

На правах рукописи



Какоурова Анна Александровна

**МИГРИРУЮЩАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА В
СТАТИСТИКЕ ПОЛЯ ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИЗК СО РАН, г. Иркутск)

Научный руководитель

Ключевский Анатолий Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН.

Брыжак Евгений Вадимович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН.

Официальные оппоненты:

Селезнев Виктор Сергеевич, доктор геолого-минералогических наук, и.о. зам. директора по научной работе (сейсмологический филиал ФГБУН Единой геофизической службы РАН, г. Новосибирск)

Мироманов Андрей Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем (ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск)

Защита состоится «5» октября 2022 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте <http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull225/3525.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или email: dobrynina@crust.irk.ru. Тел: 8(3952)426900

Автореферат диссертации разослан: «11» августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003 022 03
кандидат физико-математических наук



А. А. Добрынина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Представленная диссертационная работа направлена на уточнение имеющихся и получение новых знаний о геофизическом явлении «миграции» сейсмичности в земной коре Байкальской рифтовой системы (БРС). Явление «миграций» сейсмичности выявлено в многих сейсмоактивных регионах Земли [Касахара, 1985; Викулин, 2003; Shelly, 2010; Tung, Masterlark, 2018; Novopashina, Lukhneva, 2021; Vukov et al., 2022 и др.]. Это явление часто объясняют прохождением деформационных волн в зонах сеймотектонической деструкции литосферы. Результаты исследования «миграции» сейсмичности в эпицентральной поле БРС представлены в работах сотрудников ИЗК СО РАН [Новопашина, 2013; Шерман, 2017; Левина, Ружич, 2015]. При изучении этого явления исследователи во многих случаях применяют неформализованные или полуформализованные методики и разработки, а в анализе часто используются данные о сильных и умеренных землетрясениях. В связи с этим актуальной является разработка методики формализованного определения и выделения цепочек землетрясений, основанной на статистическом азимутальном анализе и позволяющей единообразно обработать инструментальные данные многочисленных толчков различной силы и набрать статистику выделенных цепочек на различных масштабных уровнях литосферы. Последующий анализ этих материалов дает возможность исследовать пространственно-временное, азимутальное и энергетическое распределение цепочек землетрясений и на этой основе выявить и верифицировать основные свойства и закономерности мигрирующей сейсмичности, т.е. изучить явление «миграции» сейсмичности. Актуальность работы повышается проверкой возможности формирования не только цепочек «миграции» землетрясений, возникновение которых обусловлено геофизическими процессами в земной коре, но и цепочек формирующихся при случайном пространственно-временном распределении сейсмических событий – псевдомиграций.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование мигрирующей сейсмичности в эпицентральной поле землетрясений Байкальского региона через формализованное выделение квазилинейных цепочек землетрясений в широком диапазоне энергетических классов толчков и анализ пространственно-временного, азимутального и энергетического распределения этих цепочек. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать и протестировать методику выделения квазилинейных цепочек землетрясений в эпицентральных полях сейсмичности на разных иерархических уровнях Байкальского региона.
2. Установить статистические критерии, позволяющие параметризовать выделение цепочек землетрясений.
3. На трех иерархических уровнях Байкальского региона определить и выделить цепочки землетрясений представительных энергетических классов, установить основные закономерности их пространственно-временного, азимутального и энергетического распределения, а также особенности распределений цепочек различной длины.
4. Для выявления возможных цепочек «миграций» землетрясений изучить взаимосвязь пространственно-временного распределения цепочек разной длины с областями сеймотектонической деструкции литосферы.

Характеристика объекта и предмет исследования. В настоящей работе под Байкальским регионом будем называть территорию, ограниченную координатами $\varphi = 48 - 60^\circ$ с. ш., $\lambda = 96 - 122^\circ$ в. д. Основным объектом исследования является распределение эпицентров землетрясений Байкальского региона. Основным предметом исследования являются выделенные в земной коре Байкальского региона квазилинейные пространственно-временные последовательности (цепочки) землетрясений. Дополнительным предметом исследования является имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности, используемая для определения критериев выделения цепочек, оценки уровня и верификации мигрирующей сейсмичности в земной коре исследуемых территорий.

Методы исследования. В настоящей работе для выделения и изучения цепочек сейсмических событий разработана и применена авторская методика определения и выделения цепочек сейсмических событий, в основе которой лежит статистический азимутальный анализ большого количества землетрясений. При проведении исследований в рамках авторской методики применялись следующие методы обработки и анализа фактического материала: анализ и синтез имеющейся информации о геолого-геофизическом строении и сейсмичности Байкальского региона и БРС, исследование сейсмичности статистическими методами, азимутальный анализ поля эпицентров землетрясений и имитационных событий, имитационное моделирование (при этом в диссертации была разработана имитационная модель мигрирующей сейсмичности), корреляционный анализ, а также графический метод.

Фактический материал. В работе использовались данные о 52155 землетрясениях представительных энергетических классов $K_p \geq 8$, зарегистрированных на территории Байкальского региона коллективом Байкальского и Алтае-Саянского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БФ ФИЦ ЕГС РАН [<http://www.seis-bykl.ru>] и АСФ ФИЦ ЕГС РАН [<http://www.asgsr.ru>]) в период 1964–2013 гг. и предоставленные по официальным запросам ИЗК СО РАН для выполнения научно-исследовательских работ. При реализациях решений базовой модели мигрирующей сейсмичности использовались массивы до 10^6 имитационных событий.

Защищаемые положения.

1. На основе формализованной методики в эпицентральной поле сейсмичности Байкальского региона выделены многочисленные квазилинейные цепочки землетрясений, состоящие в основном из трех сейсмических событий.

2. Время между землетрясениями в цепочках подчиняется экспоненциальному закону распределения Пуассона. Длины цепочек группирующихся сейсмических событий соответствуют логнормальному распределению.

3. В эпицентральной поле сейсмичности Байкальского региона формируется пять типов квазилинейных цепочек землетрясений: цепочки группирующейся сейсмичности, локальные цепочки, обусловленные динамикой разломно-блоковых структур, субрегиональные цепочки, отражающие определенные условия напряженно-деформированного состояния среды, а также случайно сформированные региональные и трансрегиональные цепочки.

Научная новизна. В диссертации развивается новое направление в исследовании пространственно-временных закономерностей распределения землетрясений в земной коре Байкальского региона – изучение ансамблей квазилинейных цепочек землетрясений. Выполненное в диссертации исследование мигрирующей сейсмичности позволило получить новые результаты о сейсмомиграциях на трех иерархических уровнях БРС по материалам о многочисленных землетрясениях в широком диапазоне энергетических классов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Формализованный подход определения и выделения квазилинейных цепочек землетрясений посредством азимутального анализа поля эпицентров толчков существенно расширяет возможности исследования сейсмичности с целью выявления сейсмомиграций в заданном оператором диапазоне пространственных, временных и энергетических параметров. В диссертационной работе обосновано предположение о том, что в эпицентральной поле сейсмичности могут выделяться цепочки землетрясений, возникшие в результате случайного пространственно-временного сочетания толчков (псевдомиграции), и цепочки, отражающие геофизические и геодинамические процессы (сейсмомиграции). Обоснование возможности выделения цепочек псевдомиграций, подтвержденное в рамках базовой модели мигрирующей сейсмичности на примере распределения случайных событий, вносит вклад в теорию «миграции» сейсмичности. Выявленная в работе связь цепочек возможных сейсмомиграций с зонами сеймотектонической деструкции литосферы различного масштаба позволяет использовать данное свойство для изучения напряженно-деформированного состояния

земной коры, геодинамических процессов и сейсмичности региона, что является одной из основных задач для эффективного проведения антисейсмических мероприятий.

Соответствие работы паспорту научной специальности 25.00.10. Диссертация соответствует пункту 3 («Сейсмология (за исключением аппаратурных разработок и тех ситуаций, когда данные о современной или палеосейсмической активности используются в рамках традиционного геотектонического анализа)») и пункту 4 («Исследование природы, свойств и геодинамической интерпретация деформационных характеристик и естественных геофизических полей, источники которых располагаются в недрах Земли») паспорта специальности 25.00.10, поскольку в работе исследуется важное свойство сейсмичности Байкальской рифтовой системы – «миграции» эпицентров землетрясений. При проведении диссертационного исследования показана возможность формирования в эпицентральной зоне региона случайных цепочек и цепочек сейсмомиграций, а также доказана естественная связь пространственно-временного, азимутального и энергетического распределения цепочек и землетрясений, поэтому диссертация соответствует пункту 5 паспорта специальности 25.00.10 («Геофизические проявления напряженного состояния недр и оценка напряженного состояния по геофизическим данным»). Для изучения мигрирующей сейсмичности в работе разрабатываются и применяются: формализованная методика определения и выделения квазилинейных цепочек землетрясений, а также имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности, что соответствует пункту 6 («Математическое моделирование геодинамических процессов любых пространственных и временных масштабов») и пункту 14 паспорта специальности 25.00.10 («Методы обработки и интерпретации результатов измерения геофизических полей»).

