

УДК 550(34.012+34.013.2);004(6+9)

КВАЗИЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПОЧКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ГРУППАХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

© 2024 г. А. А. Какоурова*, В. И. Джурик, Е. В. Брыжак**, В. М. Демьянович

Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

**e-mail: anna2015@crust.irk.ru*

***e-mail: bryzhak@crust.irk.ru*

Поступила в редакцию 03.07.2023 г.

После доработки 10.10.2023 г.

Принята к публикации 06.12.2023 г.

Выделение в эпицентральной поле сейсмичности Байкальского региона большого количества квазилинейных цепочек землетрясений и их исследование показало, что среди этих цепочек могут присутствовать не только цепочки “миграций” землетрясений, но и цепочки, формирующиеся при случайном пространственно-временном распределении землетрясений. В настоящей работе при статистическом анализе распределения расстояний между эпицентрами землетрясений показана возможность формирования цепочек “миграций” в пределах групп сейсмических событий и изучено их распределение. Отмечено, что цепочки в группах землетрясений выделяются не только по распределению расстояний, но и по времени между ними. Установлено формирование цепочек землетрясений в областях следующих групп землетрясений: Бусийнгольских 1976 и 1991 гг., Южнобайкальского, Кяхтинского, Кичерского землетрясений, Томпудинской серии, Олдонгсинской и Чаруодинской групп. Показано, что эти цепочки сформировались во время реализации данных групп. В выявленных областях концентрации цепочек группирующейся сейсмичности прослеживается связь расположения и направленности цепочек с простираем разломных зон, приразломными трещинами и ориентацией nodальных плоскостей в очагах землетрясений.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая система, группы землетрясений, “миграции” эпицентров землетрясений, мигрирующая сейсмичность, цепочки землетрясений

DOI: 10.31857/S0203030624020032, **EDN:** MNRISY

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Изучению явления “миграций” землетрясений в различных сейсмоактивных регионах Земли как квазилинейного изменения положения эпицентров последовательных во времени толчков, обусловленного геолого-геофизическими процессами в недрах Земли, посвящено множество работ [Mogi, 1968; Уломов, 1993; Rydelek, 2001; Викулин, 2003 и др.]. Выделение цепочек различными исследователями производится с применением авторских формализованных и не формализованных методик с использованием в качестве исходных данных землетрясений различной силы [Mogi, 1968; Новопашина, 2013; Левина, Ружич, 2015]. Исследуемое явление объясняется прохождением в литосфере

Земли деформационных волн [Быков, 2005; Викулин и др., 2012; Шерман, 2013] или упругой и упруго-пластичной передачей напряжений в результате взаимодействия разломов [Pollitz et al., 2003]. Явление “миграции” эпицентров землетрясений представляет значительный интерес, поскольку в нем имеется потенциальная возможность прогноза сильных землетрясений [Mogi, 1968; Шебалин, 2005, 2020].

Кроме “миграций” землетрясений, геолого-геофизическими процессами может быть обусловлено формирование других разновидностей последовательностей землетрясений. Так, в работе [Гусев, 2005] изучается явление порядкового группирования землетрясений, под которым понимается тенденция крупнейших

землетрясений быть близкими соседями в упорядоченном по времени каталоге сейсмических событий. Этот процесс обнаружен в мировых каталогах землетрясений наряду с обычным формированием групп толчков. В работе [Гусев, Палуева, 2016] полученные при изучении направленностей пар соседей землетрясений закономерности объясняются распространением вдоль вторичных разломов импульсов асейсмического скольжения, сопровождающихся слабыми землетрясениями. Показано, что расположение ориентированных пар привязано к нескольким гипотетическим системам субпараллельных (эшелонированных) разломов.

При исследовании “миграций” эпицентров землетрясений выделяемые цепочки обычно считаются цепочками сейсмомиграций [Левина, Ружич, 2015] без рассмотрения возможности формирования цепочек землетрясений при случайном пространственно-временном распределении сейсмических событий — случайных цепочек. В работе [Лукк, 1978] для разделения случайных цепочек и цепочек “миграций” эпицентров землетрясений авторами вводятся ограничения на кривизну цепочки, количество землетрясений, продолжительность и длину цепочки. Однако, эти ограничения выбраны только для изучаемой в работе территории, а некоторые ограничения, по утверждению самого автора, являются условными.

Вопрос о возможном возникновении как случайных цепочек, так и цепочек “миграций” землетрясений, изучают авторы настоящей работы. Цепочкой землетрясений будем называть расположение эпицентров толчков, которое создается при квазилинейном одностороннем положении совокупности эпицентров трех или более последовательных во времени землетрясений на поверхности исследуемой области земной коры. Цепочка землетрясений является случайной, или “псевдомиграцией”, если землетрясения образуют цепочку при случайном распределении, не будучи связанными какими-либо геолого-геофизическими процессами. В цепочках “миграций” землетрясений связь сейсмических событий имеет геофизическую природу.

Изучаемый на предмет формирования цепочек землетрясений в работах авторов данной статьи Байкальский регион ($\varphi = 48-60^\circ$ с.ш.,

$\lambda = 96-122^\circ$ в.д.) является высокосейсмичной территорией, что обусловлено расположением в его пределах Байкальской рифтовой системы (БРС). Здесь происходили и возможны сильные разрушительные землетрясения, а также регистрируются многочисленные слабые толчки [<http://www.seis-bykl.ru>]. В эпицентральной поле Байкальского региона наблюдается рассеянная и сосредоточенная сейсмичность [Арефьев, 1989]. Рассеянная сейсмичность образована не связанными между собой толчками, формирующими фоновую хаотичную сейсмичность. Сосредоточенная сейсмичность соответствует группирующимся событиям и наблюдается в виде отдельных кластеров [Мельникова и др., 2020]. Результаты декластеризации “Каталога землетрясений Прибайкалья” показали, что четвертая часть землетрясений в регионе являются афтершоками землетрясений с $K_p \geq 12.5$ [Радзиминович, Очковская, 2013]. Группирующиеся землетрясения могут быть отнесены к форшок-афтершоковым последовательностям и к роям сейсмических событий. В некоторых случаях афтершоки могут сопровождаться “вторичными” афтершоками, что приводит к усложнению режима афтершоковых серий [Ключевский, 2003; Радзиминович, Очковская, 2013]. Согласно работе [Очковская, Радзиминович, 2011], для байкальских землетрясений наблюдается зависимость количества афтершоков от магнитуды главного толчка. Области группирования землетрясений часто имеют форму, близкую к изометричной, и средние размеры около 15 км [Мишарина, Солоненко, 1990]. Группы землетрясений распределены по территории БРС достаточно равномерно, но имеются участки повышенной плотности групп. Пространственного разобшения афтершоковых и роевых последовательностей в БРС не наблюдается: в областях генераций групп афтершоков происходят и рои землетрясений. Анализ распределения групп толчков во времени показывает, что максимальное количество групп землетрясений формируется после геодинамических активизаций литосферы БРС. Группы землетрясений относятся к наведенной сейсмичности, накладывающейся на фоновый сейсмический процесс региона, поскольку рои землетрясений отражают изменение реологических свойств локального объема геологической среды, а афтершоковый

процесс — перераспределение напряжений и деформаций в очаге после главного землетрясения [Ключевский и др., 2011]. Группами афтершоковых и роевых толчков проявляются переходные релаксационные процессы в геолого-геофизической среде. Релаксационные процессы отражают реакцию какой-либо системы на сильное (в масштабе системы) воздействие различной природы, выводящее ее из стационарного состояния. Анализ релаксационных процессов сейсмичности занимает особое место в изучении литосферы; он дает возможность прояснить структуру и особенности строения среды, а также изучить динамику отклика литосферы на сильное возмущение [Ключевский и др., 2015].

Информация о группах землетрясений, используемая в данной статье, заимствована из работ по исследованию этих групп землетрясений. Приведем краткое описание этих групп.

