

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

УДК 550.34
№ госрегистрации 115080610014
Инв. № 2017-3



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН
член-корреспондент РАН
А.А.Соловьев

«20» января 2017 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКИХ
СИЛЬНЕЙШИХ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ЗНАЧЕНИЙ, КАСКАДНЫХ МОДЕЛЕЙ, ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНЫХ
ВЕЛИЧИН СОБЫТИЙ ПО АРХЕО- И ПАЛЕОСЕЙСМИЧЕСКИМ
ДАНЫМИ И КОМПЛЕКСА ХАРАКТЕРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В ОБОБЩЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ
СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
(промежуточный, за 2016 год)

Заведующий лабораторией № 1
канд. техн. наук

И.В. Кузнецов

Москва 2017

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 24 с., 3 рисунка, 18 источников

ОЦЕНКА ДОЛГОСРОЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, ТИПЫ ПОВЕДЕНИЯ ХВОСТА ЗАКОНА ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ПАРАМЕТРЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЕОРИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ, ХАРАКТЕР ФОР- И АФТЕРШОКОВЫХ АНОМАЛИЙ В ОБОБЩЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, PGV ПРИ СИЛЬНЫХ ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ.

Работы по теме в 2016 году включали продолжение 1) разработки методики получения максимально точных значений параметров предельных GEV и GPD распределений теории экстремальных значений; 2) оценку параметров предельных распределений для сейсмического режима в различных сеймотектонических условиях; 3) сопоставление результатов описания хвоста функции распределения сильных землетрясений по эмпирическим данным, методом использования теории экстремальных значений и в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада; 4) получение новых прогнозных признаков на основе анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения 7) разработка методов оценки параметров сильнейших палеоземлетрясений по полевым наблюдениям и использование этой методики для решения задач оценки сейсмической опасности. Указанные направления работы отражены в предлагаемом отчете, при этом особо отметим взаимодополняющий характер результатов, получаемых по этим разным направлениям работы.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	6
2.1. Обсуждение постановки задачи	6
2.2. Развитие методики оценивания параметров предельных распределений теории экстремальных значений	9
2.3. Моделирование поведения хвоста закона повторяемости землетрясений в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК)	12
2.4. Новые результаты квантификации землетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей	15
2.5. Единообразный режим развития фор- и афтершоковых аномалий – результаты исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения	19
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	21
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	22

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования по теме выполнялись в рамках направления фундаментальных исследований 136 "Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий" Раздела IX "Науки о Земле" Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

Все исследования по проекту относятся к разным подходам к решению общей задачи - оценке долгосрочной сейсмической опасности. Исследования сейсмической опасности осложнено тем, что развитой физической модели, позволяющей описывать процесс подготовки и реализации сильного землетрясения на настоящий момент не существует. Отсюда развитие получили исследования по расчету текущей сейсмической опасности в рамках различных статистических моделей. Наиболее распространенной такой моделью является ETAS. В этой модели сейсмический процесс задается суммой фонового режима и множества связанных событий от всех недавно произошедших событий заметной магнитуды. Изменения интенсивности потока событий используется затем для статистического прогноза сейсмической опасности. Данный подход не дает, однако, достаточно точных оценок текущей сейсмической опасности. Тем более он не дает оценок поведения хвоста закона повторяемости землетрясений, где сконцентрированы сильнейшие события, ответственные за основную долю ущерба.

Проект (данная тема) нацелен на получение оценок силы и вероятности максимальных сейсмических воздействий. В работах по теме применяются методы, основанные на использовании теории экстремальных значений и предельных распределений, модели нелинейного мультипликативного каскада, использовании результатов исследования типового предвестникового поведения в обобщенной окрестности сильного землетрясения, методы получения оценок величин максимальных массовых скоростей (*PGV*) по данным полевых макросейсмических наблюдений.

Научная новизна выполняемых исследований состоит в получении оценки сейсмической опасности от редких сильных событий с использованием: 1) теории экстремальных значений и предельных распределений; 2) модели мультипликативного нелинейного каскада; 3) совместном использовании данных по инструментальной и исторической и палеосейсмичности; 4) новых результатов по оцениванию пиковых величин скоростей движения грунта по данным полевых макросейсмических наблюдений; 5) типовых аномалий сейсмического режима, выявленных в ходе исследования обобщенной окрестности сильного события.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Обсуждение постановки задачи

Ключевой нерешенной на настоящий момент проблемой при оценке сейсмической опасности является задача расчета долгосрочной сейсмической опасности, проистекающей от редких экстремально сильных землетрясений. Как подтвердил случай японского мега-землетрясения Тохоку (11.03.2011, $M = 9,0$), даже одна из лучших на планете сетей сейсмических наблюдений и весьма длительный (с 869 г. н.э.) ряд данных по исторической сейсмичности не обеспечивают получение надежных оценок долгосрочной сейсмической опасности. Расчеты величин M_{\max} для территории Японии оказались заниженными, что и привело к недооценке возможной высоты волны цунами и к катастрофе на атомной станции Фукусима. Тем более нерешенность проблемы оценки долгосрочной сейсмической опасности касается регионов, где данные по исторической сейсмичности достаточно скудны, а ряды инструментальных сейсмических наблюдений более короткие. Недостаток такой информации может быть восполнен несколькими способами.

Наиболее длительную историю развития и опыт применения имеет метод оценки долгосрочной сейсмической опасности (конкретно, оценки величины максимально возможного для данного региона землетрясения M_{\max}) по комплексу геолого-геофизических и сейсмо тектонических данных. Метод достаточно полно описан многими авторами, поэтому здесь ограничимся только самой краткой его характеристикой. Первые работы этого направления базировались на кластеризации типов земной коры при приписывании этим разным типам различного сейсмического потенциала. В дальнейшем это направление исследований получило развитие в плане использования более сложного математического аппарата на основе алгоритмов распознавания образов и нечеткой логики. Развитие этот метод получил также и в создании программных пакетов по решению такого рода задач. Недавним примером такого подхода является оценка сейсмической опасности для северо-запада Вьетнама с участием авторов данного отчета. Использование программных пакетов позволяет легко рассматривать различные варианты исходной геолого-тектонической информации и различные способы задания связи между сейсмичностью и этими параметрами. В целом, полученные этим первым методом результаты достаточно обнадеживающие, но, тем не менее, они не дают уверенной оценки долгосрочной сейсмической опасности.

Другие подходы к пониманию режима экстремально сильных редких землетрясений и к оценке долгосрочной сейсмической опасности имеют меньшую историю применения. Эти подходы базируются на теории экстремальных значений, на оценке параметров максимальных палеоземлетрясений по полевым данным и на модели трактовки сейсмического режима в рамках нелинейного мультипликативного каскада. Охарактеризуем вкратце эти подходы.

