

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ МОРСКОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИМГиГ ДВО РАН)

*на правах рукописи*

**ГРИГОРЬЕВА ОЛЬГА ОЛЕГОВНА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА СЕЙСМИЧНОСТИ КУРИЛЬСКИХ  
ОСТРОВОВ В РАМКАХ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО  
МУЛЬТИПЛИКАТИВНОГО КАСКАДА**

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Направление подготовки: 05.06.01 «Науки о Земле»

Направленность: Геофизика, геофизические методы поисков полезных  
ископаемых

Научный руководитель:  
кандидат физ.-мат. наук  
Андреева М.Ю.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

	Стр.
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	3
СТРУКТУРА И ОБЪЕМ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ	7
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	12

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность**

Курильские острова расположены в зоне субдукции двух плит: океанической Тихоокеанской и континентальной Охотской. В этой зоне происходят и сильнейшие катастрофические землетрясения с магнитудой  $M \geq 8.0$ . Землетрясения являются одним из опасных явлений для жителей Курильских островов.

Сахалинская область имеет важное экономическое, политическое и военно-стратегическое значение для страны. Курильские острова заселены крайне неравномерно. Население постоянно проживает только на северных и южных Курилах, где и происходит большое количество землетрясений. В результате природных стихийных бедствий страдают люди, разрушаются объекты инфраструктуры. В связи с тем, что до сих пор геофизики не научились определять точное время и место землетрясений, то опасность для жизни населения существует всегда. Поэтому изучение землетрясений и их прогнозирование – неотъемлемая составляющая развития островного региона.

В настоящее время существует довольно много методов прогноза землетрясений [Федотов, 1968; Моги, 1988; Матвиенко, 1998; Тихонов, Малышев, 2001; Соболев, 2003; Кособоков, 2005; Соболев, Тюпкин, 2006; Завьялов, 2006], большинство из которых базируются на использовании данных исторических землетрясений. Эти признаки основаны на тех или иных особенностях сейсмического режима, представляющих относительно характерные фазы подготовки сильного землетрясения. Лучшие из этих методов дают эффективность прогноза существенно выше случайного угадывания, но не достаточную для их широкого практического использования.

Метод построения обобщенной окрестности сильного землетрясения (в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада) обеспечивает получение наиболее детального сценария: типичного развития фор- и афтершоковых процессов. Этот метод позволяет существенно уточнить характер ряда известных ранее предвестниковых и афтершоковых аномалий, а также выявить ряд неизвестных (или предположительно предполагавших некоторыми авторами). Метод позволяет продвинуться и в понимании некоторых физических процессов, связанных с подготовкой и реализацией сильного землетрясения. Этот метод в настоящее время реализован только по мировым данным и неизвестны его региональные особенности.

**Целью работы** является исследование параметров сейсмического режима в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада и анализ обобщенной окрестности

сильного землетрясения по региональным данным за период 1923–2020 гг. для Курильских островов.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить аналитический обзор современного состояния исследований в сейсмичности Курильского региона, а также в части применения алгоритмов прогнозов сильных землетрясений для Курильского региона;
2. Создать региональный однородный каталог землетрясений для Курильского региона;
3. Создать каталог афтершоковых последовательностей Курильского региона за промежутки времени 1923–2020 гг.;
4. Проанализировать статистику изменения  $b$ -value по подзонам Курильских островов;
5. Исследовать параметры графиков повторяемости землетрясений в афтершоковых последовательностях с позиций модели нелинейного мультипликативного каскада;
6. Построить и провести анализ обобщённой окрестности сильного землетрясения по региональным данным для Курильских островов.

**Предмет исследований** – режим сейсмичности Курильских островов.

**Объект исследований** – Курильская сейсмоактивная зона.

**Научная новизна:**

Создана база данных для исследований: однородный электронный каталог землетрясений Курильского региона за период времени 1923–2020 гг. и электронный каталог из 107 афтершоковых последовательностей землетрясений. Исследованы изменения параметров графиков повторяемости афтершоковых последовательностей землетрясений Курильского региона. В характере поведения хвоста распределения графиков повторяемости афтершоковых последовательностей сильных землетрясений выделено два типа. Впервые выявлена тенденция уменьшения угла наклона графика повторяемости не только за несколько лет до сильного землетрясения, но также несколько лет после него. Выявлен эффект временной кластеризации сильных землетрясений Курильского региона при прогнозе сейсмической активности. Обнаружена большая продолжительность подготовки глубоких ( $H > 400$  км) сильных землетрясений, по сравнению с менее глубокими.