Личный вклад автора. Методика определения и выделения цепочек землетрясений в эпицентральной зоне сейсмичности [Патент № 2659334] разработана и реализована при непосредственном участии соискателя: разработаны программы [Свидетельство № 2016661616; Свидетельство № 2016661511; Свидетельство № 2017619612], выполнено формирование массивов исходных сейсмологических данных, подготовлены материалы и проведены расчеты. соискателем определены и выделены цепочки землетрясений в эпицентральной зоне различных иерархических уровней Байкальского региона, осуществлен анализ их пространственно-временного, азимутального и энергетического распределения, а также установлены и верифицированы основные закономерности формирования возможных цепочек «миграций» землетрясений в эпицентральной зоне разных уровней региона.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIV–XVI Всероссийских научных совещаниях «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)» (Иркутск, 2016, 2017, 2018 гг.), XXVII–XXVIII Всероссийских молодежных конференциях с участием исследователей из других стран «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2017–2019 гг.), XXVIII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Иркутск, 2017 г.), XII Российско-монгольской международной конференции «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: результаты многолетних исследований и научно-образовательная политика (к 100-летию ИГУ)» (Иркутск, 2018 г.), XIII Российско-Монгольской международной конференции по астрономии и геофизике «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона» (Иркутск, 2019).

Публикации. По теме диссертации в соавторстве опубликовано 18 работ, из них 6 статей опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. По итогам диссертационного исследования имеются результаты интеллектуальной деятельности.

Достоверность результатов работы подтверждается применением статистических методов обработки большого количества землетрясений. Достоверность работы методики обеспечена ее проверкой на выборках землетрясений и выборках имитационных событий, в которые были вставлены «детерминированные» модельные цепочки. Точность вычислений и

определений задается преимущественно погрешностями фактических материалов из «Каталога землетрясений Прибайкалья», так как точность компьютерных вычислений высока. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается при сравнении с основными результатами предшественников.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 156 страницы включает 22 таблицы и 59 рисунков. Список используемой в работе литературы состоит из 235 источников.

Благодарности. Автор работы считает своим долгом выразить искреннюю благодарность научным руководителям д.г.-м.н. А. В. Ключевскому и к.г.-м.н. Е. В. Брыжаку за постановку задачи, высококвалифицированное руководство и постоянную помощь в работе. Автор искренне признателен В. М. Демьяновичу, Ф. Л. Зуеву, Н. А. Радзиминович, В. И. Джурику, О. П. Смекалину, А. А. Ключевской, А. А. Добрыниной, В. А. Санькову, К. Ж. Семинскому, А. В. Новопашиной и А. В. Черемных за содействие, консультации и помощь в ходе исследования и при подготовке диссертации. Автор благодарит сотрудников лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии Института земной коры СО РАН за помощь в проведении диссертационного исследования, обсуждение диссертации и высказанные замечания.

Работа выполнена на основе данных о землетрясениях, полученных сотрудниками БФ ФИЦ ЕГС РАН и АСФ ФИЦ ЕГС РАН. Автор выражает благодарность указанным \ организациям за предоставленные данные.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Геолого-геофизическая характеристика Байкальского региона и Байкальской рифтовой системы

1.1. Геолого-структурная позиция Байкальского региона и Байкальской рифтовой системы

Основная масса землетрясений Байкальского региона происходит в пределах Байкальской рифтовой системы (БРС), протянувшейся системой рифтовых впадин и обрамляющих их разломных структур из северо-западной Монголии к южной Якутии на расстояние почти 2200 км. БРС является наиболее опасной в сейсмическом отношении частью Байкальского региона – здесь происходили и регистрируются сильные и разрушительные землетрясения с магнитудой $M \geq 6$ [Новый каталог..., 1977]. Общее структурное положение и современная геодинамика БРС определяются связью с зоной сочленения докембрийского Сибирского кратона и Центрально-Азиатского подвижного пояса. БРС включает систему поднятий и грабенообразных впадин, которые ограничены разломами преимущественно сбросового кинематического типа [Солоненко, Флоренсов, 1975; Logatchev, Florensov, 1978]. Если рассматривать БРС как единый глобальный разлом, то его можно классифицировать в качестве крупного раздвига, представленного сложным комплексом структур [Лобацкая, 1987; Sherman et al., 2004].

1.2. Глубинное строение земной коры и литосферы Байкальской рифтовой системы по геолого-геофизическим данным

По данным комплекса геофизических исследований установлено, что мощность земной коры в БРС варьирует в пределах 35–60 км [Голенецкий, 1961; Зорин, 1977; Турутанов, 2018]. Под крупными впадинами земная кора имеет существенно меньшую толщину, чем под окружающими их горными хребтами, а области интенсивного, умеренного и слабого горообразования хорошо различаются по мощностям земной коры и литосферы.

Для БРС различными методами [Шерман, 1977; Семинский, 2003; Vornyaakov, 2019 и др.] установлены основные направления простирания разломов. В центральной части БРС преобладают разломы северо-восточного простирания, среди разломов юго-западного фланга наиболее распространены разломы северо-западного простирания, на северо-восточном фланге БРС преобладают разломы субширотного простирания. Вид тектонических движений вдоль разломов определяется напряженно-деформационным состоянием геологической среды. В центральной части и на северо-восточном фланге БРС

преобладают условия растяжения, сдвиги преобладают на дистальных окончаниях флангов БРС [Sankov, Dobrynina, 2018]. Ось максимального сжатия почти во всей БРС направлена субвертикально. Ось растяжения почти везде субгоризонтальна, в центральной части и на части северо-восточного фланга БРС расположена вкрест рифтовых структур. Промежуточная ось также имеет в основном пологий угол падения к горизонту [Мельникова, Радзиминович, 2007; Sankov, Dobrynina, 2018].

1.3. Сейсмичность Байкальской рифтовой системы

На территории Байкальского региона происходили и, несомненно, возможны землетрясения с интенсивностью до 11–12 баллов по шкале MSK-64 и энергетическим классом $K_p \geq 16$ [Голенецкий, 1977; Новый каталог..., 1977; Сейсмическое районирование..., 1977]. Сопредельные территории, окружающие рифтовую систему, по уровню сейсмичности существенно отличаются от БРС, и на карте эпицентров землетрясений достаточно четко выделяется высокосейсмичная рифтовая система, ограниченная почти асейсмичной Сибирской платформой и умеренно сейсмичным Забайкальем. Эпицентрально поле землетрясений БРС в крупном плане имеет сложное мозаичное строение [Golenetsky, 1990; Мишарина, Солоненко, 1990]. Более детальное рассмотрение показало, что эпицентры сконцентрированы в полосы различной ширины обычно северо-восточного направления [Голенецкий, 1976; 1977; Солоненко, Штейман, 1994].

На протяжении инструментального периода наблюдается рассеянная и сосредоточенная сейсмичность [Патент № 1712917]. Рассеянный тип образуют не связанные землетрясения, формирующие фоновую хаотичную сейсмичность. Сосредоточенная сейсмичность соответствует группирующимся событиям и наблюдается в виде отдельных кластеров [Ключевская, Какоурова, 2015; Мельникова и др., 2020]. Группирующиеся землетрясения могут быть отнесены к форшок-афтершоковым последовательностям и к роям сейсмических событий.

Глава 2. Методика исследования мигрирующей сейсмичности: основные модели, методы и результаты тестирования

2.1. Проблема «миграции» очагов землетрясений

Явление «миграции» очагов землетрясений исследуется различными методами и способами [Wood, Allen, 1973; Викулин, 2003; Уломов и др., 2006]. «Миграции» очагов, как «перемещения» эпицентров землетрясений, выявлены в разных сейсмоактивных зонах Земли [Лукк, 1978; Касахара, 1985; Новопашина, 2013; Trofimenko et. al., 2017; Lomax, 2020] и имеется гипотеза о волновой природе этого явления [Губерман, 1976; Быков, 2005; Викулин и др., 2012]. При изучении «миграций» обычно анализируются совокупности достаточно сильных землетрясений. При исследованиях выделенные последовательности толчков обычно считались «миграциями» очагов землетрясений, а вопрос о случайном формировании таких последовательностей сейсмических событий ставился редко.

В эпицентрально поле Байкальского региона «миграции» эпицентров сейсмических событий и сейсмической энергии выявлены сотрудниками ИЗК СО РАН [Шерман и др., 2012; Новопашина и др., 2012; Левина, Ружич, 2015; Novopashina, Lukhneva, 2020]. Отмечено, что «миграции» происходят в северо-восточном и юго-западном направлениях, а их скорости обычно составляют десятки км/год. В других сейсмоактивных регионах Земли скорости не превышают первых сотен км/год.

