

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.3

Рег. № НИОКТР АААА-А19-119011490129-0

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

чл.-корр. РАН

_____ П.Н. Шебалин

« ____ » _____ 2020 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
«РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В
ЦЕЛЯХ ИЗУЧЕНИЯ ОЧАГА, СРЕДЫ, СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ»
(промежуточный, этап 2020 года)

Руководитель НИР
гл. науч. сотр., зав. лаб.,
докт. физ.-мат.наук

_____ М.В. Родкин
Подпись, дата

Москва, 2020 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, гл. науч. сотр., зав. лаб., докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	М.В.Родкин (введение, разделы 1, 3, заключение)
Исполнители темы		
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук, профессор	_____ Подпись, дата	В.Ф.Писаренко (раздел 1)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	А.А.Скоркина (раздел 3)
вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	Б.Г.Букчин (раздел 4)
ст. науч. сотр. канд. тех. наук	_____ Подпись, дата	А.С.Фомочкина (раздел 4)
ст. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	А.В. Ландер (раздел 2)
вед. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	А.Ф.Кушнир (раздел 5)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	А.В.Варыпаев (раздел 5)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	В.В.Гравиров (раздел 6)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	К.В.Кислов (раздел 6)
науч. сотр.	_____ Подпись, дата	Т.А.Рукавишникова
Нормоконтролер	_____ Подпись, дата	О.В.Селюцкая

РЕФЕРАТ

Отчет 62 с., 1 кн., 25 рис., 33 источн., 2 прил.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ; ТЕОРИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ; ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ; СЕЙСМОТЕКТОНИКА; ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Целью комплекса исследований по теме является уточнение сейсмической опасности. Развивается комплекс подходов, направленных на уточнение сейсмической опасности, как в методическом плане, так и применительно к отдельным, сейсмоопасным регионам России. В методическом отношении продолжено развитие нового метода математически корректного расчета сейсмической опасности на основе предельных распределений теории экстремальных значений. В этом году была детально проанализирована точность расчетов сейсмической опасности (для реальных и искусственных каталогов) разными методами, в том числе и на основе предельных распределений. Проводились исследования, направленные на уточнение сейсмической опасности ряда сейсмоопасных областей Дальнего Востока России, развивались методы исследования очагов землетрясений и уточнения сейсмотектонической ситуации отдельных территорий. Полученные результаты позволили продвинуться также и в понимании физики сейсмического процесса в плане вероятной связи сейсмичности с процессами превращения вещества литосферы. Параллельно проводились работы по развитию программной и аппаратурной обеспеченности исследований. В совокупности развиваемые методы обеспечивают заметный прогресс в оценке сейсмической опасности и лучшего понимания физики землетрясений, а в перспективе также и для прогноза землетрясений. Полученные за отчетный период результаты весьма разнообразны и потому описаны с разной степенью детальности; более детально описаны результаты, представляющие более принципиальный интерес, менее подробно – касающиеся региональной тематики; еще менее подробно - касающиеся текущих аппаратурных разработок; при этом в отчетах за разные годы основное внимание уделено разным сторонам работ по теме.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	8
1 Использование теории экстремальных значений в целях расчета сейсмической опасности	8
1.1 Постановка проблемы и обоснование подхода к решению задачи	8
1.2 Двухзвенная модель графика повторяемости землетрясений.....	10
1.3 Сравнение точности оценок сейсмической опасности разными методами.....	12
1.3.1 Метод сравнения.....	12
1.3.2 Оценка квантилей на искусственных каталогах.....	14
1.3.3 Оценка квантилей на реальных каталогах.....	20
2 Региональные исследования Дальний Восток России.....	23
2.1 Результаты комплексных исследований сильного сейсмического события, произошедшего 20.12.2018 г. на краю Тихоокеанской литосферной плиты вблизи сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг	23
2.2 Детальное цунамирайонирование района бухты Бечевинки на восточном побережье Камчатки, в которой ведется строительство крупного терминала по перегрузке СПГ	26
2.3 Исследование сильного Северо-Курильского землетрясения 25 марта 2020 г.....	31
3 Исследования физики сейсмического процесса.....	36
4 Детальные исследования очаговых характеристик землетрясений	42
5 Мало-апертурные группы, исследование слабых событий.....	43
6 Аппаратное и аппаратно-программное обеспечение исследований	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	51
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	54
ПРИЛОЖЕНИЯ:	
Приложение А – Публикации по теме НИР, изданные в 2020 г.....	57
Приложение Б – Зарегистрированные программы в 2020 г.....	59

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие сокращения и обозначения.

Г-Р	–	закон Гутенберга-Рихтера
ООСЗ	–	обобщенная окрестность сильного землетрясения
ОРП	–	обобщенное распределение Парето
ОСЗ	–	обобщенное сильное землетрясений
ОСР	–	общее сейсмическое районирование
СКО	–	среднеквадратичное отклонение
ФСЕ	–	фазовый статистически эффективный алгоритм
GEV	–	обобщенное распределение экстремальных значений
PGA	–	пиковое максимальное ускорение грунта
PGV	–	пиковая максимальная скорость грунта

ВВЕДЕНИЕ

Задача оценки сейсмической опасности имеет важное теоретическое и практическое значение, уточнение этих оценок является основной задачей работ по проекту, другие задачи носят подчиненный характер. Развитие методов анализа параметров очага и среды, а также аппаратные исследования являются в рамках темы вторичными, служебными по отношению к задаче оценки сейсмической опасности. Актуальность этой основной задачи и неудовлетворительность существующих подходов к ее решению видны уже из сложившейся общемировой практики пересмотра карт сейсмической опасности (ОСР) раз в 10-20 лет. При этом актуальность задачи уточнения оценки сейсмической опасности, в особенности в плане вероятности реализации редких сильных землетрясений, становится все более острой в связи с сооружением большого числа особо важных и потенциально высоко-опасных сооружений (АЭС, ГЭС, других), иногда и с очень длительным сроком эксплуатации (таковы, например, хранилища радиоактивных отходов, безопасная эксплуатация которых должна обеспечиваться в течении нескольких тысяч лет и более).

Основным, традиционно используемым источником информации при построении карт сейсмической опасности являются данные инструментальных сейсмических наблюдений; именно они обеспечивают наиболее точную информацию о сейсмическом режиме. Однако ряды инструментальных наблюдений короткие, редко более сотни лет. В то же время период повторяемости наиболее сильных землетрясений, дающих основной вклад в суммарные значения ущербов от землетрясений, может составлять сотни и первые тысячи лет. Отсюда понятно, что инструментальных данных недостаточно для решения задачи оценки сейсмической опасности. Традиционно инструментальные наблюдения дополняются историческими и палеосейсмическими данными, а также различного рода оценками величины возможных землетрясений по геологическим и сеймотектоническим данным. Подход к оценке сейсмической опасности на основе выявления зон возможных очагов сильных землетрясений (зон ВОЗ) по комплексу геологических, геоморфологических и геофизических данных развивается в рамках другой темы института, и здесь не рассматривается.

Ядром данной темы является новый подход к оценке сейсмической опасности на теоретически корректной основе теории экстремальных значений теории вероятностей. Участники темы (В.Ф.Писаренко и М.В.Родкин) являются известными в мире специалистами по применению методов теории экстремальных значений в геофизике. В рамках данной темы исследования на основе методов теории экстремальных значений весомо дополняются комплексом исследований по анализу текущего сейсмического

режима (как в плане развития методов регистрации и анализа слабой сейсмичности, так и анализа сеймотектонической ситуации, более полного представления информации по фокальным механизмам и учета характеристик среды). Решение проблемы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений, несомненно, значительно бы продвинулось, если бы была создана адекватная физическая модель сейсмического процесса. Задача понимания физики этого процесса особенно важна при решении задач прогноза, но она имеет важное значение и в задаче оценки сейсмического риска. Очевидно также, что задача понимания физики сейсмического процесса весьма далека от своего решения и, несомненно, не может быть решена в рамках данной темы. Тем не менее, определенный вклад в решение этой задачи был сделан, и эти вопросы освещаются в данном отчете.

Работы по теме предусматривают не только использование инструментальных данных. Также используется оригинальный авторский подход к оценке возможных максимальных массовых скоростей грунта (PGVs) по данным полевых наблюдений смещений скальных отдельностей. Этот метод, впервые предложенный и обоснованный в (Родкин и др., 2012), является одним из методов палеосейсмических исследований, но он существенно менее трудоемок и проще в реализации, чем обычно используемый метод палеосейсмических исследований, основанный на вскрытии и анализе канав в зонах активных сейсмогенных разломов.

В своей совокупности перечисленные разработки позволяют заметно продвинуться в решении поставленной задачи оценки сейсмической опасности.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Использование теории экстремальных значений в целях расчета сейсмической опасности

1.1 Постановка проблемы и обоснование подхода к решению задачи

Основной любых работ по оценке сейсмической опасности, как известно, является закон Гутенберга-Рихтера (далее Г-Р). Этот закон можно сформулировать следующим образом. Если в некотором, достаточно большом сейсмоактивном регионе достаточно долго наблюдать землетрясения, то распределение их числа N по магнитудам m будет иметь следующий вид:

$$\lg(N) = a + b \cdot (m - m_0), \quad (1)$$

где N – число землетрясений с магнитудами не менее m , m_0 – нижний порог регистрации землетрясений, $a > 0$, $b < 0$ параметры закона (они могут иметь различные значения в различных сейсмических регионах).

При формулировке в терминах сейсмической энергии или сейсмического момента закон Г-Р принимает вид степенного закона. Разъяснению физического смысла закона Г-Р, статистической оценке его параметров и различным его модификациям посвящено огромное количество работ. Однако, почти сразу в сейсмологической практике стала выявляться и неудовлетворительность закона Г-Р в диапазоне очень больших магнитуд. Из общих соображений очевидно, что закон Г-Р не может быть продолжен в область сколь угодно больших значений магнитуд, так как закон Г-Р отвечает расходящемуся ряду по величинам сейсмической энергии (и сейсмического момента). Эмпирически наблюдаемые параметры закона (1) таковы, что число событий с увеличением магнитуды на единицу падает примерно на порядок, но сейсмическая энергия одного события возрастает примерно в 30 раз, что указывает на физически нереализуемую ситуацию как бы бесконечности среднего по времени значения сейсмической энергии. При этом, благодаря концентрации энергии в области максимальных магнитуд, именно такие максимальные редкие события дают основной вклад в суммарные значения ущерба от землетрясений. Отсюда проблема оценки сейсмической опасности оказывается тесно связанной с оценкой вероятности возникновения и локализацией редких (и потому, как правило, еще не реализовавшихся за время сейсмических наблюдений) сильнейших землетрясений.