На основе теории экстремальных значений с использованием предельных распределений - обобщенного распределения экстремальных значений (GEV) и обобщенного распределения Парето (GPD) - можно при соблюдении ряда условий получать устойчивые оценки квантилей распределения максимальных событий за любой будущий интервал времени. Следует отметить, что для некоторых сейсмических регионов нет уверенности в том, что эти условия выполняются. Возможно также (как будет видно далее), что они не выполняются и на масштабе времени от нескольких десятков до нескольких сотен лет.

В плане обсуждения результативности применения методов теории экстремальных значений отметим то очевидное обстоятельство, что все реально измеримые значения конечны. Отсюда резонно предположить, что и достаточно точно описывающие эти данные теоретические распределения также должны быть конечны. Однако широко применяемые в сейсмологии распределения магнитуд землетрясений (распределение Гутенберга-Рихтера и распределение землетрясений, предложенное Я.Каганом) не отвечают этому требованию. Это указывает на то, что эти распределения в области редких сильнейших событий недостаточно точны. Напротив, распределения экстремальных событий, предложенные авторами отчета, оказываются, как правило, принадлежащими к классу конечных распределений (Писаренко В.Ф., Родкин М.В., Рукавишникова Т.А. Оценка вероятности сильнейших сейсмических катастроф на основе теории экстремальных значений // Физика Земли, 2014, № 3. С.3-17).

Следующий возможный подход к оценке долгосрочной сейсмической опасности связан с методами определения параметров сильных палеоземлетрясений. Представляется, что определение параметров сильнейших палеоземлетрясений на масштабе времени нескольких тысяч лет позволило бы наиболее надежно решить задачу оценки долгосрочной сейсмической опасности. Классические методы такой оценки связаны с тренчингом и определением смещений по разломам при древних землетрясениях. Эти методы, однако, весьма трудоемки, а следы смещений в рельефе сильно сглаживаются со временем.

В качестве альтернативы таких подходов одним из авторов отчета (Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика, 2012, т.3, № 3. С.203-237) были предложены методы оценки максимальных массовых скоростей при землетрясениях (значений *peak ground velocity, P_{GV}*) по смещениям скальных отдельностей, а также номограмма для ориентировочного определения возможных пар значений магнитуды и гипоцентрального расстояния для данного значения *P_{GV}*. Естественно, каждое отдельное такое определение весьма ненадежно (наблюдаемое смещение может породиться самыми разными причинами). Однако при получении достаточного для статистической обработки количества оценок величин *P_{GV}*, этот метод позволяет характеризовать уровень долгосрочной сейсмической опасности достаточно определенно.

Методы оценки величин PGV и пар значений «магнитуда + расстояние до очага» прошли тестирование полевыми исследованиями в областях нескольких недавних сильных землетрясений, и было получено вполне удовлетворительное согласие результатов расчетов с параметрами землетрясений. В частности, этот подход оценки параметров палеоземлетрясений был протестирован в очаговых зонах сильного Сусамырского (19.08.1992 г., $M_S = 7,3$) и Кеминского (1911 г., $M_w = 7,9$) землетрясений в Киргизии. Этот же подход был опробован для оценки сейсмической опасности верхнего участка строительства Верхне-Нарынского каскада ГЭС. Полученные данные сравнивались с результатами исследования сейсмического режима другими методами и была показана их хорошая согласованность. В целом полученные результаты (естественно, требующие дальнейшей проверки и уточнений) указывают на перспективность развиваемого метода оценки величин PGV и параметров палеоземлетрясений по полевым данным о смещениях скальных отдельностей.

Общие качественные закономерности возможных режимов реализации редких сильнейших землетрясений могут быть исследованы в рамках модели мультипликативного каскада. Известно, что обычный закон повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера может быть смоделирован в рамках схемы мультипликативного каскада, когда сейсмический режим трактуется как последовательность большого числа эпизодов лавинообразной релаксации, случайным образом реализующихся на множестве метастабильных подсистем. Было показано, что такая модель позволяет имитировать также и такие закономерности сейсмического режима как уменьшение наклона графика повторяемости в окрестности сильных землетрясений, развитие афтершокового степенного каскада и предвестниковой активизации, существование сейсмического цикла. Таким образом, в рамках схемы мультипликативного каскада могут быть смоделированы все достаточно надежно установленные закономерности сейсмического режима. Усложнение схемы каскада добавлением нелинейных членов в кинетическое уравнение каскада позволяет дать описание также эффект «загиба вниз» графика повторяемости землетрясений и возможности возникновения характеристических землетрясений. Результаты моделирования сопоставлялись с данными по сейсмичности Юго-Восточной Азии и по Центральной Азии. По результатам сопоставления можно предположить, что развитие нелинейности в порождающем уравнении мультипликативного каскада связано с более высокими концентрациями флюида в литосфере зон субдукции.

Итак, на настоящий момент имеется несколько подходов к решению вопроса оценки долгосрочной сейсмической опасности. Первый и наиболее развитый из этих подходов связан с определением связи между сейсмическим потенциалом (максимально возможной магнитудой M_{max}) и геолого-геофизическими и тектоническими характеристиками территории.

Второй способ связан с использованием теории экстремальных значений и предельных распределений - обобщенным распределением Парето (GPD) и предельным распределением экстремальных значений (GEV). Условием применимости этого теоретически строгого подхода являются предположение о гладкости и монотонности хвоста исследуемой функции распределения в области редких сильнейших событий. Это требование, естественно, может в отдельных случаях не выполняться. В частности оно не выполняется, если реализуется режим характеристических землетрясений. Фактически это значит, что если в рассматриваемой области действительно происходят характеристические землетрясения, то данный метод будет давать некорректные результаты.

Третий способ решения проблемы оценки долгосрочной сейсмической опасности связан с получением данных о сильных палеоземлетрясениях. Наиболее известными подходами здесь являются методы тренчинга и оценки величин смещений поверхности при сильных землетрясениях. Однако метод тренчинга весьма трудоемок, а деформации поверхности при землетрясениях обычно не сохраняются достаточно долго. Полезным добавлением в этой связи является метод оценки величин пиковых массовых скоростей при палеоземлетрясениях, оцениваемых по величинам смещения скальных отдельностей. Данный метод не прошел пока достаточной верификации, но представляется весьма эффективным и перспективным.

Полезной моделью описания поведения хвоста функции распределения является модель мультипликативного каскада в линейном и нелинейном вариантах. Этот подход позволяет на качественном уровне проинтерпретировать все основные возможные особенности режима редких сильных землетрясений («загиб вниз» графика повторяемости землетрясений, режим характеристических землетрясений и их комбинации). Модель не позволяет, однако, в настоящее время получать количественные оценки параметров сейсмического режима.