2.2. Методика определения и выделения квазилинейных цепочек землетрясений

Под цепочкой землетрясений понимается расположение эпицентров толчков, которое создается при квазилинейном одностороннем положении совокупности эпицентров трех или более последовательных во времени землетрясений ($n \geq 3$) на поверхности исследуемой области литосферы. Методика определения и выделения цепочек землетрясений в эпицентрально поле сейсмичности описана в формуле патента [Патент № 2659334], а на программу «Chain», осуществляющую определение и выделение цепочек землетрясений, получено свидетельство о государственной регистрации [Свидетельство № 2016661616]. Для выбранной территории формируется выборка данных в формате стандартного каталога

землетрясений и строится карта эпицентров толчков. Создается векторная диаграмма азимутов от эпицентра первого землетрясения выборки ко второму, от второго – к третьему и т.д. до последнего толчка. Проводится временной анализ векторной диаграммы азимутов в секторах заданного размера нелинейности q' от азимутального направления α . Определяется количество направленных в одну сторону последовательных во времени эпицентров землетрясений n . Если последовательность состоит не менее чем из трех событий ($n \geq 3$), то она считается цепочкой землетрясений в эпицентральной поле сейсмичности и выводится в соответствующий массив – каталог цепочек. Такой подход позволяет формализовано, строго и единообразно решить задачу определения и выделения квазилинейных цепочек землетрясений из «Каталога землетрясений Прибайкалья», ясно и однозначно определить границы и условия отбора землетрясений и осуществить определение и выделение цепочек землетрясений на территории с несколькими разломными зонами и в зоне одного разлома.

2.3. Имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности

2.2.1. Основные положения

В соответствии с результатами предшественников [Лукк, 1976], в некоторых случаях цепочки землетрясений создаются в результате случайного пространственно-временного сочетания толчков, т.е. не все определенные и выделенные цепочки землетрясений будут являться сейсмомиграциями и отражать геолого-геофизическое явление «миграции» очагов сейсмических событий. Для решения проблемы выявления и верификации сейсмомиграций в эпицентральной поле землетрясений Байкальского региона разработана имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности. Эта модель используется для определения критериев выделения цепочек в статистике поля эпицентров землетрясений Байкальского региона, а прототипом пространственного распределения имитационных событий служит региональная сейсмичность. Модель позволяет соотнести статистику цепочек землетрясений, определенных и выделенных среди N землетрясений в площадке заданных размеров и формы со статистикой цепочек, определенных и выделенных в поле из N имитационных случайных событий в площадке таких же размеров и формы. На компьютерные программы, реализующие модель, получены свидетельства о государственной регистрации [Свидетельство № 2016661511; Свидетельство № 2017619612].

2.3.2. Базовая модель мигрирующей сейсмичности: площадка круглой формы

В имитационной базовой модели мигрирующей сейсмичности для площадки круглой формы «эпицентры» синтезированных N событий генерируются на поверхности круглой площадки радиуса R в виде случайного поля с постоянной плотностью вероятности. Такая площадка является прототипом территории, включающей зоны разломов. В заданном азимуте α в это поле вставляется цепочка последовательных событий ($n \geq 3$) как «детерминированная» модельная цепочка, имитирующая «миграцию» очагов землетрясений. Площадка разбивается на равные по углу и площади секторы, а модельная цепочка вставляется в середину одного из секторов.

Для определения критериев выделения цепочки событий в круглой площадке радиусом $R = 100$ км были осуществлены многократные генерации выборок размером $N = 10 \div 1000$ событий так, чтобы общее количество событий в выборках одного размера N с цепочкой одинаковой длины n всегда было равно 100000 событий. В эти выборки вставлялись цепочки из $n = 2 \div 8$ событий, и было получено множество искусственных выборок с сочетаниями переменных N и n величин. Полученные распределения просуммированы по секторам и созданы кумулятивные выборки. В качестве критерия определения и выделения цепочек принят параметр Δp , равный отношению отклонения среднего в секторе со вставленной модельной цепочкой от генерального среднего по всем другим секторам к стандартному отклонению по выборке.

2.3.3. Базовая модель мигрирующей сейсмичности: площадка прямоугольной формы

Статистические критерии выделения цепочек землетрясений в зоне разлома или деструкции земной коры в зависимости от объема выборки N , длины цепочки n , расстояния r от цепочки до линии разлома получены в рамках имитационной базовой модели

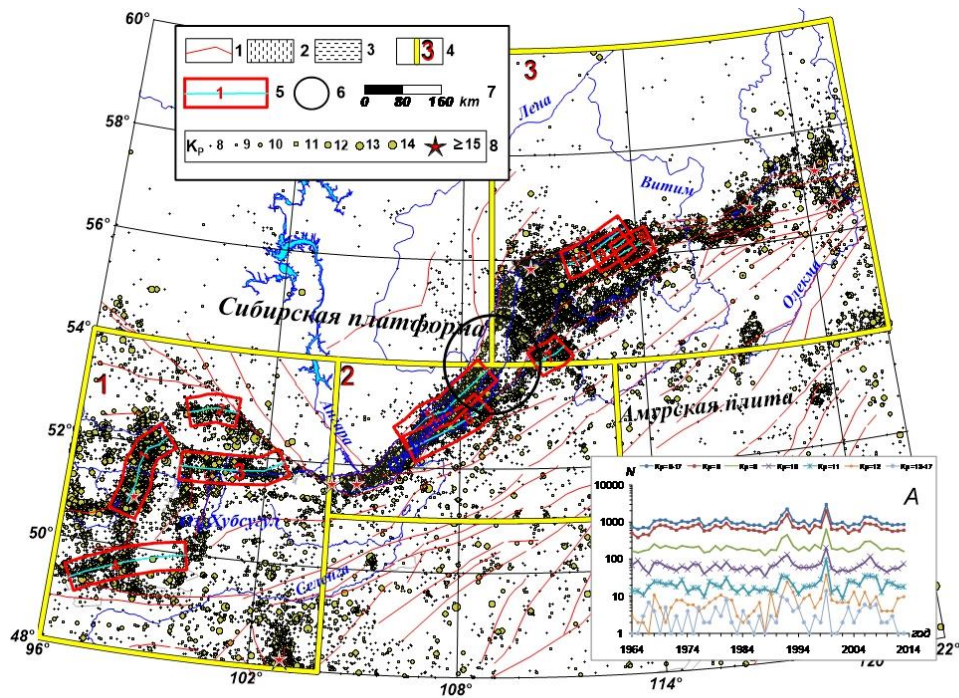


Рисунок 1. Карта эпицентров 52155 землетрясений Байкальского региона с $K_p \geq 8$ (1964-2013 годы).

1 – разломы [Демьянович и др., 2007; Свидетельство № 2019620422], 2 – впадины, 3 – озера, 4 – границы и номера районов, 5 – границы и номера зон основных разломов, 6 – площадка круглой формы радиусом $R = 100$ км (центр круга имеет координаты $\varphi = 54.0^\circ$ с. ш., $\lambda = 109.0^\circ$ в. д.), 7 – масштабная линейка, 8 – эпицентры землетрясений представительных энергетических классов. На вставке А приведены графики количества N землетрясений региона в год с $K_p \geq 8$ и выборки толчков отдельных классов землетрясений региона в год с $K_p \geq 8$ и выборки толчков отдельных классов.

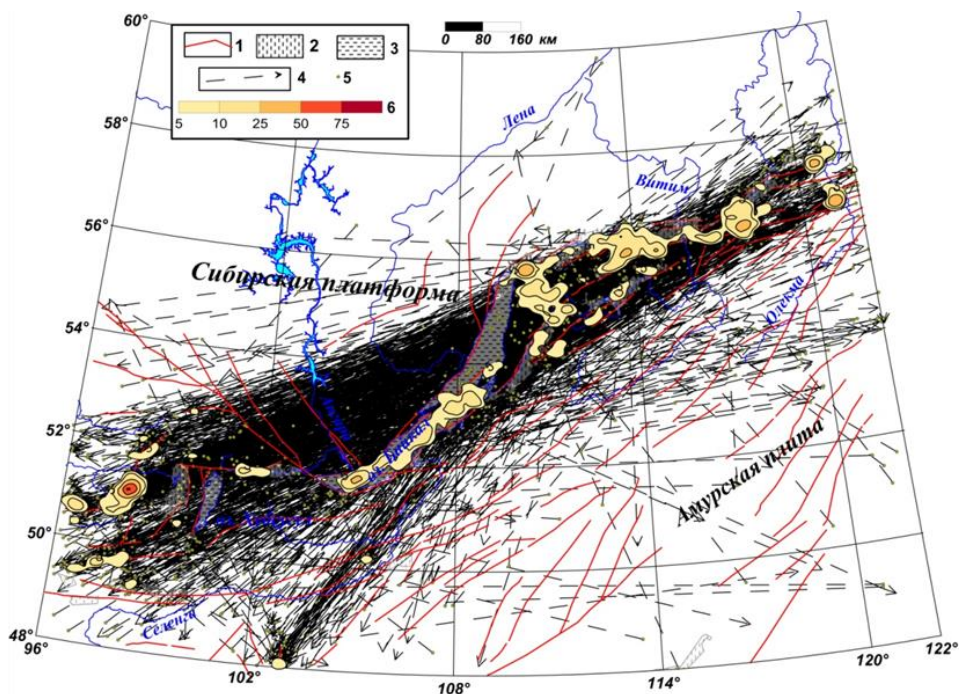


Рисунок 2. Карта-схема расположения и ориентации 2172 цепочек землетрясений в литосфере региона.

