



УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН ИНГГ

им. А.А. Трофимука СО РАН

д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН

 В.Н. Глинских

«16» сентября 2022 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук на диссертационную работу Какоуровой Анны Александровны «Мигрирующая сейсмичность Байкальского региона в статистике поля эпицентров землетрясений»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

В диссертационной работе А.А. Какоуровой изложены новые научно-обоснованные результаты исследования геофизического явления «миграции» сейсмичности в земной коре Байкальской рифтовой системы.

**Объект исследования** – распределение эпицентров землетрясений Байкальского региона.

**Цель диссертационной работы** – 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.

Результаты работы представляют значительный интерес как для решения фундаментальных задач, так и задач инженерной сейсмологии. Связь полученных результатов с сейсмотектоникой позволят получить новые знания в области изучения напряженно-деформированного состояния и сейсмического районирования региона.

**Актуальность темы исследований** диктуется необходимостью получения новых знаний о явлении «миграция» сейсмичности в земной коре Байкальского региона, систематизации и классификация большого объема накопленных сейсмологических данных в удобном для дальнейших исследований виде. В данной работе – это цепочки сейсмических событий, которые классифицированы по нескольким критериям: количество землетрясений, энергия, пространственное расположение, время, направление.

**Новизна** полученных результатов, выводов и рекомендаций сформулирована в диссертации корректно и не вызывает сомнений: развивается новое направление в исследовании пространственно-временных закономерностей распределения землетрясений в земной коре Байкальского региона на основе изучения ансамблей квазилинейных цепочек землетрясений.

**Обоснованность и достоверность научных результатов, выводов и заключений.**

Достоверность полученных результатов диссертационного исследования 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.

Результаты работ автора неоднократно обсуждались на международных и российских конференциях и хорошо известны специалистам. 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: патент и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Оценка содержания диссертации**

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

**В главе 1** дана оценка геолого-структурной позиции Байкальского региона и Байкальской рифтовой системы, распределению сейсмичности рассматриваемого региона, представлены современные гипотезы о развитии и формировании БРС. Показана степень изученности глубинного строения земной коры и литосферы Байкальской рифтовой системы по геолого-геофизическим данным, геодинамическая обстановка и напряженно-деформированное состояние региона. Проведен анализ существующих каталогов землетрясений для района исследований, дана качественная оценка достоверности данных. Приведены данные об изученности сейсмической обстановки региона, указаны некоторые характеристики сейсмичности.

**Во 2-й главе** представлены результаты разработки и тестирования новой методики определения и выделения квазилинейных цепочек землетрясений. Методика основана на азимутальном анализе эпицентров сейсмических событий различных энергетических классов. Для верификации полученных результатов разработана имитационная модель мигрирующей сейсмичности. Под явлением «миграции» в диссертации понимается процесс формирования квазилинейной цепочки из последовательных во времени эпицентров толчков, происходящий в результате и под воздействием сеймотектонических деформаций горных пород.

Автор проводит подробный анализ опубликованных ранее работ, описывающих явление «миграций» очагов землетрясений. Отмечено, что чаще всего анализируются совокупности достаточно сильных сейсмических событий, которые происходят редко и могут неточно описывать явление «миграции», кроме того, редко учитывается тот факт, что цепочки могут не быть «миграциями», а сформировались случайно. Показано, что многие авторы, которые занимались проблемой «миграции» очагов сейсмических событий, связывали это явление с распространением деформационных волн.

Далее описана авторская (запатентованная) методика определения и выделения квазилинейных цепочек землетрясений, показано, что статистический азимутальный анализ выборки землетрясений позволяет строго и единообразно выделять цепочки, независимо от представлений

исследователя. Автор связывает процесс образования таких цепочек с направленной генерацией очагов землетрясений вдоль зон деструкции геологической среды.