Было предложено несколько вариантов решения указанной проблемы. Наиболее часто исходят из предположения о продолжении соотношения Г-Р (1) до некоторого максимально возможного специфического для данной области землетрясения, магнитудой M_{\max} . Работы этого направления обычно направлены на разработку методов наилучшего определения величин M_{\max} . Этот подход представляется, однако, довольно уязвимым, так как резкий обрыв закона Г-Р на некотором значении M_{\max} трудно обосновать физически; откуда следует, что этот вариант решения проблемы является только довольно грубой аппроксимацией неизвестного истинного закона повторяемости землетрясений. Достаточно представительная подборка публикаций этого направления приведена в монографии [Писаренко, Родкин, 2007], более поздние варианты такого подхода и соответствующая библиография представлены в работах [Kijko, 2011; Kijko, Singh, 2011; Vermeulen, Kijko, 2017]. Заметим также, что величина максимально возможного события может быть оценена, исходя из геолого-геофизических соображений о связи M_{\max} с совокупностью геолого-геофизических параметров. Данное направление исследований представлено в монографии [Горшков, 2010] и рассматривается в другой теме нашего института.

Другой вариант решения проблемы задает некоторое правило постепенного прогрессирующего, быстрее закона (1), уменьшения вероятности событий с ростом магнитуды. Такой закон убывания числа землетрясений с ростом магнитуды должен обеспечить конечность средних значений сейсмической энергии и мощности источника сейсмогенной энергии. Наиболее известным вариантом такого подхода является модель Я. Кагана, (1999; и др.), предполагающая умножение распределения (1) на экспоненту, что начинает проявляться только при больших магнитудах. Однако именно такой вид хвоста распределения ничем дополнительно не обосновывается, и потому также может рассматриваться только как более или менее хорошее приближение к реальному неизвестному закону распределения.

Теоретически более оправданным представляется описание хвоста распределения на основе положений теории экстремальных значений [Embrechts et al., 1997; Писаренко, Родкин, 2007; Pisarenko, Rodkin, 2010]. В этом случае поведение хвоста распределения задается одним из предельных распределений – Обобщенным распределением Парето (ОПР) или Обобщенным распределением экстремальных значений (GEV). После оценки значения 3-х неизвестных параметров ОПР или GEV распределения расчет любой статистической характеристики становится тривиальной задачей. Обычно такой расчет реализуется на основе использования метода максимального правдоподобия, при этом для достаточно точного определения параметров необходимо знание о 30-50 сильнейших

событиях, характеризующих поведение хвоста данного исследуемого эмпирического распределения. Проблема, однако, в том, что в большинстве практически важных случаев мы не располагаем таким числом зарегистрированных сильных событий.

Далее, в рамках этого раздела темы, рассматриваются подходы, направленные на преодоление этого ограничения. Основным результатом отчетного периода является новая модель графика повторяемости землетрясений и проведение сравнения точности и робастности разных методов расчета сейсмической опасности.

1.2 Двухзвенная модель графика повторяемости землетрясений.

В качестве модели теоретического «истинного» закона распределения нами было предложено составное распределение, называемое далее M2, которое задаётся следующим образом (см. подробнее [Писаренко и др., 2020]). Функция распределения магнитуд $F(x)$ состоит из двух частей

$$F(x) = \begin{cases} C_1 \{ 1 - \exp[-b \cdot (x - m_0)] \}; & m_0 \leq x \leq h; \\ C_3 + C_2 \{ 1 - [1 + (\xi/s) \cdot (x - h)]^{-1/\xi} \}; & h \leq x \leq M_{\max} = h - s/\xi, \xi < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Модель (2) в области событий средней и слабой силы описывается обычным законом Г-Р, а в области редких сильнейших событий Обобщенным распределением Парето (ОРП). Эта модель содержит набор параметров. Порог h разделяет 2 ветви модели, Г-Р и ОРП. Нижняя граница распределения m_0 зависит от системы регистрации землетрясений и обычно определяется границей соблюдения прямолинейности закона Г-Р на левом хвосте распределения. Мы полагаем m_0 известным. Параметр b – это наклон прямолинейной ветви ГР в логарифмическом масштабе, ξ , s – параметры ОРП, характеризующие остроту «клюва» на конце распределения и масштаб; C_1 , C_2 , C_3 – константы (они зависят от указанных параметров), которые должны обеспечить нормировку функции распределения $F(x)$ и её непрерывность в точке h :

$$\begin{aligned} C_1 &= 1 / \{ 1 + (1+\xi) \cdot \exp[-b(h-m_0)] - \exp[-b(h-m_0)] \}, \\ C_2 &= 1 - C_1 \{ 1 - \exp[-b(h-m_0)] \}, \\ C_3 &= C_1 [1 - \exp[-b \cdot (h - m_0)]]. \end{aligned} \quad (2a)$$

Выбор модели M2 обусловлен следующими соображениями. Общеизвестно, что в диапазоне малых и средних магнитуд распределение хорошо описывается законом Гутенберга-Рихтера. Относительно диапазона больших магнитуд (хвоста распределения) у сейсмологов нет единого мнения. Ясно только одно: из физических соображений

распределение магнитуд должно быть конечным, тогда как неограниченный закон Г-Р не удовлетворяет этому требованию. Модель (2) основана на том, что в пределе, при большом числе наблюдений, хвост распределения должен подчиняться закономерностям теории экстремальных значений. В соответствии с этой теорией распределение хвоста должно сходиться к Обобщенному Распределению Парето, ОРП (см. [Gumbel, 1956; Embrechts et al., 1997; Писаренко, Родкин, 2007; Pisarenko, Rodkin, 2010]). Это и реализовано в модели (2), которая задаётся параметрами: h , b , s , ξ . Заметим, что в общем случае, на значение параметра ξ в ОРП законе распределения ограничений не накладывается. Но при $\xi \geq 0$ распределение ОРП, как и неограниченный закон Гутенберга-Рихтера, не отвечает физическому требованию конечности распределения. Поэтому в модель M2 в (2) введено дополнительное условие $\xi < 0$.

Модель (2) включает 4 неизвестных параметра h , b , s , ξ , которые необходимо оценить по имеющимся данным. Однако резонно потребовать непрерывности не только плотности распределения в точке h сочленения ветвей модели, но и непрерывности её первой производной. Это представляется естественным, поскольку плотность вероятности магнитуд должна описывать некий плавный физический механизм перехода от самоподобного процесса генерирования малых и средних толчков к процессу генерирования крупнейших событий, связанных с большими блоками и конечной толщиной земной коры. Из непрерывности производной плотности $f(m)$ в точке $m = h$ следует соотношение:

$$s = (1+\xi)/b. \quad (3)$$

Отсюда, зная значение наклона графика повторяемости в области часто повторяющихся несильных землетрясений, получаем соотношение для определения одного из параметров ОРП закона распределения. Более того, параметр h оказывается не критичным, так как в точке h непрерывна не только плотность распределения (2), но и производная плотности, что значит, что этот параметр может задаваться довольно грубо. Таким образом, для определения всех параметров модельного M2 распределения, фактически, требуется определить только один из параметров ОРП закона распределения. Это позволяет определять M2 закон повторяемости сильных событий для пространственно-временных областей с существенно меньшим числом сильных землетрясений. Фактически, мы получаем возможность получать теоретические оценки закона повторяемости сильных землетрясений с пространственным разрешением, принятым при построении карт ОСР и при расчетах сейсмической опасности в модели обрезанного распределения Г-Р.

Получив такое решение, естественно поставить задачу сравнения робастности и точности оценки сейсмической опасности разными методами.

1.3. Сравнение точности оценок сейсмической опасности разными методами

Сравниваются модель, основанная на расчете максимально возможной магнитуды обрезанного графика повторяемости Г-Р и модель М2. Первая модель рассчитывалась А.А.Любушиным на основе применения метода Байеса [Pisarenko, Lyubushin 1999; Lyubushin et al. 2002, Lyubushin and Parvez 2010]. Параметры М2 модели рассчитывались методом максимального правдоподобия (ММП).

1.3.1. Метод сравнения

В данной статье проблема оценки M_{max} трактуется как чисто статистическая; сеймотектонические и физические факторы, определяющие величину M_{max} не рассматриваются. $M_{max}(T)$ понималась как максимальная магнитуда события, которое произойдет в заданной области в будущий интервал времени T . При такой трактовке M_{max} является случайной величиной, характеристики которой могут быть статистически оценены с определённой надёжностью. Были рассмотрены три разных временных масштаба. Масштаб 1-10 лет представляет интерес для страхования, масштаб 10-50 лет - для строительства и эксплуатации обычных сооружений, масштаб 50 - сотни лет – для сооружений особого назначения (АЭС, иные особо ответственные предприятия, хранилища радиоактивных отходов и т.п.). Естественно, значения $M_{max}(T)$ для разных масштабов времени для одного и того же региона могут сильно отличаться (на единицу магнитуды и более). Эти соображения приводят к тому, что M_{max} целесообразно рассматривать не как региональный (неизвестный) параметр, а как случайную величину $M_{max}(T)$, зависящую от длины будущего интервала времени T . Такой подход был предложен ранее в [Pisarenko et al., 2010] и развит в ряде дальнейших публикаций [Pisarenko, Rodkin, 2010; Pisarenko, Rodkin, 2014 и др.]. Эта случайная величина имеет корректное вероятностное определение и функцию распределения, которую мы будем обозначать $F_T(x)$, где x – магнитуда землетрясения (индекс T мы часто будем опускать). Иногда удобнее пользоваться не самой $F_T(x)$, а обратной по отношению к ней функцией, которая определяется из соотношения:

$$F_T(x) = q, 0 \leq q \leq 1. \quad (4)$$

Если $F_T(x)$ непрерывна и монотонна, то обратная функция $Q_T(q)$ определяется однозначно. Она представляет собой квантиль уровня q распределения $F_T(x)$. Квантиль уровня $q = 0.5$ является медианой распределения. Для значений q близких к 1 квантиль $Q_T(q)$ может служить верхней границей доверительного интервала для магнитуд s

уровнем доверия q . Задавая несколько значений уровня доверия, скажем, $q = 0.9; 0.95; 0.975; 0.99; 0.999$, и вычисляя оценки соответствующих квантилей $Q_T(q)$, получаем достаточно полную характеристику поведения максимальных за время T магнитуд.

Квантиль максимального события растёт логарифмически с ростом T и с ростом показателя $1/(1-q)$. Если одиночная магнитуда имеет Обобщённое распределение Парето (ОРП)

$$\Phi(x) = 1 - [1 + b \cdot \xi(x - h)]^{-1/\xi}, \quad (5)$$

то получаем

$$Q_T(q) = h + (1/b\xi) \cdot \left[\left(\frac{\log(\frac{1}{1-q})}{\lambda T} \right)^{-\xi} - 1 \right]. \quad (6a)$$

При малых по модулю отрицательных ξ получаем приближение

$$Q_T(q) \approx h + (1/b) \cdot \log(\lambda T) + (1/b) \cdot \log\left(\frac{1}{1-q}\right). \quad (6б)$$

Соотношения (6a) - (6б) полезны при оценках сейсмического риска. Они позволяют устанавливать своего рода эквивалентность между длительностью наблюдений произвольного Пуассоновского потока с заданной интенсивностью и уровнем значимости (надёжностью) оцениваемой величины при анализе максимальных событий на будущем интервале времени.

Были рассчитаны статистические оценки квантилей, их смещение, стандартное отклонение и среднеквадратичное отклонение. Обычно эти характеристики оцениваются по реальной выборке (каталогу землетрясений) тем или иным способом. Такой расчёт обычно основан на некотором распределении, которое гипотетически соответствует реальной выборке. В данном случае, по-видимому, впервые, оценки получены на большом количестве (1000 штук) искусственных каталогов с известным законом распределения. Это дало возможность сравнить «истинную» точность оценок с той, которая получается по одному каталогу с неизвестным законом распределения. Модельные характеристики разброса относительно известного ответа ожидаемо оказались несколько больше величин разброса, оцениваемых по одному (реальному) каталогу.

