

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ГЕОФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.34

№ госрегистрации 115080610014

Инв. № 2019-3



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

Доктор физ.-мат. наук

А.И.Горшков

«30» января 2019 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
(заключительный, 2016-2018 годы)

Заведующий лабораторией теории
прогноза землетрясений
чл.-корр. РАН

А.А. Соловьев

Москва 2019

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

Подписи сотрудников ИТФВ РАН
заверяю.

Ученый секретарь ИТФВ РАН, ас ф.-м. н.



А.К. Некрасова

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ГЕОФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.34

№ госрегистрации 115080610014

Инв. № 2019-3

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

Доктор физ.-мат. наук

_____ А.И.Горшков

« »

2019 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
ДАНЫМ И КОМПЛЕКСА ХАРАКТЕРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В ОБОБЩЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ
СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
(заключительный, 2016-2018 годы)

Заведующий лабораторией теории
прогноза землетрясений
чл.-корр. РАН

А.А. Соловьев

Москва 2019

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 32 с., 1 табл., 5 рис., 47 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 за 2016-2018 гг. обеспечили значительное продвижение исследований. За отчетный период по теме опубликованы 2 монографии и 27 статей в реферируемых изданиях, сделано 19 докладов на международных и российских конференциях. Различные направления исследований по теме являются вариантами подходов к решению общей задачи оценки сейсмической опасности. В рамках исследования закона распределения редких сильных событий на основе использования предельных GEV и GPD распределений теории экстремальных значений были развиты и реализованы методы более точной оценки значений параметров модельных законов распределения, а за счет использования новой 2-х звенной модели закона повторяемости землетрясений удалось добиться значительного (в разы) улучшения пространственного разрешения рассчитываемых карт сейсмической опасности. В рамках использования каскадных моделей получены новые примеры ожидаемых предвестниковых изменений режима сейсмичности, описан наблюдаемый по акустическим данным переход между экспоненциальным и степенным законами распределения, получено описание ранее эмпирически выявленных 4-х типов формы хвоста функции распределения сильных землетрясений. Значительное распространение получил предложенный ранее метод оценки скоростей PGV и возможных параметров землетрясений по данным о смещении скальных отдельностей. Полученные оценки широко используются для параметризации исторических и палеоземлетрясений и для уточнения оценок сейсмической опасности. Значительная часть публикаций по теме представлена работами с применением этого метода разными группами исследователей (коллективная монография и 11 публикаций из общего числа 27 статей в реферируемых изданиях). В плане исследования сейсмического режима в обобщенной окрестности сильных землетрясений был установлен эмпирический закон роста амплитуд аномалий в окрестности обобщенного сильного события. Из значительного (до 10) числа выявленных ранее аномалий выделены 4, являющиеся независимыми. Исследования по физике процесса землетрясений в дальнейшем будут базироваться на анализе именно этих аномалий и выявленного эмпирического закона изменения амплитуд аномалий по мере приближения момента обобщенного сильного землетрясения.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	6
2.1. Общий обзор направлений и результатов исследований по отдельным направлениям работы	6
2.2. Методика оценивания параметров предельных распределений теории экстремальных значений в масштабе, приближенном к масштабу карт ОСР	9
2.3. Интерпретация сейсмических данных в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК)	12
2.4. Оценки PGV для исторических и палеоземлетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей	16
2.5. Исследования обобщенной окрестности сильного Землетрясения	19
2.6. Факторы сейсмичности, напряженное состояние и метаморфизм	21
2.6.1. Выявление тектонических проявлений слабых, но физически достоверно имеющих место напряжений	21
2.6.2. Пример возможной определяющей роли уровня развития метаморфизма для возникновения сейсмичности	22
2.6.3. Проблема стационарности сейсмического режима	22
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	24
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	26

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.

Разные направления исследований по теме относятся к решению единой общей задачи - оценке сейсмической опасности. Как известно, оценка долгосрочной сейсмической опасности осложнена тем, что развитой физической модели, позволяющей описывать процесс подготовки и реализации сильного землетрясения, на настоящий момент не существует. Отсюда – за неимением развитой физической модели - широкое развитие получили исследования по оценке сейсмической опасности в рамках различного рода статистических моделей. К решению этой задачи мы подходим разными путями, что позволяет дополнительно верифицировать получаемые результаты и получать более робастную общую картину.

Исследования были нацелены на получение уточненных оценок силы и вероятности сильных сейсмических воздействий, выделение типовых черт предвестниковых и афтершоковых аномалий. В работах по теме применяются методы, основанные на использовании предельных распределений теории экстремальных значений, модели кумулятивного и мультипликативного каскадов, исследовании типового предвестникового поведения в обобщенной окрестности сильного землетрясения, а также методы получения оценок величин максимальных массовых скоростей (PGV) по данным полевых макросейсмических наблюдений.

Научная новизна выполненных исследований состоит в развитии ряда новых методов получения уточненных оценок сейсмической опасности от редких сильных событий на основе 1) предельных распределений теории экстремальных значений; 2) модели кумулятивного и мультипликативного каскадов (в линейном и нелинейном вариантах); 3) результатов оценивания пиковых величин скоростей движения грунта по данным полевых макросейсмических наблюдений; 4) развития подходов к прогнозу и пониманию физики подготовки и реализации сильных землетрясений на основе оригинального анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения. Как предположительно наиболее практически важный результат отметим разработку подходов к расчету сейсмической опасности на основе теории экстремальных значений с пространственным разрешением, приближающимся к масштабу карт ОСР.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Общий обзор направлений и результатов исследований по отдельным направлениям работы

Ключевыми нерешенными на настоящий момент проблемами сейсмологии являются проблема физики и прогноза землетрясений и проблема робастной оценки сейсмической опасности. Нерешенность проблемы физики землетрясений неоднократно указывалась разными авторами как возможная причина неудач программ прогноза землетрясений. Не решена и проблема сейсмической опасности, которую можно рассматривать как случай особо долгосрочного прогноза землетрясений. Действительно, как показал 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 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. В еще большей степени нерешенность проблемы оценки долгосрочной сейсмической опасности касается регионов, где данные по исторической сейсмичности скудны, а ряды инструментальных сейсмических наблюдений более короткие и менее качественные. Недостаток 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 сеймотектонических данных. Метод этот 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 исследования сеймотектонических узлов, использования методов распознавания образов и более сложного математического аппарата и специальных программных комплексов, позволяющих быстро проигрывать различные варианты решения задачи. Примером такого подхода является оценка сейсмической опасности для северо-запада Вьетнама, проведенная с участием руководителя работ по данной теме [11, 15, 36]. В целом, полученные этим методом результаты достаточно обнадеживающие, но, тем не менее, они не дают пока достаточно уверенной оценки долгосрочной сейсмической опасности и потому должны использоваться в комплексе с другими методами.

Другие подходы к пониманию режима экстремально сильных редких землетрясений в меньшей степени используют геологические и

тектонические данные и имеют меньшую историю применения. Эти подходы (в рамках данной темы) базируются на 1) использовании предельных распределений теории экстремальных значений, 2) модели описания сейсмического режима в рамках нелинейного мультипликативного каскада и 3) на использовании метода анализа палеосейсмических (макросейсмических) данных, позволяющем получать оценки величин максимальных локальных сейсмических воздействий (пиковых значений скорости смещения грунта, PGV) за длительный срок (тысячи лет). Охарактеризуем вкратце эти подходы.

Известно, что на основе теории экстремальных значений с использованием предельных распределений - обобщенного распределения экстремальных значений (GEV) и обобщенного распределения Парето (GPD) - можно получать устойчивые оценки квантилей распределения максимальных событий за любой будущий интервал времени. В плане демонстрации эффективности этого подхода, отметим пару важных результатов, полученных на его основе.

