

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 01201281968
Инв. № 2016-3



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТПЗ РАН
член-корреспондент РАН
А.А.Соловьев
«21» января 2016 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ

РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ПОЛУЧЕНИЮ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ОПАСНОСТИ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕОРЕМ ТЕОРИИ
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ, КАСКАДНЫХ МОДЕЛЕЙ И
КОМПЛЕКСА ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО
РЕЖИМА В ОБОБЩЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ СИЛЬНОГО СОБЫТИЯ
(годовой, за 2015 год)

Заведующий лабораторией № 1
канд. техн. наук

И.В. Кузнецов

Москва 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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



М.В. Родкин

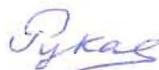
Ответственные исполнители:

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук



В.Ф. Писаренко

науч. сотр.



Т.А. Рукавишникова

РЕФЕРАТ

Отчет 27 с., 7 рисунков, 13 источников

ПРОГНОЗ ДОЛГОСРОЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ,
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОВЕДЕНИЯ ХВОСТА ФУНКЦИИ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ПАРАМЕТРЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ,
ОБОБЩЕННАЯ ОКРЕСТНОСТЬ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Работы по теме в 2015 году включали продолжение 1) разработки методики получения параметров предельных распределений теории экстремальных значений с учетом неоднородности представительности каталога (нестационарности исходных данных, включающих результаты инструментальных наблюдений и данные по историческим и палеоземлетрясениям); 2) разработки методики оценивания величины максимального события в течение будущего интервала времени T на основе методов теории экстремальных значений; 3) сравнение различных методов статистического оценивания временных рядов сейсмических данных; 4) сопоставление результатов описания хвоста функции распределения методом использования теории экстремальных значений и в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада; 5) интерпретацию эмпирических данных о присутствии/отсутствии характеристических землетрясений в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада; 6) получение новых прогнозных признаков на основе анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения 7) разработка полевых методов оценки параметров сильнейших палеоземлетрясений. Все эти направления работы отражены в предлагаемом отчете, при этом особо отметим взаимодополняющий характер результатов, получаемых по этим разным направлениям работы.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	6
2.1. Методики оценивания параметров предельных распределений теории экстремальных значений с учетом нестационарности ряда данных	6
2.2. Моделирование сейсмического режима в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК)	7
2.3. Опыт квантификации землетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей по данным для районов двух сильных землетрясений Киргизии	15
2.4. Результаты исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения	23
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	25
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	26

1. ВВЕДЕНИЕ

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

Исследования опасности землетрясений сильно осложнено тем, что развитой физической модели, позволяющей описывать процесс подготовки и реализации сильного землетрясения на настоящий момент не существует. Отсюда, в последние годы развитие получили исследования по расчету текущей сейсмической опасности в рамках статистической модели ETAS. В этой модели сейсмический процесс задается суммой фонового режима и множества связанных событий от всех недавно произошедших событий заметной магнитуды. Эти события трактуются как порождающие афтершоковые изменения в интенсивности сейсмического режима. Получаемая модель изменений интенсивности потока событий используется затем для статистического прогноза сейсмической опасности. Данный подход не дает, однако, достаточно точных оценок текущей сейсмической опасности. Тем более он не дает оценок максимальных сейсмических воздействий, а именно величина и повторяемость сильнейших событий и представляют наибольший практический интерес.

Проект (данная тема) нацелен на получение оценок силы и вероятности максимальных сейсмических воздействий. В работах по теме применяются методы, основанные на использовании теории экстремальных значений и предельных распределений, модели нелинейного мультипликативного каскада, использовании результатов исследования типового предвестникового поведения в обобщенной окрестности сильного землетрясения, совместном анализе исторических каталогов землетрясений и данных по палеосейсмичности, а также методы получения оценок величин максимальных массовых скоростей (PGV) по полевым данным.

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

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Методики оценивания параметров предельных распределений теории экстремальных значений с учетом нестационарности ряда данных

Исследовались распределения величин землетрясений и сильных сейсмогенных воздействий в диапазоне редких сильных событий. Такие задачи состоят в оценивании квантилей «за пределами диапазона данных», т. е., квантилей уровня $Q > 1 - 1/n$, где n – размер выборки. Оценка квантиля уровня $Q > 1 - 1/n$ не может быть получена без дополнительных предположений о поведении хвоста распределения. Обычно используется то или иное модельное распределение, полагаемое «истинным» законом распределения. При этом, как правило, веские аргументы в пользу того или иного выбора «истинного» закона распределения отсутствуют. Нами, в качестве альтернативного подхода, используются результаты теории экстремальных значений и предельные распределения (Обобщенное распределение Парето GPD и Обобщенное распределение экстремальных значений GEV). Такой подход дает возможность оценивать квантили произвольно высокого уровня. Важно отметить, что при некоторых значениях параметров GPD и GEV распределения широко используемый параметр – максимально возможная величина землетрясения M_{\max} и другие аналогичные величины (например, пиковое ускорение грунта, PGA) оказываются неустойчивыми. Этот результат является математическим отражением известного факта регулярно повторяющихся случаев возникновения сильных землетрясений в районах, считавшихся до того районами слабой сейсмической активности, а то и практически асейсмичными. Естественно, такие неожиданные землетрясения особенно опасны и часто приводят к особенно большим ущербам. Чтобы избежать такой нестабильности результатов оценки сейсмического риска нами был введен новый параметр $Q_q(T)$ – квантиль заданного уровня Q величины q за будущий интервал времени T . В отличие от M_{\max} , $M_{\max} = Q_q(\infty)$, при $q \rightarrow 1$, параметр $Q_q(T)$ является стабильным и робастным. Квантиль $Q_q(T)$ может быть очень полезным инструментом для определения рисков в страховом бизнесе и для оптимизации распределения ресурсов и готовности соответствующих служб.

Использование такого подхода, однако, предполагает выполнение условий его применимости. Такая проверка предусматривает разработку и апробирование статистических подходов к выделению в хвосте эмпирических функций распределения нарушений некоего неизвестного, но единого для всех имеющихся значений регулярного закона распределения. Как наиболее простой вариант отклонения, рассматривались случаи отскакивающих значений. Ранее, в качестве примера, были рассмотрены данные о численности населения крупнейших городов и обнаружено, что Москва, Петербург, большой Париж и большой Лондон отскакивают от общей зависимости «число городов – численность» для соответствующих

стран. Рассматривались также методы различения близких по поведению функций распределения хвоста, таких как степенной, логнормальный и экспоненциальный законы распределения для хвоста функции распределения.

Полученные результаты опубликованы в статье [6].

2.2. Моделирование сейсмического режима в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК)

Анализ сейсмического режима методами использования предельных распределений теории экстремальных значений является в определенном смысле лучшим возможным статистическим приближением, но такой подход не дает физического описания процесса сейсмогенеза. Вариант, допускающий физическую интерпретацию результатов может быть получен в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада. Совместное использование статистического подхода и модели мультипликативного каскада позволяет реализовать более полное описание сейсмического режима и, в частности, режима возникновения сильных землетрясений.

Отметим, что в рамках модели нелинейного мультипликативного каскада (НМК) достигается альтернатива известному подходу, основанному на уже упомянутой выше модели ETAS. В рамках НМК модели сейсмический режим трактуется как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, реализующихся на множестве метастабильных подсистем. При этом геофизическая сейсмогенерирующая среда описывается параметром, отражающим степень пространственной иерархичности среды (параметр r , отождествляемый с параметром иерархичности по М.А.Садовскому) и параметром характеризующим степень метастабильности среды (параметр p – вероятность продолжения идущего процесса лавинообразной релаксации данной метастабильной подсистемы), а также группой параметров, описывающих память системы. Такая модель позволяет описать закон повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера, закон Омори, из нее следует среднее соотношение между величиной магнитуды главного события и числом афтершоков. Модель имитирует также большинство надежно установленных прогнозных признаков, а именно, наличие квазипериодического сейсмического цикла, приуроченность сильных землетрясений к интервалам времени пониженных значений наклона графика повторяемости и, в меньшей степени, предвестниковую активизацию, проявляющуюся в модели в нерегулярном росте (к моменту основного события) числа землетрясений и выделенной ими сейсмической энергии. Отдельные форшоковые последовательности имеют при этом сугубо нерегулярный случайный характер, но их средняя (для большого числа сильных событий) зависимость описывает (как и по результатам анализа сейсмического режима в Обобщенной окрестности сильного землетрясения) систематический рост сейсмической активизации к моменту главного события.