В качестве точного закона распределения (для генерирования на его основе 1000 искусственных каталогов) было использовано составное распределение M2, состоящее из двух ветвей: распределение Г-Р для диапазон малых и средних магнитуд и Обобщённое Распределение Парето (ОРП) для больших магнитуд. Обоснование такого выбора модели следует из вышесказанного в разделе, посвященном модели M2. В качестве прообразов для точных законов распределения использовались каталоги 6 разных регионов, выбранных из мирового каталога ISM-GEM (1904-2014 гг.), который обеспечивает наиболее длинный числовой ряд в единых магнитудах M_w [Di Giacomo et al., 2018]. Были

выбраны 6 регионов: Атлантика, Япония, Курильские острова, Новые Гебриды, Перу, Филиппины (см.Рис.1). Величина m_0 (минимальная магнитуда) для всех регионов принята $m_0=6.0$. Критерии выбора таких регионов были следующие: сеймотектоническая однородность региона, статистическая представительность, разнообразие в поведении графика повторяемости и, в особенности, хвоста распределения. Дополнительным условием было возможное разнообразие сеймотектонического характера регионов.

Для каждого из региональных каталогов подбирался теоретический закон распределения, по которому генерировалась 1000 каталогов, что позволяло затем надёжно оценить систематическое смещение и случайный разброс для каждого из регионов.

Сравнивались 2 различных способа: метод максимального правдоподобия (ММП) и метод Байеса (МБ), введённый авторами в [Pisarenko et al., 1996, Pisarenko, Lyubushin 1999] и модернизированный одним из авторов в последующих работах [Lyubushin et al. 2002, Lyubushin and Parvez 2010]. В методе ММП в качестве параметрической модели использовалась модель M2, в Байесовском методе – усечённое распределение Гутенберга-Рихтера. Помимо тестирования оценок квантилей на искусственных каталогах с известным ответом, мы провели также оценивание квантилей на их реальных «прототипах».

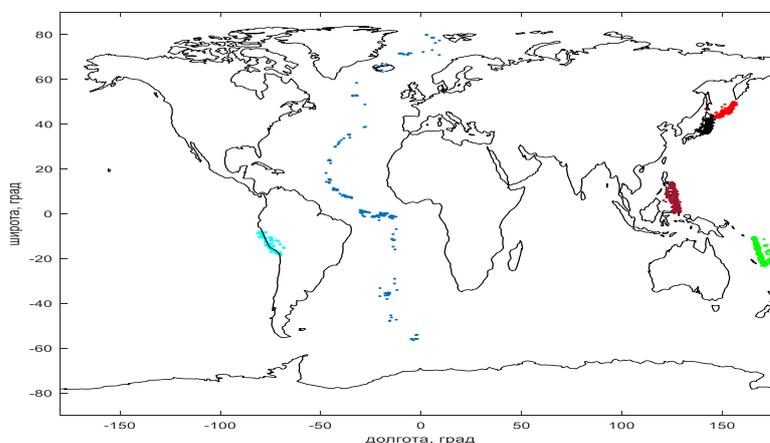


Рис 1. Сейсмические регионы: Атлантика (синий), Япония (чёрный), Курильские острова (красный), Новые Гебриды (зелёный), Перу (голубой), Филиппины (коричневый)

1.3.2. Оценка квантилей на искусственных каталогах.

Искусственные каталоги генерировались следующим способом. Известно, что если любую случайную величину η с непрерывной функцией распределения $F(x) = \Pr\{\eta \leq x\}$ подставить в эту функцию в качестве аргумента, то полученная случайная величина

$$\zeta = F(\eta) \quad (7)$$

будет иметь равномерное распределение на отрезке $[0; 1]$. Уравнение (7) можно разрешить относительно η , применив к обеим частям (7) функцию V , обратную по отношению к функции F :

$$V(\zeta) = \eta. \quad (8)$$

Равенство (8) утверждает, что если в функцию V подставить в качестве аргумента случайную величину ζ с равномерным на $[0; 1]$ распределением, то получится случайная величина с распределением F . Таким способом можно генерировать случайные величины с любым заданным законом, используя компьютерные псевдослучайные числа с равномерным на отрезке $[0; 1]$ распределением. В качестве модели теоретического (истинного) закона распределения использовалось составное распределение $M2$; параметры модельного распределения, аналога реальных распределений для 6 выбранных регионов, даны в табл. 1.

Таблица 1. Параметры распределения $M2$

Регион, название, номер	n, число основных событий	h	b	ξ
Атлантика, 1	257	6.60	0.95	-0.34
Япония, 2	245	6.72	0.82	-0.012
Курилы, 3	236	6.70	0.79	-0.14
Новые Гебриды, 4	413	6.62	0.88	-0.13
Перу, 5	89	6.90	0.57	-0.20
Филиппины, 6	377	6.73	0.76	-0.16

Графики повторяемости для выбранных регионов достаточно разнообразны (рис. 2). Из общих теоретических соображений, наиболее ожидаемым поведением хвоста интегрального графика повторяемости можно полагать его более или менее систематический загиб вниз. Такие графики действительно наиболее типичны. В нашей выборке им отвечают область Срединно-Атлантического хребта, Новых Гебрид и Филиппин, соответствующие номера графиков 1, 4, 6. Однако эмпирические графики повторяемости таким типом поведения хвоста распределения не исчерпываются. Часто встречаются нерегулярные вариации поведения хвоста распределения. Так, например, даже и на кумулятивных графиках повторяемости достаточно часто встречаются горбы (см. Рис. 2), которые, конечно, могут иметь и случайный характер. Впрочем, они могут быть и не случайными, а соответствовать повышенной вероятности сильных землетрясений в некотором диапазоне магнитуд. В случае если такой диапазон достаточно

узок и расположен близко к самому хвосту распределения, такие землетрясения называют *характеристическими* [Ellsworth, 1995]

Последнее даёт основание рассмотреть в качестве возможных графиков повторяемости также и случаи с систематическим завышением числа сильных землетрясений в некотором диапазоне сильных событий. Среди рассмотренных регионов таковы случаи Японии, Курил и Перу, номера регионов 2, 3, 5 (Рис.2). Такие отклонения можно трактовать и как относительно маловероятные случайные флуктуации хвоста графика повторяемости. Основная цель нашей работы заключается в том, чтобы оценить реальную эффективность оценки квантилей максимальных событий в будущем интервале времени T на примерах с точно известным ответом, а также продемонстрировать устойчивость и робастность этих квантилей, как информативной и важной характеристики сейсмического риска. Графики эмпирических распределений магнитуд и их «прототипы» по модели $M2$ для перечисленных выше регионов приведены на рис. 2.

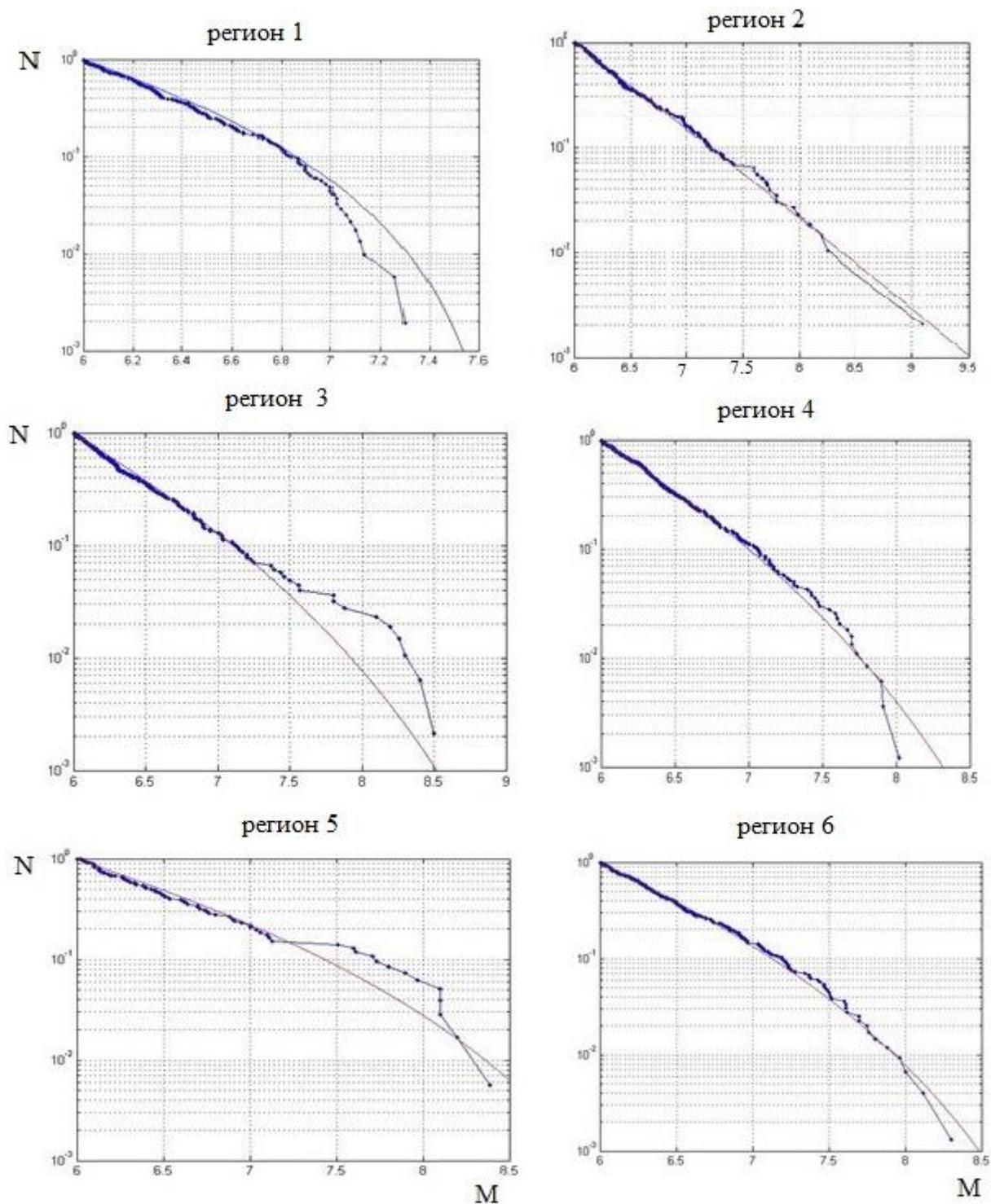


Рис.2 Теоретические и эмпирические комплементарные функции распределения магнитуд.

Номера регионов по Табл. 1. По оси «X» – магнитуды, по оси «У» – число событий.