Прежде всего, 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 большинство широко применяемых в сейсмологии распределений магнитуд землетрясений (распределение Гутенберга-Рихтера и его уточнение, предложенное Я.Каганом) не отвечают этому требованию. Это указывает на то, что эти распределения в области редких сильнейших событий недостаточно точны. Напротив, распределения величин экстремальных событий, получаемые авторами данного отчета, оказываются, как правило, принадлежащими к классу конечных распределений (см., например, монографию [Pisarenko, Rodkin, 2014]).

Другим довольно красноречивым свидетельством эффективности нашего метода является вывод о достаточно высокой вероятности реализации в Японии мега-землетрясений $M9+$, опубликованный в [Pisarenko et al., 2010]. До землетрясения Тохоку (11 марта, 2011, $M=9.1$), на основании исторических данных за более чем тысячелетний период было принято полагать, что землетрясения с $M = 9$ в Японии невозможны. Такое предположение весомо подкреплялось мировым опытом. Сильнейшие события с $M \geq 9$ были известны только на протяженных (длиной более 1000 км) прямолинейных участках зон субдукции, таких, как в Южной Америке или Индонезии. В Японии таких участков нет. Зона субдукции здесь представлена сложной совокупностью разноориентированных участков зоны. Максимальная инструментально зарегистрированная магнитуда за период 1923—2010 гг. равнялась $M=8.3$.

Приведенные примеры указывают на эффективность метода расчета, основанного на использовании предельных распределений теории экстремальных значений. Этот метод, однако, требует развития в плане получения более точных значений параметров модельных законов распределения и в плане возможного улучшения пространственного

разрешения результатов расчетов. Именно эти две задачи и решались в рамках данной темы, полученные результаты представлены в статьях [8, 10, 12, 13, 19, 20, 22, 24] из списка публикаций по теме, а также в материалах конференций [29, 31, 34, 40, 41, 43, 47].

Другой 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 достаточно надежно решить задачу оценки долгосрочной сейсмической опасности. Классические методы такой оценки связаны с тренчингом и определением величин смещений по разломам при древних землетрясениях. Эти методы, однако, весьма трудоемки и часто неоднозначны (например, часто неясна степень единовременности смещений), а следы смещений в рельефе сильно сглаживаются со временем и становятся незаметны. В качестве альтернативы такому подходу ранее руководителем темы [Родкин и др., 2012] был предложен метод оценки максимальных массовых скоростей при землетрясениях (значений *peak ground velocity*, *PGV*) по смещениям скальных отдельностей, а также номограмма для ориентировочного определения возможных пар значений магнитуды и гипоцентрального расстояния для данного значения *PGV*. Естественно, каждое отдельное такое определение весьма ненадежно (наблюдаемое смещение может порождаться самыми разными причинами). Однако при получении достаточного для статистической обработки количества оценок величин *PGV*, этот метод позволяет охарактеризовать уровень долгосрочной сейсмической опасности достаточно определенно. За весь отчетный период по теме по данному направлению работ опубликованы 1 коллективная монография и 11 публикаций, касающиеся палеосейсмической активности различных регионов [2, 3-7, 17, 23, 25, 26-28], а также в материалах конференций [29, 30, 32, 39, 46].

Общие качественные закономерности возможных режимов реализации редких сильнейших землетрясений исследовались также в рамках модели мультипликативного каскада. Новые результаты, полученные по этому направлению работ представлены ниже. Результаты, полученные за отчетный период, опубликованы в [35, 42].

Три указанных направления работ позволяют трактовать задачу оценки долгосрочной сейсмической опасности с взаимодополняющих позиций. Ниже, в соответствующих разделах, представлены основные результаты, полученные за отчетный период по указанным направлениям работ.

В отличие от вышеуказанных направлений работ, нацеленных на определение долгосрочной сейсмической опасности, анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения нацелен на выявление краткосрочных (часы – годы) аномалий сейсмического режима, указывающих на возможное развитие сильного землетрясения и характеризующих физику сейсмического процесса. Обнаружено единообразие характера развития разных видов аномалий в окрестности обобщенного сильного землетрясения, в том числе,

выявленного вида предвестниковой аномалии, выражающейся в уменьшении средней глубины слабых землетрясений в малой пространственно-временной окрестности сильного землетрясения. Данный результат интересен тем, что может быть интерпретирован как показатель присутствия в очаговой области флюида малой плотности и резкого роста проницаемости среды по мере приближения момента сильного землетрясения. Поставлена и решена задача выделения среди всей совокупности выявленных аномалий независимых аномалий; выявлено 4 таких аномалий. Результаты по данному направлению работ по теме опубликованы в [1, 9, 33, 35, 38, 45].

Далее дается краткое описание результатов, полученных по означенным выше направлениям исследований.

2.2. Методика оценивания параметров предельных распределений теории экстремальных значений в масштабе, приближенном к масштабу карт ОСР

Сложность оценки опасности редких экстремальных событий (в частности, землетрясений) связана с необходимостью оценивания квантилей «далеко 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 распределения. При этом веские аргументы в пользу того или иного выбора «истинного» закона распределения обычно отсутствуют. Для означенной цели, нами используются предельные распределения теории экстремальных значений - Обобщенное распределение Парето (GPD) и Обобщенное распределение экстремальных значений (GEV). В этом случае аргументация «истинности» таких законов распределений базируется на соответствующих теоремах теории экстремальных значений. 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.

Получаемые значения параметров GPD и GEV распределений, как правило, оказываются таковы, что широко используемый параметр – величина максимально возможного землетрясения M_{max} и другие аналогичные величины (например, пиковое ускорение и скорости грунта, PGA и PGV) оказываются конечными, но неустойчивыми (не робастными). Так, для случая оценки величины максимально возможной магнитуды M_{max} методом GPD предельного распределения имеем

$$M_{max} = h - s/\xi, \quad (1)$$

где h – реально наблюдаемая магнитуда, часто близкая к максимальной; s , ξ – параметры GPD закона распределения, $s > 0$. Для типично реализуемого случая конечного распределения имеем близкое к нулю значение $\xi < 0$.

Применительно к известной задаче расчета сейсмической опасности этот результат – близость к нулю значение параметра ξ – является математическим отражением неробастности оценок M_{max} , известного факта регулярно повторяющихся случаев возникновения сильных землетрясений в районах, считавшихся ранее областями слабой сейсмичности. Естественно, такие неожиданные землетрясения – вследствие недостаточности антисейсмических мероприятий – особенно опасны и часто приводят к особенно большим ущербам. Вместо нестабильного параметра M_{max} мы рекомендуем использовать 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.

В работах по теме 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 бустреп-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 подходы были применены и хорошо себя показали 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). При этом при расчетах были протестированы подходы, альтернативные методу оценивания оптимальных значений параметров методом максимального правдоподобия, ММП (этот метод не дает оптимальных результатов при относительно небольшом числе событий). В качестве альтернатив ММП были использованы метод квантилей (МК) и метод моментов (ММ). Первый из них на модельных примерах оказался наиболее эффективным при оценке параметров методом предельного GEV распределения, другой – при оценке методом GPD распределения.

Полученные результаты подтвердили выявленное ранее различие законов распределения для областей срединно-океанических хребтов, зон субдукции и областей внутриконтинентальной сейсмичности. Отсюда получаем, что метод предельных GEV и GPD распределений позволил выявить различие в поведении хвоста закона повторяемости землетрясений для случаев зон субдукции, зон срединно-океанических хребтов, и зон внутриконтинентальной субдукции.

