

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. № 2018-3



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

Доктор физ.-мат. наук

 А.И.Горшков

«29» *сентября* 2018 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
(промежуточный, за 2017 год)

Заведующий лабораторией теории
прогноза землетрясений
чл.-корр. РАН



А.А. Соловьев

Москва 2018

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 ИТПЗ РАН заверяю.
Ученый секретарь ИТПЗ РАН, к. ф.-м. н.



А.К. Некрасова

РЕФЕРАТ

Отчет 26 с., 6 рис., 1 табл., 19 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 2017 году представляли собой логическое продолжение исследований по теме. Исследования включали следующие отдельные направления работ: 1) разработку методики получения максимально точных значений параметров предельных GEV и GPD распределений теории экстремальных значений с целью разработки методов перехода на пространственный масштаб, применяемый при построении карт ОСР; 2) оценку параметров предельных распределений для сейсмического режима в различных сеймотектонических условиях с целью получения робастных решений, которые могли бы быть в дальнейшем использованы для расчета сейсмической опасности в масштабе карт ОСР; 3) описание эмпирически выявленных типов формы хвоста функции распределения сильных землетрясений в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада с целью исследования долгосрочной сейсмической опасности; 4) уточнение методов оценки параметров сильнейших палеоземлетрясений по полевым наблюдениям с целью использование этой информации для оценки долгосрочной сейсмической опасности. Указанные направления работы отражены в прилагаемом отчете, при этом особо отметим взаимодополняющий характер результатов, получаемых по перечисленным разным направлениям работ, все из которых нацелены на оценку сейсмической опасности от редких сильнейших землетрясений (методики обычно приложимы и для анализа иных типов сильнейших воздействий).

СОДЕРЖАНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	4
1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Обзор направлений работ и постановки задач	7
2.2. Методика оценивания параметров предельных распределений теории экстремальных значений в масштабе карт ОСР	9
2.3. Интерпретация разнообразия поведения хвоста закона повторяемости землетрясений в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК)	11
2.4. Новые результаты квантификации землетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей	15
2.5. Режим развития фор- и афтершоковых аномалий –результаты исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения	17
2.6. Проблема различения фоновой и вызванной сейсмичности и сейсмической опасности от афтершоков	19
2.7. Связь режима субдукции с вращением Земли	19
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	24
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	25

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования по указанной 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.

Исследования по проекту относятся к решению единой общей задачи - оценке долгосрочной сейсмической опасности. При этом к решению этой задачи мы подходим разными возможными способами, что позволяет дополнительно верифицировать получаемые результаты и получать более точную общую картину. 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 широкое развитие получили исследования по расчету текущей сейсмической опасности в рамках различного рода статистических моделей. Наиболее распространенной такой моделью является эпидемическая модель сейсмического режима - ETAS. В этой модели сейсмический процесс задается суммой фонового режима и множества связанных событий от всех недавно произошедших событий заметной магнитуды. Отсюда встает и задача разделения фоновой и вызванной сейсмичности (в первую очередь - афтершоков). Изменения интенсивности потока событий используется затем для текущего статистического прогноза сейсмической опасности. Данный подход не дает, однако, оценок поведения хвоста закона повторяемости землетрясений, где сконцентрированы сильнейшие события, ответственные за основную долю ущерба.

Данный проект 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, методы разделения фоновой и вызванной сейсмичности, 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 оригинальных новых подходов: 1) теории экстремальных значений и предельных распределений; 2) модели мультипликативного нелинейного каскада; 3) новых результатов по оцениванию пиковых величин скоростей движения грунта по данным полевых макросейсмических наблюдений; 4) разработке методов получения оценок сейсмической опасности на теоретически надежной основе методов теории экстремальных

значений на локальном пространственном масштабе, типичном для карт ОСР; 5) новых подходов к разделению фоновой и вызванной сейсмичности (афтершоки, рои землетрясений).

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Обзор направлений работ и постановки задач

Ключевой нерешенной на настоящий момент проблемой при оценке сейсмической опасности является задача расчета долгосрочной сейсмической опасности редких экстремально сильных 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 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. 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 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 и специальных программных комплексов, позволяющих быстро проигрывать различные варианты решения задачи. Примером такого подхода является оценка сейсмической опасности для северо-запада Вьетнама с участием руководителя данного отчета [3, 4]. В целом, полученные этим 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 в меньшей степени используют геологические и тектонические данные и имеют меньшую историю применения. Эти подходы (в рамках данной темы) базируются на теории экстремальных значений, на модели описания сейсмического режима в рамках нелинейного мультипликативного каскада и на макросейсмических данных, позволяющих (в определенных условиях) получать оценки максимальных локальных сейсмических воздействий за длительный срок (тысячи лет). Охарактеризуем вкратце эти подходы.

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 будущей интервал времени. В плане обсуждения результативности 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 (см., например, [13]).

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 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*, *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 характеризовать уровень долгосрочной сейсмической опасности достаточно определенно. Данное направление работ достаточно подробно было описано в отчете за 2016 год, вряд ли стоит повторять это описание и в данном отчете. За отчетный период по данному направлению работ опубликованы и приняты к печати 2 публикации, касающиеся палеосейсмической активности Восточной Фенноскандии [10, 11].