**Достоверность исследований** обусловлена:

Представительным объемом экспериментальных данных по землетрясениям Курильских островов, стандартными и хорошо апробированными методиками обработки данных. Анализ данных проводился на основе информационных технологий с применением специальных компьютерных программ, сопоставлением с другими опубликованными результатами.

**Обоснованность результатов** подтверждается их согласованностью и непротиворечивостью результатов исследований проводимых по смежной тематике. Обеспечивается применением современных методов сбора информации, статистических методов сбора и обработки информации.

**Практическая ценность работы:**

Результаты исследований могут быть использованы:

1. Для прогноза землетрясений в Курильском регионе путем изучения изменения параметров графиков повторяемости в районах сейсмических брешей;
2. Для повышения детальности описания фор- и афтершокового режима для сильных землетрясений Курильских островов;
3. Метод анализа обобщённой окрестности может быть удобным для выявления эффекта группируемости сильных землетрясений Курильского региона во времени;
4. При прогнозе сейсмической активности необходимо учитывать эффект временной кластеризации сильных землетрясений Курильского региона.

**Личный вклад:**

1. Принимала непосредственное участие в создании базы данных землетрясений и афтершоковых последовательностей, содержащих сведения о сейсмическом режиме Курильских островов;
2. Проводила анализ параметров графиков повторяемости по трем Курильским подзонам и по всему Курильскому региону.
3. Участвовала в теоретическом обосновании динамики параметров графиков повторяемости афтершоковых последовательностей землетрясений Курильского региона;
4. Исследовала сейсмичность Курильского региона в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада, применяя метод обобщенной окрестности землетрясений;
5. Вместе с соавторами участвовала в подготовке публикаций по теме работы;

**Аппробация**

Результаты по теме ВКР докладывались и обсуждались на семинарах ИМГиГ ДВО РАН, а также на III Всероссийской научной конференции с международным участием (Южно-Сахалинск, 2019 год).

**Публикации:**

1. Родкин, М.В. Анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения по региональным данным, Курило-Камчатский регион / М.В. Родкин, М.Ю. Андреева, О.О. Григорьева // Вулканология и сейсмология. – 2020. - №6. - С. 1 -11.
2. Андреева, М.Ю. Анализ видов графиков повторяемости землетрясений в Курильском регионе / Андреева М.Ю., Григорьева О.О. // Геодинамические процессы и природные катастрофы, Южно-Сахалинск, 27–31 мая 2019 г. Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием.

## СТРУКТУРА И ОБЪЕМ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

Научно-квалификационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы (189 источников), в том числе на иностранном языке 57 источников. Работа изложена на 102 страницах машинописного текста и включает 24 рисунка и 11 таблиц.

Во введении определена актуальность темы исследований, предмет, цели и задачи, новизна работы, практическая ценность и личный вклад автора.

В первой главе представлен аналитический обзор современного состояния исследований сейсмичности Курильских островов, рассмотрена структура Курильской сейсмоактивной зоны и дана краткая геологическая характеристика этого региона. Описана сейсмичность Курильских островов, выделены сильнейшие землетрясения, происходившие в этом регионе и особенности глубинного распределения землетрясений. Рассмотрены все известные алгоритмы прогнозов землетрясений, примененные к Курильскому региону.

Во второй главе описан регион исследований: район Курильских островов, ограниченный координатами  $\varphi = 41^{\circ}\text{N} - 51.5^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda = 142^{\circ}\text{E} - 162^{\circ}\text{E}$ . Выделены три зоны (блока): Южно (ЮК)-, Средне (СРК)- и Северо-Курильскую (СК). СРК отделяется от СК проливом Крузенштерна, от ЮК- проливом Буссоль.