Преимущество модели НМК перед моделью ETAS состоит в прозрачном физическом смысле ее параметров. Применение ранее этой модели для описания сейсмичности Сахалина показало, что реализации сильных Горнозаводского и Невельского землетрясения предшествовали периоды времени значительного роста параметра метастабильности p . Отмеченные подходы были использованы для анализа и интерпретации данных по конкретным регионам. Полученные результаты опубликованы.

Здесь нами рассматривается развитие модели мультипликативного каскада, с целью описания хвоста функции распределения землетрясений (области редких сильнейших событий). Сильнейшие землетрясения редки и традиционно рассматриваются как независимые события. Поэтому для данного рассмотрения память системы – учет которой позволил описать степенной закон Омори, форшоковую активность и наличие сейсмического цикла – не существенна и рассматриваться не будет.

Ставится задача промоделировать эффект загиба вниз графика повторяемости землетрясений и возможность реализации режима так называемых характеристических землетрясений. Под характеристическими (отскакивающими) землетрясениями будем понимать здесь сильные землетрясения, реализовавшиеся с большей вероятностью, чем это следует из степенного распределения для основной массы надежно определяемых землетрясений слабой и умеренной силы (упоминавшиеся выше случаи отскакивания по численности населения столиц ряда стран являются другим примером такого поведения хвоста функции распределения). Возможность описания эффектов характеристических событий и загиба вниз графика повторяемости достигается добавлением в кинетическое уравнение мультипликативного каскада нелинейных членов высшего порядка (квадратичного, кубического и более высокого порядка). Модельные результаты сравниваются с данными каталога землетрясений Юго-Восточной Азии. На основании такого сравнения делается предположение, что нелинейные положительные связи, обеспечивающие возникновение характеристических землетрясений связаны с нелинейностями, порождаемыми более активным глубинным флюидным режимом зон субдукции.

Кратко опишем модель НМК, для этого сначала охарактеризуем линейный вариант модели. Не сложно подобрать значения параметров модели r и p таким образом, чтобы получаемые значения наклона графика повторяемости и величины X отвечали типичным значениям для закона повторяемости величин сейсмического момента. Магнитуды модельных событий M введем по аналогии с введением магнитуды M_w

$$M_w = 2/3 \lg (X) - 16.1. \quad (1)$$

Такой выбор параметров модели не носит принципиального характера, а используется исключительно в целях удобства сравнения модели с сейсмическими данными. Если задать теперь некое среднее число N

лавинообразных процессов за единицу времени и некоторый закон небольших изменений от времени параметров r и/или p , то модель даст последовательность магнитуд основных (независимых) событий $\{M\}$, сходную с таковой для магнитуд землетрясений или сейсмических моментов в реальном сейсмическом процессе. Даже уже такая - предельно простая - модель каскада оказалась содержательной. Она продуцирует известный “прогнозный” признак – интервалам времени возникновения сильных землетрясений отвечают (в среднем) пониженные значения наклона графика повторяемости β . Эта связь имеет в модели вероятностный характер. Реализации больших значений магнитуд статистически отвечают значения параметров модели p и r , соответствующие также и меньшим значениям наклона графика повторяемости.

Усложняя модель каскада, естественно ввести в модель память. Естественно задать вариант памяти системы, затухающей со временем не медленнее чем $1/t$, что формально обеспечивает конечность памяти системы. Задание памяти в виде, близком к $1/t$ позволило описать закон Омори для афтершокового каскада, эффект предвестниковой активизации и возникновение сейсмического цикла.

Учет памяти системы, однако, лежит вне данного рассмотрения, посвященного анализу режима сильнейших землетрясений, так как редкие сильнейшие события в сейсмологии полагаются независимыми и потому учет памяти системы в этом случае (по крайней мере, в первом приближении) не требуется.

Применительно к закону повторяемости в системе сильнейших событий имеем, что линейной модели мультипликативного каскада присущи те же некорректности, что и классическому закону повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера. Действительно, среднее значение сейсмической энергии (сейсмического момента) для закона повторяемости Гуттенберга-Рихтера (с типичным значением наклона графика повторяемости) оказывается бесконечным. В этом случае источник энергии сейсмического процесса должен был бы иметь бесконечную мощность. Такой характер поведения представляется физически неоправданным, отсюда следует, что закон Гутенберга-Рихтера не может выполняться для сколь угодно редких сильных землетрясений. Закон повторяемости землетрясений должен включать или некое максимально возможное событие, или некоторым образом постепенно видоизменяться, чтобы среднее значение выделяемой энергии (сейсмического момента) стало бы уже конечным. Оба эти варианта решения широко используются в сейсмологии. В практике оценки сейсмической опасности часто вводится значение максимально возможного события (землетрясения) M_{\max} , ограничивающего справа область выполнения закона Гутенберга-Рихтера. Оценки величин M_{\max} являются важнейшими характеристиками схем сейсмического районирования. Однако определение параметра M_{\max} вызывает затруднения логического характера и потому не является вполне удовлетворительным.

Более логически оправданным вариантом решения проблемы является следующее. В функцию распределения землетрясений (закон Гуттенберга-Рихтера) вводится экспоненциальный множитель, который начинает сказываться только в области сильных событий и который обеспечивает конечность среднего значения выделенной сейсмической энергии (сейсмического момента). Закону распределения числа сильнейших землетрясений, обеспечивающему конечность источника сейсмической энергии, отвечает известный эффект «загиба вниз» графика повторяемости землетрясений.

Другая методика описания хвоста функции распределения основана на суммировании результатов исследований поведения хвоста функции распределения в рамках теории экстремальных значений. Показано, что в подавляющем большинстве случаев поведение хвоста функции распределения описывается конечным распределением. Только в том случае, когда рассматривался небольшой временной интервал, включающий M9+ мега-землетрясения начала нашего века – Андаманское и/или Тохоку – параметры эмпирического распределения оказались близкими к безлимитному экспоненциальному закону распределения. Полученный результат представляется вполне ожидаемым; действительно, все реально оцениваемые количества являются конечными, отсюда можно предположить, что и описывающие их законы распределения также должны быть конечными. Невыполнение условия конечности модельного закона распределения обычно указывает на малый размер используемой выборки, не описывающей должным образом статистики повторяемости редких сильнейших событий.

Приведенные результаты исследования хвоста эмпирических функций распределения, типичность проявления эффекта «загиба вниз» графика повторяемости землетрясений, наконец, требование конечности мощности источника сейсмической энергии указывают на необходимость модернизации кинетического уравнения мультипликативного каскада. Задающее загиб вниз графика повторяемости усложнение мультипликативного каскада удобно задать в виде

$$X_{i+1} = r \times X_i - r_2 \times (X_i / A_{02})^2 \quad (2)$$

где $r_2, A_{02} > 0$. Параметр A_{01} при этом как бы задает уровень событий, начиная с которого проявляется эффект загиба, а параметр r_2 регулирует скорость изменений поведения графика.

Кроме эффекта «загиба вниз» графика повторяемости землетрясений в сейсмологии часто рассматривается возможность реализации так называемых характеристических землетрясений – аномально сильных событий, реализующихся существенно чаще, чем это следовало бы ожидать, исходя из уравнения Гуттенберга-Рихтера. Режим с возникновением характеристических землетрясений естественно задать путем добавления в соотношение (2) положительного кубического члена. После такого

добавления, однако, снова возникает проблема конечности мощности источника сейсмической энергии. Для удовлетворения условию конечности сейсмической энергии в уравнение следует добавить отрицательное слагаемое более высокой (скажем четвертой) степени по X . Отсюда получаем финальное нелинейное соотношение, позволяющее смоделировать и эффект загиба вниз графика повторяемости землетрясений и возможность возникновения характеристических землетрясений:

$$X_{i+1} = r \times X_i - r_2 \times (X_i/A_{02})^2 + r_3 \times (X_i/A_{03})^3 - r_4 \times (X_i/A_{04})^4 \quad (3)$$

В соотношении (3) естественно принять $A_{04} \gg A_{03} \gg A_{02}$; все коэффициенты в (3) полагаются неотрицательными. При сравнимых по порядку величины значениях параметров r по мере роста силы событий (величины X) сначала будет реализовываться загиб графика повторяемости вниз, затем будет располагаться область доминирующего развития характеристических землетрясений, затем будет новый окончательный загиб вниз графика повторяемости. При этом модельный график повторяемости будет качественно аналогичен предполагаемому в случае реализации характеристических землетрясений. Вообще говоря, стадию первого загиба вниз графика повторяемости можно сократить и рассматривать усеченный вариант соотношения (3) степени не выше третьей.