Общие качественные закономерности возможных режимов реализации редких сильнейших землетрясений могут быть исследованы в рамках модели

мультипликативного каскада. Новые результаты, полученные по этому направлению работ представлены ниже. Результаты опубликованы в [14].

Легко видеть, что указанные направления работ позволяют трактовать задачу оценки долгосрочной сейсмической опасности с взаимодополняющих позиций. Ниже представлены результаты, полученные за отчетный период по указанным направлениям работ.

Решение вопросов обзора проблемы и постановка и очередности решаемых задач, в том числе и вычислительных по оценке сейсмической опасности, невозможны без определенного анализа физического аспекта проблемы, в частности вопросов физики очага, прогнозируемости землетрясений и специфики свойств вещества очаговых зон сильных землетрясений. В целом, основные результаты, полученные при исследованиях в этих направлениях, опубликованы в работах [1, 3-8, 12] и представлены в докладах [16, 17]. Несколько в стороне стоит публикация [15], в которой наработки по статистике землетрясений были применены для анализа статистики морских подводных гор, полагаемых обычно вулканическими образованиями.

2.2. Методика оценивания параметров предельных распределений теории экстремальных значений в масштабе карт ОСР

Более детально методика расчетов сейсмической опасности на основе теории экстремальных значений была дана в отчете за 2016 год. Здесь она представлена максимально кратко. Сложность оценки опасности редких экстремальных событий (в частности, землетрясений) связана с 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. Однако веские аргументы в пользу того или иного выбора «истинного» закона распределения 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.

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. 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. 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.

За 2017 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 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 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, зон субдукции и областей внутриконтинентальной сейсмичности. Отсюда следует 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, при этом полученные для этих зон типовые значения параметров GEV и GPD предельных распределений могут быть (по-видимому) использованы для математически корректных расчетов сейсмической опасности в масштабе карт ОСР.

Результаты, приведенные в данном разделе, опубликованы в работах [2, 4, 12, 13] и вошли в доклад [19].

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

Ранее (в 2016 г.) были разработаны модельные представления о возможных в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК) типах поведения хвоста закона повторяемости землетрясений. В заключении раздела отчета указывалось, что этот материал войдет в готовящуюся публикацию по сейсмичности Центральной Азии и будет использован для анализа эмпирических данных о сильной сейсмичности Центральной Азии за длительный (100 - 200 лет) период времени. Полученные результаты опубликованы в работе [14]. Ниже кратко приведены основные полученные новые результаты.

Работа основывалась на эмпирических данных о вариативности поведения графика повторяемости сильных землетрясений в зонах влияния основных региональных сейсмоактивных разломов Центральной Азии. Выбор региона обусловлен тем, что исследуемый район (рис.1) является уникальным районом на Земле, где во внутриплитной области реализуются сильнейшие (в отдельных случаях с магнитудой $M > 8.0$) землетрясения. Другой важной особенностью первичного анализа эмпирического материала являлось то, что анализировалось поведение графика повторяемости в зонах влияния крупнейших сейсмоактивных региональных разломов. 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.

В результате такого подхода были выделены 4 типа поведения хвоста закона повторяемости землетрясений (рис. 2), именно такие типы формы графика повторяемости устойчиво повторяются для разных разломных зон исследуемого региона.

Важно, что приведенные на рис. 2 типы поведения хвоста закона повторяемости землетрясений находят естественную интерпретацию в рамках нелинейного мультипликативного каскада. Общие требования к модели НМК состоят в том, что модель (кроме обычного закона повторяемости Гутенберга-Рихтера и эффекта уменьшения наклона графика повторяемости в области реализации сильных землетрясений) 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 весьма сильных, но не экстремально сильных землетрясений).