1 – разломы [Демьянович и др., 2007; Свидетельство № 2019620422], 2 – впадины, 3 – озера, 4 – «векторы» цепочек землетрясений, 5 – эпицентры первых землетрясений в цепочках с $K_p \geq 8$, 6 – шкала изолиний плотности эпицентров первых землетрясений в цепочках.

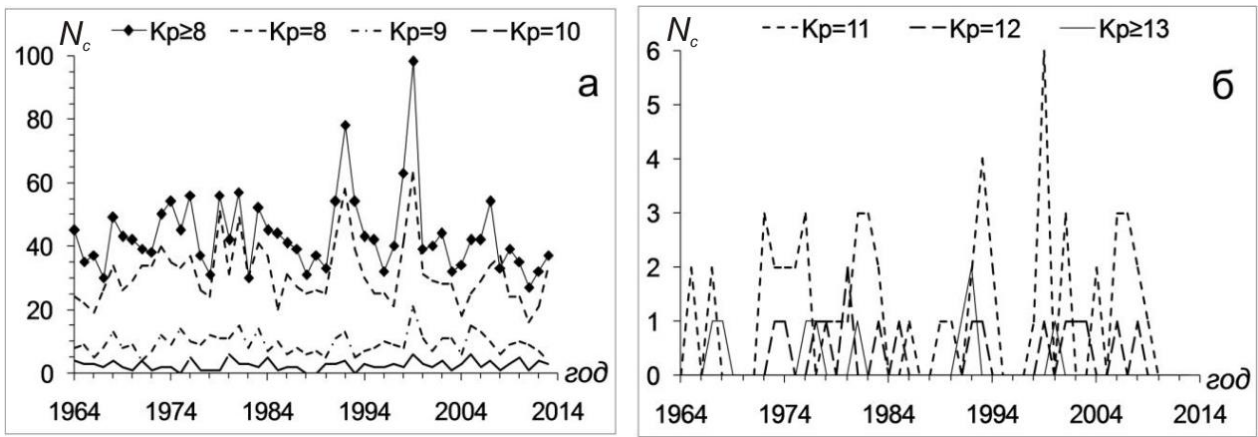


Рисунок 3. Графики количества цепочек землетрясений в год в разных диапазонах K_p .
 а – $K_p \geq 8$, $K_p = 8$, $K_p = 9$, $K_p = 10$; б – $K_p = 11$, $K_p = 12$, $K_p \geq 13$.

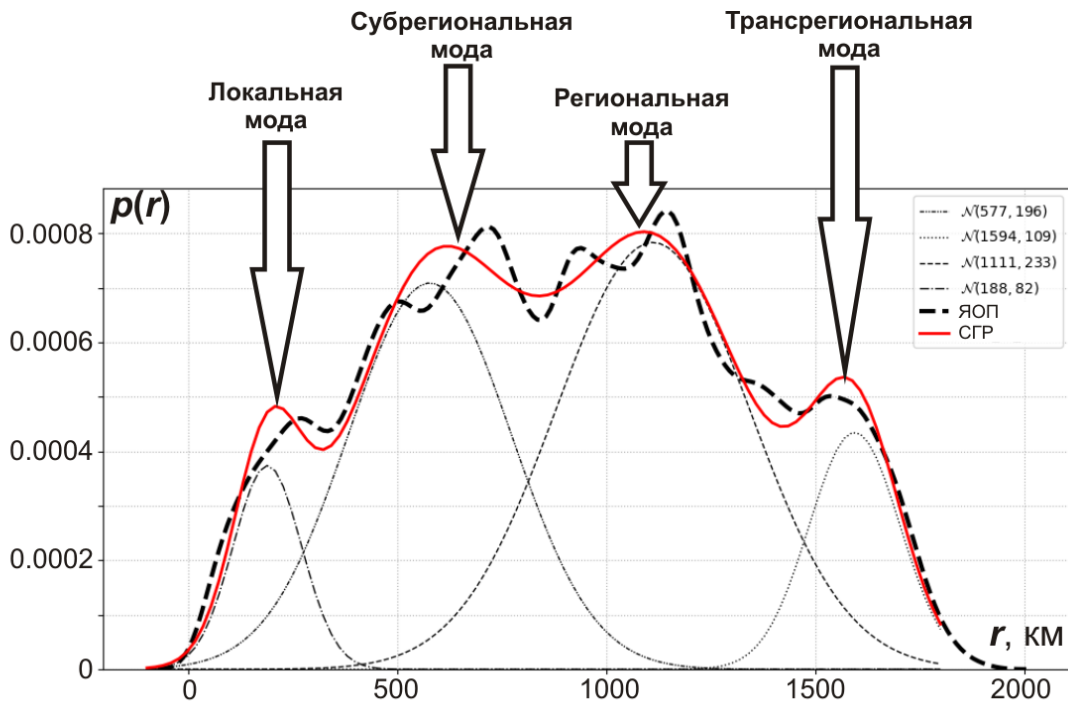


Рисунок 4. Ядерная оценка плотности (ЯОП, жирная пунктирная линия) распределения количества цепочек землетрясений N_c по эпицентральному расстояниям r_{13} (от первого до третьего землетрясения цепочки), аппроксимация данных смесью гауссовых распределений (СГР, сплошная жирная линия) и гауссовы распределения, составляющие СГР ($N(\mu, \sigma)$, тонкие линии). а – для первого района, б – для второго района, в – для третьего района.

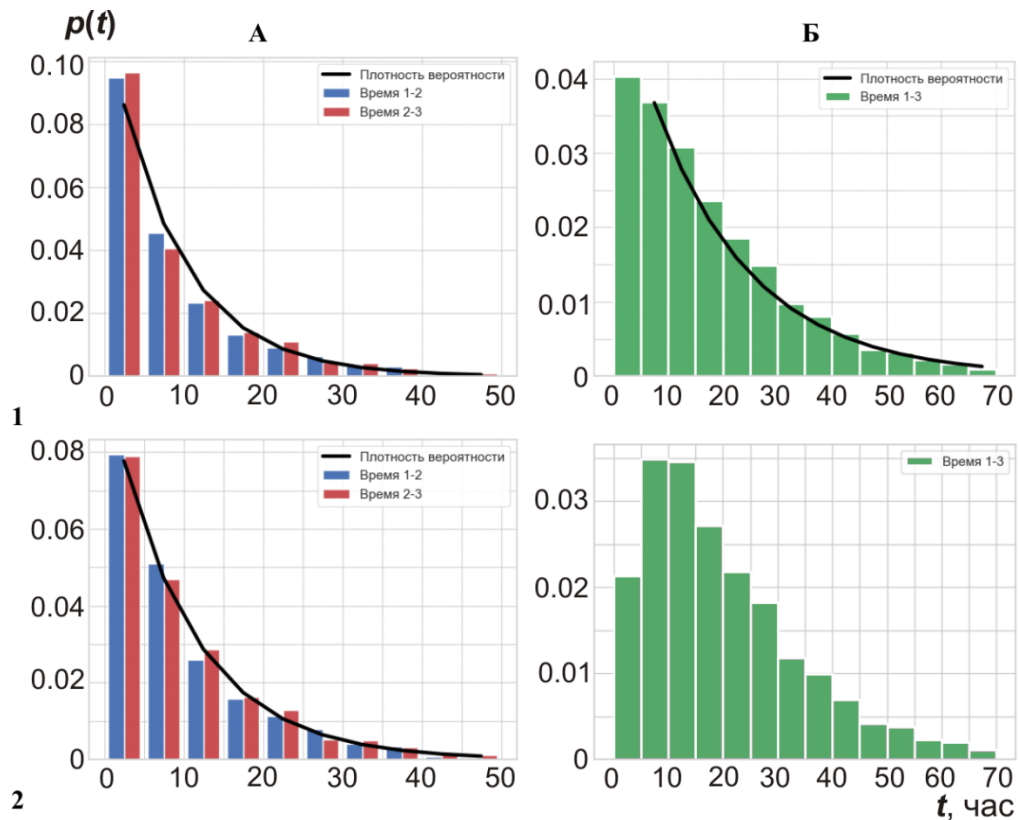


Рисунок 5. Нормированные гистограммы распределения времен между землетрясениями с $K_p \geq 8$ в цепочках и график плотности вероятности экспоненциальной Пуассоновской модели с подобранными параметрами (А) и распределение времен между первым и третьим землетрясением цепочки (Б) для Байкальского региона до (1) и после (2) исключения цепочек группирующихся сейсмических событий.

