405. [In Russian].
42. Zonenshain L.P., Kovalyov A.A. (eds.), Volkovitch K.E., Denisova G.I. (transl.) Novaya global'naya tektonika : sb. statei [New global tectonics : coll. of papers]. Moscow: Mir; 1974. 472 p. [In Russian].
43. Novopashina A.V. Technique of the Cis-Baikal seismic activity migration isolation by GIS. *Geoinformatika*. 2013;1:33–36. [In Russian].
44. Molchan G.M., Naimark B.M., Levshin A.L. (eds.) Problemy dinamiki litosfery i seismichnosti [Problems of the dynamics of the lithosphere and seismicity]. In: Computational seismology. Issue 32. Moscow: GEOS; 2001. 303 p. [In Russian].
45. Dem'yanovich V.M., Klyuchevskii A.V. Computer program "Azimut" Rus. Federation №2016662608. Declared 05.07.2016; published 16.11.2016.
46. Kakourova A.A., Klyuchevskii A.V. Computer program (RU) "Chain" Rus. Federation №2016661616. Declared 24.08.2016; published 14.10.2016.
47. Kakourova A.A., Klyuchevskii A.V. Computer program (RU) "Migrations_fault_y" Rus. Federation №201761912. Declared 04.07.2017; published 28.08.2017.
48. Klyuchevskii A.V., Kakourova A.A. Computer program "Migrations" Rus. Federation №2016661511. Declared 23.05.2016; published 12.10.2016.
49. Psakh'e S.G., Ruzhich V.V., Smekalin O.P., Shilko E.V. Response of the geological media to dynamic loading. *Physical Mesomechanics*. 2001;4(1):67–71. [In Russian].
50. Richter C.F. Elementary Seismology. San Francisco: W.H. Freeman and Company; London: Bailey Bros. & Swinfen Ltd; 1958. 768 p.
51. Sadovskii M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. Deformirovaniye geofizicheskoi sredy i seismicheskii protsess [Deformation of the Geophysical Medium and the Seismic Process]. Moscow: Nauka; 1987. 101 p. [In Russian].
52. Medvedev S.V. (ed.) Seismicheskoe raionirovaniye SSSR [Seismic zoning of the USSR]. Moscow: Nauka; 1968. 476 p. [In Russian].
53. Klyuchevskii A.V., Kakourova A.A., Klyuchevskaya A.A., Dem'yanovich V.M., Chernykh E.N. Method for determining earthquake chains in an epicentral seismicity field: patent 2659334 Rus. Federation. № 2017131805. Declared 09.11.2017; published 29.06.2018, bul. № 19.
54. Ulomov V.I. Ochagovaya seismichnost' i dolgosrochnyi prognoz zemletryasenii [Focal seismicity and long-term forecast of earthquakes]. In: Problemnye voprosy seismologii Srednei Azii. Tashkent: FAS; 1988. pp. 32–87. [In Russian].
55. Ulomov V.I. Volny seismogeodinamicheskoi aktivizatsii i dolgosrochnyi prognoz zemletryasenii [Waves of seismogeodynamic activation and long-term prediction of earthquakes]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 1993;4:43–53. [In Russian].
56. Sherman S.I. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013;4(2):83–117. DOI: 10.5800/GT2013420093. [In Russian].
57. Sherman S.I. Izbrannyye trudy. Tektonika razlomoobrazovaniya i sopushtvuyushchikh protsessov v litosfere [Selected Works. Tectonics of fault formation and associated processes in the lithosphere]. Irkutsk: Institut of Earth's crust SB RAS; 2017. 1476 p. [In Russian].
58. Sherman S.I., Gorbunova E.A. Wave origin of fault activation in Central Asia on the basis of seismic monitoring. *Physical Mesomechanics*. 2008;11(1):115–122. [In Russian].
59. Box G.E.P., Muller M.E. A Note on the Generation of Random Normal Deviates. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1958;29(2):610–611.
60. Golenetsky S.I. Problems of seismicity of the Baikal rift zone. *Journal of Geodynamics*. 1990;11:293–307.
61. Isack B., Oliver J., Sykes L.R. Seismology and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*. 1968;73:5855–5899.
62. Lee W.H.K., Kanamori H., Jennings P.C., Kisslinger C. (eds.) International handbook of earthquake and engineering seismology. Amsterdam; Boston; New York; Tokyo: Academic Press; 2002. Part A. 934 p.
63. Mogi K. Migration of seismic activity. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University*. 1968;46:53–74.
64. Sherman S.I., Dem'yanovich V.M., Lysak S.V. Active faults, seismicity and fracturing in the lithosphere of the Baikal rift system. *Tectonophysics*. 2004;380(3–4):261–272. DOI: 10.1016/j.tecto.2003.09.023.

Информация об авторах

Какоурова Анна Александровна

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

Ключевский Анатолий Васильевич

Доктор геолого-минералогических наук,
 главный научный сотрудник
 ФГБУН Институт земной коры СО РАН
 Иркутск, 664033, ул. Лермонтова, 128
 e-mail: akluhev@crust.irk.ru
 SPIN-код: 3969-2385, ORCID ID: 0000-0002-1901-4985
 AutorID: 6602285941

Демьянович Владимир Михайлович

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

Ключевская Анна Анатольевна

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

Information about authors

Anna A. Kakourova

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

Anatolii V. Klyuchevskii

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences,
 Chief Researcher
 The Institute of the Earth's crust SB RAS
 128, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia
 e-mail: akluhev@crust.irk.ru
 SPIN-код: 3969-2385, ORCID ID: 0000-0002-1901-4985
 AutorID: 6602285941

Vladimir M. Dem'yanovich

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

Anna A. Klyuchevskaya

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