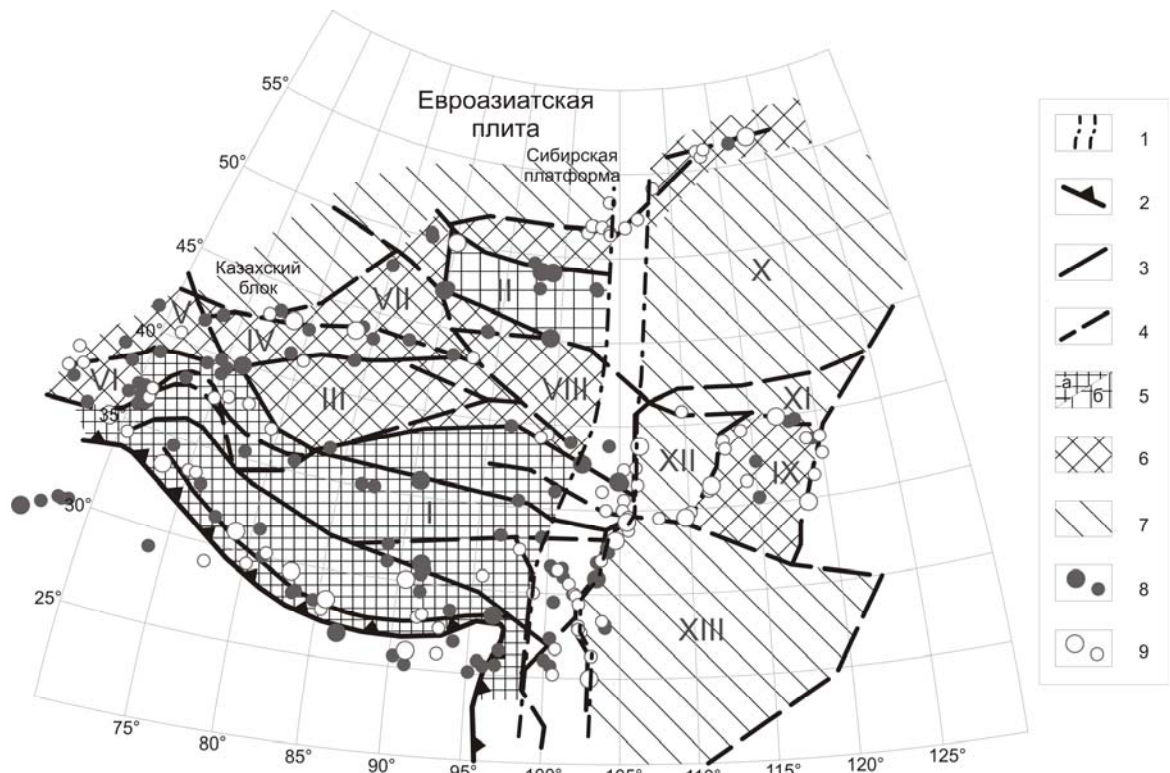


Рисунок 1. Карта блоковых структур и активных разломов Центральной Азии, контролирующих сильные современные и исторические землетрясения с $M \geq 8$ и $7 \leq M < 8$. Составлена с частичным использованием материалов статьи (Wang Hui, Liu Mian, Cao Jianling, Shen Xuhui, and Zhang Guomin, *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**, B02405).

Условные обозначения:

1 – глобальная трансрегиональная пограничная структура с переходным строением, прослеживающаяся до глубин в 600 км (Sherman, Ma Jin, Gorbunova, 2015); 2 – Гималайский надвиг; 3 – активные разломы, в областях динамического влияния которых в последнее столетие (1900 -2014 гг.) произошли сейсмические события с $M \geq 8$; 4 - активные разломы, в области динамического влияния которых в последнее столетие (1900-2014 гг.) произошли сейсмические события с $7 \leq M < 8$; 5а – активные блоки литосферы, с утолщенной земной корой (>40 км) и квазивязким течением материала; 5б – активный блок литосферы с высокоамплитудными смещениями по пограничным разломам; 6 – активные блоки с разломами, контролирующими сейсмические события с $M \geq 7$; 7 – блоки с редкой рассеянной сейсмичностью и асейсмичные; 8 – эпицентры землетрясений с $M \geq 8$ и $7 \leq M < 8$ соответственно, произошедшие в последнее столетие (1900-2014 гг.); 9 - эпицентры землетрясений с $M \geq 8$ и $7 \leq M < 8$ соответственно, произошедшие в предшествовавшее столетие (1800-1899 гг.);

Римскими цифрами обозначены блоки, образующие геодинамические зоны: Центральная зона (I – Тибетский; II – Гобийский; III – Таримский; IV – Тянь-Шаньский; VII – Джунгарский; VIII – Алаксанский (Alaxan)); Западная зона (V – Туранский; VI – Таджикский;) Восточная зона (IX – Восточно-ордосский (состоящий из блоков Taihang, Huaihe и North China Plain); X – западная

часть Амурского блока; XI – Северо-Китайский блок (Yan Shan); XII–Ордосский блок; XIII – Южно-Китайский блок).