Ярким примером землетрясения, породившего крупную афтершоковую последовательность, является Бусийнгольское землетрясение (27.12.1991; $\varphi = 50.98^\circ$ с.ш., $\lambda = 98.08^\circ$ в.д., $M_S = 6.5$, $K_p = 16.2$). Это сейсмическое событие, приуроченное к Бусийнгольской впадине, связано с самой западной структурой в системе впадин БРС. Землетрясение породило афтершоковую последовательность, продолжавшуюся даже в 2000-х годах. В момент землетрясения активизировались разломные структуры как самой Бусийнгольской впадины, так и ее горного обрамления, но главный толчок в горном обрамлении и сила сейсмической активизации впадины несоизмеримо меньше силы активизации ее горного обрамления. Главной особенностью сейсмического процесса после данного землетрясения являются пульсирующие активизации сейсмического процесса в рассматриваемой впадине: так, в период до 2000 г. можно выделить порядка десяти циклов активизации сейсмического процесса [Еманов и др., 2006]. В цитируемой работе отмечается, что в 1991–1992 гг. крупные афтершоки Бусийнгольского землетрясения происходят вдоль линии, проходящей под углом к Бусийнгольской впадине.

Южнобайкальское землетрясение 25.02.1999 ($\varphi = 51.64^\circ$ с.ш., $\lambda = 104.82^\circ$ в.д., $K_p = 14.6$, $M_W = 6.0$), сопровождавшееся форшоками и афтершоками, является одним из сильнейших

землетрясений, произошедших в пределах южного Байкала за инструментальный период наблюдения. Это сейсмическое событие произошло в области пересечения нескольких разломов северо-восточного, северо-западного и запад-восточного простирания [Radziminovitch et al., 2006]. Форшоковая серия началась 9 февраля, магнитуда форшоков достигала значений $M_W = 4.7$ [Radziminovitch et al., 2005, 2006]. Эпицентрального поля форшоков было вытянуто в виде “цепочки” северо-западного простирания. Фаза основной активности завершилась Южнобайкальским землетрясением 25.02.1999 в 18:58. Второе по силе сейсмическое событие произошло через 13 минут после главного толчка и отличалось от него по магнитуде на 0.9 ($M_W = 5.1$). Форма эпицентрального поля изменилась после главного толчка, вытянувшись в северо-восточном направлении. Форшок-афтершоковая последовательность представлена двумя сериями толчков, разделенных фазами сейсмического затишья 23 и 24 февраля. Первая последовательность была вызвана движениями по разлому северо-западного простирания, а вторая — связана с главным толчком. В целом эпицентрального поля группы землетрясений вытянуто с севера на юг. В феврале эпицентрального поля имело тенденцию к расширению, а в марте 1999 г. количество афтершоков последовательности стало уменьшаться. В июне 1999 г. количество толчков данной области приблизилось к фоновым значениям [Radziminovitch et al., 2006].

Кяхтинское землетрясение 13.05.1989 ($\varphi = 50.17^\circ$ с.ш., $\lambda = 105.34^\circ$ в.д., $M_W = 5.7$) сопровождалось более чем 450 афтершоками энергетического класса $K_p \geq 7$, регистрируемыми до 20 декабря 1989 г. Эпицентры этой группы землетрясений локализованы в междуречье Селенги и Дзелтэры (Желтуры) на юго-восточном склоне хр. Бутэлийн-нуру. Бутэлийнский блок, в котором, видимо, локализован очаг главного землетрясения, ограничен Селенгинским и Желтуринским разломами, продолжающимися к востоку Хангайскую систему сейсмогенерирующих разломов и переходящими в Тугнуйский и Хилокский глубинные разломы [Radziminovitch et al., 2013].

В районе Кичеро-Верхнеангарского горного перешейка между Кичерской впадиной и

бассейном Верхней Ангары 21.03.1999 произошло Кичерское землетрясение ($\varphi = 55.83^\circ$ с.ш., $\lambda = 110.34^\circ$ в.д., $K_p = 14.5$, $M_w = 6.0$). Это сейсмическое событие было приурочено к разлому северо-восток–юго-западного простирания. Общее число форшоков и афтершоков, происходивших в январе – декабре 1999 г., составляет около 6000 [Melnikova et al., 2007]. Затем в этой области сейсмическая активность затухала в течение нескольких лет.

К отрогам Баргузинского хребта, примыкающим к юго-восточному берегу Байкала, приурочена Томпудинская серия землетрясений. Максимальное количество толчков этой серии произошло в 2007 г., а главный толчок магнитудой $M_w = 5.3$ зарегистрирован 04.07.2007 ($\varphi = 55.45^\circ$ с.ш., $\lambda = 110.39^\circ$ в.д.) [Гилева и др., 2013]. Изолинии плотности эпицентров толчков данной серии со временем вытягиваются в северо-восток–юго-западном направлении [Мельникова, Гилева, 2017]. Такое же направление деструкции земной коры выявлено в простирании плоскостей разрывов в очагах с известными механизмами [Гилева и др., 2013]. Максимальная плотность толчков этой серии была приурочена к сейсмоактивному блоку, ограниченному со всех сторон разноориентированными разломами в основном невысокого ранга [Мельникова, Гилева, 2017] и находящемуся на пересечении полос повышенной концентрации эпицентров северо-западного и северо-восточного направлений.

Олдонгсинский рой землетрясений начался в сентябре 1997 г. в пределах Верхнетокинской впадины, охватывающей верховья рек Токко и Чаруода. Всплеск его активности приходился на последнюю декаду октября. Всего в Олдонгсинском рое 1997 г. зафиксировано 597 толчков с $K_p = 7–12$, причем 60% из них зарегистрированы в октябре [Козьмин, 2003]. В ноябре – декабре 2005 г. в пределах Олекмо-Чарского нагорья, расположенного в междуречье Олёкмы и ее притока Чары (бассейн р. Лены) между Байкальской рифтовой системой и Становой складчатой системой в Южной Якутии происходила Чаруодинская группа землетрясений. Эта группа сочетала в себе свойства афтершоковой и роевой последовательностей: сильные события роя сопровождались последовательностями афтершоков

[Шибаетов и др., 2011]. В течение указанного периода времени зарегистрировано 2623 сейсмических события, самое сильное из которых произошло 10.11.2005 ($\varphi = 57.37^\circ$ с.ш., $\lambda = 120.77^\circ$ в.д., $K_p = 15.7$, $M_w = 5.7$).

Применение формализованной методики выделения цепочек землетрясений в предыдущих работах [Ключевский, Какоурова, 2019; Какоурова, Ключевский, 2020]. позволило выделить 2172 цепочки землетрясений, 2120 из которых состоит из трех и 52 – из четырех землетрясений. Тот факт, что 97.6% цепочек состоит из трех землетрясений, обусловлен малой допустимой нелинейностью цепочки (сектор допустимой нелинейности цепочки составляет $\beta = 10^\circ$) и, возможно, выбором для исследования Байкальского региона, значительную часть которого занимает БРС, имеющая сложное пространственно-временное распределение эпицентров землетрясений. В качестве исходных данных для выделения цепочек землетрясений использовались $N = 51811$ землетрясений энергетического класса $K_p \geq 8$, зарегистрированные в пределах Байкальского региона в 1964–2013 гг. Байкальским [<http://www.seis-bykl.ru>] и Алтае-Саянским [<http://www.asgsr.ru>] филиалами Единой геофизической службы Российской академии наук. Пространственно-временное и энергетическое распределение выделенных в эпицентральной зоне региона квазилинейных цепочек землетрясений соответствует распределению сейсмических событий: цепочки землетрясений формируются в пределах БРС, где плотность землетрясений высокая, а азимутальное распределение цепочек соответствует в целом простиранию зон деструкции литосферы. Кроме того, максимумы годовых чисел цепочек и землетрясений наблюдаются одновременно, а большинство цепочек образовано слабыми землетрясениями (рис. 1) [Какоурова, Ключевский, 2020]. Этот результат, а также результаты имитационного моделирования мигрирующей сейсмичности [Ключевский, Какоурова, 2018; Какоурова и др., 2021] показали, что в эпицентральной зоне сейсмичности Байкальского региона могут присутствовать цепочки “миграций” и цепочки “псевдомиграций”. Однако, задача разделения этих двух видов цепочек в настоящее время не решена. В данной статье продолжено изучение распределения выделенных в предыдущих работах авторов