В предлагаемом отчете рассмотрено развитие большинства отмеченных выше подходов. Представленное обсуждение постановки задачи опубликовано в статьях [1, 2, 9] и вошло в доклады [10, 17, 18].

2.2. Развитие методики оценивания параметров предельных распределений теории экстремальных значений

Сложность оценки опасности редких экстремальных событий (в частности, землетрясений) обуславливается необходимостью оценивания квантилей «за пределами диапазона данных», т. е., квантилей уровня $Q > 1 - 1/n$, где n – размер выборки. Оценки квантилей уровня $Q > 1 - 1/n$ не могут быть получены без дополнительных допущений о характере (истинном законе) распределения. Обычно используется то или иное модельное распределение, полагаемое «истинным» законом распределением. При этом, однако, веские аргументы в пользу того или иного выбора «истинного» закона распределения, как правило, отсутствуют. Нами используются

результаты теории экстремальных значений и предельные распределения, а именно, Обобщенное распределение Парето (GPD) и Обобщенное распределение экстремальных значений (GEV). Для тестирования качества подгонки моделей были использованы классические статистические критерии Колмогорова, Смирнова, Андерсона-Дарлинга, адаптированные для рассматриваемой задачи, а также эффективный статистический бутстреп-метод. Такой подход дает возможность оценивать квантили произвольно высокого уровня для распределения магнитуды максимального события в любом будущем интервале времени.

Важно сразу подчеркнуть, что при некоторых (и эмпирически довольно часто встречающихся) значениях параметров GPD и GEV распределения широко используемый параметр – величина максимально возможного землетрясения M_{\max} и другие аналогичные величины (например, пиковое ускорение и скорости грунта, PGA и PGV) оказываются неустойчивыми. Применительно к известной задаче расчета сейсмической опасности этот результат является математическим отражением известного факта регулярно повторяющихся случаев возникновения сильных землетрясений в районах, считавшихся ранее областями слабой сейсмичности, а то и асейсмичными. Естественно, такие неожиданные землетрясения особенно опасны и часто приводят к особенно большим ущербам. Чтобы избежать такой нестабильности результатов оценки сейсмического риска нами был введен новый параметр $Q_q(T)$ – квантиль заданного уровня q максимальной величины за будущий интервал времени T . В отличие от M_{\max} 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.

Использование такого подхода, естественно, предполагает выполнение условий его применимости. Как наиболее простой пример невыполнения этого условия укажем данные о численности населения крупнейших городов мира. Обнаружено, что Москва, Петербург, большой Париж и большой Лондон отскакивают от общей зависимости «число городов – численность» для соответствующих стран. Применительно к сейсмическому режиму эта ситуация отвечает режиму развития так называемых характеристических землетрясений.

За 2016 год были реализованы новые подходы к расчету параметров предельных GEV и GPD распределений. Прежде всего, отметим ряд методических усовершенствований, развитых для расчета параметров GEV и GPD распределений. К ним относятся: адаптация известного статистического бутстреп-метода к оцениванию параметров распределения и к оценке уровня значимости по одной реальной выборке, модификация статистических критериев Смирнова-Колмогорова и Андерсона-Дарлинга для проверки совместимости двух каталогов и др. Эти (и предыдущие) усовершенствования позволяют считать эти исследования пионерскими, позволяющими наиболее точно оценивать поведения хвоста распределения в области редких экстремально сильных землетрясений. Эти подходы были

применены для расчета параметров предельных распределений для регионов с большим числом землетрясений, находящихся в различных сеймотектонических условиях (зоны субдукции, области срединно-океанических рифтов, районы внутриконтинентальной сейсмичности). Для решения этой задачи были развиты подходы, альтернативные методу оценивания оптимальных параметров методом максимального правдоподобия, ММП (этот метод не дает оптимальных результатов при относительно небольшом числе событий). В качестве альтернатив ММП использован метод квантилей (МК) и метод моментов (ММ). Один из этих методов оказался максимально эффективным при оценке параметров методом предельного GEV распределения, другой при оценке методом GPD распределения. Полученные результаты подтверждают выявленное ранее различие законов распределения для областей срединно-океанических хребтов и иных зон сейсмической активности. Но по совокупности всех трех параметров предельных GEV и GPD распределений, выявляется также и различие между законом повторяемости землетрясений зон субдукции и областей внутриконтинентальной сейсмичности (рис. 1). Отсюда получаем принципиально важный результат, что метод предельных GEV и GPD позволяет выявить различие в поведении хвоста закона повторяемости землетрясений для случаев зон субдукции, зон срединно-океанических хребтов, и зон внутриконтинентальной субдукции.

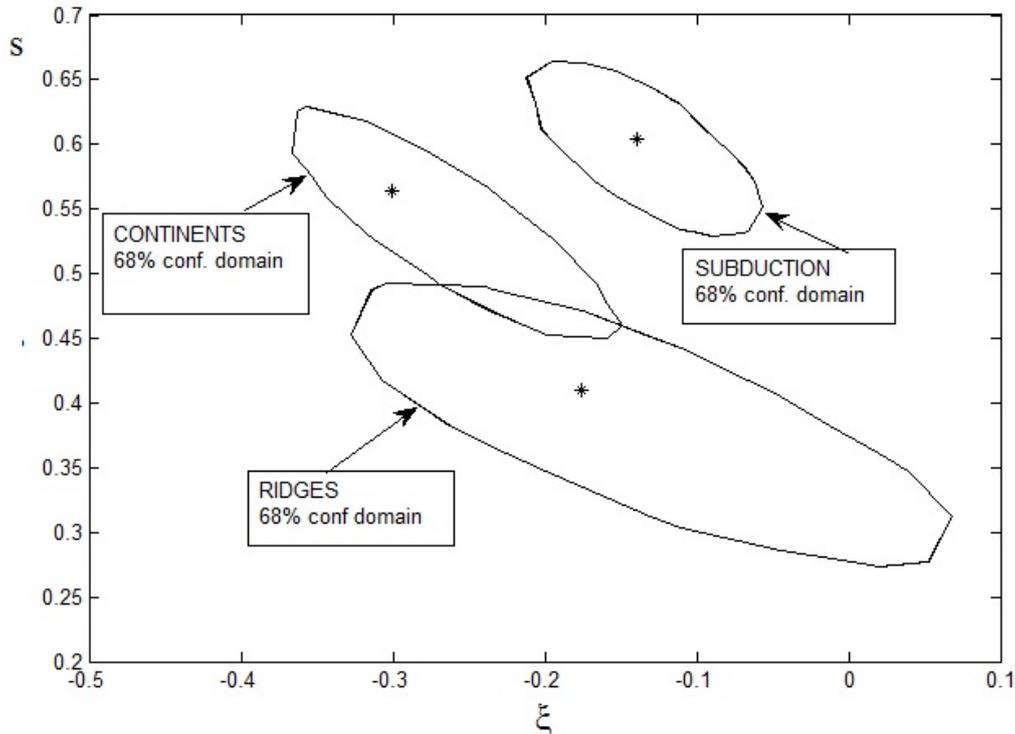


Рисунок 1. Доверительные 68%-ные области изменения (ξ , s) параметров GPD распределения для зон субдукции, внутриконтинентальной сейсмичности и срединно-океанических хребтов.