Поскольку сейсмический поток полагается стационарным Пуассоновским потоком, требуется провести декластеризацию исходных каталогов, избавиться от афтершоков. Мы воспользовались для этой цели методом, использующим обобщённое расстояние между

двумя событиями, учитывающее как пространственную, так и временную компоненту (см. подробнее [Писаренко, Родкин, 2019]). Декластеризация привела к следующим процентам главных толчков (по отношению ко всем толчкам): Атлантика 98.9% (257 толчков); Япония 47.4% (245); Курилы 55.0% (236); Новые Гебриды 72.3% (413); Перу 88.1% (89); Филиппины 82.1% (377). Низкий процент главных толчков в Японии объясняется большим количеством афтершоков мега-землетрясения Тохоку (2011 год).

В соответствии с теоретическими распределениями, изображёнными на Рис.2 и указанным в Табл. 1, генерировалась 1000 каталогов для каждого региона, объем каталога соответствовал реальному каталогу основных событий. Для каждого искусственного каталога число событий и магнитудный диапазон соответствовали указанным выше значениям для данного региона. Оценка параметров производилась методом максимального правдоподобия (ММП) и Байесовским методом (БМ) для усечённого распределения Гутенберга-Рихтера.

Для каждого из 1000 каталогов рассматриваемого региона оценивались квантили максимального события в будущем интервале времени T . Для квантилей были выбраны уровни $q = 0.5, 0.9, 0.95, 0.975, 0.99, 0.999$. Для интервалов T использовались значения $T = 10, 25, 50, 100, 200, 1000$ лет. Ниже приведены данные для $T = 50$ лет.

На Рис.3 для $T = 50$ лет и для 6 регионов показаны 3 типа кривых: синим цветом – истинное модельное значение квантиля, черным цветом - средние значения по методу ММП (по 1000 каталогам, они фактически не отличаются от средних по ансамблю из-за большого объёма выборки), и красным цветом – средние значения по методу БМ. По оси «х» изменения q даны в логарифмическом масштабе для величины $1/(1-q)$, которая даёт квантиль q в удобном нелинейно растянутом виде, используемом в теории информации.

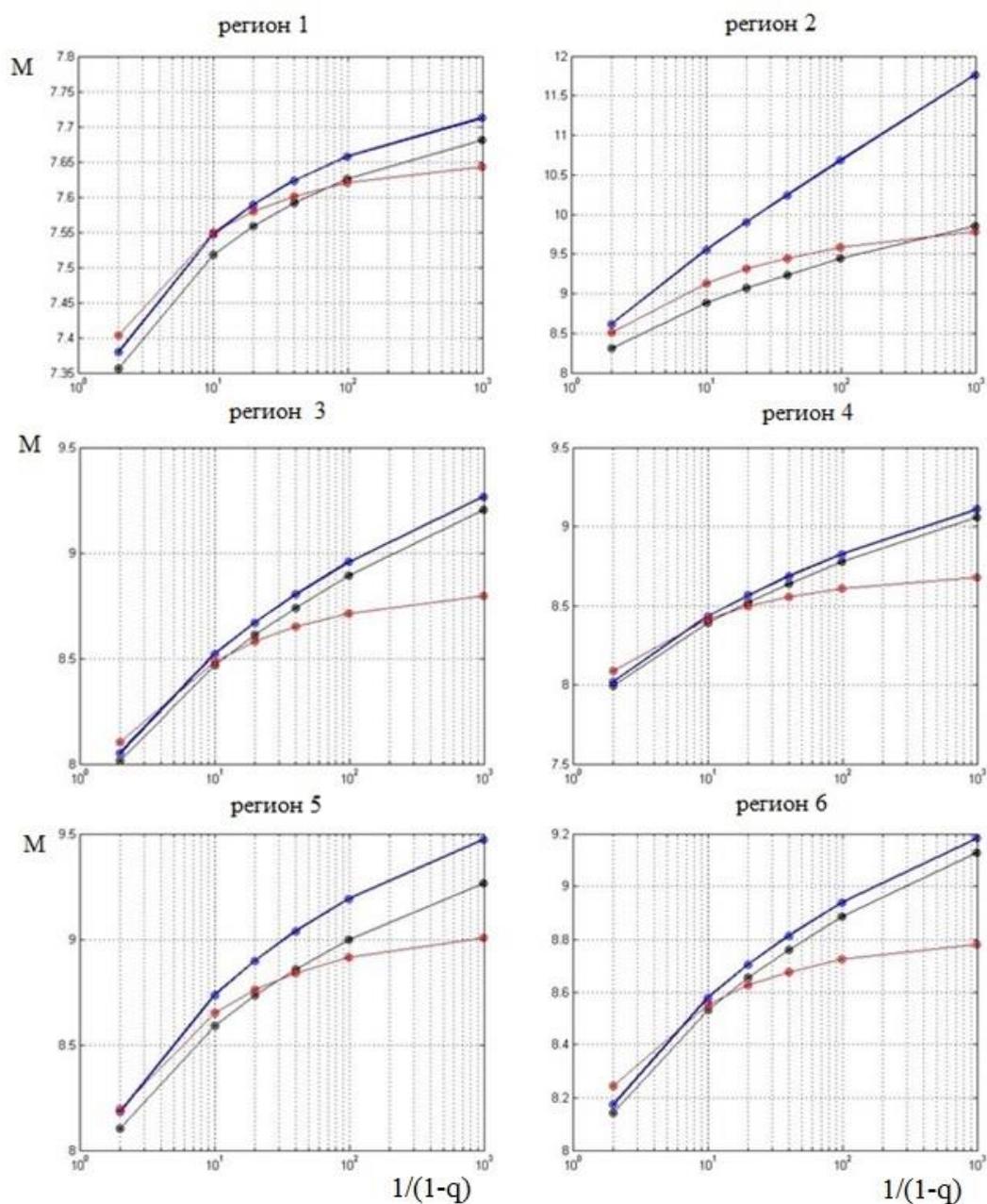


Рис. 3. Средние значения квантилей: синий (модельные значения); красный (МБ); чёрный (ММП); $T=50$ лет. Искусственные каталоги (1000 реализаций), основные толчки. По оси «X» величины $K=1/(1-q)$; по оси «Y» - магнитуды M .

Среди 6 регионов, точнее, среди 6 искусственных прототипов региональных каталогов, можно выделить 2 экстремальных региона: Атлантику и Японию. Для Атлантики характерны небольшие значения максимальных магнитуд (по каталогу объёма 257), как правило, не превосходящие 7.7. График повторяемости круто загибается вниз (см. Рис.2), что отражается в оценках параметра формы ОРП ξ , он имеет относительно большие по абсолютной величине отрицательные значения $-0.35 \sim -0.25$. Значения СКО

оценок квантилей Атлантики уровня $q = 0.9$ равны примерно 0.11, а для уровня $q = 0.999$ (очень высокий уровень, практически дающий максимально возможную магнитуду распределения) получаем примерно 0.16. Разница весьма мала, что свидетельствует о большой робастности квантилей при не слишком малых по абсолютной величине значениях параметра ξ . Для другого «экстремального» региона – Японии - значения СКО оценок квантилей уровня $q = 0.9$ равны примерно 0.35, а для уровня $q = 0.999$ получаем очень большое значение 0.95. Значения параметра ξ в искусственных каталогах малы по абсолютной величине и доходят практически до нуля. В остальных 4-х «регионах» наблюдается промежуточная ситуация. Расхождения с истинными значениями выше в регионах 2, 3, 5 (Япония, Курилы и Перу) для которых на рис.2 наблюдался горб на эмпирических графиках повторяемости, и для которых, соответственно, значения параметра ξ ближе к нулю. Для этих же регионов максимален и разброс оценок.

Обращает на себя внимание, что во всех случаях полученные оценки лежат ниже модельных «истинных» квантилей. Возможно, это обусловлено используемой моделью. В методе БМ к этому могло привести исходно задаваемое априорное ограничение магнитуд. В методе ММП к этому смещению могло приводить задаваемое при расчётах вариантов требование $\xi < 0$. Значения среднеквадратические отклонения (СКО) оценок квантилей уровня $q = 0.9$ лежат для всех регионов кроме Японии в интервале 0.1 ~ 0.5 (для Японии 0.7), а для уровня $q = 0.999$ получаем 0.15 ~ 0.8 (для Японии 2.2). Эти величины дают представление о точности возможных оценок, по одному реальному каталогу. Они получены по большому числу каталогов (1000) с точно известным ответом.

Были рассмотрены как СКО, так и систематические смещения оценок. В целом получаем, что при $T = 50$ лет и $q \leq 0.95$ отклонения значений квантилей от модельного «истинного» результата, как правило, не превосходят 0.2 единицы магнитуды и только в случае Японии приближаются к 0.5. Такая погрешность может полагаться допустимой.

1.3.3. Оценка квантилей на реальных каталогах.

Оценки были получены для тех же 6 регионов. Для реальных каталогов истинные значения квантилей неизвестны. Поэтому мы сравнивали только оценки квантилей (Рис.4).

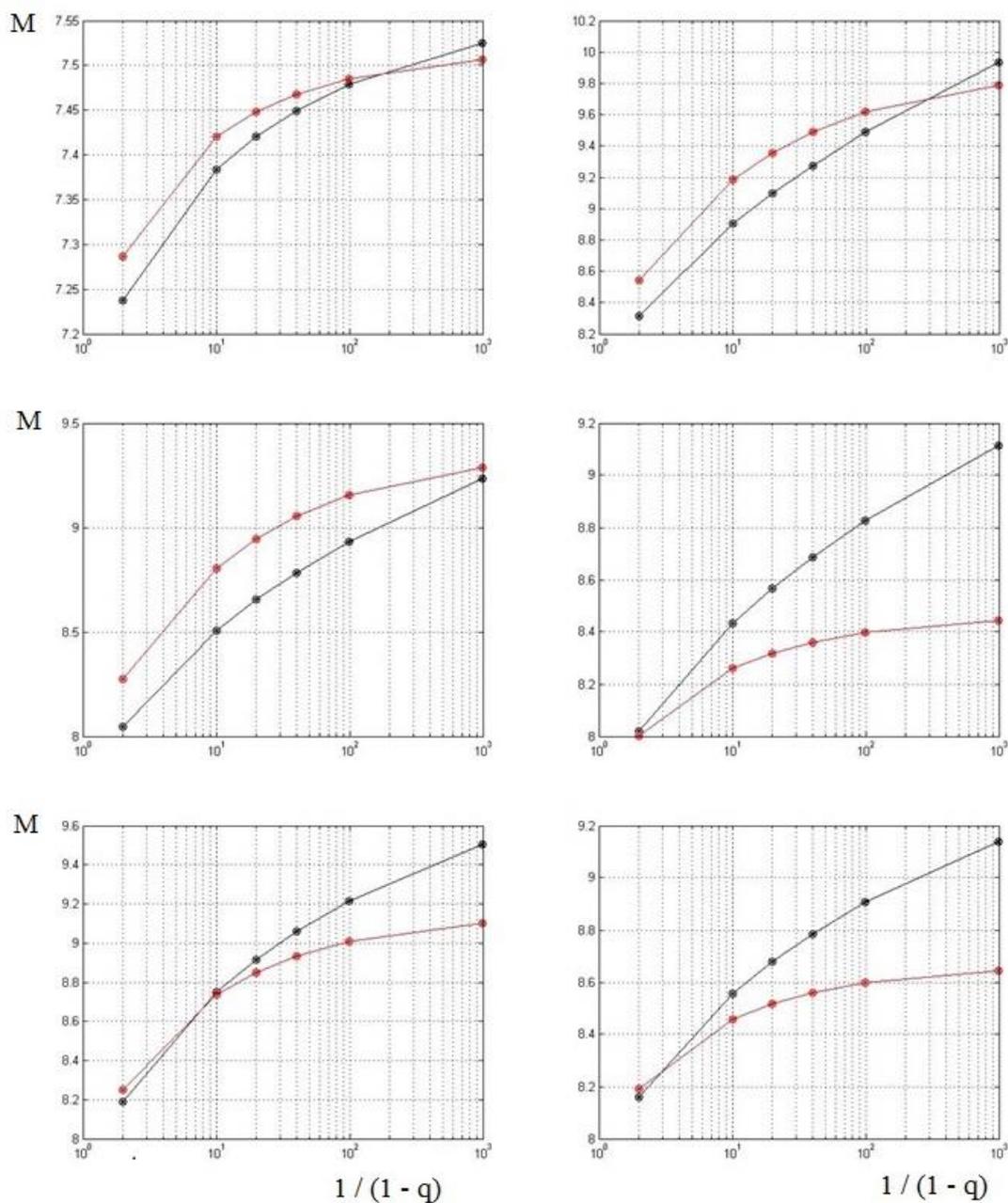


Рис. 4. Оценки квантилей: красный (БМ); чёрный (ММП). $T = 50$ лет. Реальные каталоги, основные события. По оси «X» величины $K = q/(1-q)$; по оси «Y» - магнитуды.