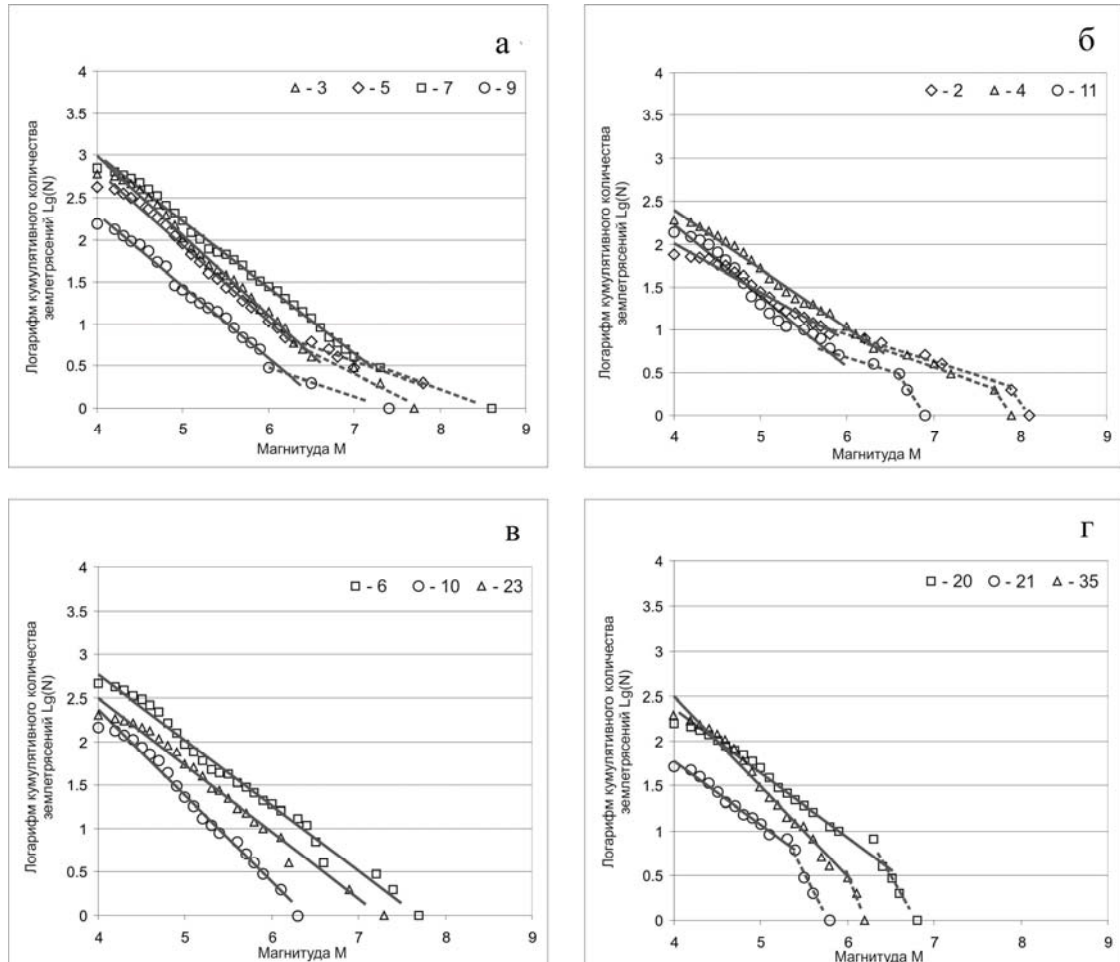


Рисунок 2. Четыре типа поведения графиков повторяемости землетрясений в областях влияния основных сейсмоактивных разломов

Приведенные требования легко удовлетворяются в рамках МНМК модели и при этом описывают эмпирические тенденции, отраженные на рис. 1 и 2. Действительно, согласно МНМК модели, простейший вариант, обеспечивающий как конечность сейсмической энергии, так и существование эффекта характеристических землетрясений, имеет вид:

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

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 .

На графиках с первым типом хвоста распределения (рис. 2а) в его основной части реализуется обычный закон Гутенберга-Рихтера, а в правом хвосте распределения отражается эффект возникновения аномально сильных, характеристических, землетрясений. Они соответствуют участку с уменьшением угла наклона графиков повторяемости землетрясений. Таким образом, основное соотношение (1) для графиков с первым 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 (1), 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

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

Можно предположить, что второе слагаемое в соотношении (2) 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.

В целом получаем, что четыре наблюдаемых 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 столетнего интервала, 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 Типизация поведения хвоста графиков повторяемости землетрясений

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

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

Выше отмечалась необходимость использования данных для исторических, архео- и палеоземлетрясений 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. 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 году эти методики были применены к исследованию ряда объектов на территории Российской Федерации и в Киргизии. Данный подход является существенно новым (хотя уже и использованном в более десяти публикаций), поэтому повторим, отчасти, кусок отчета за 2016 год.

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 горизонтальной поверхности с трением используется уравнение баланса энергии

$$mV^2/2 = m \cdot g \cdot k \cdot L, \quad (3)$$

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 (3), 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 .

Данная методика применена для параметризации сильных палеоземлетрясений в Восточной Фенноскандии [9, 10]. В этих работах детально описаны два ключевых участка, где оценки величин PGV

подкрепляются данными о деформациях в рыхлых породах и возрастом слоев деформаций [9]. 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 ущелья находится в непосредственной близости.

На рис. 3 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.

Результаты, приведенные в данном разделе, опубликованы в статьях [9, 10] и вошли в доклад [18].

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

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 по данному направлению новых публикаций не было. Получены уточненные результаты по характеру сейсмического режима в обобщенной окрестности сильного землетрясения. Данные результаты указывают на важность нормировки параметров землетрясений на величину сейсмического момента, точнее на кубический корень из этой величины. Значительное число аномалий просто оказывается связанными с тем обстоятельством, что в преддверии и в окрестности сильного землетрясения увеличивается средняя величина сейсмического момента. Здесь стоит подчеркнуть, что прогнозный признак в этом случае принимает характер тавтологии: «прогнозным признаком роста вероятности сильного землетрясения является увеличение средней силы (сейсмического момента) землетрясений». Такой прогнозный признак логически представляется практически безупречным; физический смысл его, однако, остается не ясным.