Описаны каталоги землетрясений, которые были собраны для научной работы. Основой данной работы является каталог Курило-Камчатских землетрясений [Андрева, Ким, 2012] с 1737 г., пополняемый авторами из бюллетеня ISC [ISC = [International Seismological Centre] ..., 2021] и продолженный до апреля 2021 г. Из настоящего исследования были исключены мелкофокусные события о-ва Сахалин. В такой список входит 44153 землетрясений с магнитудой  $M \geq 3.0$  с глубиной очага  $0 \leq H \leq 700$  км. Этот каталог и был использован для построения обобщенной окрестности сильного землетрясения.

Следующий каталог, созданный для работы – это список афтершоковых последовательностей за период с 1937 по 2020 гг. За период наблюдений в Курильском регионе удалось выделить 107 афтершоковых последовательностей: в ЮК – 57, СРК – 27 и СК – 23. В них содержится 13324 событий.

Третий каталог – это список событий, ограниченный глубиной очага  $0 \leq H \leq 300$  км и по площади - северной оконечностью Большой Курильской гряды. Он включает в себя 28133 землетрясения.

Далее были созданы несколько рабочих подкаталогов из данного списка

землетрясений: построены очаговые области сильнейших землетрясений (по облаку афтершоков) по всему сейсмообъему (все годы и глубины) и условно названные 1952, 1958, 1963, 1969, 1973, 1978, 1994, 2006-2007. Одновременно были выбраны для исследования районы Курильской дуги, определяемые в работе [Федотов, Соломатин, 2019] как сейсмические бреши (СБ) в районе Средних Курильских островов со 2-й степенью опасности, вблизи концов главного разрыва Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. Настоящие 11 подкаталогов и были применены для изучения сейсмического режима выбранных участков Курильского региона.

Далее описаны способы выделения афтершоковых последовательностей: Ручной, оконный, кластерный и метод локального отношения интенсивностей. Для исследования использовалась программа, доступная для компьютерной обработки каталогов сейсмических событий: программа для выделения афтершоковых последовательностей программа, разработанная В.Б. Смирновым [Смирнов, 1997]. Она позволяет определить афтершоковые зависимости, принадлежащие к тому или другому основному событию.

Далее в рамках универсального закона повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера были исследованы изменения угла наклона графика повторяемости ( $b$ ) до и после момента сильного землетрясения. Были определены изменения значения  $b$ -value закона повторяемости для землетрясений Курильских островов в зависимости от периода наблюдений и выбранных зон.

Было определено, что среднее значение угла наклона  $b = 0.86 \pm 0.02$  для всего Курильского региона за весь период наблюдений. Значения  $b$ -value для каждой из зон в пределах среднеквадратичной ошибки практически равны: для ЮК  $b = 0.85 \pm 0.01$ , для СРК  $b = 0.87 \pm 0.02$ , для СК  $b = 0.80 \pm 0.02$ .

Рассмотрены вариации  $b$  за период наблюдений по выделенным зонам, хорошо видна тенденция перед сильными землетрясениями  $b$ -value увеличивается до максимальных значений в этот период, затем идет снижение. Минимальным значениям является величина  $b = 0.6$ , максимальным  $b = 1.6-1.7$ . В настоящий период только зоны ЮК и СРК имеют тенденцию увеличения этого показателя, что может говорить о том, что через некоторое время произойдет именно в этих зонах сильное землетрясение.

Далее определены значения представительной магнитуды для ЮК, СРК, СК, ее изменение в зависимости от периода наблюдений. Отмечено, что все больше регистрируются землетрясения с магнитудами, меньше 4.0, это значит, что для задач прогнозирования сильных землетрясений улучшаются условия и качество наполнения каталогов землетрясений.

Следующим этапом было исследование вариаций угла наклона графика повторяемости для некоторых участков Курильских островов. В определении значений величин  $b$  участвовали только значимые землетрясения, построены графики изменения этого параметра для каждого выделенного сейсмического объема (1952, 1958, 1963, 1969, 1973, 1978, 1994, 2006-2007, СБ<sub>1</sub>, СБ<sub>2</sub>, СБ<sub>3</sub>). Все они находятся в Курило-Континентальной зоне и зоне Курильский желоб ( по модели зон возможных очагов землетрясений) [Andreeva, 2012].