Максимальные различия величин квантилей при расчёте двумя разными методами для реальных каталогов не превышают 0.4 – 0.5 единиц магнитуды; только в одном случае региона 4 различие достигает величины 0.6. Эти различия оказались несколько выше для реальных каталогов, чем для их теоретических аналогов. Возможно, использование в модельных каталогах условия $\xi < 0$ несколько «сгладило» эти каталоги, сделало их более единообразными, нежели исходные.

В целом, оценки по двум методам вполне удовлетворительно согласуются. Оценка методом БМ является более «консервативной»: для уровней доверия близких к единице они систематически и все более заметно ниже оценок ММП.

Проведённое сравнение не даёт оснований предпочесть один из использованных методов оценки сейсмической опасности. Существующие обрывочные данные по максимальным магнитудам исторических и палеоземлетрясений, например, события с $M > 8.5$ для Курильской зоны субдукции [Yukinobu Okamura, Yuichi Namegaya, 2011], ложатся в пределы, полученные обоими методами, и также не дают основания для выбора одного из вариантов расчёта.

В диапазоне квантилей для $T=50$ лет и $q \leq 0.90$ погрешности определения величин M_{\max} обоими методами лежат в пределах практических требований к такого рода оценкам. Для более высоких квантилей расхождения больше, но указать предпочтительную модель затруднительно; для разных регионов меньшие погрешности дают разные модели.

Расчёт методом БМ ожидаемо даёт более консервативную оценку и меньший рост величин M_{\max} в области больших интервалов времени T и доверительных пределов q . Возможно, именно это различие и будет в дальнейшем являться ключевым при выборе решения рекомендовать тот или иной подход. В пользу консервативного (БМ) варианта решения говорят соображения о вероятном исчерпании энергетического потенциала для реализации экстремально сильных сейсмических событий. В пользу варианта ММП говорит теоретическая общность теории экстремальных значений и предельных распределений. Выбор между двумя моделями описания решится тем, произойдут ли где аномально сильные события, отвечающие длинному узкому «клюву», характерному для ОРП закона распределения при близких к нулю отрицательных значениях (и не предполагаемые в модели резкого обрезания закона Г-Р). Заметим, что развитые подходы применимы не только для оценки сейсмической опасности, но и во многих других случаях, где имеют место степенные распределения с тяжёлым хвостом, в частности, при анализе величин ущерба от природных и природно-антропогенных катастроф [Pisarenko, Rodkin, 2014].

По этому разделу отчета в 2020 году были опубликованы:

Pisarenko V.F., M.V. Rodkin. Statistics and spatial-temporal structure of ground acceleration caused by earthquakes in the North-Western Pacific region. Pure Appl Geophys. Pure Appl. Geophys. 2020, 177, 6, 2563-2578. ISSN: 0033-4553eISSN: 1420-9136

Pisarenko V., Rodkin M. A Collection of Statistical Methods for Analysis of the Disaster Damages and the Seismic Regime. Geographies of the Anthropocene, Vol. 2, No. 2 (2019), pp. 43-63.

Писаренко В.Ф., М.В.Родкин, Т.А.Рукавишникова. Стабильная модификация закона повторяемости землетрясений и перспективы ее применения в сейсморайонировании. Физика Земли, 2020, №1, 62-76.

Rodkin, M.V. Dependence of Losses from Natural Hazards on the Prosperity of Societies: A Brief Review. Journal of Anthropological and Archaeological Sciences. 1, 5, 134-137.

2. Региональные исследования (проведены совместно с сотрудниками КФ ФИЦ ЕГС РАН)

2.1. Результаты комплексных исследований Землетрясения Углового Поднятия 2018 г., $M_w=7.3$

Землетрясение Углового Поднятия (ЗУП) произошло 20.12.2018 г. на краю Тихоокеанской литосферной плиты вблизи сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг и имело магнитуду $M_w=7.3$. Гипоцентр землетрясения и его облако афтершоков располагались в диапазоне глубин 35–55 км под акваторией Тихого океана. На рис.5 приведена схема сочленения литосферных плит региона и положение на ней эпицентра главного толчка ЗУП. Помимо крупнейшей Тихоокеанской здесь располагаются две относительно больших литосферных плиты: Охотская (включающая Камчатку) и Берингия, а также самостоятельно перемещающиеся блоки Алеутской дуги, ближайший из которых к ЗУП – Командорский.

Границами Тихоокеанской плиты в этом регионе являются Камчатский и Алеутский желоба. Непосредственно южнее района их соединения с океанической стороны располагается Угловое поднятие, возвышающееся над дном желобов на 1.5 - 2.5 тыс м. В его пределах располагался основной очаг ЗУП. В этом районе землетрясения (в основном слабые) фиксируются в течение всего периода инструментальных наблюдений на Камчатке.



Рис. 5. Эпицентр землетрясения Углового поднятия (звезда) на тектонической схеме сочленения литосферных плит в северо-западной части Тихого океана. Стрелками на границах показаны направления относительного перемещения плит.

ЗУП ощущалось на расстояниях до 500 км, но благодаря удаленности от большинства населенных пунктов, не привело к разрушительным последствиям. Согласно опросу населения, максимальная балльность составила $I=5-6$ на эпицентральной расстоянии $\Delta \sim 90$ км на о. Беринга в с. Никольское. Там же отмечено максимальное инструментально зарегистрированное акселерометром ускорение ~ 60 см/сек².

Примерно за два года до ЗУП, в конце 2016 г., в районе его будущего очага в течение месяца наблюдалась форшоковая активность с магнитудой сильнейшего события $M_L=5.85$. Как и ЗУП, сильнейшие форшоки были обусловлены напряжением растяжения, направленным субгоризонтально, субширотно ($Az \sim 276-279^\circ$). Началом сейсмического процесса в очаге ЗУП можно считать ноябрь 2016 г.

ЗУП вызвало интенсивную афтершоковую активность (рис.6). По состоянию на конец сентября 2019 г. зарегистрировано ~ 4000 афтершоков. Сильнейший афтершок имел магнитуду $M_L=6.55$, еще 25 событий соответствовало магнитудам $M_L \geq 5.0$. Облако афтершоков первых четырех дней было вытянуто субмеридионально вдоль простирания трещины растяжения, соответствующей механизму очага ЗУП (рис. 7). Общая площадь афтершоковой области составила ~ 5 тыс. км². Особенностью афтершокового процесса является ярко выраженная пространственная кластеризация сейсмических событий – выделены три кластера афтершоков. Форма кумулятивного временного хода землетрясений в трех кластерах различна: только в главном (включающем окрестности эпицентра ЗУП) кластере она соответствует традиционному представлению о плавном затухании афтершокового процесса. В двух побочных кластерах наблюдались синхронные процессы активизации.

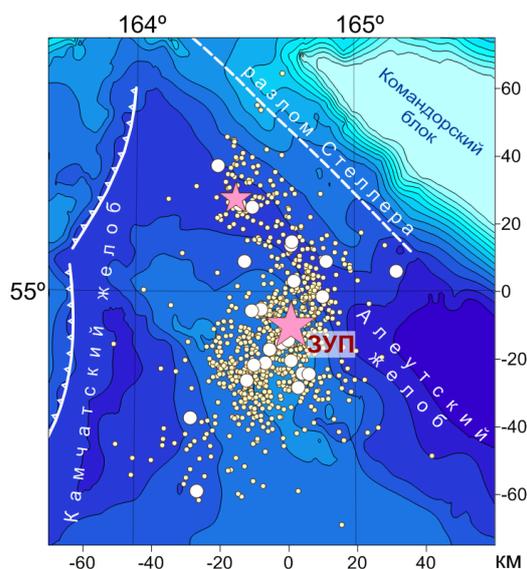


Рис. 6. Эпицентр и облако афтершоков ЗУП за период с 20 декабря 2018 г. по 31 мая 2019 г. Звезды — эпицентры главного толчка и сильнейшего афтершока 24 декабря 2018 г. Белыми кружками обозначены землетрясения с магнитудами $M_L \geq 5.0$.

По записям широкополосных сейсмических станций Дальнего Востока определены тензор сейсмического момента ЗУП (рис. 7), глубина эквивалентного источника 25 км, длительность очагового процесса 20 с и моментная магнитуда $M_w=7.3$. Тензор сейсмического момента ЗУП обладает большой недипольной составляющей и может интерпретироваться как трещина растяжения. Полученные по волновым формам оценки параметров очага ЗУП дополнены моделированием косейсмических подвижек, зафиксированных на ближайших к эпицентру ГНСС станциях BRNG ($\Delta \sim 90$ км) и UKAM ($\Delta \sim 200$ км) (рис.7). По этим данным получены оценки размеров основного очагового разрыва: длина 60 км, ширина 25 км, величина очаговой подвижки 2.1 м.