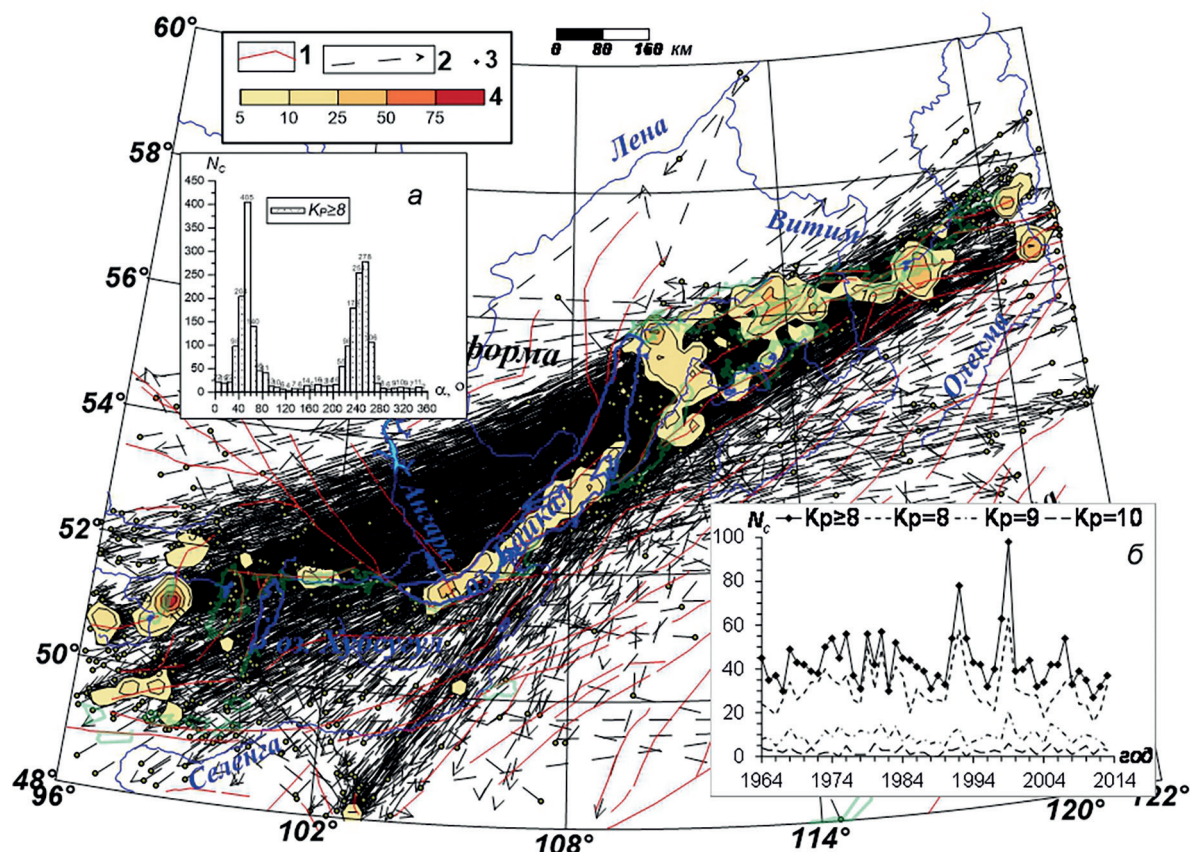


Рис. 1. Карта расположения и ориентации 2172 цепочек землетрясений в земной коре Байкальского региона [Ключевский, Какоурова, 2019].

1 – разломы, 2 – “векторы” цепочек землетрясений, 3 – эпицентры первых землетрясений в цепочке с $K_p \geq 8$, 4 – шкала изолиний плотности эпицентров первых землетрясений в цепочках в площадках $0.2^\circ \times 0.3^\circ$.

На вставке (а) показано распределение количества цепочек землетрясений по азимутам. На вставке (б) приведены количества цепочек землетрясений в год.

цепочек землетрясений, состоящих из трех сейсмических событий. Предпринята попытка частичного решения задачи поиска возможных цепочек “миграций” землетрясений путем анализа пространственно-временного и энергетического распределения квазилинейных цепочек сейсмических событий, сформировавшихся в группах землетрясений – форшок-афтершоковых и роевых последовательностях.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для выделения цепочек землетрясений разработана формализованная методика, основой которой является анализ азимутов, рассчитанных между последовательными во времени землетрясениями различных энергетических классов или магнитуд [Какоурова, Ключевский, 2020; Патент № 26593344].

1. Для заданной территории формируется выборка данных N землетрясений, произошедших в заданном временном интервале и имеющих выбранный диапазон энергетических классов или магнитуд. Данная выборка имеет формат стандартного каталога землетрясений.

2. Производится расчет азимутов α_{ij} , $i = 1 \dots N - 1$, $j = 2 \dots N$, $j = i + 1$, от эпицентра первого землетрясения выборки ко второму, от второго – к третьему и т.д. до последнего толчка в выборке.

3. Проводится временной анализ азимутов последовательных во времени землетрясений в заданном секторе допустимой нелинейности β от азимутального направления. Пусть 1, 2, 3 – три последовательных во времени землетрясения, α_{12} и α_{23} – азимуты землетрясений

2 и 3, рассчитанные от предыдущих толчков. Для анализа производится расчет среднего значения этих азимутов α , а затем проверяется условие $\alpha - \beta / 2 \leq \alpha_{ij} \leq \alpha + \beta / 2$, $i = 1, 2$, $j = 2, 3$. Если условие для землетрясений 1, 2, 3 не выполняется, производится его проверка для землетрясений 2, 3, 4. Если условие выполняется для трех землетрясений, то эти землетрясения образуют цепочку, и путем включения в анализ следующего за землетрясением 3 землетрясения 4 аналогичным образом проводится анализ возможности формирования цепочки из землетрясений 1, 2, 3, 4. Если условие не выполнилось для четырех землетрясений, в специальный массив (каталог цепочек землетрясений) записывается цепочка из землетрясений 1, 2, 3. Иначе производится проверка формирования цепочки из пяти сейсмических событий. Таким образом проверяется вся выборка сейсмических событий и выделяются все цепочки, удовлетворяющие заданному сектору допустимой нелинейности.

Работа пунктов 2 и 3 методики реализуется программой “Chain” [Свидетельство № 2016661616]. Отличительными особенностями данной методики выделения цепочек землетрясений от методик многочисленных предшественников [Mogi, 1968; Лукк, 1978; Левина, Ружич, 2015 и др.] являются использование статистического подхода и анализа азимутов, рассчитанных между последовательными (происходящими друг за другом по времени) сейсмическими событиями. Это дает возможность использования в качестве исходных данных большого количества землетрясений различной силы и выделения всех квазилинейных цепочек, имеющих в выборке землетрясений. Допустимая кривизна цепочки задается сектором допустимой нелинейности. Кроме того, методика позволяет выделять цепочки землетрясений на различных иерархических уровнях литосферы и исследовать как территорию любой формы и площади с расположенными разломами, так и зону отдельного сейсмоактивного разлома. При выделении цепочек в зоне разлома следует учитывать, что пространственно-временные закономерности в возбуждении активизации разломов следует искать в пространственно-временной организации локализации очагов в областях динамического влияния уже установленных сейсмоактивных

разломов [Шерман, 2014]. При выделении цепочек в пределах некоторой территории может наблюдаться присутствие цепочек слабых землетрясений там, где нет известного разлома. Это может объясняться тем, что существующий разлом не проявлен на поверхности Земли, поэтому методика может быть полезна при изучении литосферы сейсмоактивной территории. С позиций геодинамики формирование цепочек последовательных землетрясений вдоль линии разлома можно объяснить направленной генерацией очагов землетрясений вдоль зоны сейсмотектонической деструкции геологической среды, обусловленной прохождением по разломам деформационных волновых возмущений от энергетических источников [Викулин, 2003; Быков, 2005]. Поскольку зона тектонической деструкции обычно является квазилинейно ориентированной временной изменчивости положения эпицентров толчков будет отражать поступательное, направленное в одну сторону возникновение очагов землетрясений вдоль зоны разлома. Подобная локализация и динамика процесса “миграции” очагов землетрясений хорошо вписываются в рамки модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Мячкин и др., 1975].