Предложена и реализована новая составная модель распределения магнитуд землетрясений, статистически удовлетворительно описывающая их распределение как в диапазоне слабых и умеренных землетрясений (законом Гутенберга-Рихтера), так и в области сильнейших событий (GPD законом распределения теории экстремальных значений). Эта двух-звенная модель обеспечивает возможность более детального пространственного разрешения за счет того, что условие сопряжение двух ветвей модели дает дополнительное соотношение, позволяющее определить один из неизвестных параметров GPD закона распределения. На примере Японии и Курил (по данным GСMT каталога) было показано, что модель хорошо описывает сейсмичность в кругах, содержащих не менее 80 основных событий в диапазоне уверенной регистрации $m \geq 5.3$. Требование по числу событий задает статистическое ограничение на возможную разрешающую способность предлагаемой модели, которая оказывается однако на порядок выше, нежели без применение двух-звенной модели. Для указанных регионов оказалось возможным получить надежную оценку параметров сейсмичности для областей радиусом 300 км по сетке $2^\circ \times 2^\circ$. Результаты расчетов квантилей $M_{\max} Q_{0.9}(50)$ с вероятностью реализации 90% в течение 50 лет представлены на рис.1.

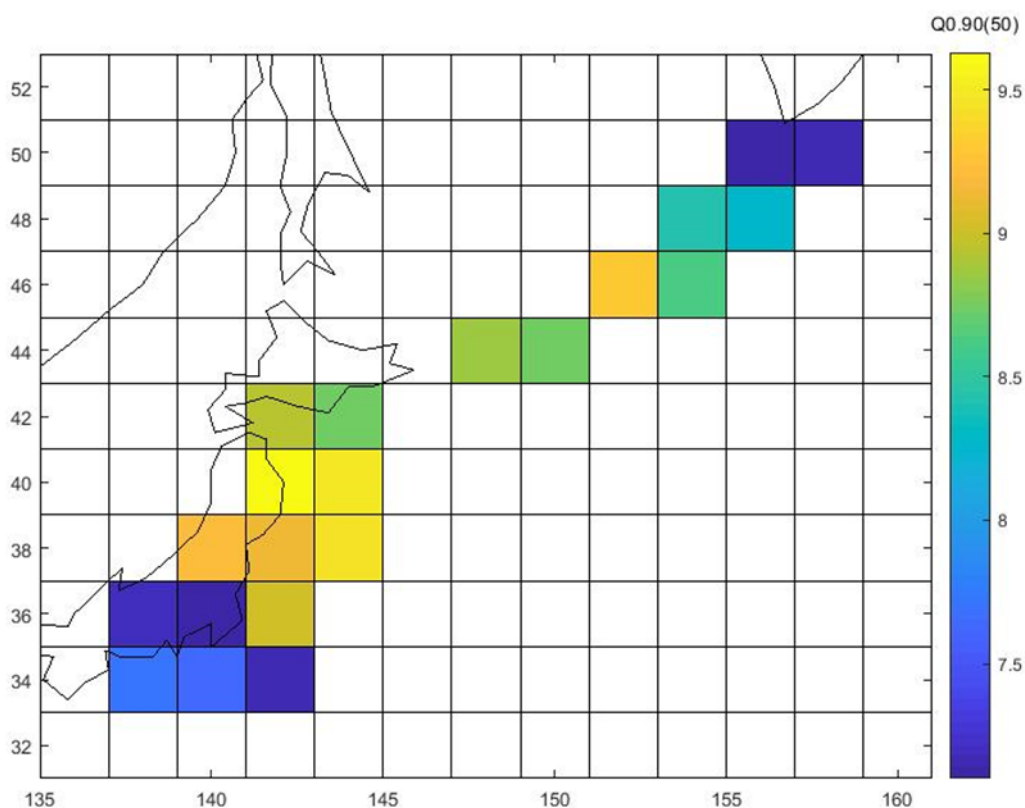


Рис.1. Схема пространственного расположения полученных значений квантиля $Q_{0.9}(50)$ для района Япония-Курилы.

Полученный результат дает новую теоретическую основу для развития методики сейсмического районирования как в плане большей робастности

получаемых результатов, так и лучшего их пространственного разрешения, приближающемуся к масштабу карт общего сейсмического районирования.

Исследования представлены в статьях [8, 10, 12, 19, 20, 22, 24] и материалах конференций [31, 34, 40, 41, 43, 47], подготовлена статья, публикация которой была задержана, с тем, чтобы поместить в юбилейный номер журнала.

2.3. Интерпретация сейсмических данных в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК)

Разработаны модельные представления о возможных в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК) типах поведения хвоста закона повторяемости землетрясений. Требования здесь были – описание эффекта возникновения характеристических землетрясений и конечность величин выделенной сейсмической энергии.

В 2017 году эти представления были применены для интерпретации эмпирических данных по сильной сейсмичности Центральной Азии за длительный (100 - 200 лет) период времени. Работа основывалась на эмпирических данных о вариативности поведения графика повторяемости сильных землетрясений в зонах влияния основных региональных сейсмоактивных разломов Центральной Азии. Этот регион является уникальным районом на Земле, где во внутриплитной области реализуются сильнейшие (в отдельных случаях с магнитудой $M > 8.0$) землетрясения. Особенностью первичного анализа эмпирического материала был анализ поведения графиков повторяемости в зонах влияния крупнейших сейсмоактивных региональных разломов по методике С.И.Шермана. Такой выбор резко ухудшал статистику (используются только землетрясения, принадлежащие зоне влияния данного разлома), но зато более четко проявлялись особенности (специфика) сейсмического режима присущие данной разломной зоне. По эмпирическим данным были выделены 4 типа поведения хвоста закона повторяемости землетрясений, которые устойчиво повторяются для разных разломных зон исследуемого региона.

Приведенные на рис. 2 типы поведения хвоста закона повторяемости землетрясений получили естественную интерпретацию в рамках нелинейного мультипликативного каскада (НМК). Общие требования к модели НМК состоят в том, что модель (кроме обычного закона повторяемости Гутенберга-Рихтера) должна обеспечивать как конечность величин сейсмической энергии (чему отвечает загиб вниз графика повторяемости в области сильнейших землетрясений), так и возможности развития эффекта характеристических землетрясений (чему отвечает уменьшение наклона графика повторяемости в области некоторых весьма сильных, но не экстремально сильных землетрясений).

Приведенные требования легко удовлетворяются в рамках МНМК модели и при этом описывают эмпирические тенденции, отображенные на рис.2. Действительно, согласно МНМК модели, простейший вариант,

обеспечивающий как конечность сейсмической энергии, так и существование эффекта характеристических землетрясений, имеет вид:

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

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 .