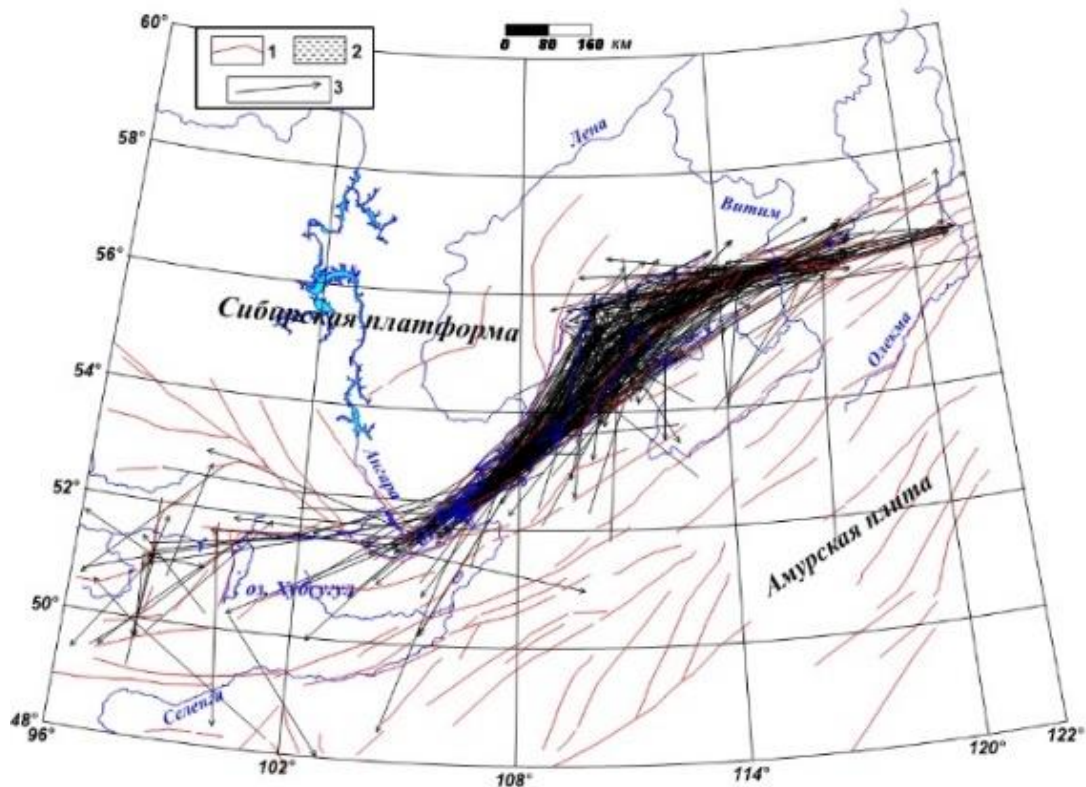


Рисунок 6. Карта расположения и ориентации 374 субрегиональных цепочек землетрясений, с расстояниями между событиями $r \leq 370$ км.

1 – разломы [Демьянович и др., 2007; Свидетельство № 2019620422], 2 – озера, 3 – цепочки землетрясений.

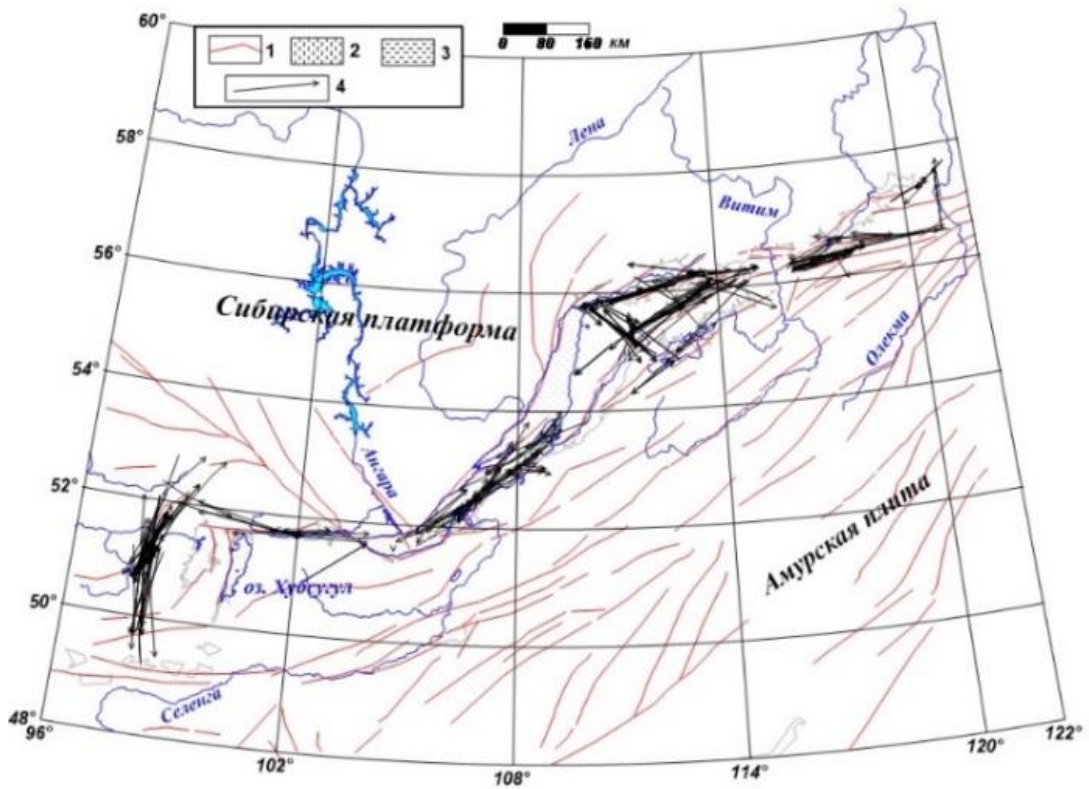


Рисунок 7. Карта расположения и ориентации локальных цепочек землетрясений делимости с $K_P \geq 8$ длиной не более $r=200$ км.

1 – разломы [Демьянович и др., 2007; Свидетельство № 2019620422], 2 – впадины, 3 – озера, 4 – цепочки землетрясений.

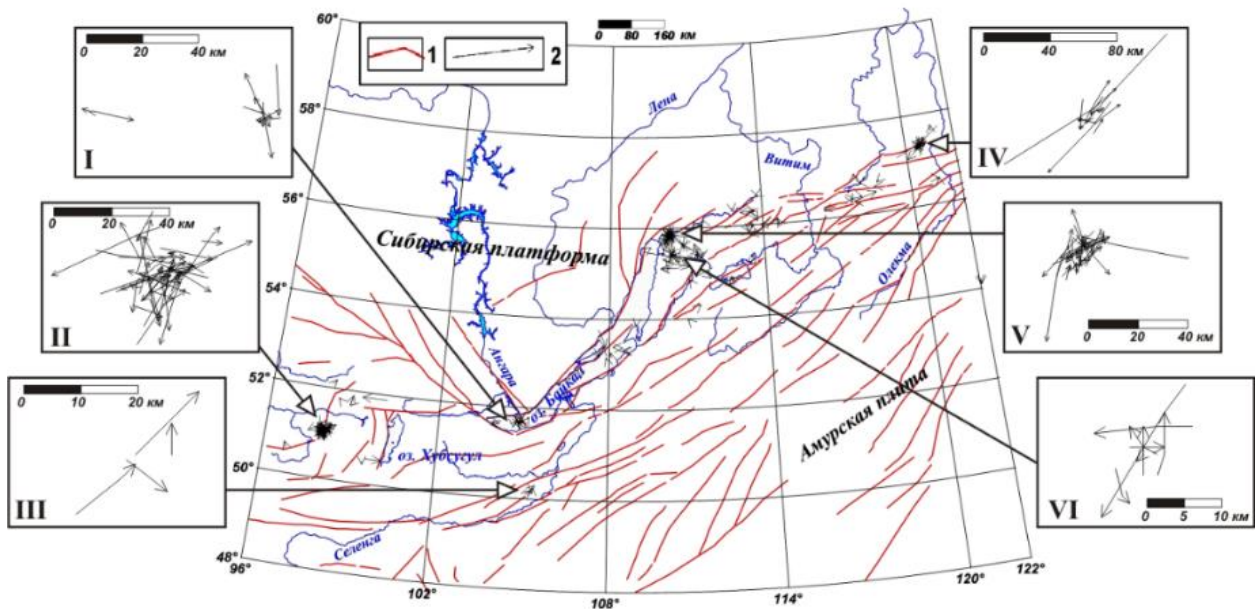


Рисунок 8. Карта расположения и ориентации цепочек группирующей сейсмичности в областях групп сейсмических событий в земной коре БРС.

1 – разломы [Демьянович и др., 2007; Свидетельство № 2019620422], 2 – цепочки группирующей сейсмичности. На врезках – эпицентральные области Южнобайкальского (1999 г.) и Култукского (2008 г.) землетрясений (I), Бусийгольских 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).

мигрирующей сейсмичности. Вдоль «виртуального разлома» длиной L имитационные события распределены с постоянной плотностью вероятности, поперек зоны «разлома» имеет место нормальное распределение событий. На заданном расстоянии от линии «разлома» вставляется «детерминированная» модельная цепочка из n событий, а для проведения расчетов площадка разбивается на продольные полосы шириной $h = 10$ км.

При реализации модели было многократно сгенерировано эпицентральное поле $N = 10 \div 1000$ событий в прямоугольной площадке длиной $L = 100$ км и шириной $r = \pm 30$ км от линии «разлома». Общее количество событий в выборках одного размера N с цепочкой одинаковой длины n равнялось 100000 событий. В одну из полос площадки вставлялась модельная цепочка из $n = 2 \div 8$ событий. В процессе накопления выборок одинакового размера N с модельной цепочкой одной длины n создавались кумулятивные выборки. В результате проведенных расчетов получены графики и уравнения корреляции параметров $\Delta p(N, r)$ и $\Delta p(N, q)$ при $n = const$, а также $N(n, r)$ и $N(n, q)$ при $\Delta p = const$.