Для того чтобы определить, подчиняется ли исследуемый ряд (в нашем случае значения логарифма расстояния между землетрясениями или общей длины цепочки) закону нормального распределения, были использованы статистические критерии согласия, что является стандартной процедурой при анализе данных. Для проверки нулевой гипотезы использовались комбинированный тест на отклонение от нормального распределения Д’Агостино–Пирсона [D’Agostino, Pearson, 1973] и тест Шапиро–Уилка [Shapiro, Wilk, 1965]. Выбор этих тестов обусловлен тем, что тест Шапиро–Уилка обычно используется для небольших выборок [King, Eckersley, 2019], а тест Д’Агостино–Пирсона предназначен для выборок средних и больших размеров [D’Agostino, 1971].

Критерий Шапиро–Уилка основан на оценке дисперсии исследуемого ряда, тест Д’Агостино–Пирсона для проверки на отклонение от нормального распределения использует статистику, основанную на таких метриках, как

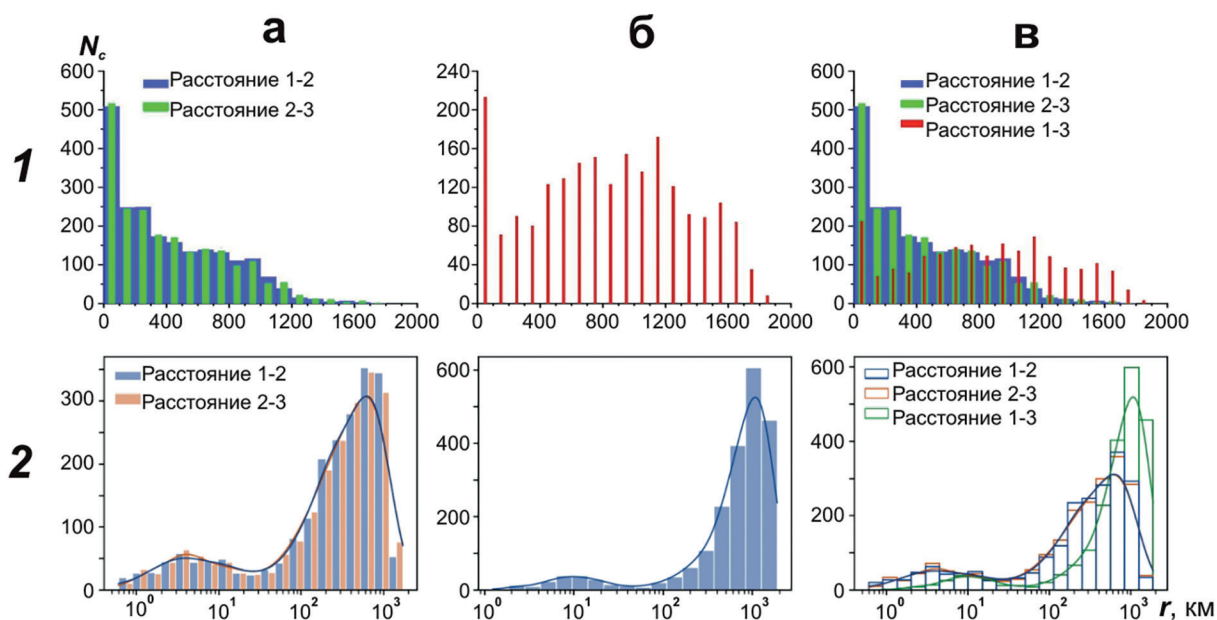


Рис. 2. Гистограммы распределения количества цепочек землетрясений с $K_p \geq 8$, выделенных в Байкальском регионе, по расстояниям r и их осредняющие кривые в линейном (1) и логарифмическом масштабах (2). а — для расстояния от первого до второго землетрясения (Расстояния 1-2) и от второго до третьего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

симметричность и эксцесс. Тест Д'Агостино—Пирсона является правосторонним критерием: проверяемая гипотеза о нормальности распределения отклоняется при больших значениях статистики $K2$ (превышающих критическое). В то время как в тесте Шапиро—Уилка (левосторонний критерий) при больших значениях статистики W (близких к значению 1) проверяемая гипотеза о нормальности не может быть отклонена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе проанализированы расстояния между первым и вторым, вторым и третьим, а также — между первым и третьим землетрясениями во всех выделенных цепочках (r_{12} , r_{23} , r_{13} соответственно), состоящих из трех землетрясений. Выбор цепочек, состоящих именно из трех толчков, обусловлен тем, что большинство выделенных цепочек состояло именно из такого количества сейсмических событий (2120 из 2172). Построение гистограммы распределения расстояний показало присутствие максимумов распределений расстояний r_{12} , r_{23} , r_{13} в диапазоне $r = 0–100$ км, сформированный, главным образом, цепочками, образовавшимися в группах землетрясений (рис. 2(1)). Назовем такие цепочки цепочками

группирующей сейсмичности. С ростом значений расстояний r_{12} и r_{23} количество цепочек уменьшается, в то время как в распределении расстояний r_{13} кроме максимума в том же диапазоне расстояний наблюдаются максимумы в диапазонах $r_{13} = 200–300$ км, $r_{13} = 700–800$ км, $r_{13} = 1100–1200$ км и $r_{13} = 1500–1600$ км. На рис. 2(2) гистограммы представлены в логарифмическом масштабе. Из рисунка видно, что все распределения становятся бимодальными и происходит не наблюдающееся в линейном масштабе закономерное смещение максимумов в сторону больших расстояний. Примерная граница двух распределений, или точка перегиба кривой, осредняющей гистограмму, согласно графику, составляет приблизительно ~ 30 км для расстояний между землетрясениями и ~ 60 км для общей длины цепочки. Распределения цепочек, расстояния между событиями в которых относятся к первому локальному максимуму на гистограммах (см. рис. 2(2)), соответствуют максимумам $0–100$ км на линейной гистограмме (см. рис. 2(1)). Проверка этих симметричных распределений на соответствие логнормальному закону проведена с использованием комбинированных статистических тестов Д'Агостино—Пирсона и Шапиро—Уилка. Результаты тестирования показали, что для

логарифма значений распределений r_{12} и r_{23} гипотеза о нормальности отклоняется на уровне значимости $\alpha = 0.05$ в любом диапазоне расстояний $(0, r]$, где r меняется от 5 до 120 км. Таким образом, распределения r_{12} и r_{23} статистически значимо отличаются от логнормального, и такие отклонения могут быть, связаны с ошибкой определения эпицентров землетрясений. Для распределения длин цепочек r_{13} установлено, что гипотеза о том, что логарифм значений r_{13} распределен по нормальному закону, не может быть отклонена на уровне значимости $\alpha = 0.05$ в диапазоне расстояний $(0, r]$, где r меняется в пределах значений, указанных для обоих тестов в табл. 1, с наилучшим соответствием логнормальному распределению при $r = r_0$. Эти значения являются статистическим критерием для того, чтобы отнести цепочку к группирующейся сейсмичности, что подразумевает возможность их формирования в пространственно-временных пределах реализации роев, форшоковых или афтершоковых серий землетрясений. 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 трех землетрясений, и общая вероятность значительной ошибки определения эпицентров землетрясений снижается и оказывает меньшее влияние на форму распределения, хотя сама ошибка может возрастать. Отметим, что полученные значения позволяют отнести цепочки, соответствующие им, к группирующейся сейсмичности, поскольку в группах землетрясений сейсмические события происходят на относительно небольших расстояниях друг от друга и при этом могут происходить друг за другом во времени.

Для исключения несимметричных цепочек, т.е. цепочек с существенно отличающимися расстояниями между землетрясениями, статистические тесты Д'Агостино–Пирсона и Шапиро–Уилка проведены для распределения полных длин цепочек r_{13} , с ограничением расстояний между эпицентрами последовательных землетрясений в цепочках r_{12} и r_{23} . Это тестирование также показало, что распределение r_{13} статистически значимо не отличается от логнормального. Значения расстояний, при

которых наблюдается соответствие распределения длин цепочек логнормальному распределению, приведено в табл. 1. При этом расстояния между землетрясениями r_{12} и r_{23} в цепочке меньше указанных в табл. 1 значений. Результат в целом соответствует и значениям, когда критерием служит вся длина цепочки.

