

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

На правах рукописи

БОГИНСКАЯ НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА
САХАЛИНЕ В МЕТОДАХ СРЕДНЕСРОЧНОЙ ОЦЕНКИ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ LURR И СРП**

(25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ НАУЧНО-
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук
Закупин Александр Сергеевич

Южно-Сахалинск - 2019

Оглавление

Общая характеристика работы.....	3
Структура научно-квалификационной работы.....	9
Заключение.....	12

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Три самых разрушительных землетрясения за последние 30 лет на о. Сахалин (Нефтегорское 1995 г. с магнитудой $M=7.2$ на северо-востоке острова, Углегорское 2000 г., $M=7.0$ в центральной его части, и Невельское 2007 г., $M=6.2$ на юге) указали на более высокий уровень сейсмической опасности этого региона, чем это было предусмотрено в картах по общему сейсмическому районированию (8-9 баллов по шкале MSK-64 при $T=500$ лет). Этими событиями было инициировано развитие сети сейсмических станций на о. Сахалин и организация полноценной сейсмологической службы в начале 2000-х годов. В 2011 году сеть Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы Российской академии наук (СФ ФИЦ ЕГС РАН) стала полностью цифровой, а каталоги землетрясений получили высокую представительность за счет плотной сети (особенно на юге острова). Это способствовало более детальному исследованию сейсмического режима, включая разработку новых подходов к прогнозам землетрясений (ЗЛТ) и адаптации имеющихся методик для местных условий.

Исключительная сложность задачи прогноза предполагает определенную этапность ее решения. Для района северного Сахалина была показана возможность среднесрочного прогноза одной из самых трагичных катастроф в России - Нефтегорского ЗЛТ 1995 г. ($M_w=7.2$) с помощью алгоритма M8. Настройка алгоритма выполнялась на данных регионального каталога Геофизической службы РАН без афтершоков за последние 15 лет, начиная с 1964 г. [Тихонов, 2000].

В декабре 2005 г. сейсмологами Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) был подготовлен долгосрочный прогноз сильного ЗЛТ, на юго-

западном шельфе о. Сахалин с $M_{LH}=6.6\pm 0.6$. Основой прогноза послужили предвестники - сейсмические бреши первого рода и второго рода, которые были надежно картированы на юго-западном шельфе острова вблизи гг. Невельск, Холмск по историческим данным о сильных ЗЛТ и данным сети цифровых сейсмических станций на юге о. Сахалин. Началом его реализации явилось Горнозаводское ЗЛТ 17.08.2006 года с магнитудой $M_w=5.6$. Через 6 дней после его начала Тихоновым И.Н. и Ким Ч.У. был подготовлен среднесрочный прогноз более сильного события в этом районе. Примерно через год долгосрочный и среднесрочный прогнозы полностью реализовались Невельским ЗЛТ 2.08.2007 г. с магнитудой $M_w=6.2$ ($M_{LH}=6.2$) [Тихонов, 2006; Тихонов, 2008].

Следуя логике стадийности сейсмического процесса в дополнение к среднесрочным (или скорее долгосрочным) методам оценки сейсмической опасности Тихонов И.Н. применил метод саморазвивающихся процессов (СРП), который описывает поведение разрушающейся системы на самой последней стадии [Малышев, 1991]. Ретроспективно было проведено моделирование по методу СРП для юга о. Сахалин на детальном каталоге землетрясений с $M\geq 2.6$ за 12-летний (2003-2014 гг.) период наблюдений для восьми ЗЛТ с $M\sim 4.6-6.2$. Для каждого из них получены даты реализации прогнозов. При этом ошибка прогноза во времени составила не более суток. Авторы отмечали, что реальная точность прогноза могла бы быть выше при наличии более детального ($M\geq 2.0$) каталога землетрясений, получаемого в реальном времени, по югу о. Сахалин [Тихонов и др., 2017].

После 2014 года на о. Сахалин произошло несколько сильных землетрясений, сейсмическая сеть обеспечила представительность каталогов землетрясений с $M>3.0$ на севере и $M\geq 1.5$ на юге о. Сахалин. Очевидная актуальность прогноза сейсмической опасности свидетельствует о необходимости продолжения разработки новых методов и алгоритмов прогноза землетрясений для о. Сахалин, основанных на физических моделях.