2.3.4. Средняя частота реализации и среднее число цепочек событий

Под частотой реализации цепочек принято отношение суммарного количества событий n_{sum} , образующих цепочки, к объему выборки N . Модельные выборки событий размера $N = 100 \div 100000$ сгенерированы многократно, выполнены расчеты и получены зависимости средней частоты реализации P цепочек и среднего числа цепочек событий \bar{N}_c от размера выборки N . Установлено, что среди случайно распределенных событий реализуются большое количество цепочек, а частота реализации цепочек для выборок разных размеров остается почти постоянной. Среднее количество цепочек \bar{N}_c пропорционально возрастает с увеличением объема выборки N исходных данных. Присутствие и линейное увеличение числа цепочек имитационных событий с ростом объема выборки показывает, что в эпицентральном поле стохастической сейсмичности будут выделяться цепочки землетрясений, имеющие случайную природу, а их число будет расти пропорционально объему выборки.

2.4. Примеры тестирования и реализации методики

2.4.1. Территория нескольких разломов: площадка круглой формы

В качестве примеров и для тестирования методики использованы реальная сейсмичность и имитационные события, представленные в круглых площадках радиусом $R = 100$ км. В каждой площадке находятся по $N = 950$ землетрясений или событий и по три модельные «детерминированные» цепочки из $n = 3$, $n = 4$, $n = 5$ событий, вставленные в разных азимутах. При реализации методики в секторе допустимой нелинейности $q = 10^\circ$ выделены все модельные цепочки, а также $N_c = 22$ цепочки землетрясений и $N_c = 15$ цепочек событий. Установлено, что цепочки землетрясений имеют северо-восток–юго-западное простирание и занимают центральную часть круга с разломами, около которых сконцентрированы эпицентры толчков. Распределение цепочек имитационных событий и их направленность не имеют системного характера.

2.4.2. Зона разлома: площадка прямоугольной формы

С целью проверки методики в разломной зоне были выбраны зона Тункинского разлома и прямоугольная модельная площадка. Длина обеих площадок составляет $L = 226$ км, а ширина $W = \pm 30$ км от реальной или виртуальной линии разлома. Обе площадки содержат по $N = 1224$ землетрясения или события и по три модельные «детерминированные» цепочки из $n = 3$, $n = 4$ и $n = 5$ событий, вставленные на разных расстояниях от линии разлома. В результате азимутального анализа в секторе $q = 10^\circ$ выделены все модельные цепочки событий, а также $N_c = 66$ цепочек землетрясений и $N_c = 85$ цепочек событий. Распределение цепочек в обеих площадках согласуется с распределением в них землетрясений или событий и тяготеет к линии разлома.

Глава 3. Цепочки землетрясений в земной коре Байкальского региона и трех районов

3.1. Основные пространственно-временные и энергетические характеристики сейсмичности Байкальского региона и трех районов

Определение и выделение цепочек землетрясений осуществлено в эпицентральной поле землетрясений Байкальского региона и трех районов БРС – флангов и центральной части (рис. 1).

Материалы для диссертационного исследования взяты из «Каталога землетрясений Прибайкалья», представленного в стандартном формате группами сводной обработки БФ ФИЦ ЕГС РАН [<http://www.seis-bykl.ru>] и АСФ ФИЦ ЕГС РАН [<http://www.asgsr.ru>]. Использованы данные о 52155 представительных землетрясениях с энергетическим классом $K_p \geq 8$, зарегистрированных с 1964 по 2013 годы на территории Байкальского региона (см. рис. 1). Из выборки толчков удалены промышленные взрывы. Декластеризация каталога не проводилась, поскольку сейсмомиграции могут существовать как в эпицентральной поле рассеянных толчков, так и в группах землетрясений. На карте эпицентров землетрясений (см. рис. 1) видно, что сейсмические события концентрируются в виде полос преимущественно северо-восток-юго-западной ориентации, соответствующей простиранию основных разломов БРС. На рис. 1 А видно, что количество землетрясений в год N варьирует, основные максимумы в 1991–1992 и 1999 годах обусловлены афтершоками Бусийнгольского (1991 г.), Южно-Байкальского (1999 г.) и Кичерского (1999 г.) землетрясений и выделяются в различных диапазонах энергетических классов.

3.2. Пространственно-временное, азимутальное и энергетическое распределение цепочек землетрясений

По описанной в главе 2 методике было осуществлено определение и выделение цепочек землетрясений в секторах допустимой нелинейности $q = 10^\circ$ и $q = 20^\circ$.

3.2.1. Байкальский регион

На рис. 2 представлена карта-схема расположения и ориентации $N_c=2172$ цепочек землетрясений, выделенных в регионе в секторе допустимой нелинейности $q = 10^\circ$. На карте видно, что азимуты цепочек коррелируют с расположением и северо-восток-юго-западной ориентацией основных сейсмоактивных разломов, а максимумы плотности цепочек приурочены к зонам высокой плотности эпицентров землетрясений. Прослеживается северо-восточная и юго-западная ориентация «векторов» цепочек землетрясений, которая соответствует общему простиранию эпицентрального поля региональной сейсмичности и системе активных разломов на рис. 1.

Из табл. 1 видно, что с увеличением углового сектора допустимой нелинейности в два раза с $q = 10^\circ$ до $q = 20^\circ$ количество определенных и выделенных цепочек почти во всех диапазонах энергетических классов возрастает примерно в два раза. Если принять во внимание что подобная картина наблюдалась для цепочек имитационных событий, то, очевидно, это связано с пропорциональным ростом количества толчков в секторах допустимой нелинейности. Исключение составляют сильные землетрясения с $K_p \geq 13$, количество цепочек которых увеличилось незначительно при увеличении углового сектора. Это может быть обусловлено как относительно небольшим количеством сильных сейсмических событий в регионе, так и их квазилинейным расположением в эпицентральной поле сейсмичности, приближенном к разломам. Подавляющее большинство цепочек, выделенных в секторе $q=10^\circ$, состоят из $n=3$ толчков – $N_c=2120$, остальные 52 цепочки имеют $n=4$ толчка. При расширении сектора до значения $q=20^\circ$ количество цепочек из $n=3$ землетрясений возросло до $N_c=4196$ цепочек из $n=4$ выделено $N_c=148$, а также выявлено $N_c=5$ цепочек, состоящих из $n=5$ землетрясений.

Таблица 1

Распределение количеств цепочек землетрясений региона, выделенных в разных диапазонах классов

K_p	≥ 8	8	9	10	11	12	≥ 13	наклон	σ
$q = 10^\circ$	2172	1559	466	130	59	16	9	-0.46	0.02
$q = 20^\circ$	4349	3118	930	271	97	33	14	-0.47	0.01

На графиках количеств цепочек землетрясений в год (рис. 3 а, б), определенных и выделенных в секторе допустимой нелинейности цепочки $q = 10^0$ видно, что с ростом энергетического класса толчков количество цепочек уменьшается: основная масса цепочек формируется землетрясениями с $K_p = 8$ и $K_p = 9$. Количество цепочек в разные годы варьирует, а максимумы наблюдаются в 1992 и 1999 годах и корреспондируют с максимумами количеств землетрясений в год. Распределение количеств цепочек N_c по азимутам α имеет максимумы N_c в двух узких диапазонах азимутов: $50 \div 60^\circ$ и $250 \div 260^\circ$.

Для оценки нормальности распределения случайной величины (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; Razali, Wah, 2011]. Тесты показали, что распределения r_{12} и r_{23} статистически значимо отличаются от логнормального. Данные отклонения, возможно, связаны с ошибкой определения эпицентров землетрясений. Для распределения же общих длин цепочек r_{13} установлено, что гипотеза о том, что логарифм значений r_{13} распределен нормально не может быть отклонена на уровне значимости $\alpha=0.05$ в диапазоне расстояний r_{12} и r_{23} $(0, r]$, где r меняется от 27 до 92 км для теста Д'Агостино–Пирсона и от 31 до 79 для теста Шапиро–Уилка соответственно. Но значения статистик K^2 Д'Агостино–Пирсона и W Шапиро–Уилка наиболее соответствуют теоретическому распределению при расстоянии между землетрясениями r_{12} и r_{23} в цепочке меньше 64 и 55 км соответственно, при этом общая длина цепочки достигает 80 и 70 км соответственно. Эти значения являются статистическим критерием для того, чтобы отнести цепочку к группирующейся сейсмичности. Однако отметим, что цепочки с длиной более 30 км в данном распределении являются единичными. В этом случае распределение статистически значимо не отличается от логнормального.