Результаты, приведенные в данном разделе, опубликованы в статье [8] и вошли в доклады [12, 15].

2.3. Моделирование поведения хвоста закона повторяемости землетрясений в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК)

Разными авторами были выявлены несколько типов поведения хвоста закона повторяемости. Эти работы явились эмпирической основой трактовки вопроса о возможных типах поведения хвоста закона повторяемости землетрясений. Теоретическая трактовка реализовывалась на основе модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК). В модели НМК землетрясения рассматриваются как эпизоды релаксации статистически идентичных подсистем некоторой достаточно большой метастабильной системы. МНМК модель отличается от других возможных подходов большей общностью трактовки, когда моделирование реализуется на уровне описания совокупности положительных и отрицательных, линейных и нелинейных обратных связей. Под такое описание, кроме землетрясений, подпадают и многие другие явления. Конкретизация, применимая к развитию землетрясений, возникает на этапе физической интерпретации различных видов обратной связи. Подчеркнем, что общность и простота модели НМК дают основание предполагать общность и надежность получаемых на ее основе общих закономерностей.

Основные положения исходного линейного варианта модели мультипликативного каскада (Родкин М.В. Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных состояний // Физика Земли, 2011, № 10. С.18-26) сводятся к следующему. Пусть начавшееся землетрясение с выделенной к данному моменту времени t_i сейсмической энергией X_i с вероятностью p может продолжить свое развитие или прекратиться с вероятностью $1 - p$. В случае прекращения процесса на i -том шаге величина события полагается равной достигнутому к этому шагу значению X_i , то есть реализуется более слабое землетрясение. В случае продолжения развития землетрясения величина его X_{i+1} в следующий момент времени t_{i+1} возрастает до значения

$$X_{i+1} = r \times X_i, \quad (1)$$

где $r > 1$ параметр (в общем случае случайный параметр, со средним значением большим 1. Начальное (на первом шаге) значение величины землетрясения положим равным X_0 . В схеме (1) вероятность прерывания процесса на n -й стадии и получения значения $X = X_0 r^n$ равна $(1 - p)p^n$. Отсюда получаем, что хвост функции распределения $F(X) = P(X_n > X)$ описывается соотношением: $1 - F(X) = p^{\lg(X)/\lg(r)}$. Откуда имеем

$$\lg(1 - F(X)) = \lg(p)/\lg(r) \times \lg(X), \quad (2)$$

т.е. получаем степенную зависимость для хвоста функции распределения $1 - F(X)$.

При постоянных значениях параметров p , r на выходе процедуры (1) получаем дискретное иерархическое распределение величин землетрясений. С ростом случайного разброса значений p и r ступенчатый характер распределения сглаживается, и в пределе получаем распределение, аналогичное обычному графику повторяемости землетрясений в координатах $\{\lg(X), \lg(N)\}$. Наклон графика повторяемости в двойных лог-координатах $\{\lg(X), \lg(N)\}$ равен $\beta = \lg(1/p)/\lg(r)$, где параметр β имеет смысл, аналогичный наклону графика повторяемости землетрясений b в законе Гутенберга-Рихтера (для величин $M = \lg(X)$).

Не трудно подобрать цифровые параметры модели r и p таким образом, чтобы получаемые значения наклона графика повторяемости и величины X (магнитуды $M = \lg(X)$) отвечали типичным значениям для закона повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера. Задавая теперь среднее число N лавинообразных процессов в единицу времени и некоторую вариабельность со временем параметров r и/или p , получаем последовательность магнитуд основных (независимых) событий $M = \lg(X)$, подобную, последовательности значений магнитуд землетрясений в реальном сейсмическом процессе.

Несмотря на свою простоту, такая модель описывает известную эмпирическую тенденцию: интервалам времени реализации событий большой магнитуды M статистически отвечают меньшие значения наклона графика повторяемости b . То есть, в своем простейшем варианте модель уже содержательна.

Реальные землетрясения не независимы, и при этом среднюю на больших интервалах времени (существенно больших длительности афтершоковых последовательностей) интенсивность сейсмического процесса резонно полагать постоянной. Учет этих обстоятельств реализуется усложнением модели каскада (1) включением в нее памяти системы, затухающей со временем не медленнее чем $1/t$ (более медленно релаксирующая память дает бесконечный эффект памяти, что представляется не правомерным). Модель, дополненная таким образом, позволяет описать закон Омори для афтершокового каскада, предвестниковую активизацию, эффекты возникновения роев землетрясений и сейсмического цикла. Для настоящего изложения, однако, эти усложнения модели каскада несущественны, так как поведение хвоста закона повторяемости определяется редкими сильнейшими событиями, полагаемыми статистически независимыми.

Модели мультипликативного каскада (1) – (2) присущи те же некорректности, что и обычному закону повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера. А именно, среднее значение величины X (аналога сейсмической энергии) оказывается теоретически бесконечным. Вариант усложнения соотношения (1) нелинейными членами позволяет обеспечить

как конечность величин модельной сейсмической энергии, так и получить аналог эффекта характеристических землетрясений. Простейший вариант усложнения кинетического соотношения (1), обеспечивающий конечность сейсмической энергии и существование эффекта характеристических землетрясений, имеет вид:

$$X_{i+1} = r \times X_i + r_1 \times (X_i / A_1)^2 - r_2 \times (X_i / A_2)^3, \quad (3)$$

где все параметры положительные и $A_2 \gg A_1 \gg 1$. Параметр A_1 при этом задает диапазон величин событий (X), в котором реализуются характеристические землетрясения, а A_2 задает диапазон событий, где реализуется эффект «загиба вниз» графика повторяемости. Величины коэффициентов r_1 и r_2 регулируют скорость изменений характера графика в соответствующих диапазонах изменения величины X .

Описанная процедура введения нелинейных членов отвечает часто используемой в физике схеме, применяемой при необходимости учета в уравнении малых членов более высокого порядка. В среднем диапазоне изменения величин X (или магнитуд $M = \lg(X)$) введение в (3) нелинейных членов не заметно, но оно качественно видоизменяет вид графика в области редких событий с экстремально большими значениями X .