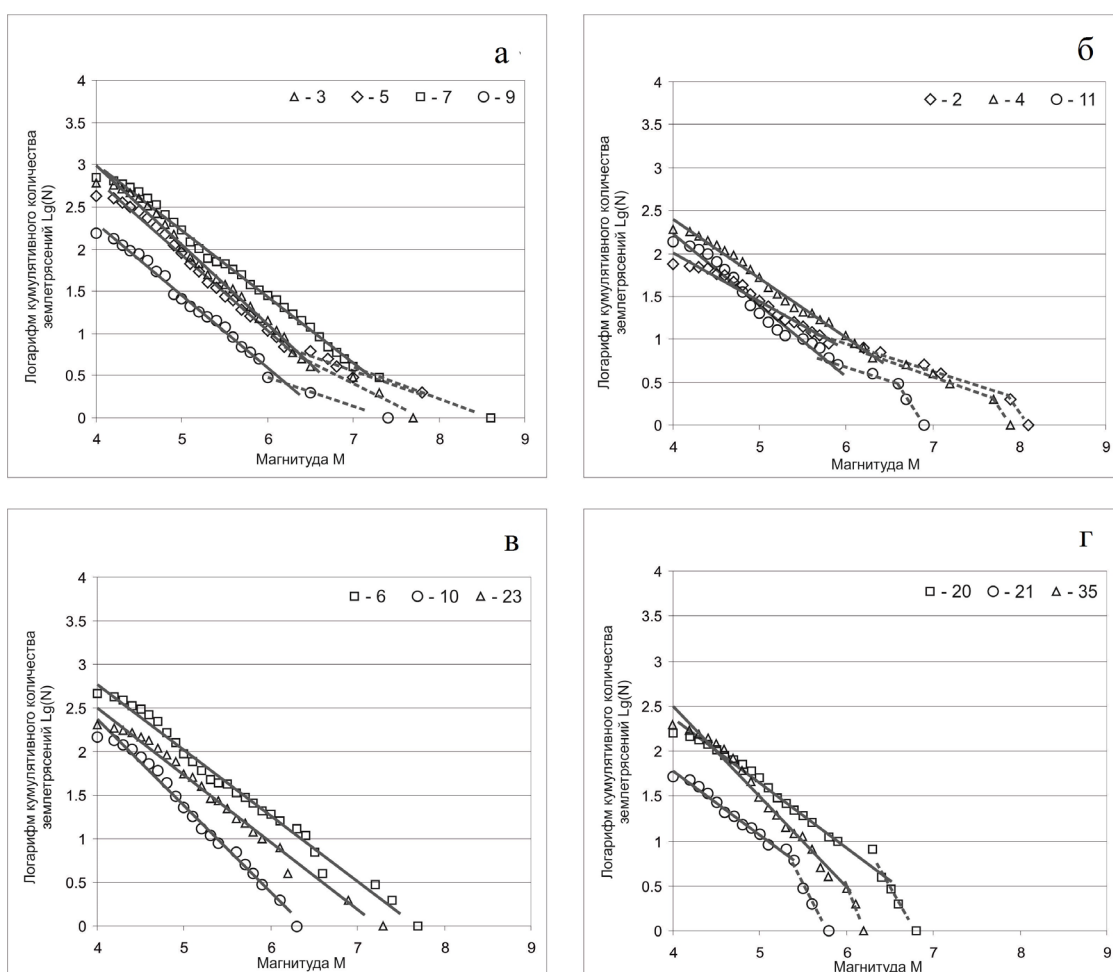


Рис. 2. Примеров четырех экспериментально выделенных типов поведения графиков повторяемости землетрясений в областях влияния основных региональных сейсмоактивных разломов Центральной Азии

На графиках с первым типом хвоста распределения (рис. 2а) в его основной части реализуется обычный закон Гутенберга-Рихтера, а в правой части - хвосте распределения - отражается эффект возникновения anomalно сильных, характеристических, землетрясений. Они соответствуют участку с уменьшением угла наклона графиков повторяемости землетрясений. Таким

образом, основное соотношение (2) для графиков с первым (2а) типом хвоста распределения работает с тем уточнением, что второе слагаемое справа отвечает наблюдаемому поведению графика повторяемости первого типа, а третье слагаемое добавлено из общих соображений, для обеспечения конечности величин сейсмической энергии.

Второй тип хвостов графиков повторяемости (рис. 2б) соответствует варианту полного нелинейного мультипликативного каскада по схеме (2), в котором и второе и третье слагаемые справа отвечают наблюдаемым особенностям графика повторяемости.

Третий тип хвостов графиков повторяемости (рис. 2в), сохраняющий угол наклона линии регрессии на всем интервале магнитуд, отвечает выполнению обычного закона Гутенберга-Рихтера. При этом, теоретическое понимание конечности сейсмической энергии обуславливает добавление отрицательного слагаемого, что приводит к соотношению

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

Можно предположить, что второе слагаемое в соотношении (3) не успело проявиться ввиду недостаточной сейсмической активности и недостаточного времени наблюдения. Наконец, четвертый тип хвостов графиков повторяемости (рис. 2г) отвечает простейшему варианту загиба вниз хвоста распределения. При этом, в отличие от предыдущего случая, загиб вниз графика повторяемости обуславливается также и эмпирическими данными, а не только теоретическими соображениями о конечности сейсмической энергии.

Четыре эмпирически выделенных типа поведения хвоста графика повторяемости землетрясений отвечают четырём возможным комбинациям ответов на два вопроса: первый вопрос - реализуется ли на данном разломе режим характеристических землетрясений; второй - достаточно ли длительности данного интервала времени, чтобы явственно обозначился теоретически ожидаемый загиб вниз графика повторяемости. Данная схема отражена в табл. 1. Логическая простота и полнота реализации схемы свидетельствует в пользу адекватности нашей модели.

Таблица 1 Типы поведения хвоста графиков повторяемости землетрясений

тип графика повторяемости	реализуется ли режим характеристических землетрясений	достаточен ли интервал времени для выявления загиба вниз графика повторяемости
I	да	нет
II	да	да
III	нет	нет
IV	нет	да

В рамках интерпретации каскадной модели резонно предположить, что на повышенную вероятность реализации сильного землетрясения указывает относительной повышенное значение параметра неравновесности. Пример возможной реализации такой тенденции приведен на рис. 3. Подобные эффекты выделялись ранее по сейсмичности Сахалина [Rodkin, Tikhonov, 2012].

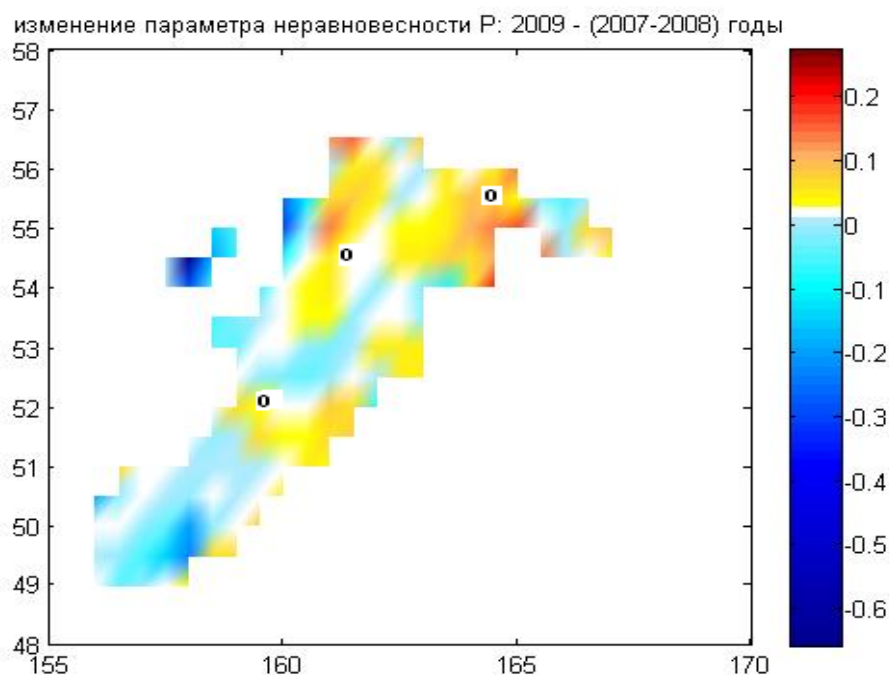


Рис. 3. Изменения параметра неравновесности в 2009 году относительно среднего для интервала времени 2007-2008 годы, кружками отмечены области реализации наиболее сильных землетрясений

В 2018 году в рамках модели кумулятивного и мультипликативного каскадов были проанализированы данные акустических экспериментов по изменению характера закона распределения микроразрушений в образце в зависимости от близости момента макроразрушения образца. Акустические экспериментальные данные обеспечивают огромный статистический объем данных, недоступный в иных случаях. Ранее было выявлено, что вдали от области макроразрушения распределение величин микроразрушений в образце отвечает экспоненциальному закону, причем очаги диффузно распределены по объему образца; а при приближении момента макроразрушения очаги микроразрушений концентрируются в области готовящегося макроразрушения, а закон распределения принимает степенной характер.

