



УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГБУН ИЗК СО РАН
Член-корр. РАН, д.г.-м.н.

Д.П. Гладкочуб

«27» июня 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН)

Диссертация «Мигрирующая сейсмичность Байкальского региона в статистике поля эпицентров землетрясений» выполнена в лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации Какоурова Анна Александровна работала в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук в должностях: ведущего инженера (с 2017 по 2018 г.), младшего научного сотрудника (с 2018 г. по настоящее время) лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН.

В 2014 году окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» (в настоящее время – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет») с присуждением квалификации «математик, системный программист» по специальности «010501.65 Прикладная математика и информатика».

В 2018 году окончила очную аспирантуру при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по направлению 05.06.01 – Науки о Земле, направленность «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выданы Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Иркутским научным центром Сибирского отделения Российской академии наук (ИНЦ СО РАН) по дисциплинам: история и философия науки; английский язык в 2015 г. и Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по дисциплинам: общая и региональная геология; геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых в 2016 и 2017 гг.

До февраля 2022 г. научным руководителем по диссертации А.А. Какоуровой был доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН Анатолий Васильевич Ключевский. После кончины А.В. Ключевского соискатель работает под научным руководством кандидата геолого-минералогических наук, заведующего лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН Евгения Вадимовича Брыжака.

Материалы диссертации представлены соискателем на заседании Секции геофизики и современной геодинамики Учёного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук.

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

- члены Секции геофизики и современной геодинамики: *доктора геол.-мин. наук:* А.В. Аржанникова, В.И. Джурик, О.В. Лунина, В.И. Мельникова, В.В. Мордвинова, А.В. Поспеев, К.Ж. Семинский; *кандидаты геол.-мин. наук:* С.Г. Аржанников, Е.В. Брыжак, И.В. Буддо, Р.П. Дорофеева, А.В. Лухнев, А.И. Мирошниченко, Н.А. Радзиминович, В.А. Саньков, О.П. Смекалин, А.В. Черемных, В.В. Чечельницкий; *кандидаты физ.-мат. наук:* Е.А. Кобелева, А.И. Филиппова.

- приглашенные специалисты ИЗК СО РАН: *доктор геол.-мин. наук* Д.П. Гладкочуб, *кандидат геол.-мин. наук* А.В. Новопашина, *вед. инженер* М.М. Кобелев.

Заслушали: доклад А.А. Какоуровой «Мигрирующая сейсмичность Байкальского региона в статистике поля эпицентров землетрясений» по теме диссертации.

Вопросы задавали (всего – 22 вопроса): д.г.-м.н. О.В. Лунина, к.г.-м.н. В.В. Чечельницкий, д.г.-м.н. В.И. Мельникова, к.г.-м.н. С.Г. Аржанников, к.г.-м.н. В.А. Саньков, д.г.-м.н. В.В. Мордвинова, к.г.-м.н. Н.А. Радзиминович, к.г.-м.н. О.П. Смекалин, д.г.-м.н. К.Ж. Семинский.

Был заслушан:

- отзыв научного руководителя кандидата геол.-мин. наук Е.В. Брыжака.

Были заслушаны следующие сопровождающие документы:

- выписка из протокола семинара лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН №5 от 17 июня 2022 г.

Был заслушан отзыв специалиста, ознакомившегося с работой до заседания:

- отзыв кандидата геол.-мин. наук, доцента кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем ИРНИТУ А.В. Мироманова.

Выступления специалистов, ознакомившихся с работой до заседания:

- кандидат геол.-мин. наук А.В. Новопашина (ИЗК СО РАН).

В обсуждении приняли участие: д.г.-м.н. Д.П. Гладкочуб, к.г.-м.н. Н.А. Радзиминович, к.г.-м.н. В.В. Чечельницкий, к.г.-м.н. В.А. Саньков, д.г.-м.н. О.В. Лунина, д.г.-м.н. К.Ж. Семинский.

Замечания, высказанные при обсуждении, не носят принципиального характера. Они касаются формы представления результатов и не требуют существенной переработки представляемой диссертационной работы.

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.

Актуальность темы исследования

«Миграции» очагов землетрясений как явление возникновения цепочек последовательных во времени и пространстве сильных толчков, выявлены в разных сейсмоактивных областях Земли [Richter, 1958; Mogi, 1968; Wood, Allen, 1973; Викулин, 2003; Уломов и др., 2006; Шерман, 2013; Novopashina, Lukhneva, 2020]. При изучении этого явления исследователи во многих случаях применяют неформализованные или полуформализованные методики и разработки, а в анализе используются, как правило, данные о сильных и умеренных землетрясениях. В связи с этим актуальной является разработка методики формализованного определения и выделения цепочек землетрясений, позволяющей единообразно обработать инструментальные данные всех зарегистрированных толчков 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.

Целью 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.

Основные задачи исследований

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 трёх 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 сейсмотектонической деструкции литосферы.