Итак, по мере увеличения энергии землетрясения (или магнитуд M) сначала будет реализовываться обычный закон Гутенберга-Рихтера, затем реализуется эффект возникновения характеристических землетрясений. Принятый его загиб вниз исходит из представлений конечности сейсмической энергии и непрерывности в характере поведения графиков повторяемости. Полученный набор различных типов поведения хвоста распределения хорошо соответствует эмпирически выявленным типам поведения хвостов закона повторяемости, построенных по длительной регистрации сейсмичности в окрестности сейсмоактивных разломов со значительной сдвиговой компонентой.

Естественно, реализация на относительно коротком временном интервале редкого отскакивающего характеристического землетрясения является сугубо случайным процессом. Однако определенная систематичность, когда по совокупности данных для большого числа зон разломов выявляются некоторое небольшое число типов закона повторяемости, и эти типы находят свою естественную интерпретацию в рамках модели НМК дает основание предполагать не случайность такого результата и даже предложить физические интерпретации выявленным типам поведения хвоста закона повторяемости землетрясений.

Материал данного раздела войдет в готовящуюся публикацию по сейсмичности Центральной Азии.

2.4. Новые результаты квантификации землетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей

Выше отмечалась необходимость использования данных для исторических, архео- и палеоземлетрясения для более надежной оценки долгосрочной сейсмической опасности. Ранее в работе (Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика, 2012, т.3, № 3. С.203-237) был предложен метод оценки параметров землетрясений по величинам смещения скальных отдельностей. Этот метод позволяет получать ценную новую информацию. Такая проверка ранее была реализована по данным о смещении скальных отдельностей в недавних сильных землетрясениях Киргизии: Сусамырском (19.08.1992 г., $M_S = 7,3$) и Кеминском (03.01.1911 г., $M_w = 7,9$). В 2016 году эти методики были применены к исследованию ряда объектов на территории Российской Федерации и в Киргизии.

Метод оценки значений PGV базируется на использовании трех важных допущений, являющихся обобщением эмпирических данных. Во-первых, на степенном распределении величин сейсмических воздействий, что позволяет учитывать только одно сильнейшее воздействие, полагая все другие, существенно более слабые по величине, как бы шумом.

Во-вторых, используется то обстоятельство, что обычно в цуге сейсмических колебаний наблюдается одно наиболее сильное отклонение (часто с переколебанием в «плюс» и «минус»). Именно это отклонение и обеспечивает резко выделяющееся по величине максимальное значение массовой скорости – PGV . Предполагается, что именно эта скорость и передается скальному блоку, который затем по инерции перемещается в свое новое положение. Типичность в цуге колебаний единичного резко выделяющегося значения позволяет не учитывать перемещения, порождаемые более слабыми воздействиями с меньшими значениями массовой скорости. Эти последние играют роль относительно несущественного шума.

Наконец, в-третьих, используется то обстоятельство, что геометрия смещающегося скального блока и окружающих его блоков породы обычно служит эффективным фильтром, позволяющим в полной мере реализовать смещения только одной определенной ориентации. Иначе направленные сильные сейсмические воздействия не реализуются по геометрическим ограничениям.

Перечисленные предположения позволяют в качестве допустимого сильно упрощающего приближения рассматривать каждое отдельное смещение скальной отдельности (глыбы) как порождаемое некоторым единичным сейсмическим воздействием. Остается оценить величину этого воздействия, т.е. значение PGV и направление воздействия. Для этого решается упрощенное модельное уравнение баланса механической энергии, связывающее величину наблюдаемого перемещения данной скальной

отдельности со значением массовой скорости в сейсмической волне, полагаемой равной PGV .

В простейшем (и наиболее часто наблюдаемом в природе) модельном случае перемещения скальной отдельности по горизонтальной поверхности с трением используется уравнение баланса энергии

$$mV^2/2 = m \cdot g \cdot k \cdot L, \quad (4)$$

где m – масса скальной отдельности; V – скорость (полагаемая равной PGV); g – ускорение свободного падения; k – коэффициент трения; L – дальность перемещения скальной отдельности.

В более сложном случае учитывается величина смещения скальной отдельности по вертикали, а также используются иные модели для оценки PGV при отбрасывании, подбрасывании скальной отдельности или при ее переворачивании. В любом из этих модельных случаев решается некоторое упрощенное соотношение баланса механической энергии. Здесь мы не будем сколько-нибудь подробно на них останавливаться.

Средние значения величин скорости, рассчитанные по (4) вполне согласуются с максимально увиденными значениями и теоретическими оценками величин скоростей скольжения бортов разломов при сейсмогенерирующей подвижке 1–3 (до 5) м/с. Задача оценки магнитуды порождающего события не вполне определена, так как зависит и от самой величины M и от расстояния R .

В 2016 году данная методика была применена для исследования и параметризации сильных палеоземлетрясений в ряде регионов. Остановимся кратко на результатах полученных для Фенноскандии и для Киргизии. Исследования последних десятилетий на востоке Фенноскандинавского щита, как ранее и в других его частях, поставили под сомнение представления о слабой сейсмической активности в предшествующие тысячелетия и столетия. Это касается и Кольского региона, где также исследованы сейсмические проявления в кристаллических породах и рыхлых отложениях.

Проведены детальные палеосейсмогеологические исследования на ряде ключевых участков. Остановимся на ключевом участке на западном борту Имандровской впадины, в пределах унаследованной разломной зоны, обнаруженной более 20 лет назад. Выделены локальные нарушения и смещения скальных пород нескольких типов – сеймотектонические, сейсмогравитационные и деформации встряхивания, а также деформации в рыхлых отложениях, определены возраст и параметры интенсивности палеоземлетрясений. Представлены результаты детальных палеосейсмогеологических исследований на ключевом участке в бортовой зоне впадины оз. Имандра (Кольский регион, северо-восток Фенноскандинавского щита). Изучение различных групп палеосейсмодеформаций, развитых в зоне разлома, применение новых методов и подходов позволило выделить крупную сеймотектоническую

зону, в которой в конце позднеледниковья и в голоцене возникали мощные землетрясения, что заставляет поставить вопрос о возможном пересмотре сейсмического потенциала района Кольской АЭС, от которой участок ущелье находится в непосредственной близости.

На рис. 2 приведен комплекс полученных данных по этому ключевому участку. На рисунке показаны данные по смещениям скальных глыб в районе ущелья, общая схема объекта и разрез ущелья. На врезке А дан поперечный профиль через ущелье, на врезке В – направления смещений глыбового материала, показывающий наличие четко выраженных характерных направлений смещения, не согласующихся с направлением движения ледника. Полученные оценки скорости при этом согласуются со значениями, получаемыми при измерении сильных движений в очаговых зонах сильных землетрясений *PGV* в диапазоне 1-3 м/с.