Для решения проблемы выявления и верификации мигрирующей сейсмичности в земной коре Байкальского региона в диссертации разработана Имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности, которая позволяет исключить цепочки землетрясений, образованные случайным пространственно-временным сочетанием толчков. Под случайностью формирования цепочки понимается отсутствие причинно-следственных связей между землетрясениями в цепочке, которое имеет место при хаотическом распределении толчков в земной коре и отсутствии достаточно сильного деформационного воздействия, создающего сейсмомиграции. В диссертационной работе базовая модель мигрирующей сейсмичности реализована в виде блока программ, которые позволяют генерировать «эпицентральное» поле имитационных  $N$  событий, распределенных на площадках заданных размеров круглой и прямоугольной формы. Проанализирована средняя частота и среднее число цепочек событий для этих площадок. Тестирование на выборках имитационных событий и землетрясений со вставленными детерминированными цепочками различной длины подтвердило достоверность, корректность и надежность методики.

**В главе 3** диссертации осуществлено определение и выделение цепочек землетрясений во всем Байкальском регионе и трех его районах. Материалы для исследований, 52 тысячи сейсмических событий с 1964 по 2013 годы с энергетическим классом  $K_p \geq 8$ , получены из каталогов БФ и АСФ ФИЦ ЕГС РАН (из каталогов исключены промышленные взрывы). По разработанной методике было осуществлено определение и выделение цепочек землетрясений в секторах допустимой нелинейности  $q = 10^\circ$  и  $q = 20^\circ$  от азимута на эпицентр. Минимальным количеством землетрясений в цепочке выбрано  $n=3$  (выбор обоснован). Показано соответствие ориентации цепочек направлению простирания зон деструкции литосферы и направлениям «миграций», определенных другими исследователями. Автором проведен анализ пространственно-временных распределений цепочек, а также, зависимости числа цепочек от выбора углового сектора, энергетического класса событий. Статистический анализ расстояний и времен между землетрясениями показал, что длина цепочки подчиняется логнормальному закону для группирующейся сейсмичности, а время между двумя последовательными событиями для остальной части выборки соответствует экспоненциальной модели Пуассона. Лучшее согласие достигнуто при анализе всего региона, для трех выделенных районов согласование хуже, в двух

районах имеются расхождения, которые автор объясняет меньшим объемом выборки по сравнению со всем регионом. На основе модели смеси гауссовских распределений (после удаления цепочек группирующейся сейсмичности) получено четыре распределения, которые выделяются по расстоянию между первым и последним событием в цепочке и соответствуют региональному, субрегиональному, локальному и трансрегиональному масштабу. Карты изолиний плотности цепочек показывает, что вдоль БРС формируется единая зона повышенной плотности цепочек. Эта карта хорошо согласуется с картой плотности эпицентров землетрясений.

**В главе 4** рассматривается связь цепочек землетрясения с зонами деструкции литосферы для нескольких сейсмически активных районов, описанных в литературе. Представленная в предыдущей главе методика распределения цепочек по расстоянию между событиями позволила исключить из дальнейшего анализа «региональные» цепочки, формирующиеся в пределах смежных районов БРС. Изучение распределения субрегиональных цепочек землетрясений показало согласованность формирования цепочек с напряженно-деформированным состоянием земной коры. Локальные цепочки частично или полностью маркируют блоки земной коры, а также приурочены к зонам разломов и впадинам. Области группирующейся сейсмичности, расположение разломов, ориентация плоскостей разрывов и ориентация эпицентральных полей форшоков и афтершоков согласуются с областями концентрации цепочек землетрясений. Значения скоростей последовательного возникновения эпицентров в цепочках землетрясений Байкальского региона могут существенно варьировать.

В заключении описаны возможности представленной методики. Содержание этого раздела свидетельствует о том, что поставленные научные задачи успешно решены, заявленная цель исследования достигнута. Вместе с тем, указаны ограничения разработки и намечены перспективы использования.

**Отметим наиболее важные с нашей точки зрения результаты исследования.**

Предложен строго формализованный алгоритм выделения квазилинейных цепочек.

Одним из важнейших результатов, полученных автором диссертации, является разработка имитационной модели сейсмичности и проведение численных экспериментов на ней. Эти эксперименты показали, что алгоритм выделения квазилинейных цепочек землетрясений, предложенный авторами,

хорошо выделяет все искусственные цепочки, вставленные в модель со случайным распределением эпицентров землетрясений. Вторым важным результатом – наряду с реальными цепочками имеют место и псевдоцепочки, возникающие при случайном распределении эпицентров землетрясений, что ранее, как правило не учитывалось.