Методы исследования

В настоящей работе для выделения и изучения цепочек сейсмических событий применена авторская формализованная методика определения и выделения цепочек сейсмических событий, в основе которой лежит статистический азимутальный анализ большого числа 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 представительного энергетического класса $K_p \geq 8$, зарегистрированных на территории Байкальского региона коллективом БФ ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН и АСФ ФГБУН ЕГС РАН в период 1964–2013 гг. Этот каталог предварительно очищен от промышленных взрывов. При реализации решений базовой модели мигрирующей сейсмичности использовались массивы до 10^6 имитационных событий. Используемые в работе сведения об основных сейсмоактивных разломах Байкальского региона взяты из базы данных [Свидетельство № 2019620422].

Личный вклад автора

Методика определения и выделения цепочек землетрясений в эпицентральной поле сейсмичности разработана и реализована при непосредственном участии соискателя: разработаны программы для формализации определения и выделения цепочек землетрясений и реализации имитационной базовой модели мигрирующей сейсмичности, выполнено формирование массивов исходных сейсмологических данных, подготовлены материалы и проведены расчеты. Соискателем сделаны все сообщения по теме исследования, и в соавторстве с коллегами из Института земной коры СО РАН опубликованы статьи, а также осуществлён литературный обзор по теме исследования.

Научная новизна исследования

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 трёх иерархических уровнях БРС по материалам о многочисленных землетрясениях в широком диапазоне энергетических классов. Примененный подход расширяет возможности статистического исследования и анализа основных закономерностей сейсмичности, ориентированного на геолого-геофизическое изучение земной коры БРС.

Теоретическая и практическая значимость

Формализованный подход определения и выделения квазилинейных цепочек землетрясений посредством азимутального анализа поля эпицентров толчков существенно расширяет возможности исследования сейсмичности с целью обнаружения и выделения цепочек землетрясений и 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 напряжённо-деформированного состояния земной коры, геодинамических процессов и сейсмичности региона, что является одной из основных задач для эффективного проведения антисейсмических мероприятий.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы подтверждается применением статистических методов обработки большого количества землетрясений с оценкой значимости полученных результатов, а также сравнением с основными результатами предшественников. Изучение мигрирующей сейсмичности в эпицентральной поле Байкальского региона является полным и достоверным, поскольку для этих целей используются все зарегистрированные землетрясения представительных энергетических классов.

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 молодёжных конференциях с участием

исследователей из других стран «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2017–2019 гг.), XXVIII Всероссийской конференции молодых учёных 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).

Автором самостоятельно и в соавторстве опубликовано 18 работ по теме диссертации, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки РФ. Имеется 4 результата интеллектуальной деятельности.

Основные публикации по теме диссертации:

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

1. Какоурова А. А. Имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности: зона разлома / А. А. Какоурова, А. В. Ключевский // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21. — № 6 (125). — С. 49–59.
2. Ключевский А. В. Имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности / А. В. Ключевский, А. А. Какоурова // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2016. — № 8 (115). — С. 74–84.
3. Ключевский А. В. Основные критерии выделения цепочек землетрясений в литосфере Байкальского региона / А. В. Ключевский, А. А. Какоурова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. — 2018. — Т. 23. — С. 64–73.
4. Ключевский А. В. Исследование мигрирующей сейсмичности в литосфере Байкальской рифтовой зоны / А. В. Ключевский, А. А. Какоурова // Доклады академии наук. — 2019. — Т. 488. — № 3. — С. 83–88.
5. Какоурова А. А. Мигрирующая сейсмичность в литосфере Байкальской рифтовой зоны: пространственно-временное и энергетическое распределение цепочек землетрясений / А. А. Какоурова, А. В. Ключевский // Геология и геофизика. — 2020. — Т. 61. — № 11. — С. 1577–1594.
6. Какоурова А. А. Геоинформационные критерии выделения квазилинейных цепочек миграции землетрясений в эпицентральных полях сложной геометрии и переменной плотности распределения толчков / А. А. Какоурова, А. В. Ключевский, В. М. Демьянович, А. А. Ключевская // Геоинформатика. — 2021. — № 2. — С. 4–25.