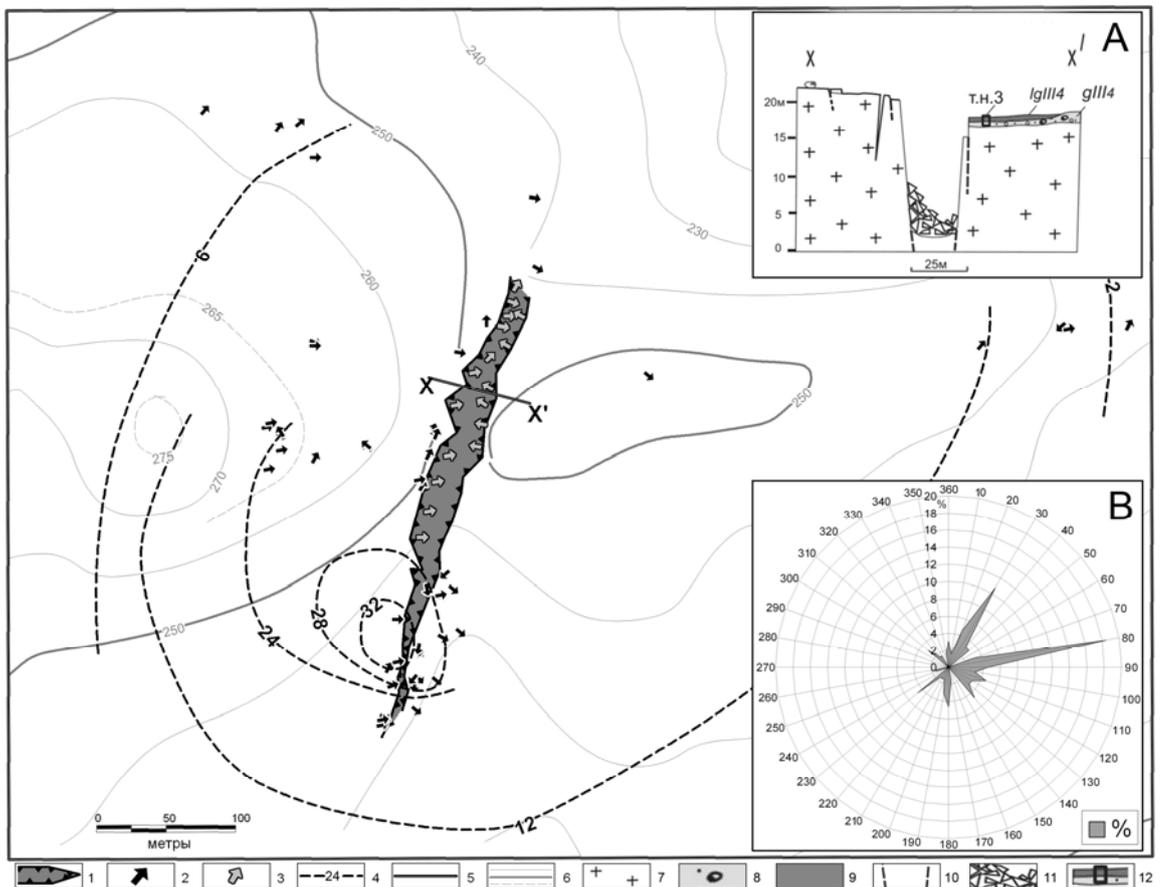


Рисунок 2. Смещения глыб в районе ключевого участка «Ущелье».

Врезка А – поперечный профиль через ущелье; врезка В – направления смещений глыбового материала; 1 – сеймотектонический ров («ущелье»); 2 – направление импульсных смещений глыб; 3 – направление обвальных шлейфов; 4 – изолинии распространения максимальных объемов смещенных блоков; 5 – поперечный профиль; 6 – изогипсы рельефа (а – через 10 м, б – через 50 м, в – через 5 м); к врезке А: 7 – гнейсо-граниты, 8 – морена, 9 – отложения позднеледникового озера, 10 – трещины, 11 – обвалы, 12 – положение шурфа с деформациями в рыхлом чехле.

Описанная выше методика была использована в широком комплексе работ, проведенном большим коллективом исследователей в ряде районов Киргизии. В ходе этих работ был исследован ряд археологических памятников в Северном Прииссыккулье (Тянь-Шань) в бассейнах рек Чет-Койсуу и Чон-Койсуу. Перечислим основные полученные результаты. Было показано, что все памятники подверглись в прошлом значительным сейсмогенным повреждениям и разрушениям: кромлех (VII в. до н.э. – VIII в. н.э.) смещен по разлому лево-сдвигового типа; курган (VII–XIII вв.) деформирован во фронте сейсмоуступа надвигового типа; крепость (XIV–XV вв.) погрузилась под воды оз. Иссык-Куль при катастрофическом опускании береговой полосы. В ходе полевых исследований идентифицирована зона сейсмогенного разрыва, которая приурочена к Культорскому краевому разлому, разделяющему Иссык-Кульскую впадину и ее горное обрамление – хр. Кунгей Ала-Тоо. Во время палеоземлетрясения образовался сейсмогенный уступ надвигового типа. Величина смещения по нему составила 1,6 м, что соответствует землетрясению с $M_S \geq 7$ и интенсивности колебаний $I_0 \geq IX$ баллов. Судя по многочисленным радиоуглеродным датировкам затопленной древесины, использованной при постройке крепости (конец XIV – начало XV в.), землетрясение произошло в XVI в. и могло способствовать угасанию цивилизации моголов в Северном Прииссыккулье.

Результаты проведенных палеосейсмологических и археосейсмологических исследований подтвердили надвигание северного борта Алабаш-Конуроленской впадины на ее осадочное выполнение. Впервые в пределах впадины выявлены следы двух древних землетрясений, произошедших в интервале 7300—8400 л. н. и в XVI (?) веке н. э. Параметры сейсмоуступа (протяженность 2,3 км) и соответствующего взброса (смещение 0,4 м) землетрясения XVI в. позволили оценить минимально возможную величину магнитуды сейсмического события в диапазоне от 6,6 до 6,8. Минимальная магнитуда более древнего землетрясения имеет сопоставимую величину.

Полученные коллективом авторов результаты указывают на необходимость ввести поправки в существующую схему сейсмического районирования Республики Кыргызстан, согласно которой на исследуемой территории Прииссыккулья возможны только землетрясения с $M \leq 6,5$. Применение описанной выше методики позволило продвинуться в параметризации ряда упомянутых выше сильных исторических землетрясений.

В случае Киргизии, как и в случае Фенноскандии, оценки получаемые по оригинальной авторской методике анализа деформаций в скальных породах позволяет получать ценную новую информацию по оценке долгосрочной сейсмической опасности.