Далее из общего распределения r_{13} были исключены цепочки длиной до 30 км, соответствующие группирующейся сейсмичности, а само распределение было представлено в виде ядерной оценки плотности (рис. 4). Ядерная оценка плотности показывает, что распределение r_{13} имеет мультимодальный характер. В связи с этим для его аппроксимации была использована смесь гауссовых распределений. Согласно расчетам по данному алгоритму из общего распределения r_{13} выделены четыре основных распределения. «Локальное» распределение с наиболее вероятной длиной цепочки 188 ± 82 км при 68% доверительном интервале сопоставимо с длиной генерального разлома в Байкальском регионе (80 км и более) [Шерман, 1977] и с размерами блоков земной коры БРС [Мишарина, Солоненко, 1990]. Длина цепочки «субрегионального» распределения в 577 ± 196 км сопоставима, например, с линейными размерами Байкальской котловины или северо-восточного фланга БРС. «Региональное» распределение имеет вероятные длины цепочек 1111 ± 233 км. Выделяется также «трансрегиональное» распределение с длиной цепочки 1594 ± 109 км, сопоставимой с размерами рассматриваемого региона. Распределения, соответствующие «региональной» и «трансрегиональной» моде, на данном этапе исследований могут быть обоснованы лишь математическими закономерностями, обусловленными пространственными размерами области, где происходят землетрясения в цепочке.

Для исследования характера распределения времени между землетрясениями в цепочках использовался случайный поток Пуассона, где вероятность появления следующего события через интервал времени t определялся по формуле $P = \mu e^{-\mu t}$ или

$$P = \frac{1}{\mu^{-1}} e^{-\frac{t}{\mu^{-1}}}, \text{ где } \mu^{-1} \text{ – средний интервал времени между землетрясениями,}$$

принадлежащими анализируемой совокупности данных [Викулин, 2003]. Оценка данного параметра методом максимального правдоподобия показала, что среднее время между последовательными землетрясениями цепочки составляет около 9 ч., а средняя продолжительность цепочки – около 18 ч.

Проверка эмпирических распределений критерием Колмогоров–Смирнова [Kolmogoroff, 1933; Большев, Смирнов, 1983] показала несоответствие всех распределений

экспоненциальному закону распределения, что, возможно, связано с высокой частотой появления землетрясений в результате группирования сейсмичности. Для Байкальского региона распределения t_{12} и t_{23} подчиняются экспоненциальному закону при исключении цепочек, где присутствуют события, расстояния между которыми менее 12 км. Но наибольшее соответствие статистик упомянутых критериев теоретическому экспоненциальному закону распределения наблюдается при исключении цепочек, где хотя бы одно расстояние между событиями составляет менее 60 км для распределения t_{12} и 61 км для распределения t_{23} . Значение параметра $\bar{\mu}^{-1}$ для распределений t_{12} и t_{23} Байкальского региона при таких ограничениях составило 10.12 ч и 10.68 ч. При этом распределение времен реализации цепочек t_{13} не показывает соответствия экспоненциальному закону, так как значительно уменьшилось количество цепочек продолжительностью до 5 ч (рис. 5).

3.2.2. Три района Байкальской рифтовой системы

Результаты определения и выделения цепочек землетрясений в районах БРС показывают, что при увеличении углового сектора допустимой нелинейности цепочки в два раза происходит рост количества цепочек сейсмических событий примерно в два раза. На карте-схеме расположения выделенных цепочек при $q = 10^\circ$ показано, что в первом районе «векторы» цепочек не концентрируются, а рассредоточены по территории в различных азимутах, в то время как во втором и в третьем районах полосы цепочек концентрируются вдоль рифтовых структур в северо-восток–юго-западном направлении. В первом районе цепочки имеют разнообразные направления, и нет явного преобладания количества цепочек в каком-либо азимуте. Во втором и третьем районах азимуты цепочек землетрясений различных классов имеют распределения в двух узких диапазонах азимутов: $\alpha = 40 \div 50^\circ$ и $\alpha = 230 \div 240^\circ$ во втором районе и $\alpha = 60 \div 70^\circ$ и $\alpha = 260 \div 270^\circ$ в третьем районе. Количество цепочек в год в районах варьирует.

В распределении длин цепочек землетрясений, выделенных в районах, найдены цепочки группирующейся сейсмичности, распределение которых соответствует логнормальному закону, локальные, и пространственные моды цепочек. Поскольку пространственная мода проявляется только математическими закономерностями, в настоящее время такие цепочки считаются случайными. Распределение времени между землетрясениями в цепочках соответствуют экспоненциальному закону Пуассона при исключении цепочек группирующейся сейсмичности.

3.3. Карты изолиний плотности цепочек землетрясений

Карты изолиний плотности цепочек землетрясений Байкальского региона получены для квадратных площадок $100 \times 100 \text{ км}^2$ и $200 \times 200 \text{ км}^2$, сглаживание выполнено перекрытием в половину площадки по широте и долготе. В каждой площадке определены и выделены цепочки землетрясений, подсчитано их количество, приписанное центру площадки, и проведены изолинии. На карте изолиний плотности цепочек землетрясений, выделенных в секторе $q = 10^\circ$, видно, что вдоль БРС формируется единая зона повышенной плотности цепочек. В некоторых площадках плотность цепочек достигает сотни, а максимальное значение плотности отмечено в зоне афтершоков Кичерского землетрясения 1999 года. В целом, плотность цепочек повышена в рифтовых структурах и низка за пределами БРС.

Глава 4. Цепочки землетрясений и геолого-геофизические процессы в литосфере Байкальского региона

В настоящей главе рассматриваются подходы к детерминации цепочек возможных «миграций» эпицентров землетрясений.

4.1. Субрегиональные цепочки землетрясений

В данном разделе диссертации исследуется распределение субрегиональных цепочек, в которых расстояния между первым и вторым и между вторым и третьим толчками не превышают 370 км, а полная длина цепочки не менее 200 км. Такие ограничения основаны на результатах исследования распределений расстояний между цепочками землетрясений. На карте расположения и ориентации субрегиональных цепочек землетрясений видно (рис. б), что в центральной части и на северо-восточном фланге БРС цепочки плотно

концентрируются в пределах рифтовых структур и имеют преимущественно северо-восточно-западную ориентацию. В центральной части наблюдается совпадение направлений цепочек и простирания рифтовых структур. На северо-восточном фланге это совпадение проявлено немного меньше. Направление большинства цепочек соответствует субширотной и северо-восток–юго-западной вытянутости эпицентрального поля. Плотность цепочек значительно снижена на восточном окончании северо-восточного фланга БРС. На юго-западном фланге субрегиональных цепочек формируется значительно меньше, чем на остальной территории БРС, а их ориентация разнообразна, как и простирания расположенных здесь разломов, а также вид эпицентрального поля. Высокая концентрация и преобладание северо-восток–юго-западного простирания цепочек наблюдается в областях БРС, в которых преобладает условия растяжения. Таким образом, предполагается, что закономерная приуроченность большей части субрегиональных цепочек к зонам с преобладающим режимом растяжения может свидетельствовать о наличии среди них сейсмомиграций. Анализ ядерных оценок плотности распределений длин цепочек землетрясений различных энергетических классов показывает, что субрегиональная мода сохраняется при увеличении энергетического класса землетрясений, в то время как остальные моды исчезают. Этот результат подтверждает, что субрегиональные цепочки могут являться цепочками сейсмомиграций.

4.2. Локальные цепочки землетрясений

Длина локальных цепочек не превышает 200 км. Такие цепочки формируются на границах литосферных блоков, маркируя их частично или полностью. Карта расположения и ориентации локальных цепочек приведена на рис. 7. При сопоставлении этой карты с картой из работы [Шерман и др., 1996] прослеживается приуроченность групп цепочек к границам некоторых блоков, а также известным разломам (Чина-Вакатскому, Намаракитскому и др.) или впадинам (Кичерской, Верхнеангарской и др.) [Лунина, Гладков, 2009]. Наиболее значительно это проявлено на северо-восточном фланге, меньше – в центральной части и на юго-западном фланге БРС. Цепочки землетрясений, произошедших западнее 100° с. ш., маркируют осевую линию зоны современной деструкции литосферы. Эта линия может рассматриваться как самостоятельная геотектоническая структура, контролирующая сейсмический процесс на современном этапе развития БРС. Локальные цепочки, выделенные на уровне Байкальского региона, согласуются с картой плотности цепочек землетрясений.

4.3. Цепочки группирующейся сейсмичности

При ограничении расстояний между эпицентрами землетрясений в цепочках $r \leq 75$ км на основе критериев, установленных в предыдущей главе, на карте расположения и ориентации цепочек выделяются области концентрации цепочек группирующейся сейсмичности в областях формирования следующих групп землетрясений: Бусийгольской [Еманов и др., 2006], Кяхтинской [Radziminovitch et al., 2013], Южнобайкальской [Radziminovitch et al., 2006, Кичерской [Melnikova et al., 2007], Томпудинской [Мельникова, Гилева, 2017], а также Олдонгсинской и Чаруодинской [Козьмин, 2003] (рис. 8). Количество цепочек, выделенных в областях групп, варьирует от нескольких штук до нескольких десятков. Прослеживается связь расположения и направленности цепочек с простиранием разломных зон, приразломными трещинами и ориентацией нодальных плоскостей в очагах землетрясений. Наиболее вероятная плоскость разлома из двух нодальных в некоторых случаях маркируется преобладающим направлением цепочек, сформированных в группах сейсмических событий, что может являться наряду с другими косвенным признаком для решения этой задачи. По-видимому, цепочки землетрясений могут формироваться в единой плоскости разрыва или трассировать ее.