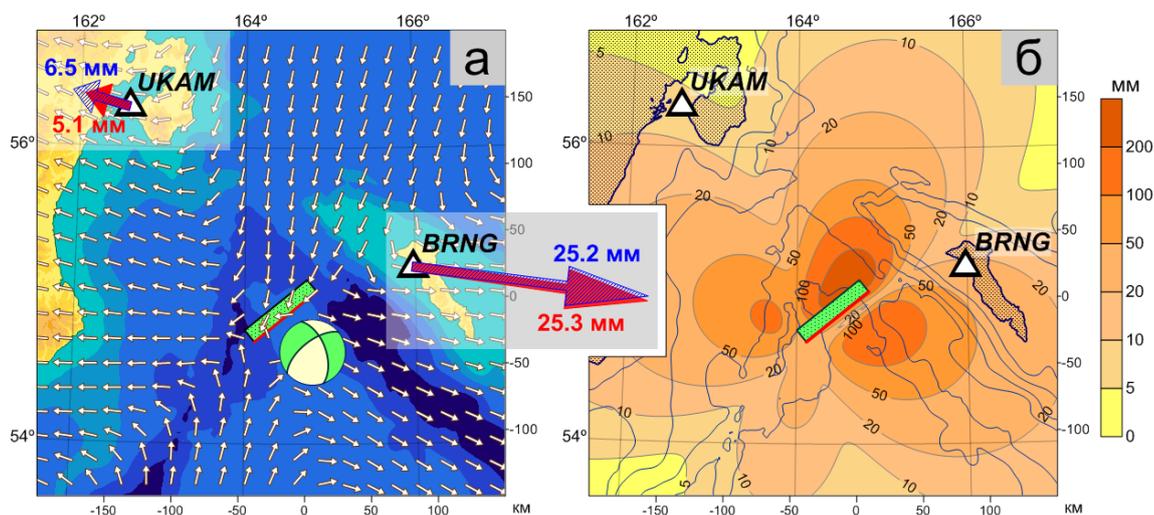


Рис. 7. Модельное поле горизонтальных косейсмических смещений. **a** - направления смещений (внемасштабные белые стрелки) и векторы косейсмических смещений станций BRNG и UKAM: зарегистрированные (красные) и модельные (синие), **b** – изолинии амплитуд горизонтальных смещений. Зеленым прямоугольником изображена проекция модельного очага на дневную поверхность, красной линией выделена его верхняя кромка. Оценки параметров тензора сейсмического момента: (Strike, Dip, Rake) = (231, 61, -36), коэффициент Лодэ-Надаи = -0.39, скалярный момент = $0.99 \cdot 10^{20}$ Нм.

В сейсмологических каталогах первой половины 20 века присутствуют два сильных землетрясения предположительно произошедших в районе Углового поднятия: 30 января 1917 г., MS=7.9 и 30 июня 1936 г., MS=7.5. Однако неопределенность в положении очагов и противоречивая макросейсмическая информация не позволяют сопоставлять их тектонические позиции с ЗУП и на этой основе оценивать повторяемость сильных событий региона. Тем не менее ЗУП и серия его афтершоков являются одним из закономерных эпизодов в сейсмическом процессе в окрестности сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, где возможны сильные землетрясения с магнитудами до ~9, которые могут вызвать катастрофические цунами.

2.2. Детальное цунамирайонирование района бухты Бечевинки на восточном побережье Камчатки, в которой ведется строительство крупного терминала по перегрузке СПГ

Разработана и применена вероятностная методика районирования, основанная на компьютерном моделировании распространения в акваториях и наката на берег волн цунами, порожденных сильными землетрясениями. Работа включает разнообразный спектр исследований от полевых работ в районе бухты Бечевинка до разработки статистических методик и компьютерного математического моделирования. В рамках общей работы основными областями ответственности участника работ по теме А.В.Ландера были статистические методики и создание синтетического каталога цунамигенных очагов землетрясений, обладающего статистическими свойствами близкими к наблюдаемой сейсмичности акваторий Восточной Камчатки (рис. 8).

Оценка возможного воздействия цунами на побережье Авачинского залива требует построения реалистичной модели сейсмического процесса, происходящего у Восточной Камчатки. При этом нас интересуют параметры сильнейших землетрясений, способных породить цунами значимой высоты. Имеющаяся статистика таких событий не велика. Поэтому мы используем все имеющиеся данные из разнородных источников:

инструментальные наблюдения, исторические источники и следы палеоземлетрясений и палеоцунами, сохранившиеся в голоценовых отложениях побережий. Предполагается что за рассматриваемое время сейсмический процесс стационарен, и в итоге мы строим набор вероятностных распределений для всех параметров землетрясений, влияющих на возникновение и амплитуду цунами. Эти распределения позволяют в дальнейшем выработать синтетический каталог модельных землетрясений, обладающий пространственными, временными, амплитудными и очаговыми характеристиками близкими к потоку реально происходящих событий. Каждый элемент синтетического каталога содержит все параметры, необходимые для расчета соответствующей порожденной землетрясением волны цунами. Это позволяет в дальнейшем перейти от свойств сейсмичности к вероятностным распределениям параметров взаимодействия цунами с побережьем, которые и являются окончательной целью решаемой задачи.

В принятом приближении очаг землетрясения описывается плоской прямоугольной дислокацией (разрывом), возникающей в однородном полупространстве, приводящей к деформации морского дна и, как следствие, возникновению волны цунами. Такой очаг задается следующими параметрами: географическими координатами и глубиной центра дислокации (центра дислокации), длиной и шириной разрыва, амплитудой относительного смещения его крыльев, а также механизмом землетрясения (описывающим геометрию разрыва). При использовании известных эмпирических масштабных соотношений размеры очага и подвижки определяются единственным параметром землетрясения – магнитудой (или скалярным сейсмическим моментом). Частота появления (во времени) землетрясений различной магнитуды определяется заданным законом повторяемости, моделирующим закон Г-Р исследуемого региона. При построении модельных распределений перечисленных параметров использованы мировые и региональные каталоги землетрясений и тензоров сейсмического момента, охватывающие период инструментальных наблюдений сейсмичности 1900-2018 гг. Пример исходных данных для построения статистических распределений параметров механизма модельного землетрясения приведен на рис. 8.

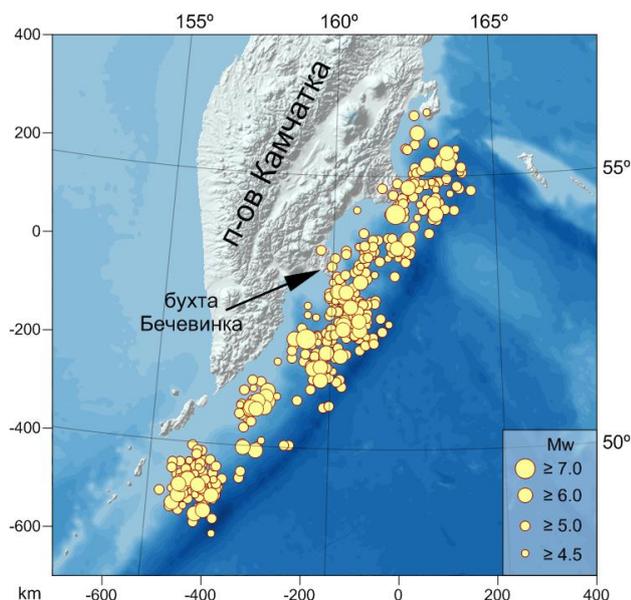


Рис. 8. Бухта Бечевинка на полуострове Камчатка. Желтыми кружками изображены 459 реальных землетрясений, тензоры сейсмического момента которых использованы для построения статистических распределений параметров механизмов модельных землетрясений в синтетическом каталоге.

В структуре Камчатки четко выражены направления, отражающие взаимодействие литосферных плит: вдоль и поперек простираются глубоководный желоб и многих параллельных ему геологических, тектонических, вулканических и др. образований. Эти направления проявляются и в свойствах очаговых параметров местных, в первую очередь субдукционных, землетрясений. Поэтому для изучения, построения и генерирования соответствующих вероятностных распределений мы использовали специальную географическую проекцию с декартовыми координатами (X, Y) в которой главные камчатские структуры приблизительно параллельны одной из осей координат (рис. 9).

Большинство сильнейших землетрясений происходит в Камчатской зоне субдукции (сейсмофокальной зоне), где Тихоокеанская плита погружается под Камчатку примерно перпендикулярно глубоководному желобу со скоростью около 8 см/год. Потенциально цунамигенна верхняя пологая (~20°) часть сейсмофокальной зоны, соответствующая в плане полосе шириной около 150 км, протянувшейся параллельно и северо-западнее желоба. Западнее зона субдукции круто погружается под континент, и происходящие там промежуточные по глубине землетрясения не представляют цунами-опасности. На северо-востоке зона ограничена Алеутской дугой, а на юго-западе землетрясения, происходящие южнее о-ва Парамушир обычно (например, Симуширские 2006, 2007 гг., $M > 8$) не приводят к значительным цунами в центральной части побережья Восточной Камчатки.

Из приведенных соображений выбрана географическая область, в которой строится синтетический каталог (рис. 9). Она охватывает практически всю пологую цунамигенную часть зоны субдукции на расстояниях до ~600 км от бухты Бечевинка. Имеющаяся на сегодня статистика не позволяет строить априорные пространственные распределения очагов. Поэтому в рассматриваемой методике мы используем равномерные распределения центроидов внутри допустимой для них области.

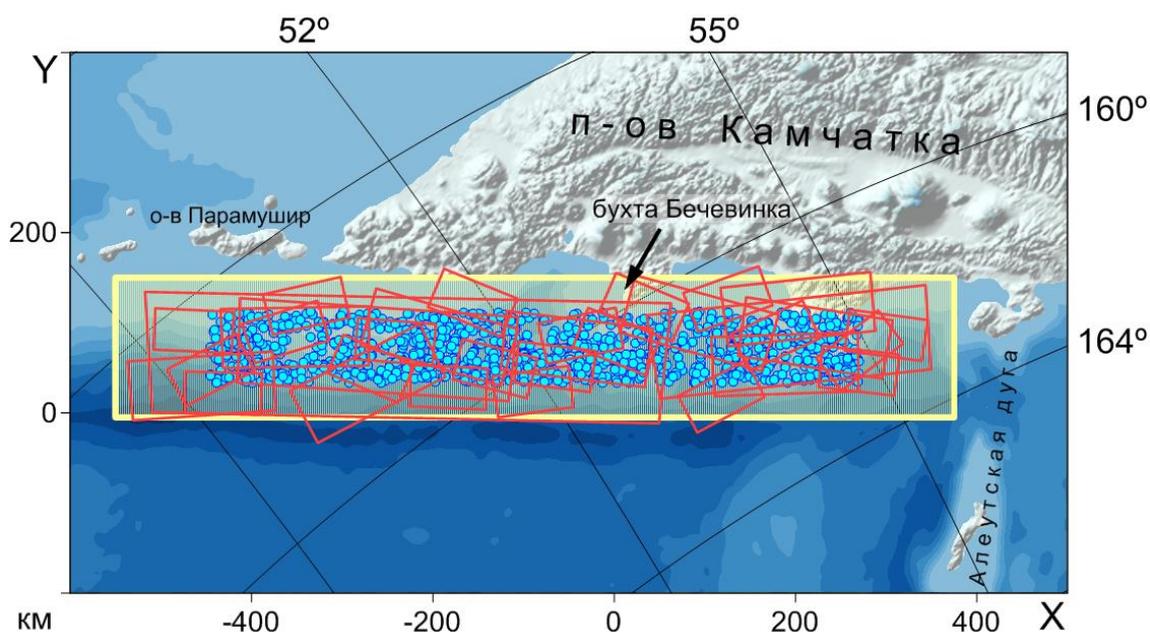


Рис. 9. Географическая область, в которой строится синтетический каталог цунамигенных землетрясений - желтый прямоугольник. Маленькими синими кружками обозначены центроиды генерированной последовательности очагов (тот факт, что они занимают не всю область объясняется конечными размерами очагов). Красные прямоугольники - проекции на свободную поверхность выборки синтетических очагов с магнитудами из интервала 7.5 - 9.0 (для наглядности сохранена лишь часть очагов).