В ходе работ по теме показано, что описанный переход естественным образом имитируется в модели кумулятивного и мультипликативного каскада при изменениях параметров кинетического уравнения, отвечающих

уменьшению или увеличению степени неравновесности моделируемого процесса. Методом конструирования виртуального закона повторяемости землетрясений для зон минимальной сейсмичности (аналогично тому, как выше рассматривалась сейсмичность обобщенных виртуальных зон субдукции, срединно-океанических хребтов и внутриконтинентальной коллизии) было показано, что закон повторяемости для областей слабой сейсмичности заметно отличается от закона Гутенберга-Рихтера, и по характеру приближается к экспоненциальному закону распределения.

Полученные результаты опубликованы в статье [21] и вошли в доклад [42].

2.4. Оценки PGV для исторических и палеоземлетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей

Выше отмечалась необходимость использования данных об исторических, архео- и палеоземлетрясениях для более надежной оценки долгосрочной сейсмической опасности. Ранее в работе [Родкин и др., 2012] был предложен метод оценки параметров сейсмических воздействий и порождающих их землетрясений по величинам смещения скальных отдельностей. Этот метод позволяет получать оценки величин пиковых массовых скоростей (PGV) при древних землетрясениях. Проверка метода ранее была реализована по данным о смещении скальных отдельностей в очаговых областях недавних сильных землетрясений Киргизии: Сусамырском (19.08.1992 г., $M_S = 7,3$) и Кеминском (03.01.1911 г., $M_w = 7,9$). В 2016-2018 годах эта методика была применена к исследованию различных объектов на территории Российской Федерации, в Киргизии и на Ближнем Востоке. Данный метод все еще является существенно новым, поэтому кратко приведем его описание.

Метод оценки значений PGV базируется на использовании трех 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 инерции 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 сложных случаях учитывается величина смещения скальной отдельности по вертикали, а также используются другие 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. Но эти более сложные случаи, как показывает опыт, относительно редко используются в практике полевых работ, и в рамках описываемых исследований они не рассматривались.

Значения величин скорости, рассчитанные по (4), согласуются с максимальными скоростями, зарегистрированными датчиками сильных движений и с теоретическими оценками величин скоростей скольжения бортов разломов при сейсмогенерирующей подвижке 1–3 (до 5) м/с. Задача оценки магнитуды и положения порождающего события не вполне определены и допускают значительное разнообразие пар чисел магнитуды события M и расстояния R .

За отчетный период данная методика применялась для параметризации сильных палеоземлетрясений в Восточной Фенноскандии, в Крыму, на Сахалине, в Киргизии и на Ближнем Востоке. В частности, в Восточной Фенноскандии были детально описаны несколько ключевых участков, где оценки величин PGV подкрепляются данными о деформациях в рыхлых породах и возрастом деформированных слоев. Были детально обследованы

участки вблизи Выборга, в районе горы Воттоваара (Западная Карелия), в районе Кандалакши, КоАЭС и в районе побережья Баренцева моря. Особый практический интерес представляет один из этих участков, расположенный в непосредственной близости от Кольской АЭС и представляющий собой послеледниковое ущелье, образованное в оглаженном ледником скальном массиве. Этот участок детально описан в статье [23],

На рис. 4 в качестве примера приведен комплекс данных по этому ключевому участку. Приведены данные по смещениям скальных глыб в районе ущелья, общая схема объекта и поперечный разрез ущелья. На врезке слева дан поперечный профиль через ущелье, на врезке справа – гистограмма направлений смещений глыбового материала, показывающий наличие четко выраженных характерных направлений смещения, не согласующихся с юго-восточным (в целом) направлением движения ледника.

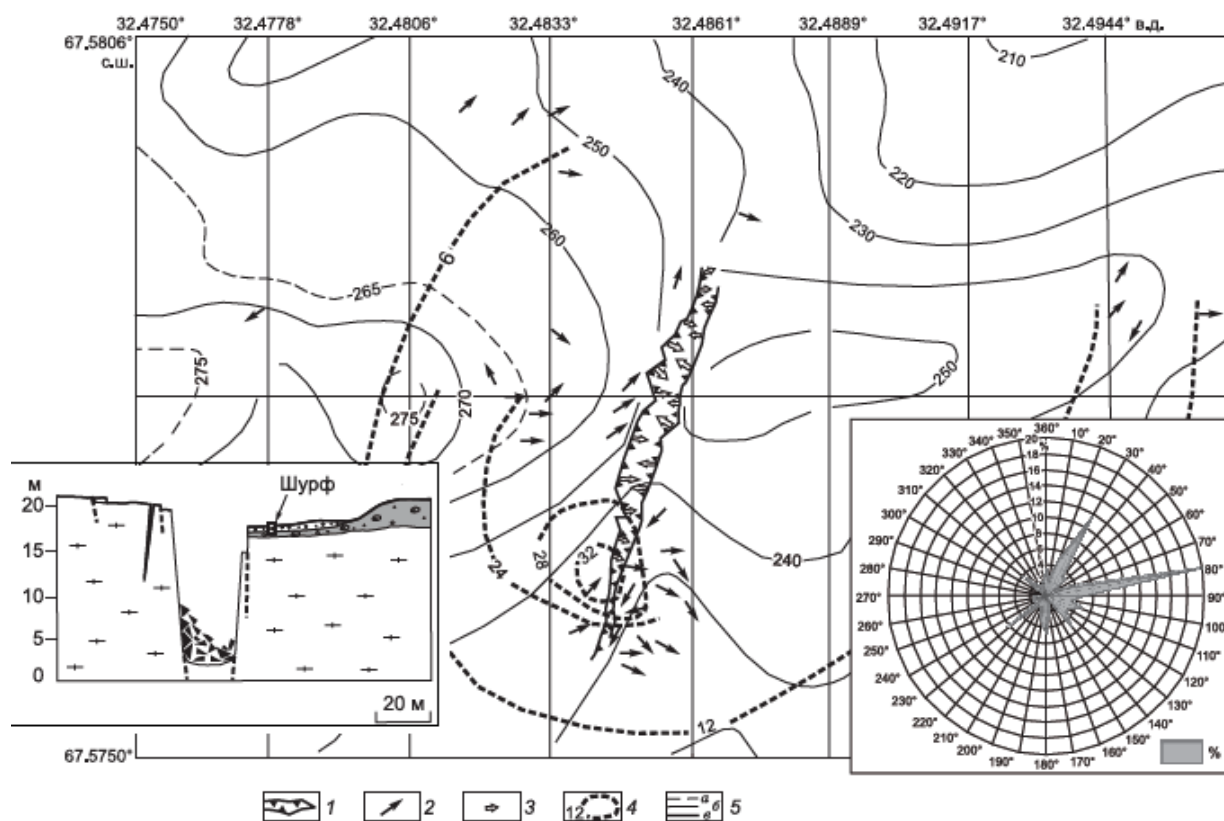


Рис. 4. Смещения глыб и обвалов в районе ущелья. 1 — ущелье; 2 — направление импульсных смещений глыб, 3 — направления смещения обвальных шлейфов, 4 — изолинии распространения максимальных объемов смещенных блоков (m^3); 5 — изогипсы рельефа через: а — 5 м, б — 10 м, в — 50 м. На врезке справа показана суммарная роза-диаграмма направлений смещений глыбового материала. На врезке слева – разрез ущелья.