С использованием статистического анализа были найдены сопоставимые ограничения при выделении разных типов цепочек, когда длина цепочки подчиняется логнормальному закону для группирующейся сейсмичности, а время между двумя последовательными событиями в цепочках остальной части выборки соответствует экспоненциальной модели Пуассона. С использованием этой закономерности выделена часть цепочек, относящихся к группирующейся сейсмичности.

Из общего распределения расстояний между первым и третьим событием в цепочках выделены еще 4 основных распределения, характеризующих разный масштаб уровней деструкции литосферы.

При решении проблемы выделения цепочек «миграции» землетрясений в общей группе выделенных цепочек особое внимание обращено на субрегиональные цепочки, в которых расстояние между соседними событиями в цепочке находится в пределах от 200 до 370 км. Ядерная оценка плотности распределения количества цепочек землетрясений показала, что эта пространственная мода наиболее устойчива при повышении энергетического класса рассматриваемых событий. Показано, что локальные цепочки землетрясений маркируют блоки земной коры и разломные зоны.

В зонах группирующейся сейсмичности, в частности, в афтершоковых последовательностях сильных землетрясений, пространственное распределение цепочек землетрясений может содействовать решению проблемы выбора нодальной плоскости, ответственной за дислокацию. Интересен для изучения феномен высокоскоростных цепочек, выявленных соискателем в группирующейся сейсмичности, когда время формирования цепочки может составлять несколько минут. По-видимому, такие высокие скорости формирования цепочек должны быть обусловлены либо особым состоянием среды, либо внешними воздействиями.

По нашему мнению, наиболее важная и пока кардинально нерешенная проблема данного исследования связана с наличием псевдоцепочек. Но следует отметить, что именно выполненные в диссертационной работе исследования позволили выявить эту проблему, которая раньше практически не рассматривалась в научной литературе. Кроме того, в диссертации рассмотрены возможные подходы к решению данной проблемы на основе выделенных распределений цепочек, соответствующих различным

масштабным уровням деструкции литосферы в Байкальском регионе, а также характерных скоростей миграций, определенных ранее предшественниками.

В работе широко и квалифицированно применяются методы статистического анализа данных, что позволило формализовать процесс выделения квазилинейных цепочек, обозначить проблему наличия псевдоцепочек, выделить пять типов цепочек в Байкальском регионе и предложить методы выявления таких типов цепочек, которые с наибольшей вероятностью могли бы свидетельствовать о возможной миграции сейсмичности.

### **Замечания.**

1. Несмотря на достаточно развернутое и полное рассмотрение в диссертации имеющихся работ по цепочкам землетрясений, следовало бы также упомянуть работы, касающиеся использования цепочек (необязательно квазилинейных) для прогнозирования сейсмической опасности – в первую очередь это работы П.Н. Шебалина (ИТПЗ РАН).

В разработанной в ИНГГ СО РАН и ИВМиМГ СО РАН геоинформационных системах GIS- EEDB и GIS-ENDDDB (Дядьков, Михеева, Марчук, 2013; Михеева, 2016) также имеется раздел анализа пространственного распределения сейсмических событий для выделения активных геоструктурных элементов.

2. На стр. 114 диссертационной работы сказано, что землетрясение 25.02.1999 г с  $M=6$  – самое сильное событие в пределах Южного Байкала за инструментальный период наблюдений (ссылка на работу Татькова и др. 2004 г). Но автору диссертации уже известно в настоящее время о более сильном событии - Култукском землетрясении 2008 г.

3. Хотя предпринятое автором исследование цепочек со скоростями формирования меньше 200 км/год в главе 4 логически обосновано на этом этапе (по данным о скоростях, полученным ранее другими исследователями), но, по-видимому, надо осуществлять поиск в широком диапазоне скоростей, имея ввиду возможность изменения свойств блочной сейсмогенной среды во времени. В том числе, как уже отмечалось, интерес представляют и цепочки с весьма высокими скоростями формирования – минуты, первые часы, для которых вероятность того, что эти цепочки являются псевдоцепочками, достаточно низка.