За период наблюдений в Курильском регионе удалось выделить 107 афтершоковых последовательностей: в ЮК – 57, СРК – 27 и СК – 23. В них содержится 13324 событий, это составляет 47% от общего количества. Афтершоковые последовательности по зависимости количества землетрясений от магнитуды основного толчка соответствует модели ETAS, в которой принято, что число афтершоков растет как  $\sim 10^M$  [Ogata, 1998].

Отмечено, что в подзоне КК<sub>1</sub> происходит большее число зависимых событий – 23 из 57 в ЮК зоне (13 имеют 50 и более афтершоков), в подзоне КЖ<sub>2</sub>, в которой 16 таких последовательностей, из них только 5 имеют в группе больше 50 событий. Из ЮК зоны область КК<sub>1</sub> является наиболее сейсмогенной.

Далее были вычислены значения  $b$  и построены графики в зависимости от периода наблюдений. Выявлено, что изменения  $b$ -value практически одинаков: увеличение значения до землетрясения до максимальных величин, затем снижение почти в два раза и период стабилизации. Можно отметить то обстоятельство, что на графиках 1952, 1958, 1963, 1969, 1973 хорошо прослеживается изменение  $b$  в течении 50-70 лет после землетрясения, на графиках 1994, 2006-2007 – изменение  $b$  за 40-50 лет до землетрясений.

Показано, что за несколько лет перед катастрофическими землетрясениями  $b$ -value достигает максимальных значений, которые варьируются от 1.4 до 1.8. Через некоторое время идет снижение значений до 1.2–0.8 и происходит землетрясение.

После землетрясения наступает период стабилизации, который достигается за 8 – 30 лет со значениями от 0.8 до 0.9, он неизменен на протяжении 35–40 лет. Период стабилизации полностью проследить невозможно, т.к. нет 140 лет наблюдений и, соответственно, списка событий.

В главе 3 рассмотрена модель нелинейного мультипликативного каскада (МНМК), где землетрясения рассматриваются как эпизоды релаксации статистически идентичных подсистем некоторой достаточно большой метастабильной системы. Рассмотрены два варианта этой модели, их отличия.

В рамках этой модели в характере поведения хвоста распределения графиков повторяемости афтершоковых последовательностей сильных землетрясений выделено два

типа. В основной части графика первого типа реализуется закон Гутенберга-Рихтера, а в хвосте графика реализуется эффект возникновения аномально сильных, характеристических, землетрясений. Второй тип хвостов графиков повторяемости отвечает простому варианту загиба вниз хвоста распределения, который обуславливается в случае отсутствия в кинетическом уравнении члена, отвечающего за появление аномально сильных характеристических событий.

Далее рассмотрен метод построения обобщенной окрестности сильного землетрясения. Дано определение, что понимается под обобщенной окрестностью сильного землетрясения. Это объединение данных по большому числу (до 1000) пространственно-временных окрестностей индивидуальных сильных землетрясений. Такое объединение позволяет резко увеличить статистику и, за счет этого, повысить детальность описания фор- и афтершокового режима, выявить его типовые черты, для каждого конкретного сильного землетрясения, маскируемые сильной случайной изменчивостью сейсмического режима.

Далее проведен анализ обобщенной окрестности Курило-Камчатских землетрясений.

При построении обобщенной окрестности отбирается некоторое большое число сильнейших землетрясений данного каталога. Для используемого в данной работе каталога оптимальным значением порога принято  $M \geq 6.3$ .

Замечено разграничение формирующих обобщенную окрестность сильных событий на два этажа по глубине; отсутствуют события с глубиной 300-400 км, и только одно сильное землетрясение имеет глубину в интервале 200-300 км. Это дало основание разделить сильные землетрясения по глубине на два класса – до 300 км и глубже 400.

