

**Федеральное агентство научных организаций**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**  
**ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ**  
**ГЕОФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**  
**(ИТПЗ РАН)**

УДК 550.34  
№ государственной регистрации 01201281968  
Инв. № 2015-3

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор ИТПЗ РАН  
член-корреспондент РАН  
А.А.Соловьев  
«12» марта 2015 г.

**ОТЧЕТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ**

**РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ПОЛУЧЕНИЮ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОЙ**  
**ОПАСНОСТИ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА**  
**НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕОРЕМ ТЕОРИИ**  
**ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ, КАСКАДНЫХ МОДЕЛЕЙ И**  
**КОМПЛЕКСА ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО**  
**РЕЖИМА В ОБОБЩЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ СИЛЬНОГО СОБЫТИЯ**  
(промежуточный, за 2014 год)

Заведующий лабораторией № 1  
канд. техн. наук



И.В. Кузнецов

Москва 2015

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,  
гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук



М.В. Родкин

Ответственные исполнители:

гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук



В.Ф. Писаренко

науч. сотр.

Т.А. Рукавишникова

## РЕФЕРАТ

Отчет 12 с., 5 источников

**ПРОГНОЗ НЕСТАЦИОНАРНОГО УРОВНЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, ПАРАМЕТРЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ**

Исследования, проводимые по теме в 2014 году, включали: разработку методики получения параметров предельных распределений теории экстремальных значений для нестационарного ряда исходных данных (неоднородности представительности каталога в прошлом); разработку подходов к оцениванию ожидаемых значений потока событий в течение будущего интервала времени; разработку подходов к оцениванию нестационарной сейсмической опасности на несколько лет вперед на основе текущей сейсмической информации и расчета параметров предельных распределений теории экстремальных значений; анализ примеров для выявления региональной и тектонической зависимости величин параметров предельных распределений, используемых для оценки сейсмической опасности.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Разработка методики получения параметров предельных распределений теории экстремальных значений	7
2.2. Моделирование сейсмического режима в рамках каскадной модели	8
2.3. Квантификация землетрясений по следам сейсмогенных смещений скальных отдельностей	10
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	11
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	12

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования по теме выполнялись в рамках подраздела 78 "Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий" Раздела VIII "Науки о Земле" Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

Развитых физических представлений, позволяющих достаточно надежно выявлять процесс подготовки сильного землетрясения на настоящий момент не существует. В этой связи в последние годы широкое развитие получили исследования по расчету текущей вероятности реализации сильных событий в рамках каскадной модели ETAS (и иных схожих представлений). В рамках таких подходов сейсмический процесс задается суперпозицией фонового режима и совокупности афтершоковых последовательностей от недавно произошедших событий большей магнитуды. Модель изменчивости интенсивности ожидаемого в будущем потока событий используется для статистического прогноза сейсмической опасности. На выходе получают статистический прогноз ожидаемого нестационарного уровня сейсмической опасности. Следует отметить, что для оценки сейсмической опасности существенна не вся совокупность землетрясений, а лишь сильнейшие события. Эта задача более точно решается на основе разработанного ранее метода использования предельных законов распределения теории экстремальных значений.

Для прогноза ожидаемого потока событий в будущем применяются методы, основанные на использовании каскадных моделей и результатов исследования типового предвестникового поведения в обобщенной окрестности сильного землетрясения. На первом этапе работы нелинейный закон повторяемости землетрясений (в частности, получаемый методом предельных распределений закон поведения хвоста функции распределения величин землетрясений) предполагается неизменным, и изменяется во времени только поток событий. В дальнейшем планируется учет также и вариабельности самого закона повторяемости (существование такой вариабельности было показано ранее в результате исследования обобщенной окрестности сильных землетрясений).

Более точный расчет сейсмической опасности предполагает также исследование региональной изменчивости величин параметров предельных распределений (в первую очередь, параметра формы) как для магнитуд землетрясений, так и для величин пиковых ускорений и скоростей движений грунта. Исследование пиковых скоростей движений грунта также включает участие в полевых работах по изучению очаговых зон сильных землетрясений.