В настоящей работе показаны результаты исследований, которые дают возможность эффективного последовательного применения методов прогноза LURR (Load-Unload response ratio) и СРП, опирающихся на современные модели процесса разрушения геосреды.

Цель работы - поиск устойчивых среднесрочных пространственно-временных закономерностей динамики потока сейсмичности на о. Сахалин до и после сильных землетрясений, для разработки методологии и алгоритмов, сужающих временные рамки прогноза сейсмических событий.

В соответствии с этим решались следующие **задачи**:

1. Выбрать физические модели для компьютерного моделирования сейсмического режима в период подготовки сильных землетрясений с учетом тектонических и сейсмических особенностей о. Сахалин.
2. Определить основные составляющие сейсмического процесса в рамках современных концепций разрушения и эволюции сейсмического очага для их выделения в компьютерных моделях алгоритмов LURR и СРП.
3. На основе выбранных моделей провести расчеты в основных сейсмогенерирующих областях о. Сахалин на имеющемся программном обеспечении, в которых за выбранный период инструментальных наблюдений были зафиксированы землетрясения с $M \geq 5.5$.
4. По результатам расчетов выделить характерные этапы развития сейсмического процесса, основные точки перехода режима в различные состояния, установить связи между параметрами имеющихся моделей.
5. Оценить возможность применения результатов моделирования для прогноза сейсмической опасности на территории о. Сахалин.

Методы исследования

В данном исследовании использовался комплекс методов: последовательное применение методов LURR и СРП. Результаты в части

выполнения расчетов по методу LURR получены с помощью программного комплекса «Seis-ASZ», который был разработан в ИМГиГ ДВО РАН [Закупин, 2016]. Для анализа данных каталогов ЗЛТ при помощи алгоритма СРП применялся программный комплекс SeisDynamicsView, который был любезно предоставлен А.И. Малышевым из Института геологии и геохимии Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН).

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложен подход для описания сейсмического режима в период подготовки сильных ЗЛТ на о. Сахалин, опирающийся на последовательное применение двух известных методов обнаружения периода подготовки и развития фолшоковых последовательностей перед сильными землетрясениями (LURR и СРП).

Достоверность результатов и выводов.

Обеспечивается использованием подходов и методов исследования, ранее апробированных и взаимно дополняющих друг друга (методы LURR и СРП); надежными алгоритмами обработки данных; согласованностью результатов с результатами работ других авторов по смежной тематике, а также подтверждением результатов, полученных ретроспективно при проведении компьютерного моделирования.

Обоснованность результатов.

Подтверждается согласованностью и непротиворечивостью полученных результатов по отношению к более ранним исследованиям других ученых.

Практическая значимость.

Результаты исследований могут быть использованы для разработки аналитических систем по прогнозу сейсмической опасности на о. Сахалин.

Алгоритм, предложенный в данной работе, может быть положен в основу автоматизированного комплекса, работающего в системе автоматического сбора и анализа сейсмологической информации СФ ФИЦ ЕГС РАН на основе специализированных программных комплексов, которые прошли этапы настройки и длительного тестирования на данных каталогов ЗЛТ других регионов, как в ретроспективном, так и в реальном режимах обработки.

В настоящее время данная методология используется при выработке решения по сейсмической опасности на о. Сахалин на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (СФ РЭС). Практическая значимость исследований подтверждена результатами успешных реальных прогнозов последних сахалинских землетрясений: Онорского 2016 г. ($M_w=5.8$) и Крильонского 2017 г. ($M_w=5.0$) (протокол заседаний СФ РЭС № 3 от 11.05.2016 г., протокол заседаний СФ РЭС № 2 от 16.03.2017 г.).

Работа выполнена в соответствии с научными темами и планами работ ИМГиГ ДВО РАН по государственному заданию (ответственный исполнитель); проектом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №18-07-00966 «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности о. Сахалин с применением сейсмических датчиков нового типа» (исполнитель).

Личный вклад автора.

Автор принимал непосредственное участие в подготовке сейсмических каталогов для проведения расчетов на выбранных компьютерных моделях на специализированном программном обеспечении.

