

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ МОРСКОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

СЕМЕНОВА ЕЛЕНА ПЕТРОВНА

**ОБОБЩЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА
В ЭПИЦЕНТРАЛЬНЫХ ЗОНАХ
СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ САХАЛИНА**

(1.6.9 – Геофизика)

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук
Родкин Михаил Владимирович

Южно-Сахалинск – 2022

Оглавление

Общая характеристика работы	3
Структура и объем научно-классификационной работы.....	8
Заключение.....,,.....	11

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

определяется тем огромным вниманием, которое уделяется детальному исследованию сейсмичности острова Сахалин, поиску и изучению закономерностей развития процессов, сопровождающих разрядку землетрясений. Изучаемые параметры динамических и статистических характеристик афтершоковых процессов имеют важное научно-прикладное значение для изучения тектонических структур региона.

Сахалинская область является одним из наиболее активных сейсмических регионов России. На протяжении последних 50 лет здесь произошли такие сильные землетрясения, как Монеронское 1971г. и Углегорское 2000г., разрушительное по своим последствиям Нефтегорское землетрясение 1995г., Горнозаводское 2006 г. и Невельское 2007г. землетрясения.

Одно из самых трагических событий на Дальнем Востоке – Нефтегорское землетрясение 1995 года с магнитудой $M_w7.1$. Сотрясения от землетрясения охватили всю территорию острова Сахалин, а также восток и центральную часть Хабаровского края. Землетрясение сопровождалось полным обрушением большей части жилых зданий в пос. Нефтегорск, погибло 2000 жителей.

4 августа 2000 года в Углегорском районе Сахалинской области произошло землетрясение с магнитудой $M_w6.7$, которое в близлежащих населенных пунктах ощутили силой до 7 баллов. Детальное обследование в эпицентральной зоне позволило обнаружить свежесломанные деревья, оползни и вывалы трещиноватых пород на обрывистых склонах русел рек.

Такойское землетрясение 1 сентября 2001 года с $M_w5.2$ произошло на расстоянии 3-4 км от близлежащих поселков, где оно проявилось интенсивностью 6 баллов. В качестве сопутствующих явлений были отмечены изменения в грифонной деятельности грязевого вулкана Южно-Сахалинский.

Произошедшее 2 августа 2007 года Невельское землетрясение с магнитудой $M_w 6.2$ вызвало значительные повреждения жилых зданий и сооружений, сопровождалось поднятием морского дна в прибрежной зоне и спровоцировало волну цунами высотой до 3,2 м.

Детальное изучение сейсмичности всего острова, а особенно его южной части, где отмечается самая большая плотность населения, а населенные пункты расположены вблизи закартированных трасс глубинных разломов, ведется активное строительство нефте-газодобывающих сооружений, прокладываются линии газо- и нефтепроводов крайне важно для уточнения степени сейсмической опасности и выявления зон, наиболее подверженных риску сейсмических подвижек, что в дальнейшем может помочь предотвратить или уменьшить последствия от сильных землетрясений.

Цель работы:

1. детальные исследования сейсмических процессов в эпицентральных зонах сильных сахалинских землетрясений;
2. определение динамических и статистических параметров сейсмического режима в зонах очагов сильных сахалинских землетрясений.

Задачи исследования:

1. Обзор результатов проведенных детальных наблюдений в эпицентральных зонах сильных сахалинских землетрясений
2. Анализ параметров афтершоковых процессов в эпицентральных зонах сильных землетрясений
3. Исследование количественных и статистических параметров сейсмического режима в эпицентральных зонах сахалинских землетрясений

Фактический материал, который использован в работе:

1. Региональный и оперативный каталоги землетрясений острова Сахалин (фонды СФ ФИЦ ЕГС РАН);

2. Каталог землетрясений юга Сахалина цифровых станций локальной сети сейсмического мониторинга (фонды СФ ФИЦ ЕГС РАН);
3. Каталог отдельных землетрясений, полученный по данным записи сети цифровых сейсмических станций DAT и Datamark;
4. Другие материалы из фондов СФ ФИЦ ЕГС РАН и ИМГиГ ДВО РАН.

Научная новизна работы:

1. на основе результатов детальных наблюдений сейсмических процессов в зонах сильных землетрясений о. Сахалин были выявлены особенности афтершоковой деятельности сахалинских землетрясений;
2. результаты детальных сейсмологических наблюдений в эпицентральных зонах сахалинских землетрясений позволили оценить динамические и статистические параметры афтершоковых процессов.