Естественно, соотношения (2) и (3) могут быть заданы не в форме рекуррентных соотношений, а для непрерывного случая в виде нелинейных дифференциальных уравнений.

На рис.1 изображено распределение очагов землетрясений юго-восточной Азии по данным регионального каталога. Ниже рассматриваются без пропусков регистрируемые события, M5+ с 1964 по апрель 2013 года. Видно, что сейсмичность региона распадается на несколько зон, часть из которых отвечает зонам субдукции, а часть внутриконтинентальным районам. Сравним характер сейсмичности в шести показанных на рисунке регионах, отвечающих резко повышенной плотности числа землетрясений. Два из этих шести районов отвечают внутриконтинентальным областям, а четыре - разным участкам зон субдукции. Число событий в разных регионах и некоторые другие параметры сейсмичности приведены в таблице.

На рис.2 а,в,с приведены графики повторяемости для внутриконтинентальных районов и для участков зон субдукции. Характер графика повторяемости для двух континентальных областей и для участков зон субдукции в нашем случае оказался существенно различным. Для континентальных областей (рис.2а) вполне отчетливо проявлен эффект загиба вниз графика повторяемости и нет признаков реализации отскакивающих, экстремально сильных характеристических событий. Наоборот, для всех участков зон субдукции (рис.2 в,с), более или менее определенно выявляются отскакивающие максимальные по силе характеристические землетрясения.

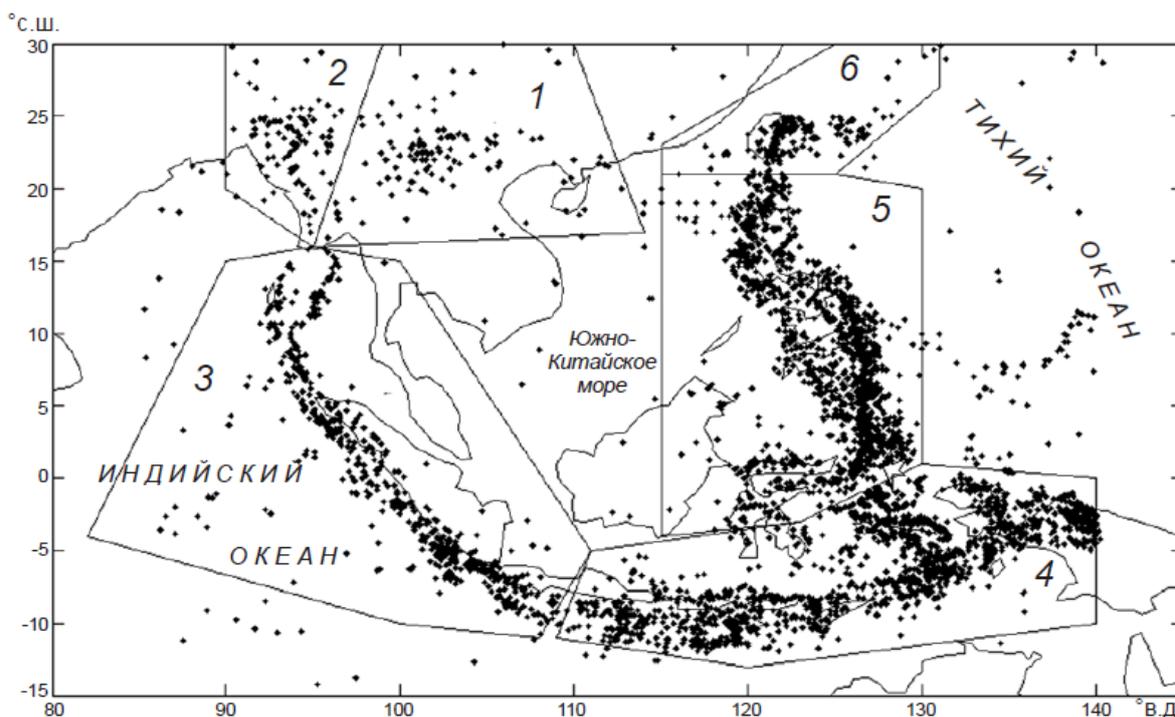


Рис. 1. Схема распределения очагов землетрясений на территории Юго-Восточной Азии с границами зон разной сейсмичности. 1–6 – номера рассматриваемых зон. Точки – эпицентры землетрясений с $M > 5$ за 1964–2013 гг.

Естественно, реализация на данном временном интервале редкого отскакивающего характеристического землетрясения является сугубо случайным процессом. Однако определенная систематичность, когда все отскакивающие землетрясения наблюдаются именно в областях зон субдукции, дает основания рассмотреть не только формальную модель описания различий в поведении хвоста функции распределения в терминах схем (2) для континентальных районов и (3) – для районов зон субдукции, но также и обсудить возможные физические причины такого различия. Проблема загиба вниз графика повторяемости землетрясений и проблема возможности реализации отскакивающих характеристических землетрясений принципиально важны для решения задачи сейсмического районирования. Значительный интерес представляет и задача физической интерпретации разнообразия, наблюдаемого в характере распределения сильнейших сейсмических событий в разных регионах мира.