Среди других наиболее значимых результатов, можно отметить, что для Киргизии был подкреплен ранее полученный вывод о более высоком, чем указывается на современных картах сейсмической опасности, уровне

сейсмичности Южного Прииссыккуля. Результаты анализа данных по археосейсмичности руин средневековых городов пустыни Негев (Израиль) свидетельствует в пользу возможности реализации здесь местной сейсмичности, а не только разрушений за счет удаленных землетрясений из района рифта Мертвого моря.

По результатам применения разработанных ранее методов за отчетный период в соавторстве опубликованы монография [2] и статьи [3-7, 17, 23, 25-28], а также сделаны доклады [30, 32, 39, 46].

2.5. Исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения

Детальная информация о типичном режиме подготовки и реализации редких сильных землетрясений может быть получена по результатам анализа сейсмического режима в обобщенной окрестности сильного землетрясения. Наиболее значительным результатом в этой области за отчетный период было выявление единообразия 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, что развитие такой аномалии указывает на (предположительно) очень сильную аномалию проницаемости в узкой окрестности главного события. Аномалию проницаемости естественно связать с резким ростом трещиноватости и разрушением 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. 5 представлена аномалия изменения средней глубины событий H в обобщенной окрестности сильного события. Соответствующее регрессионное соотношение имеет вид:

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

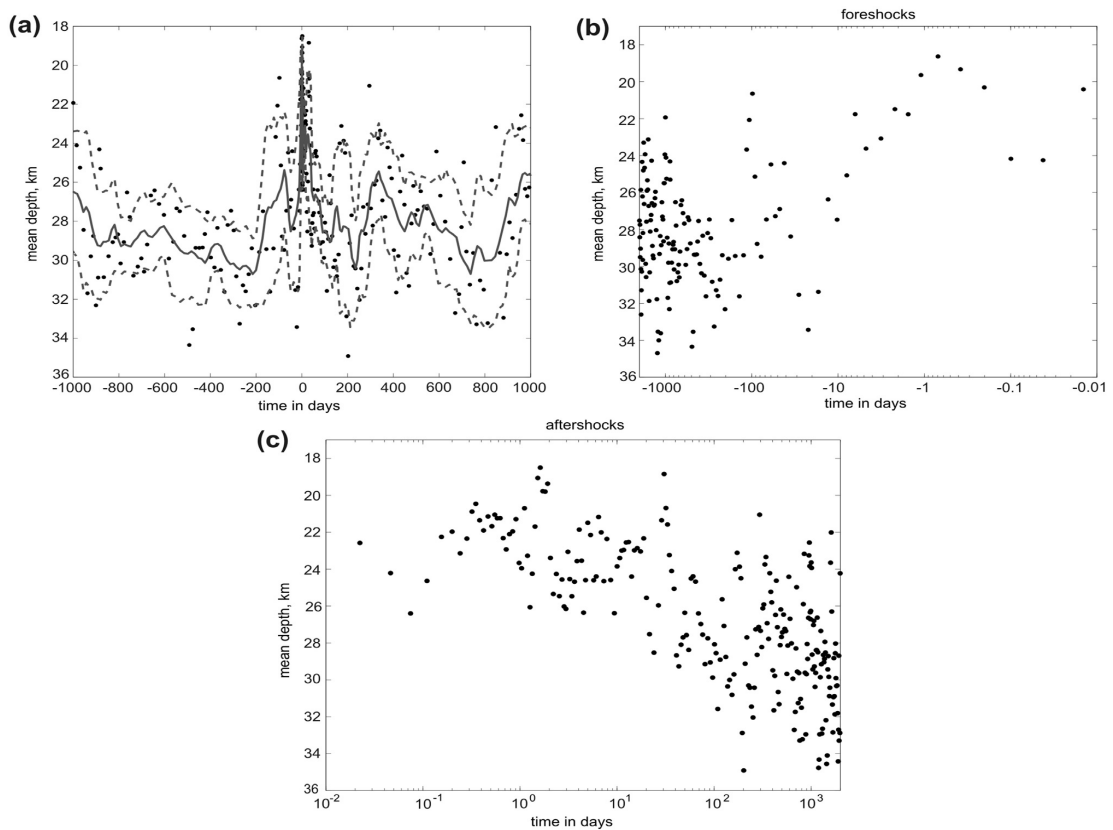


Рис. 5. Уменьшение средней глубины слабых землетрясений в обобщенной окрестности сильного землетрясения. Время до/после обобщенного основного события дано в линейной шкале (а) и в логарифмической, для форшоковой (б) и афтершоковой (в) области.

Интерпретация аномалии (б), кроме предположения о наличии в очаговой области флюида малой плотности, предполагает также и резкий рост проницаемости литосферы в пространственно-временной окрестности очага сильно землетрясения. В плане исследования этого вопроса были проведены работы по выявлению указаний на эпохи резкого роста проницаемости литосферы по геологическим, сейсмологическим и экспериментальным данным. Показано, что резкие всплески проницаемости выявляются по сейсмическим и петрологическим и геологическим данным, а также наблюдаются иногда в экспериментах, в последнем случае предположительно в связи с развитием метаморфических превращений.

В связи с большим числом единообразных по характеру проявления аномалий, выявленных в окрестности обобщенного сильного землетрясения, встает вопрос о выделении среди этих аномалий независимых аномалий и вторичных (зависимых) аномалий, предположительно связанных с иными аномалиями. Анализ характера аномалий и сравнение величин аномалий позволяет, по крайней мере в предварительном виде, выделить четыре аномалии как независимые. Это аномалии роста числа фор- и афтершоков, роста средней амплитуды землетрясений, роста согласованности ориентаций механизмов очагов землетрясений и аномалия уменьшения средней глубины землетрясений. Первая из этих аномалий растет по амплитуде к моменту обобщенного сильного землетрясения как логарифм интервала времени от момента обобщенного сильного события (по обобщенному закону Омори для афтершоков). Три другие аномалии растут по амплитуде к моменту главного события как минус логарифм времени от момента обобщенного главного события. Другие аномалии – уменьшение значений наклона графика повторяемости b -value, увеличение длительности сейсмического процесса τ и некоторые могут рассматриваться как следствие тенденции увеличения магнитуды землетрясений. Подчеркнем, что очевидный характер проявления краткосрочных аномалий в окрестности обобщенного сильного землетрясения с убедительностью свидетельствует о возможности такого прогноза.

Полученные результаты опубликованы в монографии [1] и статьях [9, 13], а также вошли в доклады [29, 33, 35, 37, 38, 44, 45].

2.6. Факторы сейсмичности, напряженное состояние и метаморфизм

Вопросы, рассмотренные в этом разделе, не были изначально предусмотрены в плане работ по теме, но получили развитие в ходе работ по выполнению темы, как подкрепляющие и дополняющие основное исследование.

2.6.1. Выявление тектонических проявлений слабых, но физически достоверно имеющих место напряжений.