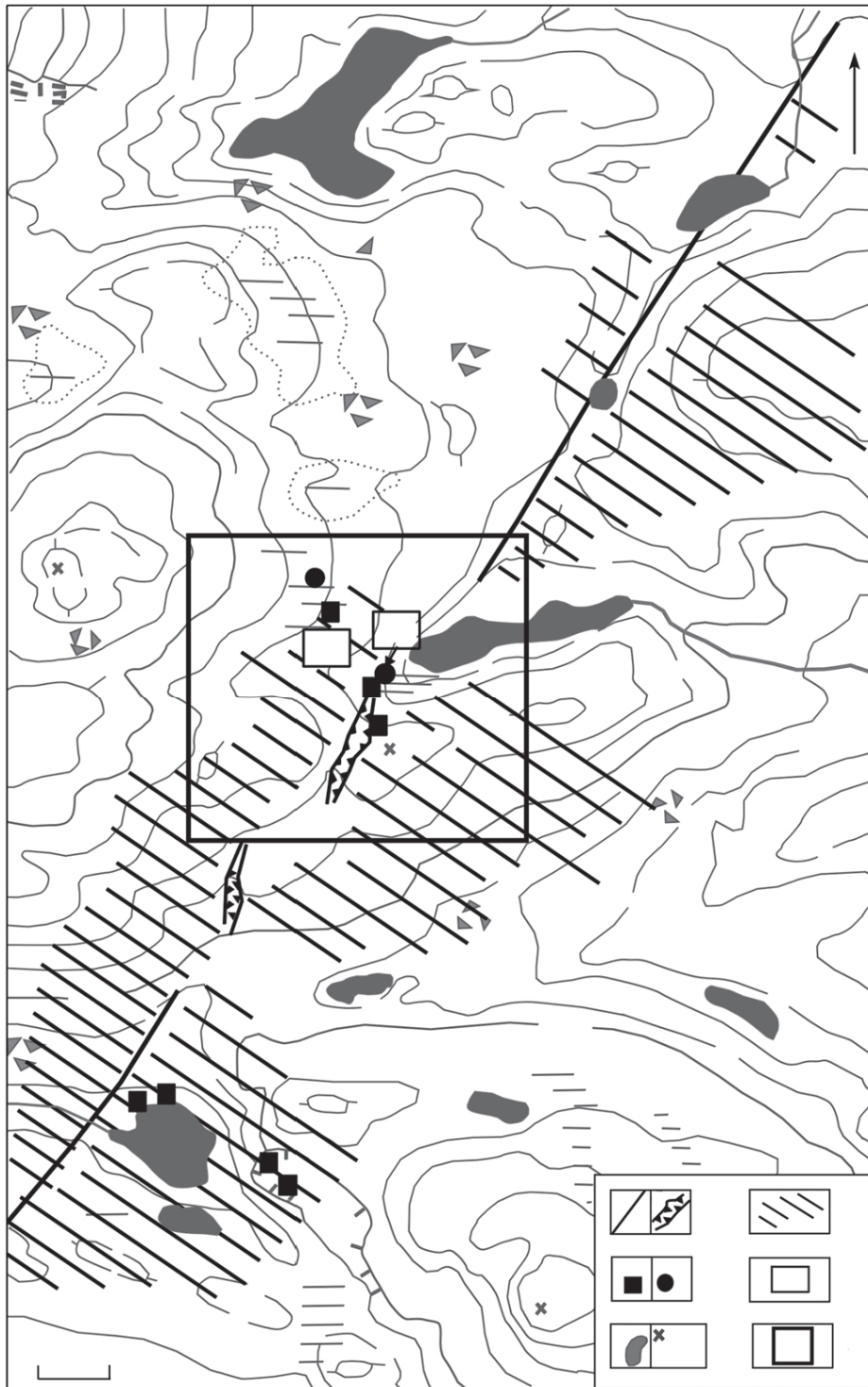


Рисунок 3. Схема строения зоны сейсмотектонических нарушений. 1 – новейшие сдвиги и разломы с неустановленным типом смещений (а), трещины-ущелья со взбросо-сдвиговой кинематикой движения (б); 2 – участки развития вторичных нарушений рельефа; 3 – шурфы (а), скважины (б); 4 – радиоуглеродный возраст, тыс. лет; 5 – озерные котловины (а), высотные отметки рельефа (б); 6 – местоположение рис. 3. Горизонтали рельефа проведены через 20м.

2.6. Проблема различения фоновой и вызванной сейсмичности и сейсмической опасности от афтершоков

К проблеме сейсмической опасности примыкает вопрос оценки опасности афтершоков. Здесь следует иметь в виду и ту особенность анализируемых данных, что ущерб от сильнейших землетрясений, в большинстве случаев, не диверсифицируется на ущерб от главного события и на ущерб от афтершоков. А вредное воздействие афтершоков в среднем выше, чем воздействие фоновых событий аналогичной магнитуды. Такая повышенная опасность афтершоков обусловлена тем, что они воздействуют на уже поврежденную инфраструктуру и зачастую сильно затрудняют проведение спасательных работ, значительно увеличивая тем самым величины ущерба.

По данному направлению работ получены некоторые предварительные результаты. Так было показано, что известный закон Ботта о том, что величина сильнейшего афтершока более чем на единицу магнитуды превышает магнитуду основного толчка, не вполне правилен. Достаточно часто наблюдаются существенно более сильные афтершоки, чем можно ожидать исходя из закона Ботта.