4. В диссертации и автореферате встречаются опечатки. Так, в тексте диссертации на 126 странице есть ссылка на рис. 4.12. По-видимому, имеется ввиду рис. 4.11.

В автореферате, на стр.14, есть неоконченное предложение с отсутствующей ссылкой.

Указанные замечания не снижают ценности полученных автором результатов. Диссертация А.А. Какоуровой является научно-исследовательской работой, вносящей новый существенный вклад в задачу изучения мигрирующей сейсмичности Байкальского региона.

### **Заключение**

Диссертационная работа и автореферат характеризуются четкой структурой, логической последовательностью и связностью, выдержаны в научном стиле и в полной мере отвечают цели и задачам исследования. Содержание автореферата соответствует содержанию текста диссертации. Диссертация и автореферат написаны лично автором, ссылки на работы других авторов оформлены корректно. Язык, стиль и грамотность оставляют хорошее впечатление.

Диссертационная работа Какоуровой А.А. представляет собой законченное научное исследование, выполненное на актуальную тему, содержит совокупность новых научных результатов и положений, выдвинутых автором для публичной защиты, обладает внутренним единством и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Результаты работы достаточно полно изложены в 6 статьях, опубликованных в изданиях, рекомендуемых ВАК для публикации основных научных результатов, 1 патенте Российской Федерации, 3-х свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ, а также неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях. Автореферат достаточно подробно и полно отражает основные идеи, содержание и выводы диссертационной работы.

Рассматривая перспективы использования методических разработок и теоретических результатов, полученных в диссертации А.А. Какоуровой, отметим направления исследований, в которых, по нашему мнению, наилучшим образом эти результаты могут быть применены:

- изучение характерных особенностей сейсмического процесса в Байкальском регионе;

- выделение активных областей современной деструкции литосферы, что может быть важным для развития и совершенствования методов сейсмического районирования;



- изучение пространственно-временных характеристик цепочек землетрясений в областях подготовки сильных землетрясений, что будет содействовать получению новой информации для теоретических построений моделей подготовки землетрясений и прогнозирования сейсмической опасности.

Диссертация «Мигрирующая сейсмичность Байкальского региона в статистике поля эпицентров землетрясений» отвечает всем требованиям ВАК, пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением № 842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., с изменениями от 21 апреля 2016 г. "О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям технического профиля, а ее автор – Какоурова Анна Александровна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Обсуждение диссертации и отзыва на диссертационную работу Какоуровой А.А. состоялось 14 сентября 2022 года на заседании Геофизического семинара ИНГГ СО РАН с участием представителей Лаборатории естественных геофизических полей, Лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, Лаборатории сейсмической томографии, одним из направлений научно-исследовательской деятельности которых является изучение сейсмичности, напряженно-деформированного состояния среды, геодинамики.

Отзыв на диссертационную работу Какоуровой А.А. одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации ИНГГ СО РАН (протокол Геофизического семинара ИНГГ СО РАН № 11 от 14.09.2022 г.).

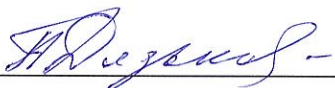
Заведующий лабораторией естественных геофизических полей  
ФГБУН ИНГГ СО РАН, к.г.-м.н.

телефон: +7(383) 333-03-99

адрес: пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090;

E-mail: [DyadkovPG@ipgg.sbras.ru](mailto:DyadkovPG@ipgg.sbras.ru)

Дядьков Петр Георгиевич



---

*Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.»*

Старший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей ФГБУН ИНГГ СО РАН к.ф.-м.н.

телефон: +7(383) 333-03-99

адрес: пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090;

E-mail: [KozlovaMP@ipgg.sbras.ru](mailto:KozlovaMP@ipgg.sbras.ru)

Козлова Марина Петровна



*Согласна на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.»*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука» Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН)

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3

тел: 8(383) 333-29-00, факс: 8(383) 330-28-07, e-mail: [ipgg@ipgg.sbras.ru](mailto:ipgg@ipgg.sbras.ru)

Ученый секретарь ИНГГ СО РАН

к.т.н.

Шумскайте Мария Йоновна