Практическая значимость работы:

Результаты работы используются для оперативной оценки сейсмического режима при возникновении сильных сахалинских землетрясений.

Материалы детальных наблюдений в эпицентральных зонах сильных землетрясений Сахалина являются основой для построения карт сейсмического районирования в Дальневосточном регионе.

Личный вклад автора:

1. Автор обеспечил создание информационной основы исследования, сформировав базу цифровых каталогов землетрясений и афтершоковых последовательностей землетрясений о. Сахалин;
2. многолетнее детальное изучение сейсмического режима в эпицентральных зонах сильных землетрясений острова Сахалин позволило автору рассчитать динамические и статистические параметры афтершоковых процессов;
3. вместе с соавторами участвовала в подготовке публикаций по теме работы, обобщении материала и формулировке выводов.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается согласованностью полученных в работе результатов с результатами, которые были получены ранее другими авторами.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на следующих научных форумах:

1. Вторая Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» г. Пермь 13 - 17 августа 2007 г.
2. Конференция «Сейсмичность Сахалина и Курильских островов», посвященная 60-летию открытия сейсмической станции «Южно-Сахалинск» г. Южно-Сахалинск 8 - 11 июня 2008 г.
3. Третья Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» г. Кисловодск 20 - 25 октября 2008 г.
4. Пятая Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» г. Владикавказ 4 - 8 октября 2010 г.
5. Шестая Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» г. Апатиты 15–19 августа 2011 г.
6. Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе. Научная конференция, посвященная 65-летию Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, 26-30 сентября 2011 г.
7. Третья региональная научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» г. Петропавловск-Камчатский 9 - 15 октября 2011 г.

8. Седьмая Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» п. Нарочь, Беларуссия 9-14 сентября 2012 г.
9. Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе. Опыт Нефтегорска. г. Южно-Сахалинск, 26-30 мая 2015 г.
10. Двенадцатая Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» Алма-Аты, Казахстан, 11-15 сентября 2017 г.
11. Тринадцатая Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» Душанбе, Таджикистан, 11-15 сентября 2019 г.
12. Четырнадцатая Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» Кишинев, Молдова, 9-13 сентября 2019 г.

Публикации

Основные результаты по теме работы: в соавторстве 2 монографии и более 10 работ в журналах из списка ВАК и других.

Структура и объем научно-квалификационной работы

Представленная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований. Работа изложена на 97 стр. текста, включая 38 рисунков и 7 таблиц.

В первой главе приводится обзор сейсмичности о. Сахалин.

Основой для изучения островной сейсмичности являются каталоги землетрясений, наполняемость и уровень представительности землетрясений которых определяются состоянием сейсмических станций региональной сети, а также имеющимися в распоряжении средствами регистрации и обработки сейсмических данных. Представительность региональных каталогов землетрясений о. Сахалин изменяется от $M_p=4.0$ до $M_p=3.0$ с течением времени в зависимости от числа станций регистрации, их чувствительности, методики и качества обработки. Уровень представительности $M_p=2.0$ каталога землетрясений по данным полевых станций локальной сети на юге о. Сахалин на протяжении двух десятков лет практически не меняется.

В работе проводится подробный обзор афтершоковых процессов, которые сопровождали сейсмический режим в зоне сильных сахалинских землетрясений как: Нефтегорское землетрясение 1995 года с $M_w7.1$, Углегорское землетрясение 2000 года с $M_w6.7$, Такойской рой 2001 г. с $M_w5.2$, Горнозаводское землетрясение 2006 г. с $M_w5.6$, Невельское землетрясение 2007 г. с $M_w6.2$, Крильонские землетрясения 2013 г. и 2017 г. с магнитудами $M_w5.1$, Онорское землетрясения 2016 г. с $M_w5.8$. Распределение эпицентров землетрясений на территории о. Сахалин и прилегающем к нему шельфе неравномерно, а зоны повышенной сейсмичности приурочены к сегментам крупнейших субмеридиональных разломов или оперяющих их структур.