Автором лично выполнены расчеты параметров LURR и СРП перед сильнейшими землетрясениями на о. Сахалин, начиная с 1988 года (с предысторией для каждого события в несколько лет).

Самостоятельно и вместе с соавторами участвовала в подготовке публикаций по теме работы, обобщению материала и формулировке выводов.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, из них 2 – в изданиях, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией (ВАК) и проиндексированных в реферативных базах Web of Science и SCOPUS, и 3 – в научных журналах, индексируемых Российским индексом научного цитирования (РИНЦ). По теме диссертации опубликовано 6 статей в сборниках материалов всероссийских и международных конференций.

Апробация работы.

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, были представлены на международных и всероссийских научных мероприятиях, в том числе:

1. XVII международной конференции по науке и технологиям Россия-Корея-СНГ 15-17 июня 2017 г., г. Южно-Сахалинск;
2. V молодежной тектонофизической школе-семинаре 09-12 октября 2017 г., г. Москва;
3. VI научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 02-07 октября 2017 г., г. Петропавловск-Камчатский;
4. Международной юбилейной научной конференции посвященной 40-летию со дня образования научной станции РАН в г. Бишкеке 03-07 июля 2018 г., г. Бишкек;
5. III международной научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы» 27-31 мая 2019 г., г. Южно-Сахалинск;
6. V международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» 04-07 июня 2019 г., г. Москва.

Структура и объем работы.

Структура работы определяется целью и задачами исследования, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 110 страницах, включает в себя 38 рисунков, 8 таблиц, 190 библиографических ссылок.

Структура научно-квалификационной работы

Научно-квалификационная работа состоит из четырёх глав.

В первой главе изложены наиболее общие, концептуальные представления о сейсмическом процессе, основных режимах накопления и диссипации тектонических напряжений, базовых моделях механики сплошной среды, на которые эти представления опираются. Рассмотрены основные материалы о режимах сейсмического процесса, таких как: рои, форшоковые и афтершоковые последовательности. Рассмотрены известные модели сейсмического очага, как основы для применения методов, определяющих переходные процессы на различных стадиях деформирования, в том числе на заключительном этапе – перед разрушением. Приведен обзор по выявлению признаков подготовки сильных землетрясений на заключительных этапах в режимах развития сейсмического процесса и аномальном поведении в этот период различных геофизических полей. Обзор известных методов прогноза сейсмической опасности, в том числе и для о. Сахалин, показал, что отдельные успехи как в среднесрочных, так и в краткосрочных оценках не дают системности для проблемы прогноза в целом. Несмотря на широкий спектр имеющихся работ на территории Дальнего Востока, общая эффективность и отдельно для каждого метода не превышают 40% (причем по данным отдельных локальных выборок в периодах различной продолжительности). Для о. Сахалин уровень исследований по всем направлениям (с учетом исследуемой площади и

периода) практически нулевой. Также показано, что в общей массе исследований в области прогноза ЗЛТ обнадеживающий вектор приняли сейсмологи ИМГиГ ДВО РАН (Тихонов И.Н. и др.), основой которого является выбор методов прогноза для поэтапного моделирования процесса. Результатом обзора является вывод об актуальности исследований по выявлению в сейсмическом режиме о. Сахалин характерных точек перехода (смен состояний) на заключительном этапе разрушения в очаговой области (на основе анализа сейсмических каталогов).

Во второй главе описаны методы моделирования сейсмического режима и программные комплексы для их реализации. Теоретически обосновано последовательное использование методов LURR и СРП в рамках общепризнанных концепций тектоники плит и разрушения в области очага подготовки сильных землетрясений. Обоснован выбор основных параметров моделей (настроек алгоритмов) для получения объективного результата по всем расчетным областям, характеризующих высокую воспроизводимость полученных результатов. Приведены характеристики сейсмических данных, которые использовались для расчетов, описаны возможности сети сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Третья глава включает в себя результаты расчетов методами LURR и СРП. Расчеты по методу LURR проведены для всей территории о. Сахалин в период с 1988 по 2018 гг. Рассмотрены вариации параметра LURR превышающие фоновый уровень и характеризующие нелинейный отклик сейсмичности на изменение напряжений в очаговых областях. Определены связи периодов аномальных значений параметра с появлением сильных землетрясений с магнитудой выше 5.5. Рассчитаны основные количественные характеристики установленной связи (пространственная и временная) которые позволяют рассматривать изменения параметра LURR, как предвестник землетрясений. Области аномальных значений параметра с линейными размерами от 100 до 200 км во всех случаях (в одном случае из 7 было отмечено отклонение в 50 км) включали в себя эпицентры