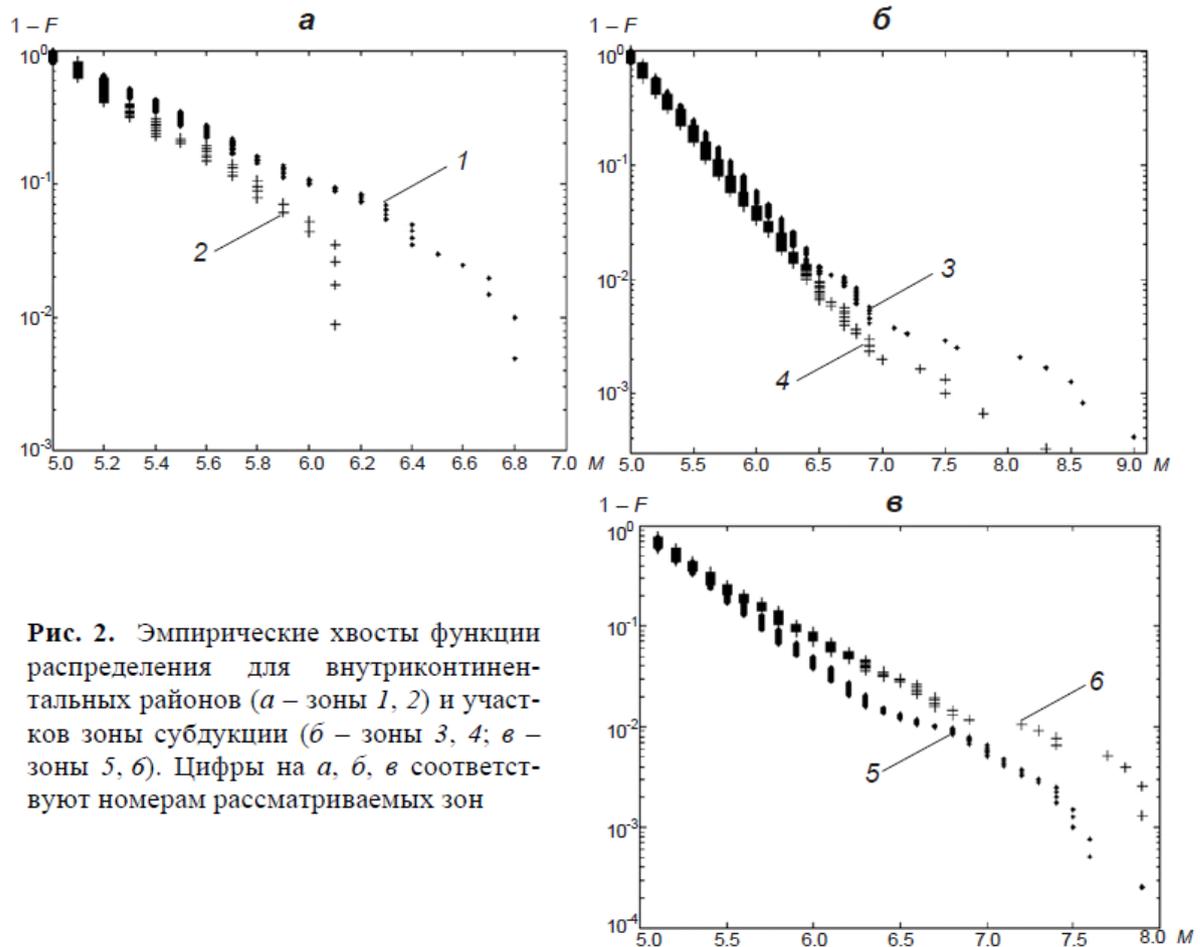


Рис. 2. Эмпирические хвосты функции распределения для внутриконтинентальных районов (*а* – зоны 1, 2) и участков зоны субдукции (*б* – зоны 3, 4; *в* – зоны 5, 6). Цифры на *а*, *б*, *в* соответствуют номерам рассматриваемых зон

Исходно авторы собирались провести оценку сейсмической опасности региона Юго-Восточной Азии на основании региональных сейсмических каталогов землетрясений и разработанной ранее методики расчета сейсмической опасности на основе использования предельных распределений теории экстремальных значений. Реализация этой программы расчетов оказалась, однако, заблокированной специфическим поведением хвоста функции распределения – вероятным развитием характеристических землетрясений - в подрегионах зон субдукции в Юго-Восточной Азии (Рис.2,в,г). Расчеты на основе теории предельных распределений теории экстремальных значений дают максимально полную и робастную оценку в том случае, если эмпирическое распределение сильнейших событий (скажем 50 – 100 сильнейших землетрясений) отвечает некоторому единому закону распределения. Это, однако, не так в том случае, когда имеется малое число, скажем 2-10 отскакивающих значений. В этом случае метод не обеспечивает робастную оценку квантилей высокого порядка (вероятности реализации сильнейших событий). Условия применимости метода будут выполняться снова при накоплении требуемого минимального числа характеристических событий, скажем минимум 30-50 таких событий. Но такая ситуация, как видно из рис.2, заведомо не реализуется. Во всех субрегионах число возможных характеристических землетрясений заведомо много меньше требуемого их числа (30-50 событий).

Если существование характеристических землетрясений в данном используемом каталоге (выборке данных) достаточно обосновано сейсмическими данными, но количество таких событий заведомо недостаточно для получения робастных оценок вероятности сильнейших событий, то более математически строгие методы оценки сейсмической опасности на основе применения предельных распределений теории экстремальных значений оказываются неприменимыми. В этом случае приходится вернуться к более простым методам оценки. Такие оценки основываются обычно на исходно задаваемом виде функции распределения. В данном случае это должна быть довольно сложная функция, учитывающая возможность возникновения характеристических землетрясений. Отметим, что именно такой подход использовался, например, при расчете комплекта карт ОСР-2012. При разработке таких типовых функций распределения может оказаться полезным подход, основанный на моделировании режима возникновения характеристических землетрясений в рамках представленной выше нелинейной схемы мультипликативного каскада.

Обратимся теперь к обсуждению возможных физических причин разнообразия, наблюдаемого в характере распределения сильнейших сейсмических событий в разных регионах. В этой связи обращает на себя внимание, что в случае Юго-Восточной Азии все случаи проявления отскакивающих характеристических землетрясений оказались локализованными в пределах зон субдукции. Естественно, это может оказаться случайным совпадением. При этом этот эффект может быть связан с тем, что в зонах субдукции реализуется большее число землетрясений, соответственно в этих зонах и больше вероятность реализации редких сильнейших характеристических землетрясений. Реализации характеристических землетрясений во внутриплитных обстановках может потребовать большего времени.

Но можно предложить и альтернативное объяснение. Из схемы мультипликативного каскада (3) видно, что условием возникновения отскакивающих характеристических землетрясений является возникновение положительных нелинейных обратных связей между размером и скоростью роста сейсмического события. Физически такие дополнительные положительные обратные связи должны быть, по-видимому, связаны с наличием в очаговой области дополнительных агентов неустойчивости. Применительно к зонам субдукции таким агентом может оказаться повышенная активность флюидного режима и большая концентрация флюидной фазы. Значительный рост концентрации флюидной фазы (до порядка величины) и большая активность флюидного режима действительно характерны для зон субдукции.

Полученные результаты опубликованы в статьях [2, 5], и по ним сделаны доклады [11, 13].

2.3. Опыт квантификации землетрясений по данным о сейсмогенных смещениях скальных отдельностей по данным для районов двух сильных землетрясений Киргизии

Выше отмечалась необходимость использования данных для исторических, архео- и палеоземлетрясения для более надежной оценки долгосрочной сейсмической опасности. Однако привлечение данных по архео- и палеоземлетрясениям невозможно без разработки методов параметризации этих землетрясений по данным макросейсмических наблюдений. Ранее в работе (Родкин и др., 2012) был предложен метод оценки параметров землетрясений по величинам смещения скальных отдельностей. Этот метод позволяет получать ценную новую информацию, но он требует проверки. Проверка была осуществлена нами путем проведения полевых работ в очаговой области известных сильных землетрясений. Такого рода работы представляют и самостоятельный интерес, в связи с чем они выделены в отдельный пункт отчета по теме.

Важнейшей проблемой оценки сейсмической опасности является задача оценки величин и повторяемости экстремально сильных сейсмических воздействий, в частности максимальных скоростей смещения грунта (peak ground velocities, *PGV*). Оценка экстремальных сейсмических эффектов затруднена редкостью сильнейших землетрясений и относительно малым размером зон максимальных сейсмических воздействий, что обуславливает и небольшое количество инструментальных записей экстремально сильных движений. Подавляющая часть записей сейсмических событий, естественно, производится на удалении от вспарываемых землетрясениями разломных зон. На настоящий момент величины сейсмических воздействий непосредственно в разломных зонах и характер их изменчивости вдоль и поперек зоны сейсморазрыва остаются дискуссионными. В этой связи достаточно указать, что даже по уточненным вариантам сейсмических шкал ММСК-86 и ММСК-92 интервал максимальных скоростей при балльности $I = X$ задавался величиной 32–64 см/с. Такие значения не согласуются с наблюдаемыми максимальными скоростями сильных движений, которые систематически дают значения *PGV* в диапазоне 1–3 м/с, с экстремальными значениями – до 4–5 м/с. Такого разногласия не наблюдается только в последнем варианте макросейсмической шкалы, где при сейсмической балльности $I = X$ вполне ожидаемыми полагаются значения *PGV* около 3 м/с. Отсюда очевидны актуальность разработки и использования макросейсмических методов исследований, позволяющих получать оценки максимальных сейсмических воздействий за длительные (до первых тысяч лет) интервалы времени.

Ранее был предложен метод оценки значений *PGV* по величинам предположительно сейсмогенных смещений скальных отдельностей. Метод в принципе позволяет оценивать величины максимального сейсмического воздействия за длительные интервалы времени, но, как всякий новый метод, требует верификации. Ниже эта методика использована для анализа полевых

наблюдений – непосредственных замеров в очаговых зонах известных сильных землетрясений Киргизии (Сусамырского 19.08.1992 г., $M_S = 7.3$ и Кеминского 03.01.1911 г., $M_w = 7.9$). Полученные оценки сравниваются с результатами исследования сейсмичности этих районов другими методами.

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

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

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

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

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

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

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

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

Ниже рассматриваются результаты применения указанной методики для фокальных зон Сусамырского и Кеминского сильных землетрясений.