По результатам наблюдений за афтершоковым процессом в эпицентральных зонах сильных землетрясений о. Сахалин можно выделить следующие характерные особенности:

1. землетрясения на о. Сахалин мелкофокусные (глубина очага не превышает 10-20 км),
2. землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$ сопровождаются выходом разрыва на поверхность.
3. землетрясения на Южном Сахалине в силу плотной заселенности являются землетрясениями ближней зоны, и даже сотрясения от слабых землетрясений с $M \geq 4$ представляют опасность для ближайших населенных пунктов Сахалин.
4. подвижка по разлому носит преимущественно взбросовый характер,
5. очаги повторных толчков мигрируют от глубины главного толчка к поверхности

Во **второй** главе выпускной квалификационной работы проводится обзор известных динамических и статистических параметров афтершоковых процессов, таких как размер очага землетрясения, график повторяемости, закономерность Бота и график Омори.

Взаимосвязь магнитуды и частоты землетрясений изучали М. Гутенберг и Ч. Рихтер, которые установили, что число землетрясений, происходящих в течение данного интервала времени в данном районе, уменьшается с магнитудой. Использование параметров графика повторяемости по данным афтершокового процесса вполне оправдано для изучения сейсмического режима в эпицентральных зонах.

Сильные землетрясения обычно сопровождаются последовательностью повторных толчков – афтершоков. Закон Омори гласит, что частота числа афтершоков в серии за единицу времени гиперболически уменьшается со временем t для времени в очаге основного толчка: $n(t) = at^{-\beta}$, где β – параметр, приближающийся к 1.

С помощью афтершоковых серий была выведена эмпирически закономерность, что средняя разность между магнитудами главного толчка и сильнейшего афтершока составляет 1.2 и которая не зависит от значения

магнитуды главного толчка. В дальнейшем эта универсальная закономерность получила название закон Бота.

Отдельное внимание во второй главе уделяется подготовке каталога афтершоков с использованием распространенных методов их идентификации: ручного и оконного методов.

Третья глава содержит данные о результатах применения известных методик использования динамических и статистических параметров к афтершоковым последовательностям сахалинских землетрясения.

Взаимосвязь магнитуды и частоты землетрясений изучали М. Гутенберг и Ч. Рихтер, которые установили, что число землетрясений, происходящих в течение данного интервала времени в данном районе, уменьшается с магнитудой. Использование полученных параметров графика повторяемости по данным афтершокового процесса вполне оправдано для изучения сейсмического режима в эпицентральных зонах.

Сильные землетрясения обычно сопровождаются последовательностью повторных толчков – афтершоков. Закон Омори гласит, что частота числа афтершоков в серии за единицу времени гиперболически уменьшается со временем t для времени в очаге основного толчка: $n(t) = at^{-\beta}$, где β – параметр, приближающийся к 1. Землетрясения, относящиеся к сейсмогенным зонам Сахалина, имеют значение угла наклона графика спадания приближенное к 1 при разных значениях магнитуд и хорошо согласуются со значением закона Омори.

С помощью афтершоковых серий была выведена эмпирически закономерность, что средняя разность между магнитудами главного толчка и сильнейшего афтершока составляет 1.2 и которая не зависит от значения магнитуды главного толчка. В дальнейшем эта универсальная закономерность получила название закон Бота. Допуск ошибки константы Бота составляет 0.1. Наше исследование показало ограниченность применения этого закона в сейсмогенных зонах Сахалина.

Заключение

На протяжении всего периода инструментальных наблюдений остров Сахалин сейсмически активен. Это проявляется в возникновении сильных и ощутимых землетрясений: катастрофического Нефтегорского землетрясения 1995г. с магнитудой $M_w7.1$, сильных землетрясений – Углегорско-Айнского 2000г. $M_w6.7$, Горнозаводского 2006г. $M_w5.6$, Невельского 2007г. $M_w6.2$, Такойского землетрясения 2001г. $M_w5.2$, Костромского 2004г. $M_w4.9$, Тымовского 2011г. $M_w5.2$, Крильонских землетрясений 2013 и 2017 гг. с магнитудами $M_w5.1$. Эпицентры сильных землетрясений тяготеют к зонам основных глубинных разломов – Центрально-Сахалинского и Западно-Сахалинского.

С 2000 года наблюдается активизация сейсмичности вдоль западного побережья Татарского пролива – в зоне Западно-Сахалинского разлома и оперяющих его структур. Это проявилось в возникновении череды таких землетрясений, как Углегорское 2000 г, Костромского 2004 г., Горнозаводского 2006 г., Невельского 2007 г., Крильонского 2013 г.