сейсмических событий с магнитудами не менее 5.5, которые происходили в период от 1 до 2 лет после появления аномалий. Расчеты по методу СРП проведены для юга о. Сахалин, имеющего представительный каталог для событий с $M \geq 2.0$ и привязаны к периоду одного из сильнейших землетрясений в рассматриваемом промежутке времени. Для Невельского землетрясения 2007 года метод СРП применен в режиме сканирования с расчетами в перекрывающихся 28 областях размером 40 км для полного каталога землетрясений и слабых землетрясений (с $M < 3.0$). Во всех 28 областях были определены периоды сейсмической активизации, определенные как СРП, однако задержки с момента их определения до землетрясения 2007 года варьировались от 5 до 107 дней. Кроме того, в период с августа 2006 года (последнее сильное землетрясение в зоне Горнозаводское 17.08.2006 г.) по август 2007 года в указанных зонах были отмечены ложные активизации (СРП) и их количество в некоторых зонах достигало 8. Рассчитана эффективность методов LURR и СРП.

В четвертой главе представлены результаты расчетов в рамках общей модели, включающей двухэтапный анализ методами LURR и СРП. С учетом результатов, полученных в третьей главе и требованиями к качеству исходных данных в модели СРП, расчеты проведены для периода с 2004 по 2018 гг. Показано, что состоятельность прогнозных оценок по методу СРП может иметь место, если имеет место аномальное значение параметра LURR. Последний метод позволяет определить время перехода состояния геосреды в стадию упругопластическую, которая сопровождается снижением сейсмической активности. Для саморазвивающегося процесса эта стадия есть стабилизация скорости накопления событий с последующим переходом к режиму с обострением. Были выполнены расчеты для пяти самых сильных землетрясений на о. Сахалин за 2004-2018 гг. по методу СРП в областях аномальных значений LURR, начиная со времени появления предвестника. Эти землетрясения, по существу, охватили практически все известные сейсмогенерирующие области о. Сахалин. Показано, что в период между

аномалиями LURR и сильными землетрясениями для трех случаев из пяти были зафиксированы по два решения модели СРП, что можно рассматривать как неопределенность или «ложную тревогу». Решения в СРП получены от недели до 2.5 месяцев до событий. Совместное использование двух методов анализа режимов сейсмичности и прогноза сейсмической опасности на Сахалине значительно улучшает точность определения времени прогнозируемого события. Основные выводы сформулированы в конце каждой главы и в заключении.

Заключение

В результате выполненных в работе исследований получены следующие результаты:

1. Методы моделирования сейсмического режима LURR и СРП теоретически обоснованы для их последующего применения в подходе к оценке сейсмической опасности на о. Сахалин.
2. Подтверждено, что снижение параметра LURR после своего максимального показателя, свидетельствует о переходе геосреды в состояние неустойчивости, в котором любой режим с ускорением, определяемый как саморазвивающийся процесс, может быть иницирующим для главного события.
3. Впервые предложена последовательность оценки сейсмической опасности на Сахалине благодаря уточнению времени переходов между различными режимами сейсмического процесса: от фонового к подготовке очага (стадии LURR - предвестника) и от режима сравнительно «медленной» подготовки к режиму с ускорением (СРП).
4. Показано, что состоятельность прогнозных оценок по методу СРП может иметь место, если имеет место аномальное значение параметра LURR.
5. Выявлено, что совместное использование двух методов анализа режимов сейсмичности и прогноза сейсмической опасности на Сахалине значительно улучшает точность определения времени прогнозируемого

события. После появления предвестника LURR в течение 1-2 лет сейсмический процесс переходит в режим с ускорением (определяемый как саморазвивающийся процесс, реализующийся от недели до 2.5 месяцев до сильного землетрясения).