Сусамырское землетрясение. Сусамырское землетрясение (19.08.1992 г., $MS = 7.3$, $H = 23$ км) произошло в западной части межгорной Сусамырской впадины Северного Тянь-Шаня, примерно в 100 км к юго-западу от г. Бишкек. Несмотря на слабую населенность этого района, от землетрясения и вызванных им обвалов погибли 52 человека. Характер фокального механизма и сейсмодислокаций отвечает развитию сжимающих (ориентированных примерно в направлении север–юг) напряжений. Вскоре после землетрясения его плейстосейстовая область была достаточно подробно исследована и описана рядом исследователей, в том числе и одним из авторов настоящей статьи. Собранные во время этих работ материалы (систематические замеры сейсмических деформаций) позволили провести приведенные ниже оценки и сопоставления. Подчеркнем, что макросейсмическое описание проводилось до разработки используемого в данной статье метода оценки величин PGV , ввиду чего оно не вполне отвечает требованиям такого подхода; в ряде моментов оно оказалось избыточным, а в ряде других – неполным. Кроме того, исследованиями была охвачена только небольшая доля площади очага.

Несмотря на большую магнитуду события, сейсморазрыв при Сусамырском землетрясении вышел на поверхность только на двух относительно коротких и сильно разнесенных (около 20 км) участках. К окрестности этих участков приурочены и две области максимальных ($I = 10$) значений балльности. Оба вышедших на поверхность коротких сегмента сейсморазрыва (рис. 3) имеют взбросо-сдвиговой характер и приурочены соответственно к субширотному Арамсуйскому адырному предгорному разлому (восточный сегмент) и Суусамырскому краевому разлому западсеверо-западного простирания (западный сегмент). Характер поверхностных сейсмонарушений (обвалов, трещин, оползней, грязевых вулканчиков) весьма разнообразен и охватывает большую площадь.

Результаты расчетов величин PGV по формуле (4) с характерным значением $k = 0.7$ приведены в таблице. Видно, что максимальные ($PGV \geq 3$ м/с) значения скорости располагаются в непосредственной близости от двух вышедших на поверхность сегментов сейсморазрыва (рис. 3). Согласно новой макросейсмической шкале, такие значения PGV соответствуют балльности $I = X+$. Балльности $I > IX$, согласно этой же шкале, соответствуют значения PGV более 1 м/с. Внутри изолинии $I = IX$ располагаются только такие значения скорости. Однако значения с $PGV > 1$ м/с встречаются также и вне изолинии $I = IX$, в области $VIII < I < IX$.

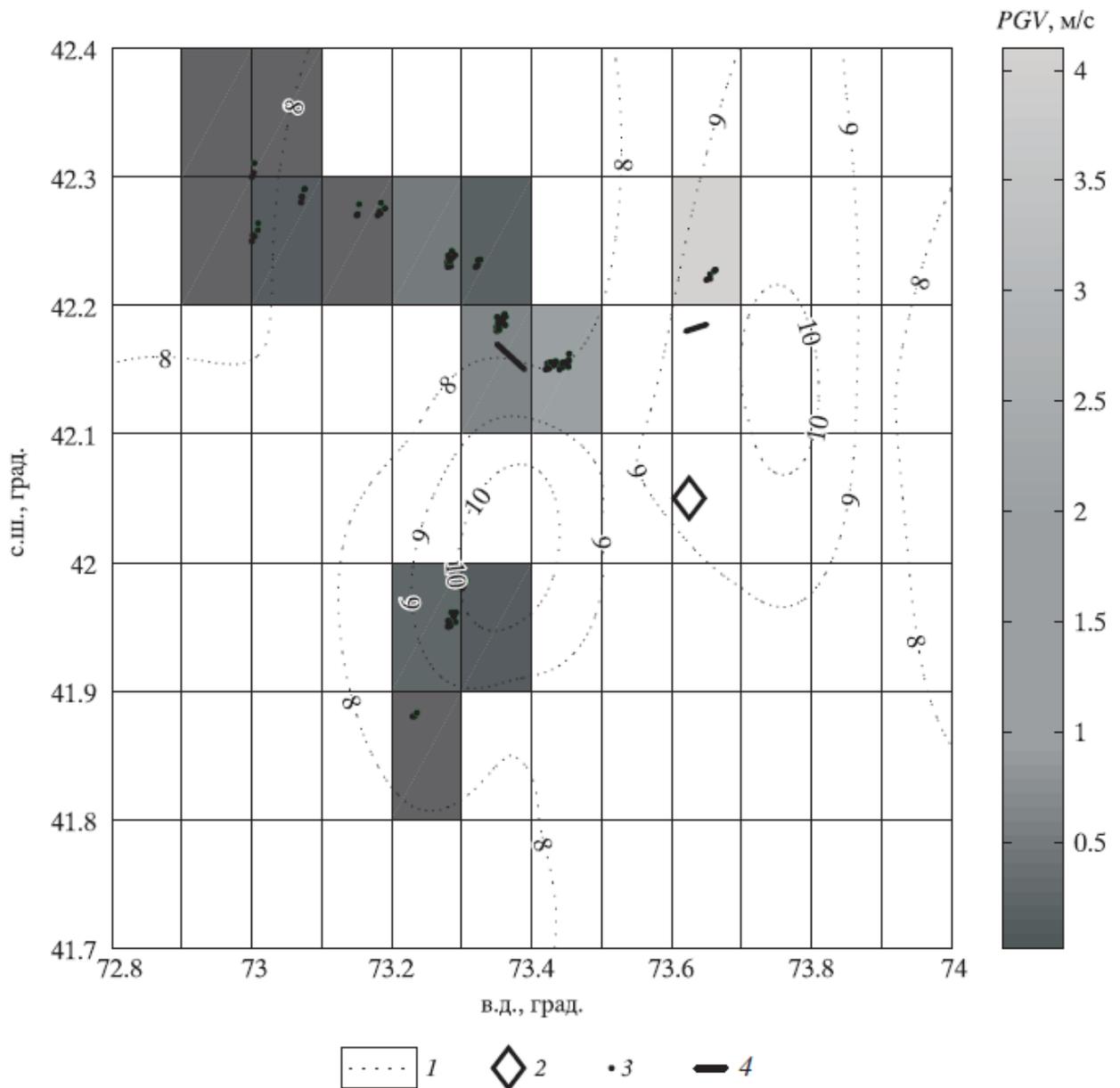


Рис.3. Расположение мест оценки величин PGV в фокальной области Сусамырского землетрясения. Даны изосейсты (1), положение эпицентра (2), точки наблюдения (3) и два участка выхода разрыва на поверхность (4).

На рис. 4 представлена гистограмма величин азимутов направлений смещений. Это распределение с несколькими (от 3 до 5) отчетливо выраженными максимумами. При этом максимумы, располагающиеся в окрестности азимутов 180° и 350° и 60° и 240° , различаются почти ровно на 180° . Выше отмечалось, что можно ожидать одно переколебание максимальных значений скорости в цуге сейсмических колебаний. Соответственно, можно ожидать тенденцию частой встречаемости смещений в противоположных азимутах. Отсюда предполагаем, что максимумы в азимутах 180° и 350° и 60° и 240° отвечают двум неким характерным направлениям. С целью проверки этого предположения проанализировано пространственное расположение точек с преимущественным развитием колебаний в направлениях 180° и 350° и 60° и 240° . Оказалось, что они

различаются. Точки наблюдения смещений в направлении север–юг концентрируются на востоке эпицентральной области, а точки наблюдения с направлениями смещений 60° и 240° – приурочены в большей степени к западной ее части.