Определяющими факторами сейсмичности и тектоники традиционно полагается напряженное состояние. При этом недостаточно изученным остается вопрос о роли в тектонике и сейсмичности напряжений, пусть и слабых, но физически достоверных. К таковым, в первую очередь, относятся напряжения, связанные со вращением Земли. Была рассмотрено воздействие напряжений, связанных с вращением Земли, на характер тектоники плит и сейсмичность. В результате, на основании анализа подборки данных [Jarrard, 1986], была показана статистическая связь порождаемых вращением Земли напряжений с характером тектоники плит (с конфигурацией плит, направлениями и скоростями их перемещений). Ранее другими авторами отмечалась связь характера сейсмичности с пространственным (широтным)

распределением числа землетрясений и с тенденциями изменений сейсмической активности во времени. Была показана статистически достоверная связь параметров тектоники плит с характером напряжений на вращающейся сфере.

По материалам этого направления работ была опубликована статья, с соавторами, занимающимися проблемами связи сейсмичности и вулканизма с вращением Земли [18].

2.6.2. Пример возможной определяющей роли уровня развития метаморфизма для возникновения сейсмичности

В ходе выполнения работ по теме выявилось уже отмеченное выше обстоятельство, что экспериментальные всплески проницаемости (предположительно) отвечают условиям развития в образцах метаморфических превращений. Естественно было рассмотреть, не выявляется ли подобная связь по сейсмическим данным (тем более что она вполне ожидаема, если исходить из флюидометаморфогенной модели сейсмогенеза [1]). В рамках таких представлений наличие соответствующего уровня напряжений не является достаточным условием для возникновения землетрясений, для возникновения землетрясений необходим также дополнительный фактор, например, реализация активных метаморфических превращений. Такое рассуждение, по-видимому, применимо для многих внутриконтинентальных областей, уровень напряжений в которых представляется выше, чем вблизи границ плит, а землетрясения часто отсутствуют. Отсутствие заметной сейсмичности объясняется при этом крайне низкой скоростью метаморфических превращений в стабильных тектонических условиях с крайне низкими скоростями изменения термодинамических условий [1].

Этот вопрос был дополнительно рассмотрен в связи с анализом характера сейсмичности океанической стороны зон субдукции. В результате рассмотрения был обоснован значительный сейсмический потенциал океанической плиты в районе глубоководных желобов, а также было показано, что в сейсмичности этой области наблюдается асейсмичный промежуток в области океанического склона глубоководного желоба при том, однако, что характер напряженного состояния, определяемый по механизмам очагов землетрясений единообразен на краях этой асейсмичной зоны. Как представляется, тем самым выявлен новый пример, когда наличие соответствующего уровня тектонических напряжений не является достаточным условием для возникновения землетрясений.

Результаты опубликованы в статье [14].

2.6.3. Проблема стационарности сейсмического режима

Обычно режим основных сейсмических событий полагается стационарным и отвечающим потоку независимых пуассоновских событий.

Однако, если сейсмичесность отвечает некоторому существенно неравновесному процессу, то скорее следует ожидать, что поток даже и основных событий не будет пуассоновским, а будет содержать некоторые макронеоднородности. Степень стационарности каталогов была исследована методами, предложенными соавторами из института прикладной математики им. Келдыша. На основании предварительного анализа было показано наличие значимых временных неоднородностей сейсмического режима разных характерных масштабов времени.

Результаты опубликованы в препринте [16].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по теме включали несколько направлений, в целом сконцентрированных на решении задачи более точной оценки сейсмической опасности и понимании физики процесса подготовки и реализации сильных землетрясений. Были использованы методы статистического описания хвоста функции распределения силы землетрясений на основе теории экстремальных значений, проведено моделирование сейсмического режима, в особенности режима возникновения сильных землетрясений, в рамках модели кумулятивного и линейного и нелинейного мультипликативного каскада, исследовалась и на многих примерах реализовывалась возможность квантификация землетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей. С целью более полного понимания физики сейсмического процесса и подготовки материалов для прогноза землетрясений исследовался сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения.

Основные полученные результаты включают:

- в плане использования аппарата предельных распределений теории экстремальных значений разработаны и реализованы методы более точного определения параметров модельных распределений для случая небольших массивов данных, когда известный классический метод максимального правдоподобия вследствие нехватки данных оказывается неоптимальным, а также разработаны подходы к существенному улучшению пространственного разрешения получаемых карт сейсмической опасности на основе использования предложенной новой двух-звенной модели графика повторяемости землетрясений;

- в плане использование каскадной модели выполнена интерпретация в рамках этой модели четырех типов поведения хвоста распределения сильных землетрясений, ранее выявленных по эмпирическим данным о сейсмичности Центральной Азии;

- в плане использования ранее предложенного метода оценки величин PGV при исторических, архео- палеоземлетрясениях осуществлено широкое применение этого метода несколькими группами исследователей (с участием руководителя темы), в результате чего были получены практически важные уточнения величин сейсмической опасности в ряде районов;

- в плане исследования сейсмического режима в обобщенной окрестности сильного землетрясения выявлена аномалия уменьшения средней глубины землетрясений в малой пространственно-временной окрестности сильного землетрясения, а также среди значительно числа ранее выявленных аномалий (часть из которых была обнаружена впервые) выделены четыре типа независимых аномалий; предложена предварительная физическая интерпретация выявленных эффектов, в частности, изменение глубины землетрясений может быть связано с присутствием в очаговой области флюида малой плотности и с резким ростом проницаемости литосферы в малой пространственно-временной окрестности сильных

землетрясений; наличие упомянутого эффекта роста проницаемости подкрепляется сравнением с экспериментальными и петрологическими данными.

За рассматриваемый период по результатам исследований в рамках темы опубликованы две монографии и 26 статей в рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях, а также сделано 19 докладов на международных и российских научных конференциях.

4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Монографии

2017

1. Родкин М.В., Рундквист Д.В. Геофлюидогеодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. М.: Издательский Дом «Интеллект», 2017, 285 с., ISBN 978-5-91559-240-6.

2018

2. Корженков А.М., С.В. Абдиева, А.Р. Агатова, ... М.В.Родкин, ... и др. Сильные исторические и палеоземлетрясения Прииссыккулья и их положение в структуре Северного Тянь-Шаня. Москва, ИФЗ РАН, 174 с., 2018.

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

2016

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/grb2016.4-4.
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.* *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.

2017

10. Pisarenko, V.F., and M.V.Rodkin, The estimation of probability of extreme events for small samples. *Pure Appl. Geophys.*, 2017, 174, 4: 1547-1560, doi:10.1007/s00024-017-1495-0.
11. Ngo Thi Lu, Rodkin M.V., Tran Viet Phuong, Phung Thi Thu Hang, Nguyen Quang, Vu Thi Hoan. Algorithm and program for earthquake prediction based on the geological, geophysical, geomorphological and seismic data. *Vietnam J. of Earth Sciences*, 2017, 38(3), 231-241.
12. Vu Thi Hoan, Ngo Thi Lu, Mikhail Rodkin, Nguyen Huu Tuyen, Phung Thi Thu Hang, and Tran Viet Phuong, Prediction of maximum earthquake magnitude for Northern Vietnam region based on GEV distribution. *Vietnam J. of Earth Sciences*, 2017, 38, 4: 339-344.
13. Родкин М. Прогноз землетрясений: крушение надежд? // *Наука и жизнь*, 2017, № 2. С.50-55.
14. Андреева М.Ю., Родкин М.В. К сеймотектонической обстановке на океанической стороне глубоководных желобов // *Тихоокеанская геология*, 2017, т.36, № 1. С.13–20.
15. Thi Lu Ngo, Родкин М.В., Viet Phuong Tran, Quang Nguyen, Thi Thu Hang Phung, Thi Hoan Vu Оценка сейсмической опасности северо-запада Вьетнама по комплексу геолого-геофизических данных с использованием оригинального программного пакета // *Вулканология и сейсмология*, 2017, № 2. С.68-76, doi:10.7868/S0203030617020067.
16. Блянкинштейн Н.И., Орлов Ю.Н., Родкин М.В., Федоров С.Л. Об оценке уровня стационарности каталогов землетрясений // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2017, № 40. С.1-18.