Результаты, приведенные в данном разделе, опубликованы в статьях [3-7] и вошли в доклады [11, 13].

2.5. Единообразный режим развития фор- и афтершоковых аномалий – результаты исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения

Дополнительная важная информация о режиме подготовки и реализации редких сильных землетрясений может быть получена по результатам анализа сейсмического режима в обобщенной окрестности сильного землетрясения. За отчетный год выполнения проекта наиболее значительным результатом в этой области было выявление единнообразия характера развития разных видов аномалий в окрестности обобщенного сильного землетрясения, а также нового вида предвестниковой аномалии, выражающейся в уменьшении средней глубины слабых землетрясений в малой пространственно-временной окрестности сильного землетрясения.

Для всех видов аномалий (кроме изменения числа фор- и афтершоков), выявленных в обобщенной окрестности сильного землетрясения имеет место существенное единообразие характера проявления этих аномалий. Аномалии начинают проявляться в обобщенной окрестности за 50 - 100 суток до момента главного события. При этом величина аномалии линейно возрастает к моменту главного события как $-\lg(|t - t_c|)$, где t - текущее время; t_c - момент главного события. Например, для параметра «текущее среднее значение магнитуды» M , изменяющегося в противофазе с величиной наклона графика повторяемости b -value, было найдено регрессионное соотношение:

$$M = -(0,19 \pm 0,04) \lg(|t - t_c|) + 6,2 \pm 0,2. \quad (5)$$

С точки зрения понимания физики процесса сейсмичности наибольший интерес представляет выявленная аномалия уменьшения средней глубины слабых землетрясений также пропорционально логарифму времени до момента обобщенного сильного события. Такую аномалию естественнее всего объяснить наличием в очаговой зоне флюида низкой плотности (не расплав), и его прорывом вверх при лавинообразном развитии трещиноватости в области активизирующегося разлома.

Важно подчеркнуть также, что развитие такой аномалии указывает на (предположительно, здесь мало данных) очень сильную аномалию проницаемости в узкой окрестности главного события. Аномалию проницаемости естественно связать с резким ростом трещиноватости и разрушения геоматериалов; такая аномалия при этом дает свидетельства примеров резкого роста проницаемости, не связанного с увеличением концентрации флюидной компоненты. Последнее важно в связи с возможными механизмами роста проницаемости литосферы, реализующимися вне связи (что обычно предполагается) с реакциями дегидратации и ростом концентрации флюида.

На рис. 3 представлена аномалия изменения средней глубины событий H в обобщенной окрестности сильного события. Соответствующее регрессионное соотношение имеет вид:

$$H = -(2,9 \pm 0,5) \lg(|t - t_c|) + 21 \pm 2. \quad (6)$$

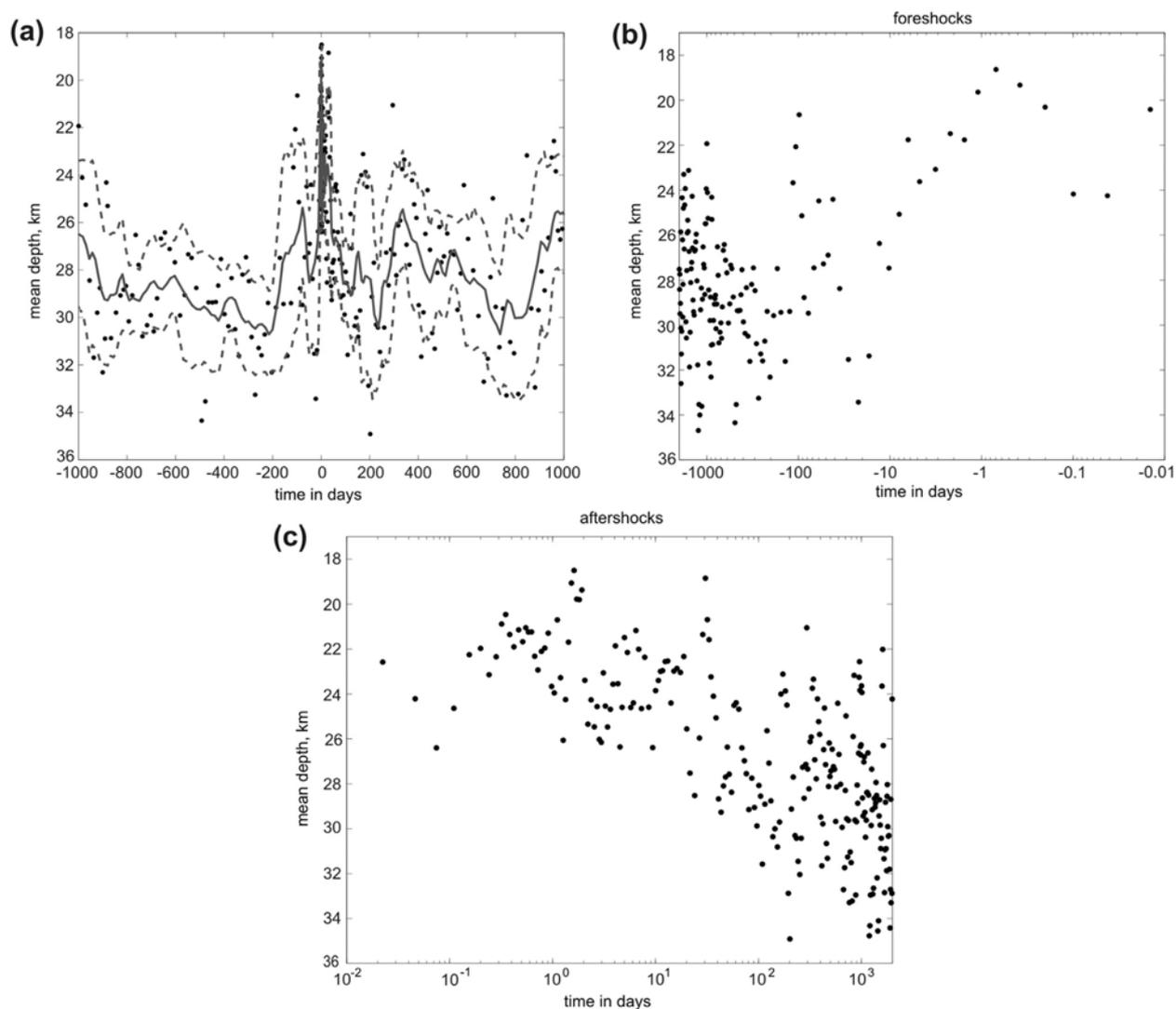


Рисунок 3. Рост средней глубины слабых землетрясений в обобщенной окрестности сильного землетрясения. Время до/после обобщенного основного события дано в линейной шкале (а) и в логарифмической, для форшоковой области (б) и афтершоковой (в).