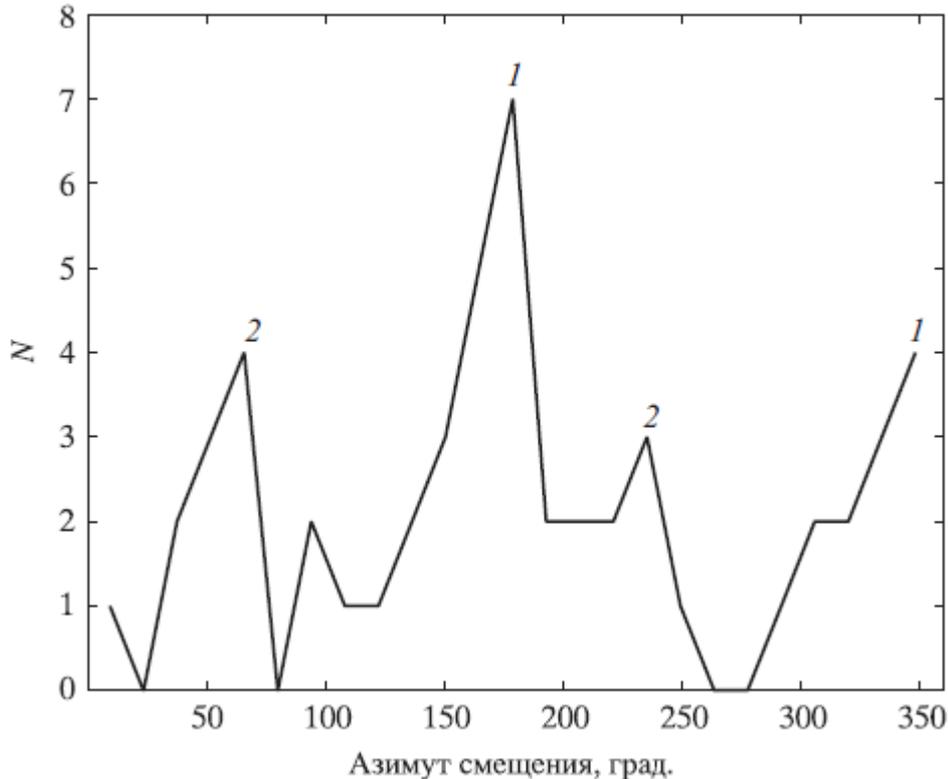


Рис.4. Гистограмма распределения азимутов смещений при Сусамырском землетрясении. 1, 2 – две пары максимумов, различающихся на 180° .

Такое положение точек согласуется с характером сейсмотектоники. Западный сегмент сейсморазрыва располагается в зоне доминирования Сусамырского разлома северо-западной ориентации, восточный сегмент находится в области Арамсуйского надвига вблизи его сближения с Каракольским разломом; при этом оба эти разлома имеют субширотное простираие. Таким образом, в обоих случаях мы имеем преимущественное развитие сильных движений поперек доминирующих разломов, как и следует ожидать при развитии надвиговых деформаций.

Отметим также и то обстоятельство, что по данным о параметрах фокальных механизмов афтершоков намечается (статистически, однако, слабовзначимая) тенденция разворота фокальных механизмов; в восточной части сейсмофокальной зоны механизмы более субширотны, в западной части секущая северо-западная компонента также достаточно выражена. Как и ожидалось, не было выявлено статистической связи между размерами смещенной скальной отдельности и величиной смещения (соответственно и оценками величин PGV). Этот результат вполне ожидаем, как можно видеть из соотношения (4) и большинства других соотношений, используемых для оценки величин PGV . Поскольку смещающийся блок скальной породы

трактуются в модели как материальная точка, то величина смещения (в первом приближении) не зависит от объема и массы смещающегося блока.

В очаговой зоне Сусамырского землетрясения были отмечены не только смещения скальных отдельностей, но и их повороты. Максимальные значения поворотов приурочены к областям повышенных значений балльности I и величин PGV . Величины поворота в области максимальных значений балльности бывают довольно значительны и превышают 90° . Не выявляется, однако, явных закономерностей в распространение поворотов по или против часовой стрелки. Отсюда можно предположить, что развитие, направление и в значительной мере величина поворота блока определяются геометрическим несовпадением центра масс блока с его «центром трения» по опорной поверхности.

Особенностью Сусамырского землетрясения является отсутствие явного положения вышедшей на поверхность протяженной плоскости разлома. Ввиду этого не представляется возможным проследить изменение величин смещения относительно плоскости разрыва. Отметим также определенную условность приведенных схем, так как полевые работы проводились еще без использования средств спутниковой системы навигации. Указанных недостатков лишены представленные ниже результаты обследования восточного участка фокальной зоны Кеминского землетрясения.

Кеминское землетрясение. Восточный сегмент сейсмофокальной области Кеминского землетрясения (03.01.1911 г., $M_w = 7.9$) был обследован нами во время полевых работ 2014 г. Также как и Сусамырское землетрясение, Кеминское землетрясение произошло в поле субмеридианально ориентированных сжимающих напряжений и характеризуется преимущественно взбросовым характером деформаций. Северное крыло все еще достаточно четко выделяемого на местности протяженного сейсморазрыва взброшено. Четкость положения сейсморазрыва способствовало получению более полной базы данных, чем в случае с Сусамырским землетрясением. С другой стороны, с момента Кеминского землетрясения прошло более 100 лет и многие сейсмогенные деформации прослеживаются на местности уже не столь определенно.

Кеминское землетрясение произошло зимой, исследуемая область расположена на высотах около 2000 м над ур. моря, поэтому район землетрясения был сильно заснежен. Вздернутое (на уступе) и практически лишенное растительности северное крыло разлома сильно, надо полагать, продувалось ветром и не было перекрыто мощным слоем снега. Южное, поднадвиговое крыло расположено непосредственно под уступом. Можно полагать, что снежный покров здесь был намного толще. Отметим для полноты картины, что некоторыми авторами указывается и на промерзание верхнего слоя грунта; в равнинных переувлажненных областях это иногда приводило к формированию разломанных и наклоненных под различными углами блоков (пластин) верхнего слоя грунта.

На исследованном участке очаговой зоны сейсмогенный уступ в своей западной части – почти непрерывен, в центральной и восточной частях – представлен рядом смещенных по широте и кулисообразно расположенных сегментов. В ходе кратких полевых работ были выявлены 19 случаев предположительно сейсмогенных смещений скальных отдельностей (камней) на северном (висячем) крыле разлома и 8 случаев – на южном (нижнем) крыле надвига. Используя модельные схемы перемещения скальных отдельностей, получены оценки величин пиковой массовой скорости, PGV и направлений сейсмического воздействия для всех выявленных случаев смещения. Так же как и в случае Сусамырского землетрясения, наиболее часто использовалась схема расчета на основе соотношения (4). Полученные результаты представлены на рис.5, где показано расположение сегментов сейсмического уступа, точек измерения и приведены значения азимутов и оценок величин PGV .

Из данных, приведенных на рис. 6, видно, что полученные оценки величин PGV в области разрыва согласуются в целом с экспериментально измеренными значениями. Отметим, однако, что в непосредственной близости от вышедшего на поверхность сейсмогенного разрыва можно было бы ожидать доминирования значений, близких к максимально наблюдаемым, – в диапазоне 3–5 м/с. В нашем же случае явно доминируют меньшие значения – в диапазоне 1–1.5 м/с. На рис. 6 также видно, что доминируют направления смещений поперек сейсмогенного уступа, что согласуется с преимущественно надвиговым характером подвижки.

Направления инерционного воздействия на северном надвинутом крыле разлома ориентированы по направлению смещения, что отвечает ситуации относительно более медленного начала движения и более резкой его остановки. В этом случае направление действия сил инерции ориентировано по направлению надвига – на юг. Направления воздействий на южном крыле разлома в целом противоположны направлению для северного крыла разлома (см. рис. 5).

В центральной части зоны, в области 77.41° в.д., кроме надвиговых подвижек, сильно выражены и сдвиговые направления. На этом участке сейсмические импульсы в наибольшей степени имеют разное направление и могли быть оценены как случайные (возможно ошибочные). Отметим, однако, что по характеру пересекающих уступ ныне сухих водотоков можно предполагать наличие существенной сдвиговой компоненты. Здесь же нарушается простая структура уступа и единый эскарп замещается серией пространственно разнесенных отдельных сегментов. Разнонаправленность сильных сейсмических движений в данном месте, таким образом, не представляется невозможной.