Если закон спадания числа афтершоков от момента основного события (модернизированный закон Омори) достаточно хорошо известен, то закон спадания числа афтершоков с расстоянием от главного толчка остается в значительной степени дискуссионным. Известно (Zaliapin, I., A. Gabrielov, H. Wong, and V. Keilis-Borok, Clustering analysis of seismicity and aftershock identification, *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**: 018501), что в координатах нормированного расстояния и времени до ближайшего землетрясения множества фоновых независимых землетрясений и множество афтершоков дает две частично перекрывающиеся области. Учитывая это обстоятельство, была поставлена расчетная задача, при каком законе убывания числа афтершоков с расстоянием от главного события, эти две области различаются наиболее четко. Полученная таким образом закономерность уменьшения числа афтершоков с нормированным расстоянием в некотором смысле могла бы рассматриваться в качестве претендента на истинный закон уменьшения числа афтершоков с расстоянием до главного события.

2.7. Связь режима субдукции с вращением Земли

Известно, что вращение Земли определяет направление закручивания атмосферных вихрей и сильно влияет на характер океанических течений. Это влияние определяется силой Кориолиса. Сила Кориолиса F , действующая на тело, перемещающееся со скоростью v относительно неинерциальной системы отсчета вращающейся с угловой скоростью ω задается векторным произведением векторов v и ω на удвоенную массу тела. Оказывает ли сила Кориолиса существенное воздействие на характер течения или нет определяется величиной числа Россби. Для скорости конвективных движений

мантии и для перемещений литосферных плит, можно принять характерные величины скорости и пространственного масштаба $U \approx 10$ см/год и $L \approx 1000$ км, тогда величина числа Россби $Ro \approx 10^{-10}$, т.е., этот параметр весьма мал, и силы инерции должны существенным образом влиять на характере движений. Отсюда следует, в частности, что можно ожидать, что будет выполняться известное в гидродинамике правило Тейлора-Праудмена, которое гласит: «Если число Россби мало и трением можно пренебречь, то течение несжимаемой жидкости происходит в плоскостях перпендикулярных вектору вращения». Естественно, при тепловой конвекции и движении литосферных плит трением пренебречь нельзя, и мантия Земли не несжимаемая жидкость, но можно полагать, что тенденция концентрации движения в плоскостях перпендикулярных вектору вращения будет наблюдаться.

Предпринята попытка выявить и проинтерпретировать связанные с вращением Земли особенности параметров зон субдукции на основе данных, представленных в статье (Jarrard, R.D. Relations among subduction parameters. *Rev. Geophys.*, 1986, 24, 2: 217-284). Эта объемная статья содержит наиболее полный и единообразный набор значений параметров для разных зон субдукции, обсуждение этих параметров и интерпретацию связывающих их эмпирических регрессионных соотношений, а также выделение и характеристику 39 зон субдукции, что допускает определенную статистическую обработку данных. Естественно, данное (и любое другое) разбиение совокупности зон субдукции на отдельные зоны, характеризующиеся разными параметрами, не лишено субъективизма. Не ясно, например, на сколько зон и как разбивать протяженную, но относительно однородную зону субдукции, падающую под Южную Америку. Однако подобных участков не много, и возможные различия в их разбиении не сказываются существенным образом на результатах статистического анализа. Не по всем зонам субдукции в указанной статье приведены все параметры, а некоторые параметры зон субдукции даны в нескольких (обычно близких по значению) вариантах. Для целей данной работы эти различия несущественны.

В плане анализа возможной роли вращения Земли естественно, прежде всего, проверить, зависимость числа зон и их скорости субдукции от азимута падения зоны (по или против вращения Земли). Поясним понятие азимута падения зоны субдукции примерами: Марианская зона, падает почти точно на запад, под азимутом 270° , Алеутская зона субдукции падает на север, с азимутом 0° . Показано, что распределение числа зон субдукции в зависимости от их азимута падения существенно неравномерно (рис. 4). Зоны субдукции определенно тяготеют к азимутам субширотной ориентации, с четким минимумом числа зон с субмеридиональными азимутами падения. Так только одна зона субдукции приходится на интервал азимутов от 110 до 240 градусов (в диапазоне $180 \pm 60^\circ$), и нет зон субдукции с азимутами падения $340-360^\circ$. Такая тенденция хорошо отвечает упомянутому выше правилу Тейлора-Праудмена, что движения должны протекать в плоскостях

перпендикулярных вектору вращения, то есть иметь преимущественно субширотную направленность.

Учитывая выявленную особенность движений литосферных плит, резонно рассматривать два их подмножества, с падением по направлению вращения Земли - на восток, и против вращения - на запад. Сила Кориолиса оказывает существенно различное воздействие на движение плит в этих направлениях. В качестве примера рассмотрим наиболее простой случай погружения плиты по и против вращения Земли в экваториальной плоскости. При погружении плиты по направлению вращения на плиту будет действовать дополнительная сила инерции, стремящаяся продвинуть плиту далее на восток. Противоположно направленная сила возникает при погружении плиты в западном направлении. На рис. 5 приведены данные о величинах угла наклона зон субдукции (в диапазоне глубин 150-400 км) в зависимости от азимута падения зоны субдукции. Видно, что малые углы наклона встречаются почти исключительно у падающих на восток зон субдукции. И наоборот, плотная группа с углами падения более 50° характерна для зон субдукции с падением на запад. Статистический анализ ситуации численным бутстреп методом (Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. М.: Финансы и статистика, 1988. 264 с.) подтверждает значимость выявленного различия на уровне 95%.