Статистические распределения параметров реальной сейсмичности меняются в пределах рассматриваемой области. Поэтому для части параметров построенные модельные распределения состоят из двух частей: детерминированного тренда, задающего изменение среднего значения параметра вдоль одной из декартовых координат области, и фиксированного для всей области распределения, описывающего случайные отклонения значений параметра от тренда, рассчитанного в точке с координатами случайно выработанного эпицентра модельного землетрясения.

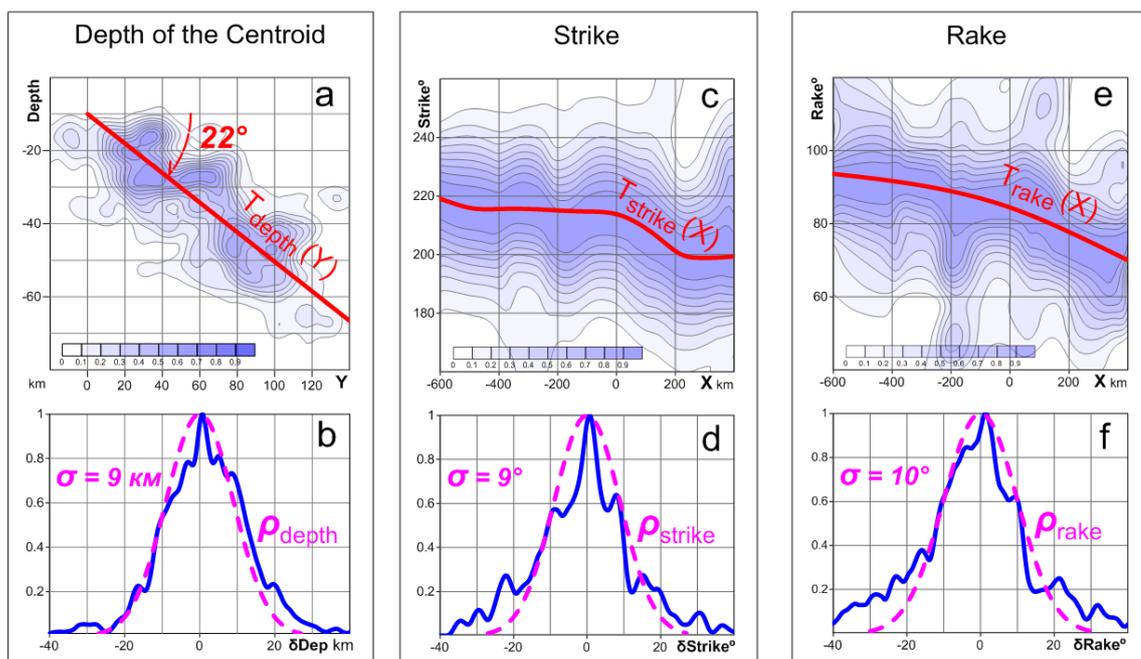


Рис. 10. Пример построения распределений для выработки трех случайных параметров очага модельного землетрясения, помещаемого в синтетический каталог: глубины центра (depth), простирания разрыва (strike) и направления подвижки (rake). (a, c, e) – сглаженные двумерные гистограммы (координата эпицентра, значение параметра), построенные по большой выборке реальных землетрясений. Красные линии демонстрируют использованные оценки трендов параметров как функций координат эпицентров). (b, d, f): синие линии – сглаженные гистограммы отклонений параметров реальных землетрясений от соответствующих линий тренда, лиловые пунктирные линии – гауссовы плотности распределения ρ , приближающие эмпирические кривые и использованные для выработки параметров модельных землетрясений синтетического каталога. σ – значения стандартных отклонений соответствующих гауссовых распределений.

На рис. 10 приведены примеры, иллюстрирующие построение и окончательную форму таких трендов и функций плотности распределения случайных отклонений от них для трех параметров модельного землетрясения: глубины центра, простирания разрыва (strike) и направления подвижки (rake). Для данных построений использована выборка реальных землетрясений, представленная выше. Процесс построения разделяется на две стадии. На первой оценивается линия тренда параметра в зависимости от координат эпицентра землетрясения (рис.10 a, c, e). Для этого по реальным данным строится двумерная сглаженная гистограмма точечного набора, например, (X, Strike) – рис. 10 c. На полученной карте находится линия частных максимумов для каждого X, которая принимается за оценку линии тренда. На второй стадии по всем использованным данным

строятся сглаженные гистограммы отклонений реальных параметров от линий трендов. Окончательно для использования при построении модельных очагов эти гистограммы приближаются гауссовыми распределениями (рис. 10 b, d, f).

Описанная методика реализована в специально написанной компьютерной программе RANDEKA (см. ниже описания зарегистрированных в 2020 г. программ). Данная программа использует все построенные эмпирические распределения и вырабатывает синтетический сейсмологический каталог произвольной длины, обладающий статистическими свойствами близкими к реальной сейсмичности цунамигенной области акваторий Восточной Камчатки.

В дальнейшем, исходя из последовательности очагов землетрясений построенного синтетического каталога, были рассчитаны оценки повторяемости высот цунами в бухте Бечевинка для различных временных интервалов и уровней доверия. Результаты расчетов проконтролированы в процессе полевых исследований палеоцунами на побережье бухты.

2.3 Исследование сильного Северо-Курильского землетрясения 25 марта 2020 г.

25 марта 2020 г. в 2:49 UTC (14:49 по местному времени) произошло сильное ($M_W = 7.4$) сейсмическое событие, эпицентр которого находился на северо-западе Тихого океана южнее п-ова Камчатка и названное «Северо-Курильским землетрясением» (СКЗ). На рис. 11 приведено положение СКЗ относительно мозаики литосферных плит региона. Гипоцентр находился на глубине 50-60 км. Разрушений и пострадавших в результате этого события не было, однако оно интенсивно ощущалось в ближайшем населенном пункте г. Северо-Курильск (~220 км от эпицентра, о. Парамушир) и до 5 баллов в г. Петропавловск-Камчатский (~430 км).

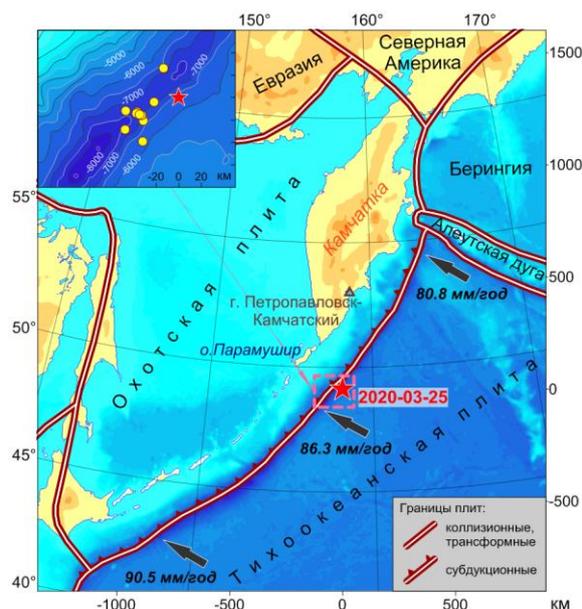


Рис. 11. Эпицентр землетрясения Углового поднятия согласно определению КФ ФИЦ ЕГС РАН (звезда) на тектонической схеме литосферных плит северо-западного обрамления Тихого океана. На врезке приведены определения эпицентра различными мировыми сетями. Черные стрелки указывают направления и относительные скорости перемещения Тихоокеанской плиты перед погружением в Курило-Камчатский желоб.

Возникновение СКЗ связано с процессом субдукции Тихоокеанской литосферной плиты под Охотскую плиту. Однако СКЗ не является непосредственно субдукционным землетрясением. Перед погружением в зону субдукции под воздействием надвигающегося аллохтона океаническая плита изгибается, образуя параллельные зоне глубоководный желоб и прилегающий к нему, в данном случае с юго-востока, внешний океанический вал. Изгиб плиты порождает собственное поле напряжений и соответствующую полосу сейсмичности, протянувшуюся вдоль океанического вала. Большинство землетрясений этой полосы являются мелкофокусными и для них характерны сбросовые механизмы с плоскостями разрыва близкими к простиранию желоба и вала. Это соответствует растяжению верхней части изгибающейся океанической плиты. Однако в более глубоких горизонтах тот же изгиб плиты порождает сжимающие напряжения и, соответственно, противоположно направленные взбросовые сейсмические подвижки. Такие более глубокие взбросовые землетрясения также фиксируются (хотя и реже, чем мелкофокусные) в полосе сейсмичности океанического вала.

СКЗ относится к последнему типу событий. Его пространственный очаг располагался на глубине 20-70 км, а в механизме субгоризонтальная ось сжатия направлена приблизительно на северо-запад поперек простирания Курило-Камчатского желоба и параллельного ему океанического вала (рис.12). Инструментальный эпицентр

СКЗ находится в глубоководном желобе у подножья внешнего океанического поднятия или на его склоне, то есть юго-восточнее фронта зоны субдукции. Таким образом СКЗ является внутриплитным событием. Его очаг располагается в Тихоокеанской плите в области, где она изогнута перед погружением в зону субдукции.

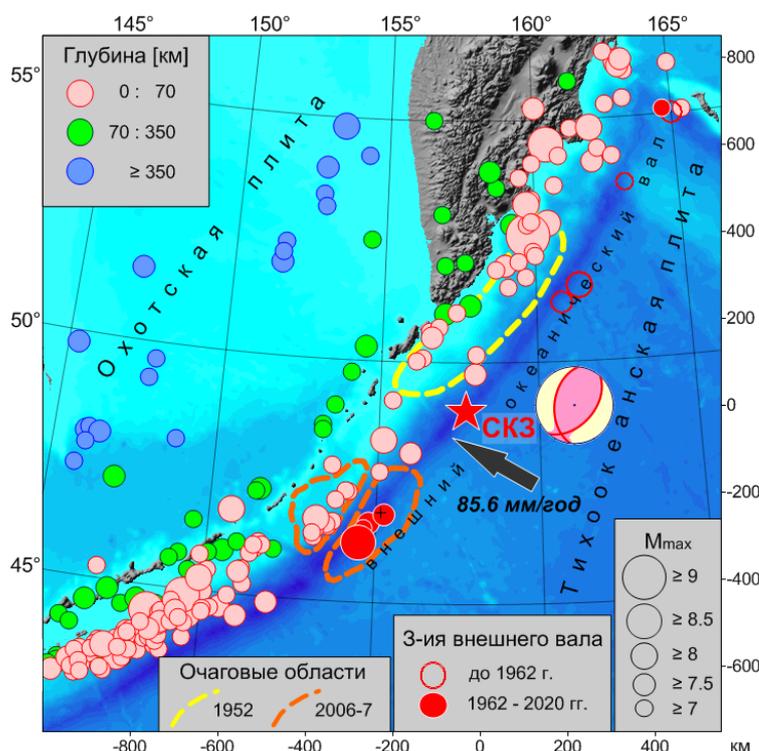


Рис. 12. Сильнейшие землетрясения Курило-Камчатской дуги с максимальной объявленной магнитудой ≥ 7.0 . События, относящиеся к внешнему океаническому валу выделены красным цветом. Пунктиром околнурены очаговые области сильнейших землетрясений, ближайших к СКЗ. Черная стрелка указывает направление и скорость движения Тихоокеанской плиты относительно Охотской в районе СКЗ. Приведены эпицентр (звезда) и диаграмма тензора сейсмического момента СКЗ. Оценка скалярного сейсмического момента СКЗ $M_0 = 1.75 \cdot 10^{20}$ Нм.