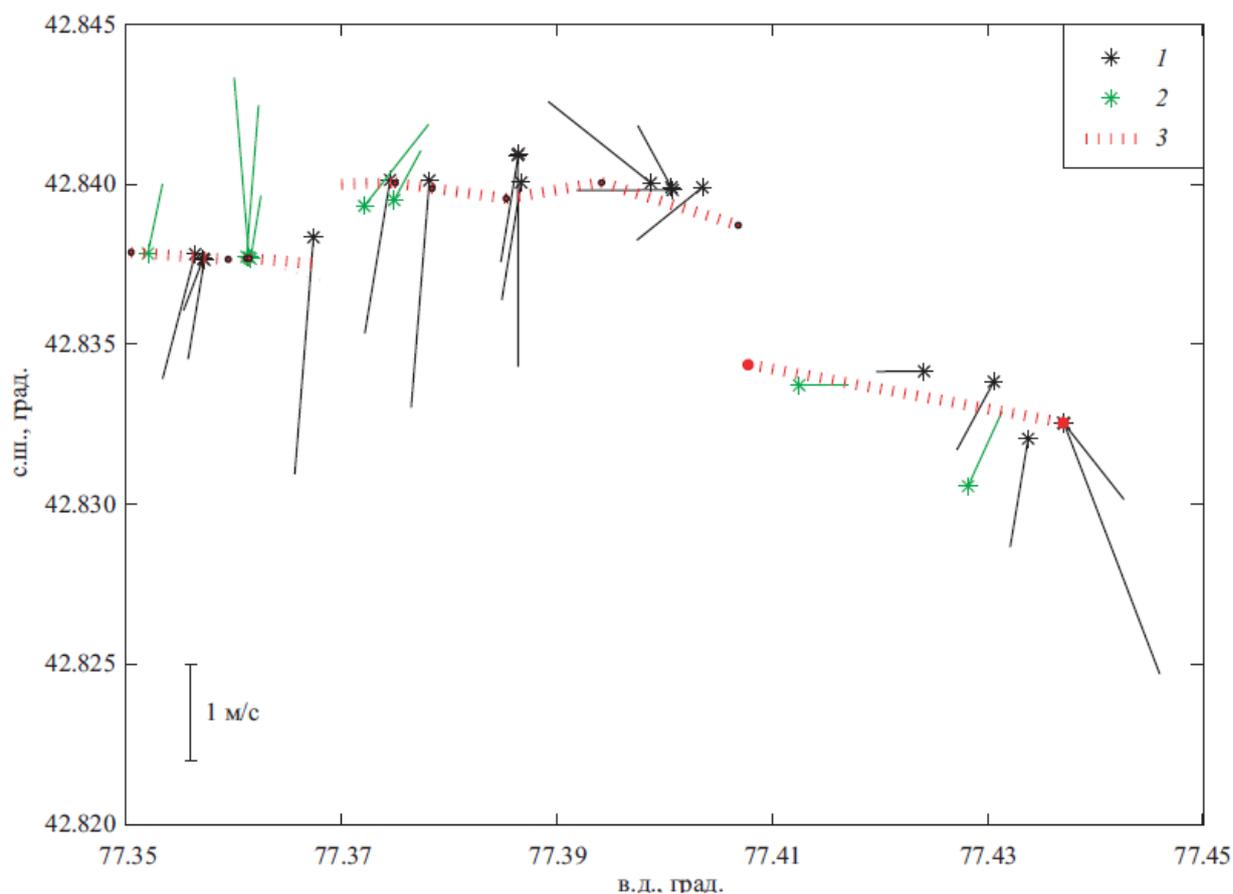


Рис.5. Макросейсмическая схема для исследованного участка Кеминского землетрясения. 1, 2 – точки оценки величин PGV на надвинутом (северном) и южном крыле разлома соответственно; 3 – положение выходов сейсмогенного разлома.

Выше уже отмечалось, что по сравнению со значениями, полученными нами в других случаях, обращают на себя внимание относительно невысокие значения получаемых оценок PGV . Можно предположить, что это связано с тем, что землетрясение произошло в январе и смещения каменных блоков были затруднены снеговым покровом. Такое предположение подкрепляется наличием корреляционной связи между полученной оценкой величины PGV и объемом сместившихся пород (рис. 6). В ранее рассмотренных случаях, в частности при анализе смещений в сейсмофокальной области Сусамырского землетрясения и вблизи эпицентра сильного взрыва (произведенного летом), аналогичной закономерности не наблюдалось. Очевидно, что тормозящая роль снежного покрова более существенна для меньших по размеру камней, что и объясняет характер корреляции. Значения первого коэффициента линейной регрессии близки по величине, а корреляция значима с вероятностью более 99 % и для северного (верхнего) и для южного (нижнего) крыльев разлома. Однако для сходных по объему смещенных пород значения PGV систематически выше для северного (верхнего, расположенного по вершине приразломной складки) крыла разлома (см. рис. 6). Мы полагаем,

что это может быть связано с более толстым слоем снежного покрова на опущенном, южном крыле разлома.

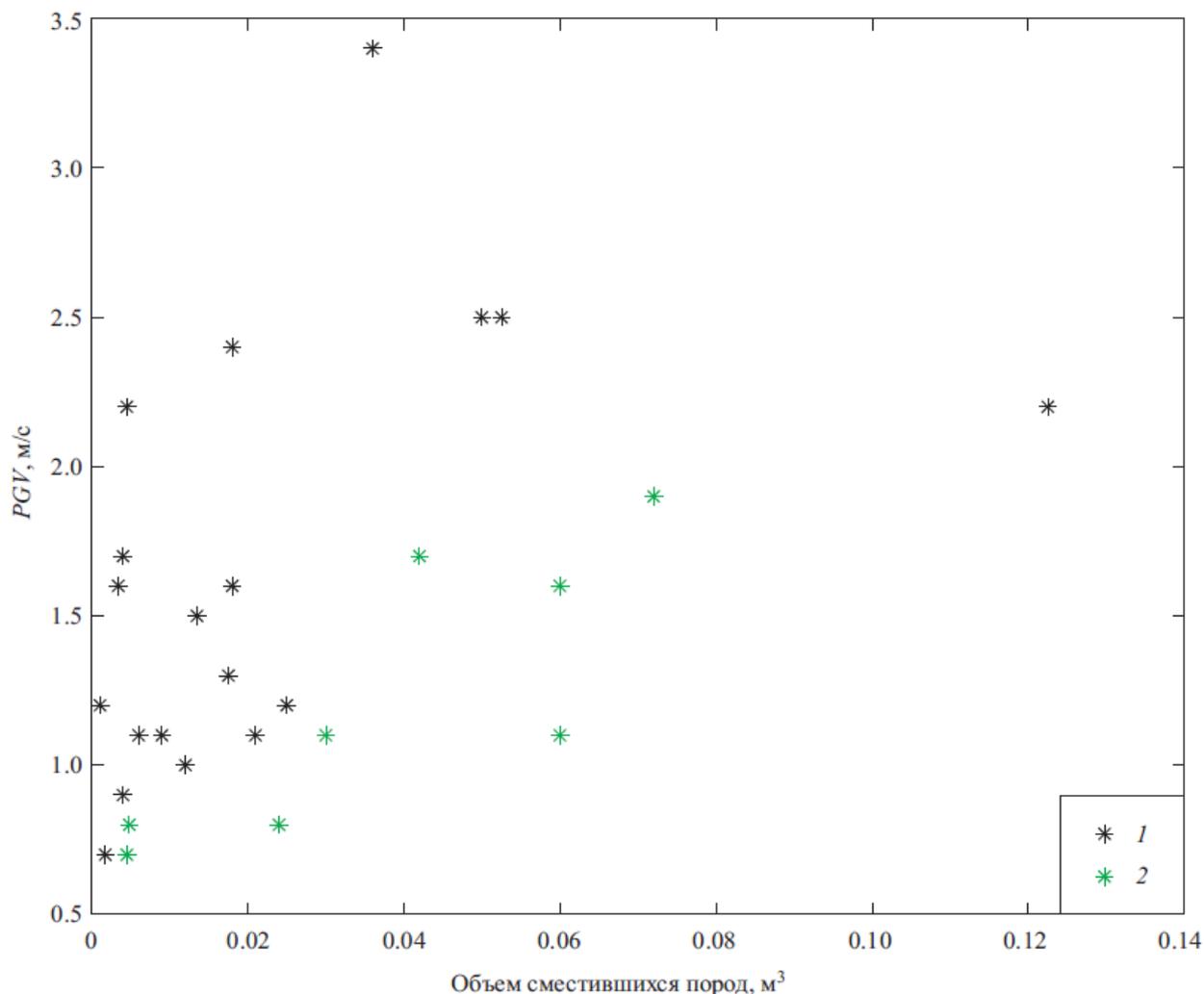


Рис.6. Связь объема сместившихся скальных отдельностей с полученными оценками максимальных скоростей для северного (1) и южного (2) крыльев разлома.

В целом полученные данные по макросейсмической оценке величин PGV вполне хорошо согласуются с оценками полученными иными известными способами. Такое согласие позволяет рекомендовать этот метод для оценки величин PGV по полевым макросейсмическим данным.