Научная новизна выполняемых исследований состоит в получении нестационарной оценки сейсмической опасности с использованием: 1) аппарата предельных распределений теории экстремальных значений; 2)

типовых аномалий сейсмического режима, выявленных в ходе исследования обобщенной окрестности сильного события; 3) новых результатов по оцениванию пиковых величин скоростей движения грунта по данным полевых исследований.

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Разработка методики получения параметров предельных распределений теории экстремальных значений

Выполнено исследование распределения величин землетрясений и сейсмогенных эффектов в диапазоне крайне редких и сильных событий. Основная проблема такого оценивания состоит в получении оценок квантилей «за пределами диапазона данных», т. е. квантилей уровня  $Q > 1 - 1/n$ , где  $n$  – размер выборки. Оценка квантиля уровня  $Q > 1 - 1/n$  не может быть получена без дополнительных предположений о поведении хвоста распределения. Обычно используется то или иное модельное распределение, полагаемое «истинным» законом распределением. Обычно однако, веских аргументов в пользу того или иного из (часто принципиально различающихся) предложенных вариантов «истинного» закона нет. В качестве альтернативного подхода используются две основные теоремы теории экстремальных значений, соответствующие обобщенные распределения (Обобщенное распределение Парето GPD и Обобщенное распределение экстремального значения GEV) и разработанный ранее метод взаимного пересчета параметров этих двух законов распределений. Такой подход дает возможность оценить квантили произвольно высокого уровня. Следует отметить, что при некоторых значениях параметров GPD и GEV распределения широко используемый параметр – максимально возможная величина землетрясения  $M_{\max}$  и другие аналогичные величины (например, пиковое ускорение грунта, PGA) являются статистически неустойчивыми. Этот формальный результат является математическим отражением известного факта регулярно повторяющихся случаев возникновения сильных землетрясений в районах, считавшихся до того районами слабой сейсмической активности, а то и вовсе асейсмичными. Естественно, такие неожиданные землетрясения особенно опасны и часто приводят к особенно большим ущербам. Чтобы избежать такой нестабильности результатов оценки сейсмического риска был введен новый параметр  $Q_q(T)$  – квантиль заданного уровня  $Q$  величины  $q$  в будущий интервал времени  $T$ . В отличие, например, от  $M_{\max} = Q_q(\infty)$ , параметр  $Q_q(T)$  является стабильным и робастным. Квантиль  $Q_q(T)$  может быть очень полезным инструментом для определения рисков в страховом бизнесе и для оптимизации распределения ресурсов и готовности соответствующих служб.

Предложенный подход реализован на ряде примеров. Кроме мировых каталогов рассмотрены случаи региональных каталогов Японии (1900-2010) и Фенноскандии (1900-2005). В случае с Японией обнаружено, что землетрясения с магнитудой  $M \sim 9,0$  возможны, несмотря на то, что такие события отсутствуют в историческом каталоге Усами (599-1884). Этот результат получил неожиданное убедительное подкрепление в возникновении мегаземлетрясения Тохоку ( $M=9$ ). Этот подход применен также к величинам вызванных землетрясениями пиковых ускорений грунта

(PGA). Регулярная часть PGA была при этом представлена функцией, зависящей от величины и расстояние до эпицентра. Получены результаты расчета PGA для набора точек (городов) Японии и Северного Кавказа.

Применение описанного подхода, однако, предусматривает определенную проверку выполнения условий его применимости. На настоящем этапе работ такая проверка включала разработку и апробирование статистических подходов к выделению в хвосте эмпирических функций распределения нарушений некоего неизвестного, но единого для всех имеющихся значений регулярного закона распределения. Рассматривались случаи выделения отскакивающих значений. Были рассмотрены примеры численности населения крупнейших городов и обнаружено, что Москва, Петербург, большой Париж и большой Лондон выскакивают из общей зависимости для данных стран. Рассматривались также методы различения близких (более или менее тяжелых) по поведению функций распределения хвоста, таких как степенной, логнормальный и экспоненциальный законы распределения для хвоста функции распределения.

Подчеркнем, что использованные методы носят весьма общий характер и применимы не только для оценки опасности землетрясений, но и для всех тех случаев, когда нужно оценить риск редких сильнейших событий.