- 17.Шварев С.В., Родкин М.В. Структурная позиция и параметры палеоземлетрясений в районе горы Воттоваара (Средняя Карелия, восточная часть Фенноскандинавского щита) // Вопросы инженерной сейсмологии, 2017, т.44, № 2. С.35-60, doi:10.21455/VIS2017.2-3.
- 18.Левин Б.В., Родкин М.В., Сасорова Е.В. О воздействии вращения Земли на процесс субдукции // ДАН, 2017, т.476, № 3. С.343-346, doi:10.7868/S0869565217270214.
- 19.Родкин М.В., Писаренко В.Ф. Предельные распределения в сейсмологии – от теории к задаче общего сейсмического районирования // Научно-популярные статьи. Науки о Земле. М.: РФФИ, 2017. С.144-151.
- 20.Писаренко В.Ф., Родкин М.В., Рукавишникова Т.А. Оценка вероятности редких экстремальных событий для случая малых выборок, методика и примеры анализа каталога землетрясений // Физика Земли, 2017, № 6. С.3-17, doi:10.7868/S0002333717060047.
- 21.Шерман С.И., Родкин М.В., Горбунова Е.А. Тектонофизический анализ типов графиков повторяемости катастрофических землетрясений Центральной Азии // Вулканология и сейсмология, 2017, № 6. С.49-63.

2018

- 22.Писаренко В.Ф. О понятии вероятность. Вестник Российской академии наук, 2018, том 88, № 7, с. 1–6
- 23.Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В., Родкин М.В. Детальные палеосейсмогеологические исследования в бортовой зоне впадины оз. Имандра (Кольский регион): новые подходы и результаты // Геология и геофизика, 2018, т. 59, № 6, С.866-880, doi: 10.15372/GiG20180608.
- 24.Vu Thi Hoan, Ngo Thi Lu, Rodkin M. V., Nguyen Quang, Phan Thien Huong, Seismic activity characteristics in the East Sea area. Vietnam Journal of Earth Sciences, 2018, 40, 3: 240-252, doi:10.15625/0866-7187/40/3/12616.
- 25.Корженков,А.М., Р.Эрроусмит, К.Кросби, ... М.Родкин ... и др., Сильные палеоземлетрясения вдоль Аксуйского краевого разлома по материалам датирования смещенного террасового комплекса реки Чон-Аксуу, Северный Тянь-Шань // Физика Земли, 2018, № 2, С.64–80, doi:10.7868/S0002333718020060.
- 26.Shvarev,S.V., M.V.Rodkin, Structural Position and Parameters of the Paleoeearthquakes in the Area of Vottovaara Mountain (Middle Karelia, Eastern Part of the Fennoscandian Shield). Seismic Instruments, 2018, 54, 2: 199-218, doi:10.3103/S0747923918020093
- 27.Rodkin M.V., A.M. Korzhenkov, Estimation of maximum mass velocity from macroseismic data: A new method and application to

archeoseismological data, *Geodesy and Geodynamics* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.06.010>

28. Shvarev S.V., A.A. Nikonov, M.V. Rodkin, A.V. Poleshchuk. The active tectonics of the Vuoksi Fault Zone in the Karelian Isthmus: parameters of paleoearthquakes estimated from bedrock and softsediment deformation features. Advance online publication of the INQUA special issue of the *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 2018, 89-105.

Доклады на международных и российских научных конференциях
2016

29. 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).
30. 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.
31. 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.
32. 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. 186-187.

- 33.Родкин М.В. Новые данные о режиме сейсмичности в окрестности сильных землетрясений // Природные катастрофы. Изучение, мониторинг, прогноз. Южно-Сахалинск, 2016. С.71-75.
- 34.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.
- 35.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.
- 36.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 years of partnership between the Vietnam Academy of Science and Technology and the Russian Foundation for Basic Research. Hanoi, February 2016: 548-569.

2017

- 37.Родкин М.В., Жариков А.В., Лебедев Е.Б. Всплески проницаемости литосферы – сейсмические, экспериментальные и геологические свидетельства // IV-я Всероссийская конференция с международным участием «Триггерные эффекты в геосистемах», 6-9 июня 2017 г., Москва. Тезисы докладов. С.80-81.
- 38.Родкин М.В. Сейсмический режим в окрестности сильного землетрясения; приложения к физике очага и к прогнозу землетрясений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. VI научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 7 октября 2017 г., г. Петропавловск-Камчатский. Программа. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С.21.
- 39.Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. К проблеме оценки долгосрочной сейсмической опасности по макросейсмическим данным, пример Фенноскандинавского щита // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. VI научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 7 октября 2017 г., г. Петропавловск-Камчатский. Программа. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С.46.
- 40.Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Новый подход к оценке сейсмической опасности на основе использования предельных распределений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. VI научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 7 октября 2017 г., г. Петропавловск-

Камчатский. Программа. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С.45.

2018

41. Pisarenko V.F., and M.V.Rodkin, New approach to estimation of probability of rare extreme events for the case of small samples: Application to seismic zoning problem. 17th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, European Association of Geoscientists and Engineers (Kiev, Ukraine, 14-17 May 2019), 2018, doi: 10.3997/2214-4609.201801799
42. Родкин М.В., Ботвина Л.Р. Изменение характера распределения параметров опасных явлений как индикаторов вероятности сильной катастрофы. ГЕОРИСК 2018, X Международная научно-практическая конференция по проблемам снижения природных опасностей и рисков. «Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата». 2018, Т.1, 98-103.
43. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Модификация закона повторяемости землетрясений и перспективы ее применения для сейсмического районирования. ГЕОРИСК 2018, X Международная научно-практическая конференция по проблемам снижения природных опасностей и рисков. «Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата». 2018, Т.1, 209-213.
44. Жариков А.В., Лебедев Е.Б., Родкин М.В. Эпизоды лавинного роста проницаемости континентальной коры – эмпирические свидетельства и модель. 19-ая Международная конференция Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле, Материалы конференции. 2018, М., 124-127.
45. Rodkin M. Four independent anomalies from the generalized vicinity of a major earthquake. Book of Abstracts of the 36th General Assembly of the European Seismological Commission (2-7 September 2018, Valletta - Malta), ESC2018-S24-666, <https://drive.google.com/file/d/1PI3IMFHJuA1Wv5LHhNMpSw4I2yQm3nBk/view>
46. Rodkin M., Shvarev S. Problem of a level of recent long-term seismicity of Fennoscandia. Book of Abstracts of the 36th General Assembly of the European Seismological Commission (2-7 September 2018, Valletta - Malta), ESC2018-S22-686, <https://drive.google.com/file/d/1PI3IMFHJuA1Wv5LHhNMpSw4I2yQm3nBk/view>
47. Rodkin M., Pisarenko V. New approach to the general seismic zoning problem based on the theory of extreme values. Book of Abstracts of the 36th General Assembly of the European Seismological Commission (2-7

September 2018, Valletta - Malta), ESC2018-S41-331,
<https://drive.google.com/file/d/1PI3lMFHJuA1Wv5LHhNMpSw4I2yQm3nBk/view>