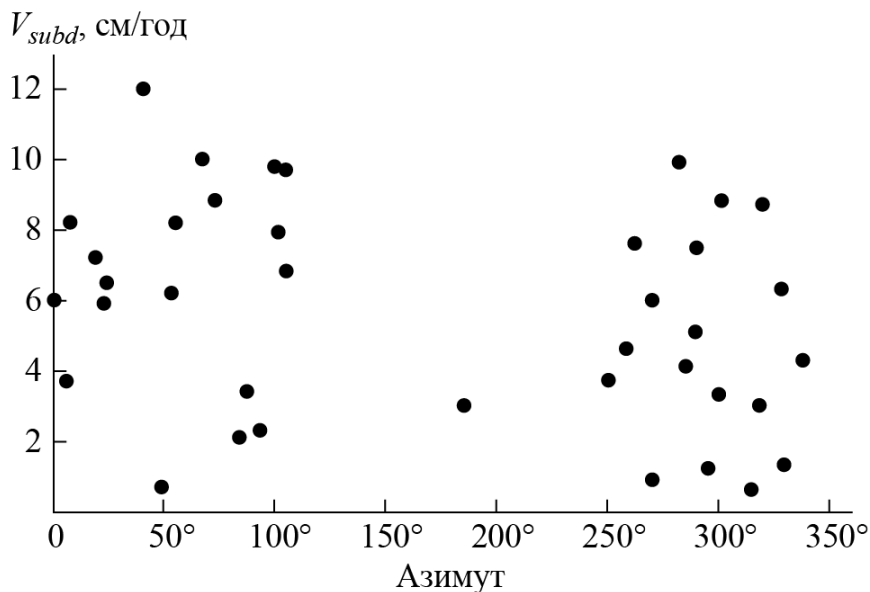


Рисунок 4. Значения азимутов падения и скоростей субдукции (V_{subd}) для различных зон субдукции. Видна неравномерность распределения, объясняемая вращением Земли.

Можно видеть также, что при движении вдоль экватора сила Кориолиса будет дополнительно как бы увеличивать вес погружающихся плит при их погружении на восток, и уменьшать - при погружении на запад. На рис.6 видно, что для зон субдукции с падением на запад характерны

большие средние значения возраста плиты; соответственно на запад погружаются плиты большей средней плотности. Можно предположить, что большая плотность вещества плит компенсирует некоторое уменьшение их веса под воздействием силы Кориолиса. Сделанное замечание находит и дополнительное подкрепление.

Как можно видеть на рис. 4, для плит, погружающихся на восток, по направлению вращения Земли, в целом характерны несколько более высокие средние скорости субдукции, чем для плит, погружающихся в западных азимутах. Такая тенденция может объясняться действием отмеченной выше силы инерции, увеличивающей вес плит, погружающихся на восток и стремящейся дальше на восток продвинуть плиты погружающиеся в этом направлении.

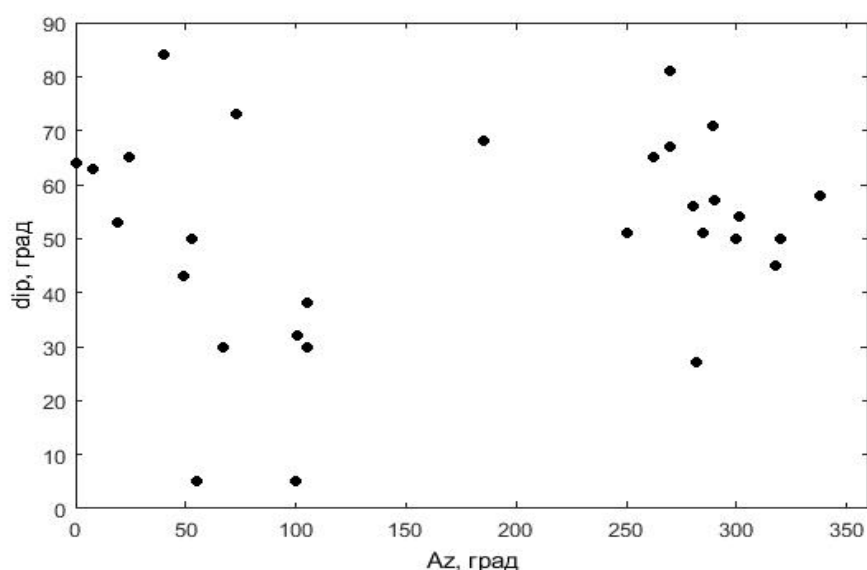


Рисунок 5. Угол погружения плиты в средней части (150-400 км) в зависимости от азимута. Зоны Бенъофа погружающиеся на восток бывают с малым углом наклона, на запад (кроме одной зоны) - все крутые.