При анализе обобщенной окрестности рассматривается изменчивость потока фор- и афтершоков. Эта зависимость дана для окрестности 72 событий  $M \geq 6.3$  с глубиной  $H < 300$  км и окрестности 12 землетрясений  $M \geq 6.3$  и  $H > 400$  км. Эти обобщенные окрестности включают данные о более 199 тысяч землетрясений и о 1498 событиях соответственно; причём в обеих этих обобщенных окрестностях представлены и глубокие и неглубокие землетрясения.

Отмечено, что рост числа форшоков начинается примерно за 100 дней до момента обобщенного сильного землетрясения, а также, что спад числа афтершоков в окрестности сильных событий с глубиной  $H > 400$  км происходит быстрее, чем в окрестности сильных землетрясений с глубиной  $H < 300$  км.

Результаты в обобщенной окрестности, сформированной сильными событиями с глубиной очага  $H < 300$  км качественно повторяют ранние результаты по общемировым

данным для событий с глубиной очага  $H < 70$  км. Примерно за 100 дней до момента обобщённого сильного землетрясения начинается уменьшение средней глубины землетрясений. Компенсирующий рост средней глубины землетрясений происходит в афтершоковой последовательности и длится 200–300 дней. Для сильных событий с глубиной очага  $H > 400$  наблюдается противоположная тенденция, а именно, происходит рост средней глубины землетрясений.

Отмечено, что для обобщенной окрестности и менее глубоких ( $H < 300$ ) и глубоких ( $H > 400$ ) сильных землетрясений наблюдается рост средних значений магнитуды в окрестности момента обобщённого сильного события. Аномалия начинается за 200–300 дней до момента обобщённого сильного землетрясения.

Выявлен эффект группируемости сильных землетрясений региона во времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами научно-квалификационной работы являются следующие:

1. Создан в электронном виде однородный каталог землетрясений Курильского региона общим периодом с 1923 по 2020 гг., который может являться основой для всех исследовательских работ, проводимых в этом районе. Составлен каталог из 107 афтершоковых последовательностей землетрясений изучаемого региона.

2. Проведен анализ изменения  $b$ -value Курильскому региону и по выделенным подзонам. Обнаружено, что вид графиков изменения  $b$ -value практически одинаков: увеличение значения за 8-30 лет до землетрясения до максимальных величин (1.6–1.8), затем снижение почти в два раза за 12-20 лет и период стабилизации (0.8–0.9);

3. Выявлена тенденция уменьшения угла наклона графика повторяемости не только за несколько лет до сильного землетрясения, но также несколько лет после него.

4. В характере поведения хвоста распределения графиков повторяемости афтершоковых последовательностей сильных землетрясений выделено два типа. В основной части графика первого типа реализуется закон Гутенберга-Рихтера, а в хвосте графика реализуется эффект возникновения аномально сильных, характеристических, землетрясений. Второй тип хвостов графиков повторяемости отвечает простому варианту загиба вниз хвоста распределения, который обуславливается в случае отсутствия в кинетическом уравнении члена, отвечающего за появление аномально сильных характеристических событий.

5. Использован метод построения обобщённой окрестности сильных землетрясений для Курильских региона в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада.

6. Обнаружена большая продолжительность подготовки глубоких ( $H > 400$  км) сильных землетрясений, по сравнению с менее глубокими. Если в окрестности менее глубоких основных событий аномалии роста числа форшоков и глубины землетрясений начинаются примерно за 100 дней до момента обобщённого сильного землетрясения, то для глубоких землетрясений, аналогичные аномалии, а также рост средней магнитуды начинают проследиваться за 200 и более дней до момента обобщённого глубокого сильного землетрясения. При этом афтершоковая активность спадает для глубоких землетрясений быстрее, чем для менее глубоких.

7. С помощью метода анализа обобщённой окрестности был выявлен эффект группируемости сильных землетрясений Курильского региона во времени. Этот эффект оказался существенно сильнее, чем по мировым данным. Обнаружено, что более трети

сильных землетрясений региона могут оказаться не независимыми, а относиться к одному из временных кластеров активизации. Пространственный размер кластеров на порядок и более превышает размеры очага максимального, входящего в кластер землетрясения.