4.4. Скорости последовательного возникновения эпицентров в цепочках землетрясений

В настоящем разделе были исследованы скорости последовательного возникновения эпицентров толчков в цепочках землетрясений Байкальского региона, второго района, а также в зонах Тункинского, Ольхонского и Муяканского разломов в выборках землетрясений с $K_p \geq 8$, $K_p \geq 12$, $K_p \geq 13$ в секторах допустимой нелинейности $q = 10^\circ$ и $q = 20^\circ$. Проведенный анализ показал, что значения скоростей могут сильно варьировать.

Следуя результатам предшественников, скорости были ограничены значением $V \leq 200$ км/год. Было установлено, что среди толчков с $K_p \geq 8$ имеется одна цепочка, которую по условию $V \leq 200$ км/год можно принять цепочкой возможных сейсмомиграций. Среди землетрясений с $K_p \geq 12$ на всех масштабных уровнях литосферы найдены единичные цепочки, которые по условию $V \leq 200$ км/год можно рассматривать как цепочки сейсмомиграций. Среди самых сильных землетрясений с $K_p \geq 13$ в зонах разломов не выделены цепочки землетрясений, единичные цепочки выделяются и соответствуют условию $V \leq 200$ км/год в пределах крупных территорий. Полученные результаты можно объяснить тем, что заданные по условию $V \leq 200$ км/год небольшие скорости возможных «миграций» обусловлены сверхнизкой частотой и примерно постоянным рекуррентным интервалом реализации сильных землетрясений. Для менее сильных толчков все намного сложнее: из-за высокой частоты их реализации скорости последовательного возникновения эпицентров могут варьировать в широком диапазоне.

Скорости последовательного возникновения эпицентров в цепочках, выделенных при ограничении скоростей в зонах разломов, были сопоставлены со скоростями вертикальных смещений в разломах [Аржанникова, 2021; San'kov, 2000] Была отмечена следующая тенденция: чем выше скорость вертикальных смещений по разлому и ее разброс, тем больше скорость возможных «миграций» и разброс скоростей последовательного возникновения эпицентров в цепочках. Тенденция уменьшения скоростей «миграций» на флангах БРС по сравнению с ее центральной частью отмечается и в работе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполненного диссертационного исследования для выделения квазилинейных цепочек землетрясений разработана формализованная методика. Тестирование данной методики на имитационной базовой модели мигрирующей сейсмичности и выборках землетрясений со вставленными детерминированными цепочками показало корректность работы методики. Кроме того, показана возможность формирования случайных цепочек.

В эпицентральной поле сейсмичности Байкальского региона выделены многочисленные цепочки землетрясений, анализ пространственно-временного и энергетического распределения которых показал значительную роль слабых землетрясений в формировании цепочек, а также связь распределения с распределением землетрясений.

Статистический анализ расстояний между землетрясениями в цепочках показал выделение пяти видов цепочек: цепочек группирующейся сейсмичности, локальных цепочек, субрегиональных, региональных и трансрегиональных цепочек. Последние два вида цепочек определяются только математически, поэтому считаются случайными. Субрегиональные цепочки формируются в определенных условиях напряженно-деформированного состояния литосферы. Локальные цепочки приурочены к зонам деструкции литосферы и могут частично или полностью маркировать литосферные блоки. Цепочки группирующейся сейсмичности образуются в областях формирования групп землетрясений. Анализ скоростей последовательного возникновения эпицентров землетрясений в цепочках показал, что на разных иерархических уровнях Байкальского региона имеются единичные цепочки, скорости в которых соответствуют скоростям, полученным предшественниками при изучении явления «миграции» землетрясений.

Таким образом, результаты настоящей работы расширяют возможности исследования мигрирующей сейсмичности за счет универсальности разработанной методики, а также выявленных и подтвержденных закономерностей распределения цепочек землетрясений. Квазилинейные цепочки землетрясений маркируют зоны деструкции земной коры Байкальского региона на разных иерархических уровнях, что дает возможность в дальнейшем использовать цепочки землетрясений как один из инструментов для изучения и уточнения распределения разломных зон сейсмоактивной территории.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК Минобрнауки России

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Ключевский А. В., Какоурова А. А. Имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 8 (115). С. 74–84.
5. Ключевский А. В., Какоурова А. А. Основные критерии выделения цепочек землетрясений в литосфере Байкальского региона // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 23. С. 64–73.
6. Ключевский А. В., Какоурова А. А. Исследование мигрирующей сейсмичности в литосфере Байкальской рифтовой зоны // Доклады академии наук. 2019. Т. 488. № 3. С. 83–88.

Прочие публикации

1. Какоурова А. А., Брыжак Е. В., Демьянович В. М. Цепочки землетрясений в эпицентральной зоне сейсмичности Байкальского региона по данным, очищенным от промышленных взрывов // Орогенез: от методов исследования до геодинамических реконструкций: Материалы Байкальского Молодежного научного семинара «Современные проблемы в вопросах геологии, петрологии и геофизики» (пос. Листвянка, 20–22 мая 2022 г.). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2022. С. 11–13.
2. Какоурова А. А., Зуев Ф. Л. Математическое моделирование миграции землетрясений // Материалы Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию (г. Иркутск, Россия, 21–25 августа 2017 г.). Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. С. 37–38.
3. Какоурова А. А., Ключевская А. А. Базовая модель мигрирующей сейсмичности: зона разлома // Стрoение литосферы и геодинамика: Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции с участием исследователей из других стран (Иркутск, 22–28 мая 2017 г.). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. С. 111–112.
4. Какоурова А. А., Ключевская А. А. Цепочки землетрясений в литосфере центральной части Байкальской рифтовой зоны // Стрoение литосферы и геодинамика: Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции (Иркутск, 8–14 апреля 2019 г.). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2019. С. 79–80.
5. Какоурова А. А., Ключевский А. В. Пространственные, временные и энергетические закономерности распределения цепочек землетрясений в литосфере Байкальского региона // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Выпуск 16. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2018. С. 116–117.
6. Какоурова А. А., Ключевский А. В. Особенности распределения цепочек землетрясений в литосфере центральной части Байкальской рифтовой зоны // Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: тезисы докладов XIII Российско.-Монгольской международной конференции по астрономии и геофизике / РАН, Сибирское отделение. Иркутский научный центр, Институт солнечно-земной физики, Институт земной коры, Институт астрономии и геофизики АН Монголии. Иркутск, 2019. С. 45.

7. Какоурова А. А., Ключевский А. В., Демьянович В. М. Цепочки землетрясений в литосфере южного Прибайкалья и северной Монголии // Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: результаты многолетних исследований и научно-образовательная политика (к 100-летию ИГУ): тезисы докладов XII Российско-Монгольской международной конференции / РАН, Сибирское отделение. Иркутский научный центр. Институт земной коры, Институт солнечно-земной физики. Иркутск: Издательство ИГУ, 2018. С. 104.

8. Какоурова А. А., Ключевский А. В., Демьянович В. М., Зуев Ф. Л. Определение критериев для выделения цепочек землетрясений в зоне разлома // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Выпуск 15. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. С. 109–111.

9. 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.

10. Ключевский А. В., Какоурова А. А. Скорости «перемещения» эпицентров в цепочках землетрясений Байкальского региона // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Выпуск 16. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2018. С. 118–119.

11. Ключевский А. В., Какоурова А. А., Демьянович В. М. Цепочки миграции землетрясений в литосфере Байкальского региона // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Выпуск 15. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. С. 122–123.

12. Ключевский А. В., Какоурова А. А., Ключевская А. А. Базовая модель мигрирующей сейсмичности // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Выпуск 14. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 114–116.

Результаты интеллектуальной деятельности

1. Пат. 2659334 Российская федерация МПК. Способ определения цепочек землетрясений в эпицентральной зоне сейсмичности / Ключевский А. В., Какоурова А. А., Ключевская А. А., Демьянович В. М., Черных Е. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИЗК СО РАН. № 2017131805; заявл. 09.11.2017, опубл. 29.06.2018, Бюллетень № 19.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016661511 Российская федерация. Программа «Migrations» / Ключевский А. В., Какоурова А. А.; заявитель и правообладатель ФГБУН ИЗК СО РАН. № 2016615186; заявл. 23.05.2016; опубл. 12.10.2016.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017619612 Российская федерация. Программа «Migrations_fault_u» / Какоурова А. А., Ключевский А. В.; заявитель и правообладатель ФГБУН ИЗК СО РАН. № 2017616455; заявл. 04.07.2017, опубл. 28.08.2017.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016661616 Российская федерация. Программа «Chain» / Какоурова А. А., Ключевский А. В.; заявитель и правообладатель ФГБУН ИЗК СО РАН. № 2016519051; заявл. 24.08.2016; опубл. 14.10.2016.

Подписано к печати 05.08.2022 г. Формат 60x84/8.

Печать Riso. Усл. печ. л. 1.5. Усл. изд. 1.25. Заказ № 300. Тираж 150 экз.

Отпечатано в Институте земной коры СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.