Полученные результаты опубликованы в статье [9] и вошли в доклады [14, 16].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по теме включили достаточно широкий набор методов: статистическое описание хвоста функции распределения силы землетрясений, моделирование сейсмического режима в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК), квантификация землетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей (с целью пополнения и уточнения данных о палеоземлетрясениях) и получение на основе этих данных уточненных представлений о долгосрочной сейсмической опасности, исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения (с целью уточнения режима сильных землетрясений, физики процесса сейсмичности, а также уточнения и выявления новых предвестников).

Предлагаемый комплексный подход позволяет объединить результаты всех упомянутых методов исследования.

По результатам выполненных в 2016 году исследований опубликовано 9 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных изданиях и сделано 9 докладов на международных и российских научных конференциях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

1. Андреева М.Ю., Родкин М.В. К сеймотектонической обстановке на океанической стороне глубоководных желобов // Тихоокеанская геология, 2017, т.36, № 1. С.13–20.
2. Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли, 2016, № 1. С.120-132, doi:10.7868/S000233371601004X.
3. Деев Е.В., Турова И.В., Корженков А.М., Лужанский Д.В., Гладков А.С., Родкин М.В., Абдиева С.В., Мажейка Й.В., Рогожин Е.А., Фортуна А.Б., Муралиев А.М., Чаримов Т.А., Юдахин А.С. Результаты палеосейсмологических и археосейсмологических исследований в западной части Алабаш-Конуроленской внутригорной впадины (южное Прииссыккулье, Кыргызстан) // Геология и геофизика, 2016, т.57, № 7. С.1381-1392, doi:10.15372/GiG20160708.
4. Корженков А.М., Деев Е.В., Лужанский Д.В., Абдиева С.В., Агатова А.Р., Мажейка Й.В., Меньшиков М.Ю., Рогожин Е.А., Родина С.Н., Родкин М.В., Сорокин А.А., Фортуна А.Б., Чаримов Т.А., Шен Д., Юдахин А.С. Сильное средневековое землетрясение в Северном Прииссыккулье (Тянь-Шань): результаты палеосейсмологических и археосейсмологических исследований // Геофизические процессы и биосфера, 2016, т.15, № 4. С.68-88, doi:10.21455/gpb2016.4-4.
5. Корженков А.М., Кольченко В.А., Лужанский Д.В., Абдиева С.В., Деев Е.В., Мажейка Й.В., Рогожин Е.А., Родина С.Н., Родкин М.В., Фортуна А.Б., Чаримов Т.А., Юдахин А.С. Археосейсмологические исследования и структурная позиция средневековых землетрясений на юге Иссык-Кульской впадины (Тянь-Шань) // Физика Земли, 2016, № 2. С.71-86, doi:10.7868/S0002333716020083.
6. Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В., Родкин М.В. Комплексные палеосейсмогеологические исследования на ключевом участке в юго-западной части Кольского полуострова (северо-восток Фенноскандинавского щита) // ДАН, 2016, т.469, № 2. С.199-203, doi:10.7868/S0869565216200172.
7. Gladkov, A.S., E.U.Lobova, E.V.Deev, A.M.Korzhenkov, J.V.Mazeika, S.V.Abdieva, E.A.Rogozhin, M.V.Rodkin, A.B.Fortuna, T.A.Charimov, and A.S.Yudakhin, Earthquake-induced soft-sediment deformation structures in Late Pleistocene lacustrine deposits of Issyk-Kul lake (Kyrgyzstan). *Sedimentary Geology*, 2016, **344**: 112-122, doi:10.1016/j.sedgeo.2016.06.019.
8. Pisarenko, V.F., A.Sornette, D.Sornette, and M.V.Rodkin, Reply to: "Comment on Pisarenko et al., 'Characterization of the Tail of the Distribution of Earthquake Magnitudes by Combining the GEV and GPD Descriptions of

- Extreme Value Theory" by Mathias Raschke in *Pure Appl Geophys* (2015). *Pure Appl. Geophys.*, 2016, **173**, 2: 709-713, doi: 10.1007/s00024-015-1194-7.
9. Rodkin, M.V., and I.N. Tikhonov, The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2016, **95**: 73-84, doi:10.1016/j.pce.2016.04.001.

Доклады на международных и российских научных конференциях

10. Горшков А.И., Писаренко В.Ф., Родкин М.В., Лы Н.Т., Туен Н.Х., Орунбаев С.Ж. Старые и новые подходы к проблеме оценки долгосрочной сейсмической опасности // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Юбилейная конференция, посвященная 25-летию образования ИГЭ РАН / отв. ред. В.И. Осипов. М.: РУДН, 2016. С.135-140 (РИНЦ).
11. Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В., Родкин М.В. Комплексные палеосейсмогеологические исследования на ключевом участке в центральной части Мурманской области (в связи с оценкой сейсмического потенциала района Кольской АЭС) // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С.170-172.
12. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Исследование хвостов распределений, приложение к оценкам сейсмической опасности // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 177-179.
13. Родкин М.В. Оценка PGV значений от древних землетрясений – новые результаты и приложение к оценке сейсмической опасности // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 186-187.
14. Родкин М.В. Новые данные о режиме сейсмичности в окрестности сильных землетрясений // Природные катастрофы. Изучение, мониторинг, прогноз. Южно-Сахалинск, 2016. С.71-75.
15. Pisarenko, V., and M. Rodkin, Some new methods and results in examination of distribution of rare strongest events. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-5281, 2016. EGU General Assembly 2016.
16. Rodkin, M., Typical scenario of preparation, implementation, and aftershock sequence of a large earthquake. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-5266, 2016. EGU General Assembly 2016.

17. Nguyen Huu Tuyen, M.Rodkin, and A.I.Gorshkov. Geoblocks delineation and recognition of earthquake prone areas in the Tuan Giao area (Northwest Vietnam). In Proc. of Scientific Workshop on “Progress and Trends in Science and Technology” commemorating 10 tears of partnership between the Vietnam Academy of Science and Technology and the Russian Foundation for Basic Research. Hanoi, Febriary 2016: 548-569.
18. Vu Thi Hoan, Ngo Thi Lu, Nguyen Huu Tuyen, M.Rodkin, Phung Thi Thu Hang, and Tran Viet Phuong, Prediction of maximum earthquake magnitude for Northern Vietnam region based on the GEV distribution. In Proc. of Scientific Workshop on “Progress and Trends in Science and Technology” commemorating 10 tears of partnership between the Vietnam Academy of Science and Technology and the Russian Foundation for Basic Research. Hanoi, Febriary 2016: 541-547.