Сейсмическая активность вдоль структур Центрально-Сахалинского глубинного разлома была обозначена в 2001 году возникновением Такойского роя, Онорским землетрясением 2016 г., Крильонским землетрясением 2017 г.

Выпускная квалификационная работа содержит сведения о сильных землетрясениях Сахалина, произошедших в период с 1995г. по 2017г. Начиная с 2007 года автор активно занимается детальным изучением сахалинских землетрясений. Результаты этих наблюдений опубликованы в сборниках «Землетрясения Северной Евразии», «Тихоокеанская геология», неоднократно были представлены на Международных сейсмологических школах.

Статистические исследования по тематике работы были выполнены на материалах каталогов сахалинских землетрясений, в числе которых региональный каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН, каталог землетрясений Южного Сахалина по данным локальной сети цифровых сейсмостанций, региональный каталог землетрясений

острова Сахалин, 1905-2005 [Региональный..., 2006]. Представительность региональных каталогов сахалинских землетрясений изменяется с течением времени от $M_{п}=4.0$ до $M_{п}=3.0$ в зависимости от числа станций регистрации, их чувствительности, качества обработки. Представительность каталога локальной сети полевых станций на юге Сахалина длительное время остается равной $M_{п}=2.0$.

После каждого достаточно сильного землетрясения наблюдается большое число афтершоков. Проведение детальных наблюдений в эпицентральных зонах сахалинских землетрясений позволило собрать обширный материал для изучения сейсмического режима в эпицентральных зонах сахалинских землетрясений.

По результатам многолетних наблюдений в эпицентральных зонах сильных сахалинских землетрясений были выделены следующие характерные особенности:

- землетрясения на Сахалине мелкофокусные (глубина очага не превышает 10-20 км),
- землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$ сопровождаются выходом разрыва на поверхность.
- землетрясения на Южном Сахалине в силу плотной заселенности являются землетрясениями ближней зоны, и именно такой тип наиболее опасен для жителей.
- подвижка по разлому носит преимущественно взбросовый характер,
- афтершоки мигрируют от глубины главного толчка к поверхности, вследствие чего сотрясения от слабых землетрясений с $M \geq 4$ представляют опасность для ближайших населенных пунктов Сахалина.

Наблюдения за сейсмическим режимом в эпицентральной зоне представляет важную задачу и для системы наблюдений, и для нахождения методов, которые могут дать представление не только о сейсмичности региона, но и позволят оценить этот процесс в динамических и статистических параметрах.

Для изучения сейсмического режима в эпицентральных зонах сильных землетрясений необходимо учитывать размеры очага, полученные по зависимости длины очага от магнитуды (или энергетического класса).

Наилучшее приближение в оценке размера очаговых зон сахалинских землетрясений показали формулы Ризниченко Ю.В. и Завьялова А.Д., Зотова О.Д., Гульельми А.В. В то же время было отмечено небольшое отклонение в оценках размеров очаговой зоны Невельского (2007 г., $M=6.2$) и Углегорского (2000 г., $M=6.8$) землетрясений, каждое из которых сопровождалось выходом разрыва на поверхность земли. Вероятные причины, которые могли повлиять на подобные отклонения:

1. Одностороннее расположение станций наблюдательной сети
2. Очаговую зону Невельского землетрясения следует рассматривать как единую афтершоковую зону двух землетрясений ($O=02-37$ UTC, $M=6.2$ и $O=05-22$ UTC, $M=6.0$), что, несомненно, должно было повлиять на ее размерность.

Аналогичная картина была получена для оценки очаговой зоны Онорского землетрясения 2016 г. При одностороннем расположении станций сейсмологической сети наблюдений отскок в размерах очаговой зоны расчетная и по облаку афтершоков составляет около 10 км.

Статистические параметры афтершоковых последовательностей сахалинских землетрясений рассмотрены по соотношениям: график повторяемости Гутенберга-Рихтера, разности магнитуд главного толчка и наиболее сильного афтершока, закон Омори для затухания афтершоков.

На основании проведенных наблюдений были определены:

типичные значения $b\text{-value}=0.8$ для сахалинских землетрясений, отклонение от которого можно рассматривать по совокупности для краткосрочного предвестника землетрясения;

среднее значение разности между магнитудой главного толчка и сильнейшего афтершока составляет 0,7-0,9 для сахалинских землетрясений;

осредненное значение скорости спадания числа афтершоков в графике Омори составляет 1.2.