Таблица 1. Значения расстояний, при которых наблюдается соответствие распределения длин цепочек логнормальному распределению

Критерий r , км	Пределы значений критерия r , км	“Наилучшее” значение критерия r_0 , км	Ограничение длины цепочки r_{13} при $r = r_0$, км
тест Д'Агостино–Пирсона			
r_{13}	36—118	73	73
r_{12}, r_{23}	27—92	64	80
тест Шапиро–Уилка			
r_{13}	44—85	68	68
r_{12}, r_{23}	31—79	55	70

Следует отметить, что цепочки, формирующиеся в группах землетрясений, влияют не только на вид распределения расстояний между землетрясениями в цепочках, но и на характер распределения времени между событиями, образующими цепочки. Так, при изучении распределения времени между событиями во всех цепочках, состоящих из трех землетрясений, проверка показывает несоответствие распределения экспоненциальному закону времени между первым и вторым, вторым и третьим, а также первым и третьим землетрясениями цепочек. При исключении цепочек группирующейся сейсмичности с использованием критериев, полученных при изучении распределения расстояний между землетрясениями в цепочках, распределения времени между первым и вторым, а также вторым и третьим землетрясениями принимает экспоненциальный характер.

Установленные критерии применены для выделения цепочек группирующейся сейсмичности. Наиболее вероятные длины цепочек для обоих тестов составили 4–24 км при доверительном интервале 68%. Далее, на основе

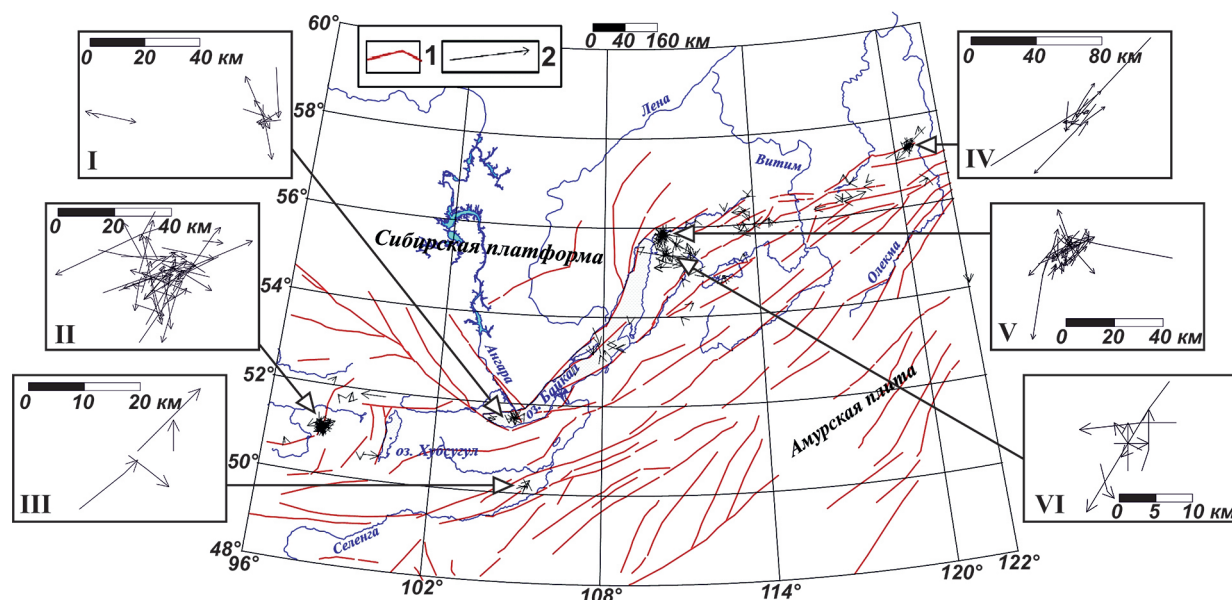


Рис. 3. Карта расположения и ориентации цепочек группирующей сейсмичности в областях групп сейсмических событий в земной коре БРС.

1 — разломы, 2 — цепочки группирующей сейсмичности.

На врезках — эпицентральные области Южнобайкальского (1999 г.) и Култукского (2008 г.) землетрясений (I), Бусийнгольских землетрясений 1976 г. и 1991 г. (II), Кяхтинского землетрясения 1989 г. (III), Олдонгсинской группы землетрясений 1997 г. (IV), Кичерского землетрясения 1999 г. (V), Томпудинской серии толчков 2007 г. (VI).

всех полученных критериев расстояние между соседними землетрясениями в цепочках ограничено значением $r \leq 65$ км. Карта расположения цепочек землетрясений, соответствующих такому ограничению, представлены на рис. 3. На карте наблюдаются концентрации цепочек землетрясений в областях формирования следующих групп землетрясений: Бусийнгольской, Кяхтинской, Южнобайкальской, Кичерской, Томпудинской, а также Олдонгсинской и Чаруодинской. В настоящей работе изучено пространственно-временное и энергетическое распределение этих цепочек землетрясений.

В области афтершоковой активности Бусийнгольского землетрясения выделена $N_c = 41$ цепочка продолжительностью от нескольких минут до 12 часов. Цепочки сформировались в 1991–1998 гг. Энергетический класс событий, формирующих цепочки, в основном составляет $K_p = 8-9$, однако, в одну из цепочек 1992 г. входит сейсмическое событие с $K_p = 13$. На розе-диаграмме азимутов цепочек (рис. 4а) наблюдается различные направления цепочек, в азимуте $\alpha = 40-50^\circ$ имеется максимум из $N_c = 5$ цепочек.

В области Бусийнгольского землетрясения в 1976 г. наблюдалась сейсмическая активизация, начавшаяся после землетрясения 01.04.1976 г. ($\varphi = 51.15^\circ$ с.ш., $\lambda = 97.97^\circ$ в.д., $M_s = 5.4$, $K_p = 14$). Афтершоками этой группы в апреле–июне 1976 г. сформировано $N_c = 6$ цепочек. Продолжительность этих цепочек составляет от нескольких часов до нескольких дней, а максимальный энергетический класс землетрясений, входящих в цепочки, составляет $K_p = 11$. Азимуты этих цепочек различные и совпадающие с направлениями некоторых цепочек афтершоков Бусийнгольского землетрясения (см. рис. 4б). Еще две цепочки землетрясений, выделенных в той же самой области в мае 1966 г., направлены на юго-запад и север ($\alpha = 235^\circ$ и $\alpha = 12^\circ$). Продолжительность этих цепочек составляет 1.5–2 часа, а максимальный энергетический класс землетрясения, входящего в цепочки, составляет $K_p = 13$.

В целом можно отметить общее соответствие азимутального распределения цепочек простиранию нодальных плоскостей в очагах главных землетрясений рассмотренных последовательностей, определенных в работе [Еманов и др., 2006]. При сопоставлении роз-диаграмм

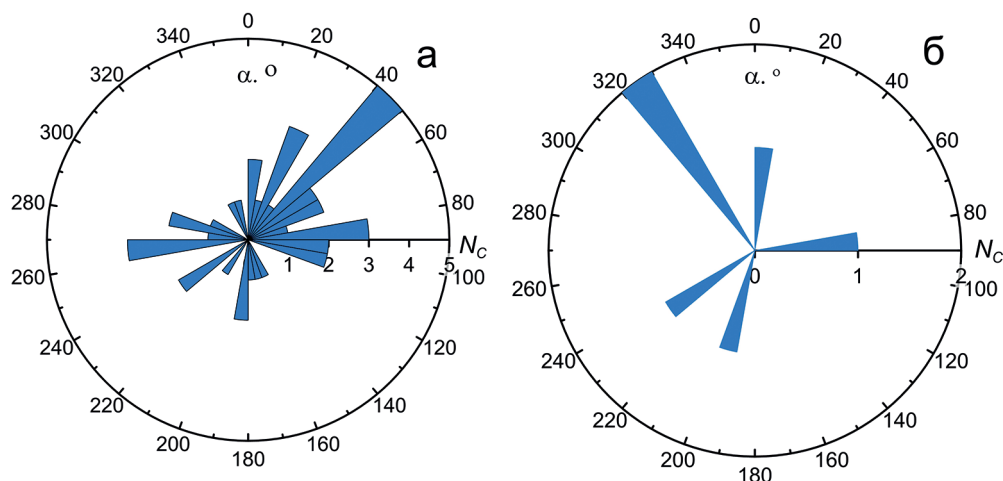


Рис. 4. Розы-диаграммы распределения количеств цепочек группирующей сейсмичности N_C по азимуту α в области Бусийнгольского землетрясения. а — для афтершоков Бусийнгольского землетрясения, б — для активизации 1976 г.