Полученные результаты опубликованы в статьях [1, 3, 4] и по ним сделаны доклады [8-10].

2.4. Результаты исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения

Дополнительная важная информация о режиме редких сильных землетрясений может быть получена по результатам анализа сейсмического режима в обобщенной окрестности сильного землетрясения. Здесь важно

отметить несколько моментов. За отчетный год выполнения проекта наиболее значительным результатом в этой области было выявление нового предвестника, связанного с уменьшением средней глубины слабых землетрясений в малой пространственно-временной окрестности сильного землетрясения. Это уменьшение средней глубины примерно пропорционально логарифму времени до момента обобщенного сильного события. Это указывает на (предположительно, здесь мало данных) очень сильную аномалию проницаемости в узкой окрестности главного события. Такая аномалия указывает как на резкий рост трещиноватости и развитие разрушения, так и дает свидетельства механизма резкого роста проницаемости, не связанного с увеличением концентрации флюидной компоненты. Это важно в связи с возможными механизмами роста проницаемости литосферы вне связи (что обычно предполагается) с реакциями дегидратации и ростом концентрации флюида. Особый интерес представляет аномалия всплывания очагов слабых землетрясений, выявленная в узкой окрестности обобщенного сильного события (рис.7).

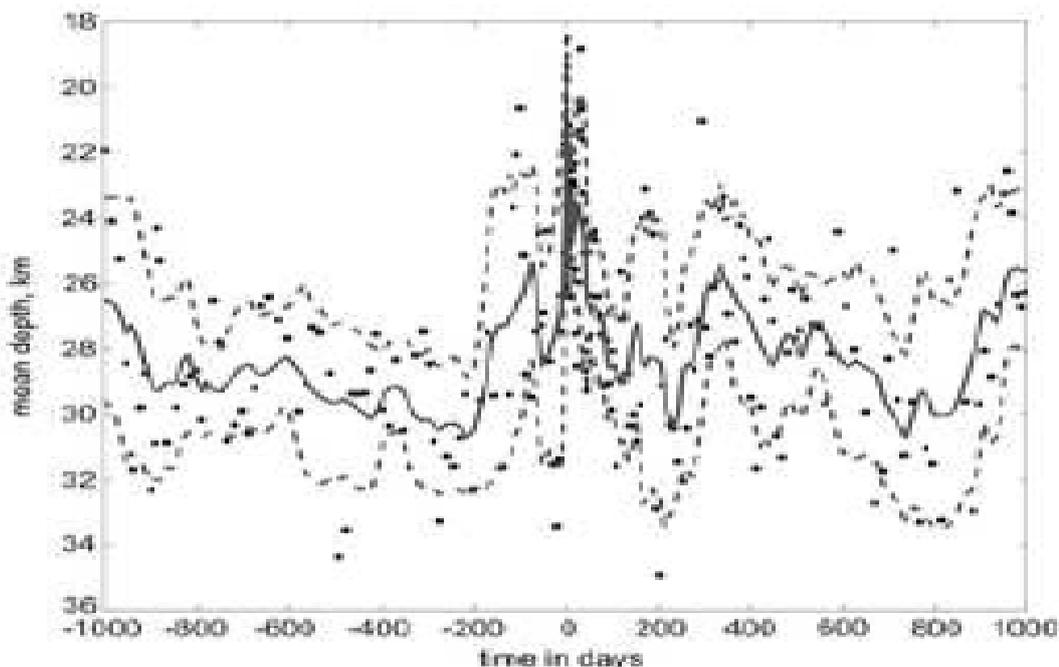


Рис.7. Изменение средней глубины очагов землетрясений в обобщенной окрестности сильного события (нулевой момент времени). Видно значимое уменьшение глубины, что можно сопоставить с разрушением вещества и прорывом флюида в вышележащие горизонты литосферы.

Механизм, основанный на росте проницаемости геосреды и соответствующем росте активности флюида рассматривается как вероятный механизм развития нелинейной положительной обратной связи в очагах сильных землетрясений. В рамках модели нелинейного мультипликативного

каскада именно такая нелинейная связь и связана с возникновением характеристических землетрясений.

По полученным результатам сделаны доклады [7, 12].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Предлагаемый комплексный подход позволяет объединить преимущества всех упомянутых методов. Практическая значимость выполненных исследований состоит в получении более точных статистических оценок текущей сейсмической опасности (прогноза сейсмической опасности) для регионов с разной геодинамической ситуацией.

По результатам выполненных исследований в 2015 году опубликовано 6 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных изданиях и сделано 7 докладов на международных и российских научных конференциях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

1. Агатова А.Р., Лужанский Д.В., Родкин М.В., Корженков А.М. Загадка катакомб Заячьего полуострова // *Природа*, 2015, № 7. С.18-27.
2. Винокуров Н.И., Корженков А.М., Родкин М.В. К оценке сейсмической опасности районе Керченского пролива по археосейсмологическим данным // *Вопросы инженерной сейсмологии*, 2015, т.42, № 2. С.51-66.
3. Лужанский Д.В., Агатова А.П., Корженков А.М., Родкин М.В., Шен Д., Деев Е.В. Влияние сейсмической активности на состояние археологических объектов (на примере катакомб полуострова Заячий оз. Иссык-Куль) // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета*, 2015, т.15, № 6. С.87-92.
4. Родкин М.В., Корженков А.М., Орунбаев С.Ж. Опыт оценки максимальных массовых скоростей в очаговых зонах сильных землетрясений по смещениям скальных отдельностей, по данным для ряда районов Киргизии // *Вопросы инженерной сейсмологии*, 2015, т.42, № 4. С.25-36.
5. Родкин М.В., Нго Т.Л., Лабунцова Л.М. Расширение модели мультипликативного каскада для описания режима повторяемости сильнейших землетрясений применительно к региональной сейсмичности Юго-Восточной Азии // *Геофизические исследования*, 2015, т.16, № 2. С.58-68.
6. Pisarenko, V.F., and M.V.Rodkin, The maximum earthquake in future T years: Checking by a real catalog. *Chaos Solitons & Fractals*, 2015, 74: 89-98, doi:10.1016/j.chaos.2015.01.006.

Доклады на международных и российских научных конференциях

7. Андреева М.Ю., Родкин М.В. О сейсмичности на океанической стороне глубоководных желобов // *Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска*. Владивосток, Дальнаука, 2015, т.1. С.64-66.
8. Деев Е.В., Корженков А.М., Родкин М.В., Юдахин А.С. Палеосейсмологические исследования активных разломов Иссык-Кульской котловины, Северный Тянь-Шань // *Материалы 47-го Тектонического совещания. Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты*. М., 2015, т.1. С.222-226.
9. Корженков А., Рогожин Е., Родина С., Деев Е., Лобова Е., Абдиева С., Фортуна А., Чаримов Т., Юдахин А., Можейко Й., Глаков А., Родкин М. Археосейсмологические исследования средневековых землетрясений южного Прииссыккуля (Тянь-Шань) // *Проблемы геодинамики и*

- геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Материалы докладов. 8-й Международный симпозиум, 23-29 июня, 2014, Бишкек, 2015. С.312-317.
10. Корженков А., Рогожин Е., Родина С., Деев Е., Лобова Е., Абдиева С., Фортуна А., Чаримов Т., Юдахин А., Можейко Й., Глаков А., Родкин М. О высокой степени сейсмической опасности в южной части Иссык-Кульской котловины (Тянь-Шань) // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Материалы докладов. 8-й Международный симпозиум, 23-29 июня, 2014, Бишкек, 2015. С.319-325.
 11. Родкин М.В., Нго Тхи Лы. Новые подходы к сейсмическому прогнозу – оценка изменений текущего уровня сейсмической опасности // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. Владивосток, Дальнаука, 2015, т.1. С.146-148.
 12. Родкин М.В., Тихонов И.Н. Уточнение прогностических признаков методом построения обобщенной окрестности сильного землетрясения // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. Владивосток, Дальнаука, 2015, т.1. С.149-152.
 13. Rodkin, M.V., V.F. Pisarenko, Ngo Thi Lu, and T.A. Rukavishnikova, Theoretical approaches for examination of the distribution law of major earthquakes. *XIVth International Conference – Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, 11-14 May 2015, Kiev, Ukraine. CD-ROM, 2015.