Из вышесказанного видно, что воздействие инерционных сил, порождаемых вращением Земли на характер процессов субдукции, а, предположительно, также и процессов мантийной конвекции, довольно значительно. Благодаря действиям силы Кориолиса во вращающейся Земле, преимущество получают субширотные направления движения, а субмеридиональные имеют тенденцию к вырождению. Такое предположение подкрепляется и преимущественно субмеридиональной ориентацией сегментов системы срединно-океанических рифтов. Движения в конвективных валах, соответствующих такой ориентации зон СОХ будут преимущественно субширотны. Ранее авторы получили ряд закономерностей связи современного сейсмического режима с вращением Земли (Sasorova, E.V., B.W. Levin, and M.V. Rodkin, A common feature in latitudinal dependence of different geophysical processes occurring on the rotating Earth. *Adv. Geosci.*, 2013, **35**: 15-21), в новой работе показано, что связь между

процессом субдукции и вращением остается значимой и на много больших интервалах времени, отвечающих геологической эволюции зон субдукции.

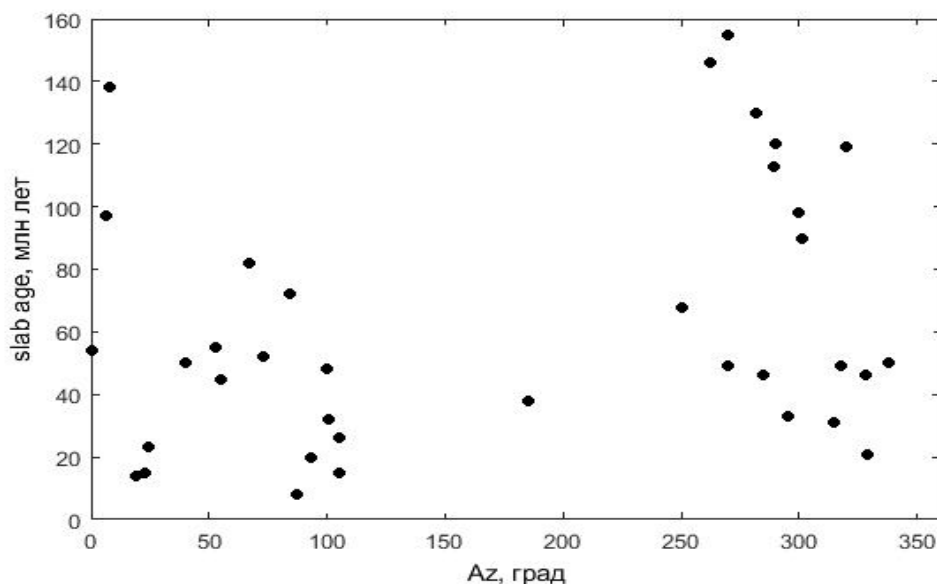


Рисунок 6. Возраст погружающихся плит в зависимости от азимута падения зоны субдукции. На восток в среднем погружаются более молодые (более легкие) плиты. На запад – более старые (более тяжелые) плиты.

Выявленные закономерности, в своем большинстве, значимы на уровне 95%. Это относительно невысокая значимость, каждый 20-й раз такой результат может наблюдаться совершенно случайно. Однако этих тенденций несколько, они хорошо согласуются между собой и при этом отвечают теоретически ожидаемым закономерностям. В совокупности это позволяет отнести к полученному результату как к вполне надежному. Тем самым продемонстрировано сильное влияние вращения Земли на характер конвекции в мантии и на складывающуюся структуру зон субдукции и литосферных плит.

Результаты опубликованы в работе [11].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по теме за отчетный период (2017 год) включали широкий набор исследований, в целом направленных на решение задачи более точной оценки сейсмической опасности. Используются методы: статистического описания хвоста функции распределения силы землетрясений на основе теории экстремальных значений, моделирование сейсмического режима в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК), квантификация землетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей (с целью пополнения и уточнения параметров палеоземлетрясений), исследование сейсмического режима в обобщенной окрестности сильного землетрясения (с целью уточнения режима сильных землетрясений, физики процесса сейсмичности, а также уточнения и выявления новых предвестников), исследование режима афтершоков и порождаемых ими сейсмической опасности.

По результатам выполненных в 2017 году исследований опубликованы 1 монография, 12 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных изданиях, 1 препринт, а также сделаны 5 докладов на международных и российских научных конференциях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Монография

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.

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Родкин М. Прогноз землетрясений: крушение надежд? // Наука и жизнь, 2017, № 2. С.50-55.
6. Андреева М.Ю., Родкин М.В. К сеймотектонической обстановке на океанической стороне глубоководных желобов // Тихоокеанская геология, 2017, т.36, № 1. С.13–20.
7. 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](https://doi.org/10.7868/S0203030617020067).
8. 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.
9. Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В., Родкин М.В. Детальные палеосейсмологические исследования в ботовой зоне впадины оз.Имандра (Кольский полуостров): новые подход и результаты // Геология и геофизика, 2017 (в печати).
10. 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.
11. 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.

12. 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.
13. 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](https://doi.org/10.7868/S0002333717060047).
14. 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.

Доклады на международных и российских научных конференциях

15. Родкин М.В., Мирлин Е.Г., Миронов Ю.В., Чесалова Е.И. Подводные горы северо-западной части Тихого океана: статистика, проблемы генезиса. Тектоника современных и древних океанов и их окраин // Материалы 49 Тектонического совещания, т.2, 2017. С.143-146.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.