азимуты цепочек и распределения цепочек на карте (см. рис. 3) можно видеть некоторое соответствие направленности цепочек простиранию, расположенных в данной области Белино-Бусийнгольского и Эрзино-Агордакского разломов.

В области эпицентрального поля форшок-афтершоковой группы Южнобайкальского землетрясения выделено $N_C = 9$ цепочек группирующей сейсмичности. Восемь из девяти цепочек произошли в феврале 1999 г., до и после главного толчка, и принадлежность этих цепочек к группе сомнений не вызывает. Последняя цепочка сформировалась 31 мая 2000 г., и ее принадлежность к группе определить сложно, поскольку определение времени окончания серии афтершоков затруднено: с одной стороны, уже в апреле 1999 г. количество толчков в данной области БРС достигло фоновых значений, с другой стороны, землетрясение, произошедшее в эпицентральной зоне Южнобайкальского землетрясения 31 мая ($M_w = 5.2$), указывает на то, что эта зона еще активна согласно работе [Radziminovitch et al., 2006]. Выделенные здесь цепочки, образованные сейсмическими событиями с $K_p = 8-14$, происходили не более нескольких часов. На розе-диаграмме азимутального распределения цепочек (рис. 5а) прослеживаются различные направления цепочек и наблюдается близость азимутов значительной части цепочек простиранию разломов, в зоне пересечения которых произошла данная группа землетрясений [Добрынина, Саньков,

2010; Radziminovitch et al., 2006]. Кроме того, при сопоставлении рис. 5а и 5б наблюдается частичное соответствие ориентации цепочек простиранию нодальных плоскостей в очагах землетрясений данной группы. Неполное соответствие направлений объясняется тем, что в ориентации цепочек больше проявлена направленность эпицентрального поля форшоков, чем афтершоков Южнобайкальского землетрясения.

В пределах района формирования Кяхтинского землетрясения выделено $N_C = 4$ цепочки сейсмических событий, формировавшиеся 13–24 мая 1989 г. Цепочки, имевшие продолжительность 1–4.5 ч, состояли из землетрясений с $K_p = 8-9$ и имели северное, северо-восточное и юго-восточное направления. Направления цепочек частично соответствуют простиранию одной из нодальных плоскостей в очаге главного землетрясения [Radziminovitch et al., 2013], а две цепочки имеют направленность, близкую простиранию Бутуэлинского и Кижингского разломов. Сама группа цепочек продолжает разломную зону по простиранию.

В области Кичерской активизации выделено $N_C = 32$ цепочки землетрясений, формирующиеся в феврале–декабре 1999 г. Цепочки состояли из толчков с $K_p = 8-11$ и длились от нескольких минут до 21 ч. На рис. 6а приведены розе-диаграммы азимутального распределения цепочек. Из рисунка видно, что цепочки имеют различные азимуты с некоторым преобладанием

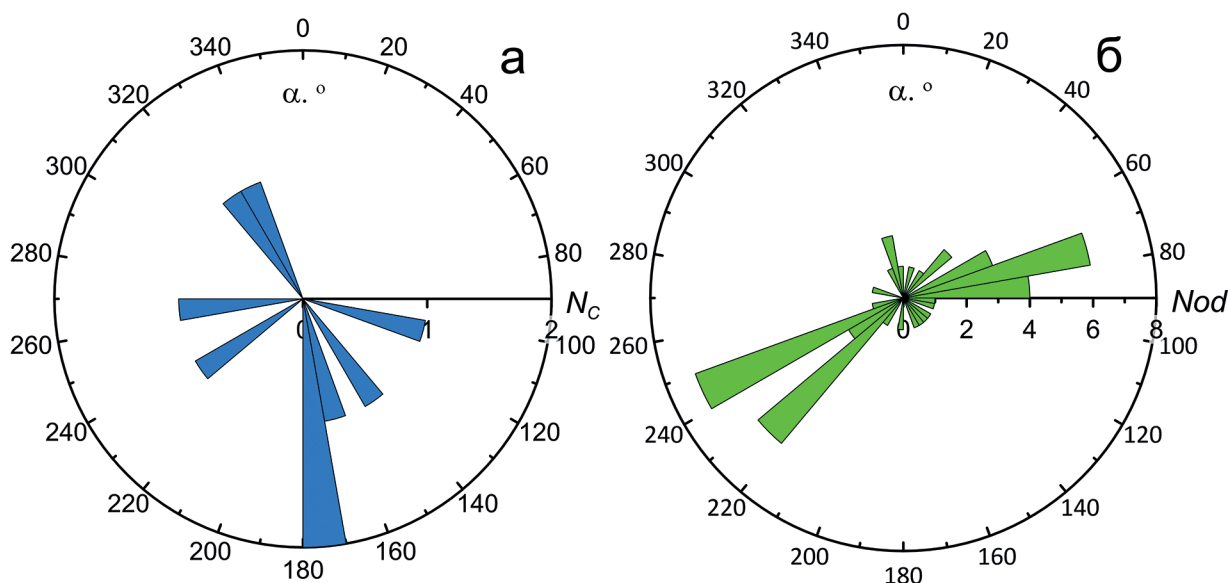


Рис. 5. Розы-диаграммы распределения количеств цепочек группирующей сейсмичности N_c по азимуту α в области Южнобайкальского землетрясения. а — для всех выделенных цепочек; б — распределение ориентаций нодальных плоскостей в очагах землетрясений группы [Radziminovitch et al., 2005].

северного и южного направлений. При сопоставлении рис. 6а и 6б отмечается частичное соответствие азимутального распределения цепочек и простираения нодальных плоскостей в очагах землетрясений. Следует также отметить, что направленность значительной части цепочек близка к простираению расположенных в рассматриваемой области Кичерского и Верхнеангарского разломов.

В области эпицентрального поля Томпудинской серии выделено $N_c = 8$ цепочек землетрясений. Эти цепочки формировались в июле–августе 2007 г. из сейсмических событий энергетического класса $K_p = 8–11$, а их продолжительность составляла от 1 мин до 15 ч. На розе-диаграмме распределения цепочек по азимутам наблюдаются различные направления цепочек. Форма группы концентрации цепочек, а также направленность цепочек наибольшей длины соответствует форме кластера Томпудинской серии.

В области формирования Олдонгсинского и Чаруодинского роев землетрясений выделено $N_c = 13$ цепочек землетрясений, формирующихся с октября 1997 г. по сентябрь 1999 г. и относящихся по времени к Олдонгсинскому рою. Продолжительность найденных цепочек составляет от нескольких минут до одних суток,

а энергетический класс событий, входящих в цепочки, составляет $K_p = 8–13$. В распределении цепочек по азимутам наблюдается близость этого распределения области растяжения на диаграмме механизма очага сильнейшего в Олдонгсинском рою толчка, произошедшего 24.10.1997 с $K_p = 12.5$ [Козьмин, 2003]. Кроме того, наблюдается соответствие азимутов некоторых цепочек простираению расположенных в данной области Токкинского и Ханийского разломов.