Материалы и тезисы докладов научных конференций

1. Какоурова А. А. Цепочки землетрясений в эпицентральном поле сейсмичности Байкальского региона по данным, очищенным от промышленных взрывов / А. А. Какоурова, Е. В. Брыжак, В. М. Демьянович // 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. Математическое моделирование миграции землетрясений / А. А. Какоурова, Ф. Л. Зуев // Материалы Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию (г. Иркутск, Россия, 21–25 августа 2017 г.). — Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. — С. 37–38.
3. Какоурова А. А. Базовая модель мигрирующей сейсмичности: зона разлома / А. А. Какоурова, А. А. Ключевская // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVII Всероссийской молодёжной 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. Цепочки землетрясений в литосфере центральной части Байкальской рифтовой зоны / А. А. Какоурова, А. А. Ключевская // Структура 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. Пространственные, временные и энергетические закономерности распределения цепочек землетрясений в литосфере Байкальского региона / А. А. Какоурова, А. В. Ключевский // 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. Особенности распределения цепочек землетрясений в литосфере центральной части Байкальской рифтовой зоны / А. А. Какоурова, А. В. Ключевский // 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. Цепочки землетрясений в литосфере южного Прибайкалья и северной Монголии / А. А. Какоурова, А. В. Ключевский, В. М. Демьянович // 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. Определение критериев для выделения цепочек землетрясений в зоне разлома / А. А. Какоурова, А. В. Ключевский, В. М. Демьянович, Ф. Л. Зуев. // 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. Группирующаяся сейсмичность Прибайкалья / А. В. Ключевский, В. М. Демьянович, А. А. Ключевская, Ф. Л. Зуев, А. А. Какоурова, Е. Н. Черных, Е. В. Брыжак // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. — Иркутск: Издательство Института Географии СО РАН, 2015. — С.139–143.
 10. Ключевский А. В. Скорости «перемещения» эпицентров в цепочках землетрясений Байкальского региона / А. В. Ключевский, А. А. Какоурова // 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. Цепочки миграции землетрясений в литосфере Байкальского региона / А. В. Ключевский, А. А. Какоурова, В. М. Демьянович // 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. Базовая модель мигрирующей сейсмичности / А. В. Ключевский, А. А. Какоурова, А. А. Ключевская // 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. Патент 2659334 Российская федерация МПК. Способ определения цепочек землетрясений в эпицентральной 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.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016661511 Российская федерация. Программа “Migrations” / А. В. Ключевский, А.А. Какоурова; заявитель и правообладатель ФГБУН ИЗК СО РАН. — № 2016615186; заявлено 23.05.2016; опубликовано 12.10.2016.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017619612 Российская федерация. Программа “Migrations_fault_y” / А.А. Какоурова, А.В. Ключевский; заявитель и правообладатель ФГБУН ИЗК СО РАН. — № 2017616455; заявлено 04.07.2017; опубликовано 28.08.2017.
4. 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.

Все вышеизложенное позволяет утверждать, что диссертационная работа А.А. Какоуровой **соответствует паспорту специальности:**

Согласно паспорту научной специальности **25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»**, работа соответствует пунктам № 3, № 4, № 5, № 6 и № 14:

Пункт № 3: Сейсмология (за исключением аппаратурных разработок и тех ситуаций, когда данные о современной или палеосейсмической активности используются в рамках традиционного геотектонического анализа).

Пункт № 4: Исследование природы, свойств и геодинамической интерпретация деформационных характеристик и естественных геофизических полей, источники которых располагаются в недрах Земли.

Пункт № 5: Геофизические проявления напряженного состояния недр и оценка напряженного состояния по геофизическим данным.

Пункт № 6: Математическое моделирование геодинамических процессов любых пространственных и временных масштабов.

Пункт № 14: Методы обработки и интерпретации результатов измерения геофизических полей.

При экспертизе текста диссертации, публикаций, а также результатов проверки текста системой «Антиплагиат» установлено, что оригинальных блоков в диссертации – 84,51%, заимствованных источников в диссертации – 15,49%:

- соискателем сделаны ссылки на все источники заимствования материалов, фактов некорректного цитирования или заимствования без ссылки на соавторов в тексте диссертации и автореферате не обнаружено;
- сведения, представленные соискателем, об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны;
- в тексте диссертации соискателем отмечено, какие результаты получены им лично, а какие – в соавторстве.

Тема диссертации утверждена на заседании Учёного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук 14 октября 2014 г., протокол № 10.

Работа КАКОУРОВОЙ Анны Александровны «Мигрирующая сейсмичность Байкальского региона в статистике поля эпицентров землетрясений» является

законченным исследованием, имеет научную и прикладную значимость и рекомендуется после внесения исправлений, касающихся формы изложения материалов, к представлению в диссертационный совет ИЗК СО РАН Д.003.022.03 для защиты на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Заключение принято на заседании Секции геофизики и современной геодинамики Ученого совета ИЗК СО РАН.

Присутствовало на заседании 23 человека, из них 20 членов Секции геофизики и современной геодинамики Ученого совета ИЗК СО РАН, председатель – д.г.-м.н. Семинский К.Ж., секретарь – к.г.-м.н. Брыжак Е.В.

Результаты открытого голосования Секции геофизики и современной геодинамики Ученого совета ИЗК СО РАН по вопросу о принятии заключения по диссертации А.А. Какоуровой: за – 19, против – нет, воздержалось – 1.

Протокол №17 от 27 июня 2022 г.

Председатель Секции геофизики и современной геодинамики Ученого совета ИЗК СО РАН,
д.г.-м.н.


К.Ж. Семинский

Секретарь Секции геофизики и современной геодинамики Ученого совета ИЗК СО РАН,
к.г.-м.н.


Е.В. Брыжак