Актуальной задачей является прогноз не только землетрясений, но и величин ущерба от землетрясений. Оценки величины ожидаемого ущерба важны для планирования мероприятий по уменьшению потерь от землетрясений. Задача оценки величин ожидаемого ущерба относится к задачам оценки суммарного эффекта от случайной совокупности событий, в том числе редких и экстремально сильных. Такая задача была решена ранее на мировом и надрегиональном уровне. Решение этой задачи на национальном уровне затруднено недостатком данных. Была разработана и предложена методика оценки величин ожидаемого ущерба от редких сильных природных катастроф на национальном уровне на основе привлечения данных по иным регионам, аналогичным по своим природным и социально-экономическим условиям.

Полученные результаты опубликованы в статьях [1, 3-5].

## 2.2. Моделирование сейсмического режима в рамках каскадной модели

Обычно сейсмический режим принято трактовать в рамках концепции самоорганизующейся критичности (SOC). Эта концепция предполагает самопроизвольную эволюцию динамической системы к критическому состоянию. Однако физического механизма такой эволюции для случая сейсмичности предложено не было. Неясно также как трактовать в рамках SOC-концепции различие сейсмоактивных и практически асейсмичных областей. Указанными проблемами не исчерпываются трудности, возникающие при интерпретации сейсмического режима в рамках модели SOC. В рамках этой модели широко используется аналогия между сейсмическим режимом и фазовыми переходами II-го рода. Данная аналогия,

однако, не вполне корректна. Принципиальной особенностью фазовых переходов II-рода является то, что превращение осуществляется без поглощения (выделения) энергии. Процессам же землетрясений отвечает взрывообразное выделение значительной энергии.

В связи с вышесказанным рассматривается альтернативная трактовка сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, реализующихся на множестве метастабильных подсистем. В случае сейсмичности возникновение метастабильных подсистем порождается (более или менее локальным) ростом запасенной упругой энергии. В рамках предложенной модели геофизическая среда описывается параметром, отражающим степень пространственной иерархичности среды (параметр  $r$ , отождествляемый с параметром иерархичности по М.А.Садовскому) и параметром характеризующим степень метастабильности среды (параметр  $p$  – вероятность продолжения процесса лавинообразной релаксации метастабильных подсистем), а также группой параметров, описывающих память системы. Такая модель позволяет описать закон повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера, закон Омори, из нее следует также среднее соотношение между величиной магнитуды главного события и числом афтершоков. Модель имитирует также большинство надежно установленных прогностических признаков, а именно, наличие квазипериодического сейсмического цикла, приуроченность сильных землетрясений к интервалам времени пониженных значений наклона графика повторяемости и, в меньшей степени, предвестниковую активизацию, проявляющуюся в модели в нерегулярном росте (к моменту основного события) числа землетрясений и выделенной сейсмической энергии. Отдельные афтершоковые последовательности имеют при этом сугубо нерегулярный случайный характер, но их суммарная (для большого числа сильных событий) зависимость описывает (как и по результатам анализа сейсмического режима в Обобщенной окрестности сильного землетрясения) систематический рост активизации к моменту основного события.

Использованная каскадная модель включает достаточно большое число параметров: параметр иерархичности  $r$ , параметр неравновесности  $p$ , параметры величины памяти  $n$ ,  $m$ ,  $k$ ,  $l$  и менее существенные для поведения системы значения продолжительности интервалов времени, по которым производится расчет эффекта памяти. Такое число параметров не представляется, однако, чрезмерно большим, если учесть, что широко распространенная и по сути формально статистическая модель ETAS включает 7 параметров. Преимущество используемой модели состоит в прозрачном физическом смысле ее параметров. Применение модели для описания каталога землетрясений Сахалина показало, что периоду реализации сильных Горнозаводского и Невельского землетрясения предшествовали периоды времени значительного роста параметра метастабильности. Такой результат не является, однако, принципиально новым так как, по сути, является следствием известного эффекта уменьшения наклона графика повторяемости в окрестности сильных землетрясений.

Убедительная и достаточно четкая выраженность этого эффекта показана в результате исследования сейсмического режима в обобщенной окрестности сильного землетрясения.

Кратко охарактеризованные выше подходы были использованы для анализа и интерпретации данных по конкретным регионам. Полученные результаты опубликованы в статье [2].