ОБСУЖДЕНИЕ

В работах авторов данной статьи изучается вопрос о существовании в эпицентральной поле сейсмичности не только цепочек “миграций” землетрясений, но и цепочек, формирующихся при случайном пространственно-временном распределении землетрясений. Присутствие в эпицентральной поле случайных цепочек землетрясений, не имеющих геофизической природы, обосновывается, прежде всего, соответствием пространственно-временного и энергетического распределения землетрясений и цепочек сейсмических событий, а также выделением цепочек в модельных полях “эпицентров” имитационных событий. Поскольку цепочки “миграций” землетрясений обусловлены

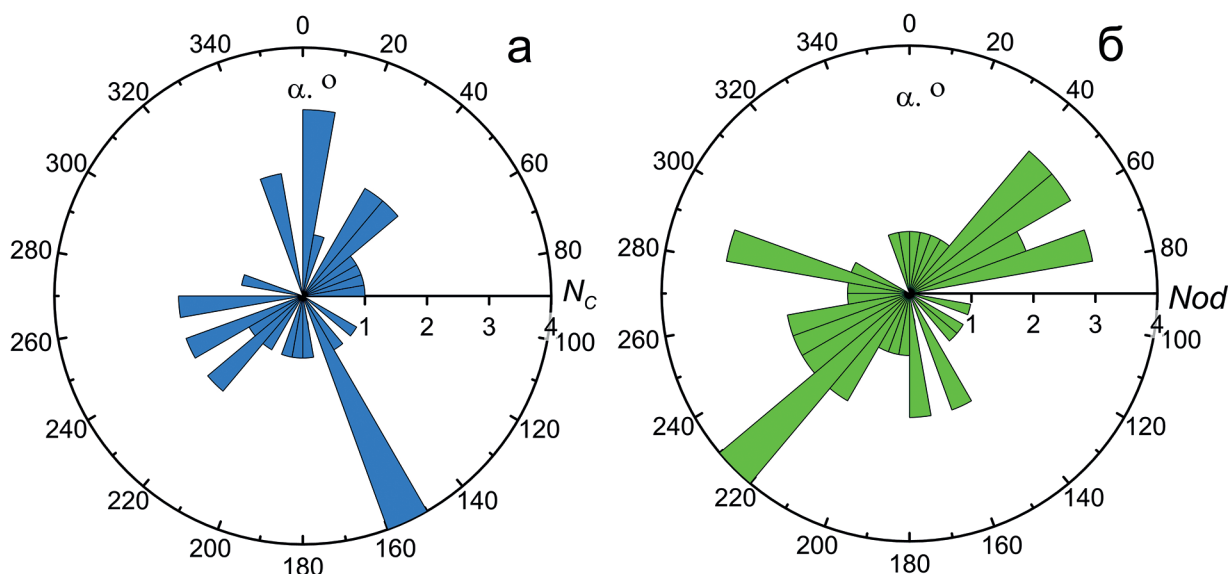


Рис. 6. Розы-диаграммы распределения количеств цепочек группирующей сейсмичности N_c по азимуту α в области Кичерского землетрясения. а — для всех выделенных цепочек; б — распределение ориентировок нодальных плоскостей в очагах землетрясений группы [Melnikova et al., 2007].

геолого-геофизическими процессами в земной коре, они могут формироваться на определенных ее иерархических уровнях.

Статистический анализ показал, что расстояния между землетрясениями в цепочках имеют бимодальные распределения в логарифмическом масштабе. В частности, в распределении расстояний большой вклад вносят группирующиеся землетрясения. Цепочки группирующей сейсмичности выделены как среди землетрясений некоторых роевых последовательностей, так и в последовательностях форшоков и афтершоков и могут отражать происходящие при этом изменения напряженно-деформированного состояния земной коры. Так, можно полагать, что более длинные цепочки землетрясений в группах приурочены к зонам, расположенным в соответствующих областях разломов, а короткие цепочки могут относиться к приразломным трещинам, образовавшимся при движении крыла тектонического разрыва, сопровождающимся значительным трением [Данилович, 1961; Шерман, Пшенников, 1980]. Отметим, что приуроченность цепочек землетрясений к зонам деструкции литосферы Байкальского региона показана при исследовании цепочек в работе [Новопашина, Саньков, 2010].

В работе [Добрынина, Саньков, 2010] отмечено, что характер распределения во времени выделившейся энергии для сейсмических последовательностей напрямую связан с напряженно-деформированным состоянием среды и отражает процесс разрядки напряжений в сейсмоактивной области. Результаты нашей работы позволяют предположить, что цепочки группирующей сейсмичности могут отражать особенности перераспределения тектонических напряжений и деформаций в области геологической среды, в которой происходит группа землетрясений. Это может быть связано с особенностями строения земной коры в области реализации данных групп землетрясений. Также в данной работе сделан вывод о том, что процесс деструкции развивается последовательно в пределах зоны активных деформаций, а направление распространения разрывов может служить индикатором зоны будущего землетрясения. Такой процесс может быть выражен в том числе формированием цепочек землетрясений.

При изучении распределения цепочек обнаружено частичное соответствие их азимутов ориентациям нодальных плоскостей в очагах землетрясений. Наиболее вероятная плоскость разлома из двух нодальных в некоторых из рассмотренных случаях может маркироваться

преобладающим направлением цепочек, сформированных в группах сейсмических событий. Возможно, цепочки землетрясений могут формироваться в единой плоскости разрыва или трассировать ее.

Выделение квазилинейных цепочек в группах землетрясений является интересным результатом, однако, примечателен тот факт, что цепочки выделены только в семи группах землетрясений, среди которых имеются как афтершоковые, так и роевые последовательности. В то же время, разными авторами за инструментальный период наблюдения в пределах БРС выделено десятки [Солоненко, Солоненко, 1987], сотни [Радзиминович, Очковская, 2013] и даже тысячи [Ключевская и др., 2015] групп землетрясений. Такой результат может объясняться особенностями разрушения геологической среды и напряженно-деформированного состояния в тех частях земной коры, где группы землетрясений происходили с формированием цепочек землетрясений. Другой причиной выделения квазилинейных цепочек землетрясений в единичных группах сейсмических событий может являться то, что цепочки выделялись на уровне всего Байкальского региона, и цепочки, формирующиеся в группах событий, “разрывались” землетрясениями, происходящими вне групп. Изучить особенности формирования и распределения цепочек группирующейся сейсмичности более полно и детально станет возможным при формализованном выделении квазилинейных цепочек непосредственно среди землетрясений различных групп. Дальнейшее изучение и развитие полученных в настоящей работе результатов будет способствовать выявлению свойств цепочек землетрясений, которые будет возможно использовать для исследования особенностей разрушения земной коры в области, где происходит группа толчков с формированием цепочек. Кроме того, дальнейшие исследования необходимы для решения задачи поиска критериев идентификации цепочек “миграций” землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистическое исследование распределений расстояний между соседними последовательными во времени землетрясениями квазилинейных цепочек, состоящих из трех

толчков, а также длин этих цепочек, позволило выделить концентрации цепочек в областях формирования семи групп землетрясений: Бусингольских, 1976 и 1991 гг., Южнобайкальского, Кичерского, Кяхтинского землетрясений, Томпудинской серии, Олдонгсинской и Чаруодинской групп. Более длинные цепочки землетрясений в группах, возможно, приурочены к зонам расположенных в соответствующих областях разломов, а короткие цепочки могут относиться к приразломным трещинам, образовавшимся при движении крыла тектонического разрыва. Кроме того, при изучении распределения цепочек обнаружено частичное их соответствие ориентациям нодальных плоскостей в очагах землетрясений. Наиболее вероятная плоскость разлома из двух нодальных в некоторых случаях может маркироваться преобладающим направлением цепочек, сформированных в группах сейсмических событий.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44011. В работе задействовалось 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 ЛИТЕРАТУРЫ

Алтае-Саянский филиал ФГБУ ФИЦ “Единая геофизическая служба Российской академии наук” [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.asgsr.ru> (Дата обращения: 03.03.2022).

- Арефьев С.С. О картировании основных параметров сейсмического режима. Оценка эффекта сильных землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 30. М.: Наука, 1989. С. 4–14.
- Байкальский филиал ФГБУ ФИЦ “Единая геофизическая служба Российской академии наук” [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.seis-bykl.ru> (Дата обращения: 13.03.2022).
- Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176–1190. DOI: 10.5800/GT-2018-9-3-0369.
- Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. 150 с.
- Викулин А.В., Викулина С.А., Акманова Д.Р., 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.
- Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б. Томпудинское землетрясение 4 июля 2007 г. с $K_p = 14.2$, $M_w = 5.4$, $10 = 7-8$ (северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии, 2007 г. / Под ред. О.Е. Старовойта и др. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 363–372.
- Гусев А.А., Палуева А.А. Первые результаты исследования статистики направлений для пар эпицентров землетрясений-соседей на Камчатке // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 4. С. 529–543. DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0221.
- Данилович В.Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями // Материалы по геологии и полезным ископаемым Иркутской области. 1961. Вып. 2(XXIX). 48 с.
- Добрынина А.А., Саньков В.А. Скорости и направления распространения разрывов в очагах землетрясений Байкальской рифтовой системы // Геофизические исследования. 2010. Т. 11. № 2. С. 52–61.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., Колесников Ю.И. Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 1. С. 33–43.
- 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.
- Какоурова А.А., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Геоинформационные критерии выделения квазилинейных цепочек миграции землетрясений в эпицентральных полях сложной геометрии и переменной плотности распределения толчков // Геоинформатика. 2021. № 2. С. 4–25. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-4-25.
- Ключевская А.А., Демьянович В.М., Ключевский А.В., Зуев Ф.Л., Какоурова А.А. Группы землетрясений и группирующаяся сейсмичность в литосфере Байкальской рифтовой системы // Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности / Под ред. Л.В. Николаевой. Нерюнгри: Издательство Технического института (филиал) СВФУ, 2015. С. 111–119.
- Ключевский А.В. Кинематика и динамика афтершоков Бусийнгольского землетрясения 1991 г. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 65–78.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Группы землетрясений Байкальской рифтовой зоны: статистика и пространственно-временное распределение // Геодинамическая эволюция Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) // Материалы совещания. Вып. 9. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2011. С. 99–101.
- 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: Изд-во ИГ СО РАН, 2015. С. 139–143.
- Ключевский А.В., Какоурова А.А. Основные критерии выделения цепочек землетрясений в литосфере Байкальского региона // Известия ИГУ. Сер. “Науки о Земле”. 2018. Т. 23. С. 64–73. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.64.
- 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/S0869-5652488313-318.
- Козьмин Б.М. Якутия // Землетрясения северной Евразии в 1997 году. М.: ГС РАН, 2003. С. 151–156.
- 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.
- Лукк А.А. Пространственно-временные последовательности слабых землетрясений Гармского района // Физика Земли. 1978. № 2. С. 25–37.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А. О связи сейсмичности северного Прибайкалья с блоковым строением земной коры // Доклады Академии наук. 2017. Т. 473. № 4. С. 459–463. DOI: 10.1134/S1028334X17040031.
- 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.
- 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.
- 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.
- Новопашина А.В. Методика выявления миграции сейсмичности Прибайкалья средствами ГИС // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 33–36.
- Новопашина А.В., Саньков В.А. Скорости медленных миграций сейсмической активности в Прибайкалье // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 2. С. 197–203.
- Очковская М.Г., Радзиминович Н.А. Предварительные результаты анализа афтершоковых последовательностей Байкальской рифтовой зоны // Известия Иркутского государственного университета. Серия “Науки о Земле”. 2011. Т. 4. № 1. С. 164–172.
- Патент № 2659334 Российская федерация МПК. Способ определения цепочек землетрясений в эпицентральном поле сейсмичности / 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.
- Радзиминович Н.А., Очковская М.Г. Выделение афтершоковых и ровевых последовательностей Байкальской рифтовой зоны // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 2. С. 169–186. DOI: 10.5800/GT2013420096.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016661616 Российская федерация. Программа “Chain” / А.А. Какоурова, А.В. Ключевский; заявитель и правообладатель ФГБУН ИЗК СО РАН. № 2016519051; заявлено 24.08.2016; опубликовано 14.10.2016.
- Солоненко Н.В., Солоненко А.В. Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Наука, 1987. 96 с.
- Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. 1993. № 4. С. 43–53.
- Шебалин П.Н. Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 3–15.
- Шебалин П.Н. Увеличение радиуса корреляции и цепочки землетрясений перед сильнейшими сейсмическими событиями // Физика Земли. 2020. № 1. С. 30–42. DOI: 10.31857/S0002333720010135.
- Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 2. С. 83–117. DOI: 10.5800/GT-2013-4-2-0093.
- Шерман С.И., Пшенников С.П. Метод поясов в исследовании приразломной трещиноватости // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. Иркутск: Иркутский политехнический институт, 1980. С. 8–20.
- Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Академическое издательство “Гео”, 2014. 361 с.
- Шибяев С.В., Петров А.Ф., Козьмин Б.М., Имаева Л.П., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Тимиршин К.В., Петрова В.Е., Гилева Н.А., Пересыпкин Д.Н. Чаруодинский рой землетрясений 2005 г. и его ощутимые землетрясения: Чаруодинское-I 10 ноября в 19h 29m с $K_p = 15.7$, $M_w = 5.8$, $I_0 = 8$ и Чаруодинское-II 11 декабря в 15h 54m с $K_p = 14.8$, $M_w = 5.7$, $I_0 = 7$ (Южная Якутия) // Землетрясения северной Евразии в 2005 году. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 404–418.
- D’Agostino R., Pearson E.S. Tests for departure from normality // Biometrika. 1973. № 60. P. 613–622.
- King A.P., Eckersley R.J. Statistics for Biomedical Engineers and Scientists // Academic Press. 2019. 249 p.
- Melnikova V.I., Radziminovitch N.A., Gileva N.A., Chipizubov A.V., Dobrynina A.A. Activation of Rifting Processes in the Northern Cis-Baikal Region: A Case Study of the Kichera Earthquake Sequence of 1999 // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2007. V. 43. № 11. P. 905–921.
- Mogi K. Migration of seismic activity // Bull. of the Earthquake Research. Inst. 1968. V. 46. P. 53–74.
- Pollitz F., Vergnolle M., Calais E. Fault interaction and stress triggering of twentieth century earthquakes in Mongolia // Journal of Geophysical Res.: Solid Earth. 2003. V. 108(B10). P. 2503. DOI: 10.1029/2002JB002375.
- Radziminovitch N.A., Deverchere J., Melnikova V.I., Sankov V.A., Gileva N.A. The 1999 M_w 6.0 earthquake sequence in the southern Baikal rift, Asia, and its seismotectonic implications // Geophysical Journal International. 2005. V. 161. P. 387–400. DOI: 10.1134/S1069351307110018.
- Radziminovitch N.A., Gileva N.A., Melnikova V.I., Ochkovskaya M.G. Seismicity of the Baikal rift system from regional network observations // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. V. 62. P. 146–161.
- Radziminovitch N.A., Melnikova V.I., San’kov V.A., Levi K.G. Seismicity and seismotectonic deformations of the crust

- in the southern Baikal basin // *Physics of the Solid Earth*. 2006. V. 42. № 11. P. 904–920.
DOI: 10.1134/S1069351306110048.
- Fort Tejon earthquake // *Geophysical Res. Lett.* 2001. V. 28. № 16. P. 3079–3082. DOI: 10.1029/2001GL013005.
- Rydelek P.A., Sacks I.S.* Migration of large earthquakes along the San Jacinto fault; stress diffusion from the 1857 P. 591–611.
- Shapiro S.S., Wilk M.B.* An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*. 1965. V. 52. P. 591–611.

Quasilinear Earthquake Chains in Groups of Seismic Events Baikal Rift System

A. A. Kakourova*, V. I. Dzhurik, E. V. Bryzhak, V. M. Dem'yanovich**

Institute of Earth's Crust SB RAS, Lermontova str., 128, Irkutsk, 664033 Russia

**e-mail: anna2015@crust.irk.ru*

***e-mail: bryzhak@crust.irk.ru*

Identification of a large number of quasi-linear chains of earthquakes in the epicentral seismicity field of the Baikal region and their study showed that among these chains there may be not only chains of “migration” earthquakes, but also chains formed during a random spatio-temporal distribution of earthquakes. In this work, using a statistical analysis of the distribution of distances between epicenters, the possibility of forming chains of “migrations” within groups of seismic events is shown and their distribution is studied. It is noted that chains in groups of earthquakes are distinguished not only by the distribution of distances, but also by the time between them. The formation of chains of earthquakes was established in the areas of the following groups of earthquakes: Busiyingol and 1976 and 1991. in the same area, the South Baikal, Kyakhtinsky, Kichersky earthquakes of the Tompudinsky series, Oldongsinsky and Charudinsky groups. It is shown that these chains were formed during the implementation of these groups. In the identified areas of concentration of chains of grouping seismicity, a connection can be traced between the location and direction of the chains with the strike of fault zones, near-fault cracks and the orientation of nodal planes in earthquake sources.

Keywords: Baikal rift system, earthquake groups, “migrations” of earthquake epicenters, migrating seismicity, earthquake chains