### 2.3. Квантификация землетрясений по следам сейсмогенных смещений скальных отдельностей

В рамках исследований по теме разрабатывается подход к квантификации землетрясений по следам сейсмогенных смещений скальных отдельностей. Этот подход является новым, так как ранее подходов к квантификации сейсмогенных эффектов в скальных породах предложено не было. Натурный материал для исследования представляется примерами такого рода нарушений при известных сильных землетрясениях 20-го века, а также древними нарушениями и смещениями на ключевых участках юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита (по результатам полевых работ). Конечная цель состоит в параметризации (в терминах интенсивности  $I$  и магнитуды  $M$ ) палеоземлетрясений по оставленным ими специфическим сейсмонарушениям. Это осуществляется путем выведения физических характеристик нарушений определенного типа, габитуса и фиксированных величин смещений скальных блоков. Систематизация многочисленных локальных нарушений скальных массивов со значительными смещениями блоков породы представлена в виде ряда типовых моделей. Были оценены значения массовых скоростей импульсных воздействий, необходимых для инициирования наблюдаемых смещений. Важно, что во многих случаях они превысили 1 м/сек, т.е. оказались существенно больше обычно принимаемых типовых значений. Для объяснения этого результата были привлечены данные по сильным движениям и по взрывам, и показано разумное согласие всего этого комплекса данных. Был сделан вывод о том, что случаи массовых скоростей  $V > 1$  м/сек соответствуют эпицентральному областям землетрясений с магнитудой  $M > 6$  (реализовавшимся в основном в период дегляциации). Предложена номограмма для оценки магнитуды и гипоцентрального расстояния инициирующего землетрясения при значениях максимальных массовых скоростей в диапазоне от 0.01 до 5 м/сек. На основании номограммы оценены параметры землетрясений, которые предположительно могли бы вызвать наблюдаемые перемещения скальных блоков.

На основании этой методики были проведены также предварительные полевые рекогносцировочные работы в районе г. Южно-Сахалинск. Конечной целью этих работ будет являться уточнение ранее сделанного другими авторами по результатам прокладки траншей в рыхлых грунтах предположения о следах реализации в непосредственной окрестности г. Южно-Сахалинск землетрясений с магнитудой в интервале 6.5 – 7.0.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый подход позволяет объединить преимущества получившего широкое распространение в последние годы методы статистического оценивания сейсмической опасности для случая нестационарного режима с методом наиболее точного оценивания вероятности реализации экстремально сильных событий и с последними результатами по наблюдениям экстремально больших скоростей движений грунта в очаговых зонах сильных землетрясений и взрывов.

Практическая значимость выполненных исследований состоит в получении более точных статистических оценок текущей сейсмической опасности (прогноза сейсмической опасности) для регионов с разной геодинамической ситуацией.

По результатам выполненных исследований опубликовано 5 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах.

## 4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах*

1. Родкин М.В., Писаренко В.Ф., Нго Тхи Лы, Рукавишникова Т.А. О возможных реализациях закона распределения редких сильнейших землетрясений // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014, т.5, № 4. С.893-904, DOI:10.5800/GT-2014-5-4-0161.
2. Mandal, P., and M.V.Rodkin, Spatiotemporal variations of fractal properties in the source zone of the 2001 Mw 7.7 Bhuj earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2014, **104**, 4: 2060-2072, doi:10.1785/0120140071.
3. Pisarenko, V.F., M.V.Rodkin, and T.A.Rukavishnikova, Estimation of the probability of strongest seismic disasters based on the extreme value theory. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2014, **50**, 3: 311-324, DOI:10.1134/S1069351314030070.
4. Pisarenko, V.F., A.Sornette, D.Sornette, and M.V.Rodkin, Characterization of the tail of the distribution of earthquake magnitudes by combining the GEV and GPD descriptions of extreme value theory. *Pure Appl. Geophys.*, 2014, **171**: 1599-1624, doi:10.1007/s00024-014-0882-z.
5. Vu Thị Hoan, Ngo Thi Lu, M.V.Rodkin, and Tran Viet Phuong, Application of the generalized extreme value distribution to study the seismicity of the Southeast Asian. *Journal of Geology. Series A*, 2014, 341-345. Hanoi, Tr. 180-189.