За период инструментальных наблюдений с начала 20 века в Курило-Камчатской дуге зафиксировано примерно 35 – 75 землетрясений (в зависимости от типа используемой магнитуды), сравнимых или превосходящих, по силе СКЗ. На карте рис.12 приведены эпицентры всех (~200) землетрясений региона, для которых хотя бы одна из объявленных магнитуд достигала или превышала 7.0. Из них 11 событий (включая СКЗ), по-видимому, произошли в районе внешнего океанического вала (события первой половины 20 века могут обладать недостаточной точностью определения гипоцентров).

СКЗ является вторым или третьим по магнитуде событием, инструментально зарегистрированным в Курило-Камчатской дуге в районе внешнего океанического вала. Сильнейшее из землетрясений вала – Симуширское 13 января 2007 г., $M_w=8.1$ возникло в верхней части изгиба океанической плиты (глубина центра 12 км), в отличие от СКЗ, в условиях растяжения, перпендикулярного простиранию Курило-Камчатской дуги. Однако через два года в пределах эпицентральной области афтершоков этого события, но на большей глубине 45 км, 15 января 2009 г. произошло землетрясение с $M_w=7.4$ и механизмом сходным с СКЗ, по-видимому, подтверждающим, что нижних горизонтах литосферной плиты одновременно существуют условия субгоризонтального сжатия поперек дуги.

На карте рис. 13 показано облако афтершоков СКЗ и синхронная фоновая сейсмичность ближайшего к СКЗ региона за период от главного толчка 25 марта до 17 мая 2020 г. согласно данным КФ ФИЦ ЕГС РАН. За это время интенсивность потока числа регистрируемых афтершоков уменьшилась примерно в 30 раз.

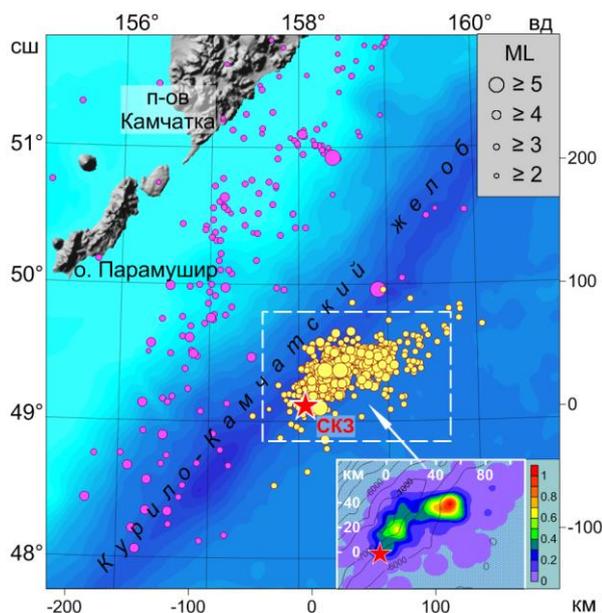


Рис. 13. Эпицентры афтершоков СКЗ (желтые кружки) и синхронная фоновая сейсмичность (пурпурные кружки) за период от 25 марта до 17 мая 2020 г. Звездой обозначен эпицентр главного толчка СКЗ. На врезке приведена соответствующая карта сглаженной плотности пространственного распределения эпицентров (без учета магнитуды). Шкала плотности распределения дана в единицах числа событий в день на 100 км².

В целом облако афтершоков вытянуто в направлении близком к простиранию жёлоба. Однако из карты на врезке рис. 13 следует, что максимальная пространственная

концентрация эпицентров достигается в двух локальных областях, центры которых разнесены на 40 — 50 км, и каждая из которых имеет собственное простирание. Первая область располагается ближе к эпицентру главного толчка, который находится у юго-западного окончания облака, вторая у противоположного северо-восточного его края. В зафиксированной последовательности афтершоков, начинающейся через 5 минут после главного толчка, отсутствуют сильные события, которые могли бы породить данные области концентрации эпицентров, причем они проявляются с самого начала процесса. Поэтому формирование этих особенностей очага произошло либо в процессе развития главного разрыва, либо в первые несколько минут после него.

Трехмерный анализ областей концентрации афтершоков позволил выделить два пространственных кластера. Первый охватывает большую часть очага и приблизительно соответствует плоскости, падающей на юго-восток. Второй кластер ограничивает очаг с северо-востока и состоит из афтершоков меньшей глубины. В соответствии с выделенными кластерами афтершоков построена модель очага главного толчка СКЗ, состоящего из неоднородных подвижек по двум различным плоскостям разрыва (рис.14).

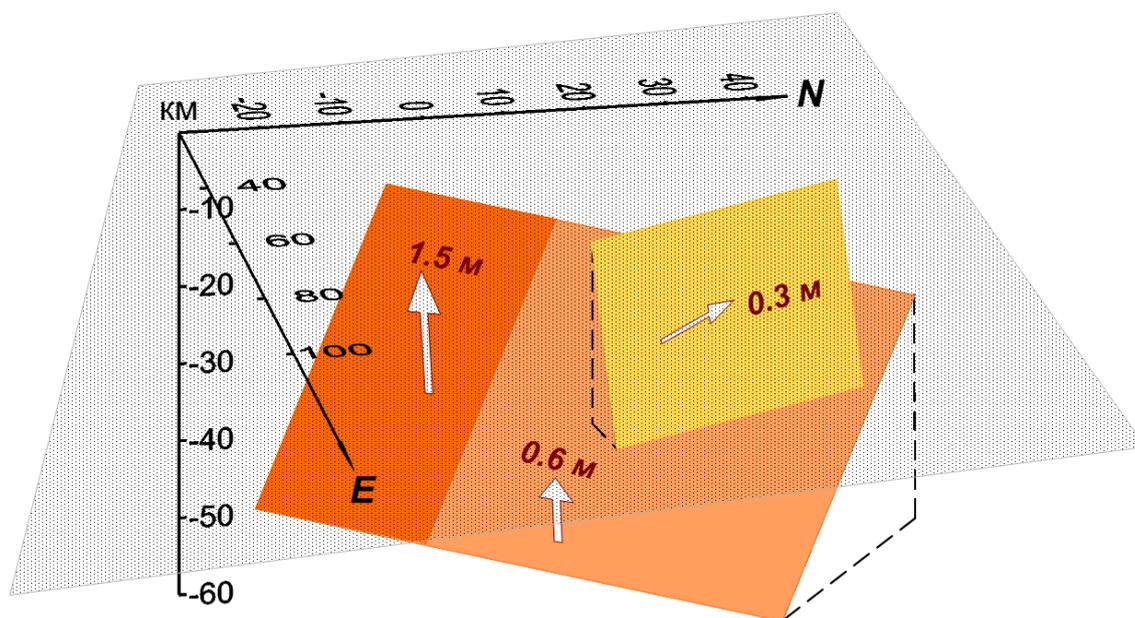


Рис.14. Модель очага главного события СКЗ, состоящая из неоднородных подвижек по двум различным плоскостям разрыва, отмеченных оранжевыми и желтым цветом.

По разделу 2 в 2020 году были опубликована статья:

Чебров Д.В., Ю.А. Кугаенко, А.В. Ландер, И.Р. Абубакиров, С.Я. Дрознина, С.В. Митюшкина, В.М. Павлов, В.А. Салтыков, Ю.К. Серафимова, Н.Н. Титков. Землетрясение углового поднятия 20 декабря 2018 г. $M_w = 7.3$ в зоне сочленения Камчатского и

Алеутского океанических желобов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 1. Вып. 45. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-1-45-1-18.

Две статьи в процессе редакторской работы.

3. Исследования физики сейсмического процесса

Данный раздел отчета посвящен обсуждению проблем физики сейсмического процесса. Принято считать, что землетрясения возникают по механизму упругой отдачи Рейда [Касахара, 1985], когда накапливающиеся напряжения превышают прочность горных пород. Но известным затруднением этой модели являются невысокие значения напряжений, фиксируемые различными способами в ненарушенных блоках земной коры, в разломных зонах и в очагах землетрясений. Эти напряжения оказываются много меньше величин, необходимых в эксперименте для разрушения образцов горных пород. Рассогласование становится вопиющим (несколько порядков величины) в случае глубоких землетрясений. Непонятно также и отсутствие тепловых аномалий, связанных с ожидаемым выделением тепла при трении пород в разломных зонах. Эти рассогласования часто объясняют наличием в очаговых зонах флюидной фазы [Соболев, 1993; Role of water ..., 2001], предлагались и другие варианты, когда землетрясения, начиная с некоторых глубин, связывают с реализацией различного рода твердотельных превращений [Калинин и др., 1989; Rodkin, 1995, 1996; 1997; Sornette, 1999; Родкин, Рундквист, 2017; и др.]. Вполне очевидно, что физика сейсмического процесса, соответственно и его прогнозные признаки, будут во всех этих случаях существенно различны.

Прежде всего, оказывается, что величина напряжений не является определяющим фактором сейсмического режима. Ещё в [Rodkin, 1996] была выявлена устойчивая отрицательная корреляционная связь между числом землетрясений и медианой (средним значением) кажущихся напряжений. В дальнейшем (например, [Ребецкий, 2007]) было убедительно показано, что уровень сейсмогенных напряжений в окрестности зон субдукции почти на порядок выше, чем во внутри континентальных областях, где число землетрясений намного меньше. Уже отсюда с уверенностью следует наличие, кроме величины напряжений, некоего фактора X , в большей степени определяющего интенсивность сейсмического режима.

Анализ нескольких специфических сеймотектонических ситуаций позволяют предварительно ответить на вопрос о возможной природе этого «фактора X ». Рассмотрим первый такой пример. Как известно, на океанической стороне зон субдукции, характер напряжённого состояния связан с подъёмом и изгибом плиты в области передового вала. Соответственно, в верхней части литосферы возникают растягивающие поперёк желобов

напряжения, а в нижней части – сжимающие. Но это напряжённое состояние наблюдается довольно локально, только вблизи оси передового вала, а чуть ближе к области глубоководного желоба, оно сменяется типичным для зон субдукции характером напряжения, с доминированием растягивающих напряжений по падению плиты (рис. 2). Неожиданным является то обстоятельство, что непосредственно в области оси глубоководного желоба наблюдается почти полное отсутствие землетрясений. При этом по обеим сторонам от этой асейсмичной области в очагах землетрясений фиксируется единообразный характер напряжённого состояния. В качестве примера, на рис.15, по материалам [Андреева, Родкин, 2017], приведён разрез поперёк хорошо исследованной Алеутской зоны субдукции. Получаем, что характер напряжённого неизменен, но землетрясения фиксируются на океанической стороне глубоководного желоба и на континентальной. Непосредственно же вблизи оси глубоководного желоба, при, казалось бы, аналогичном напряжённом состоянии, землетрясений не возникает.

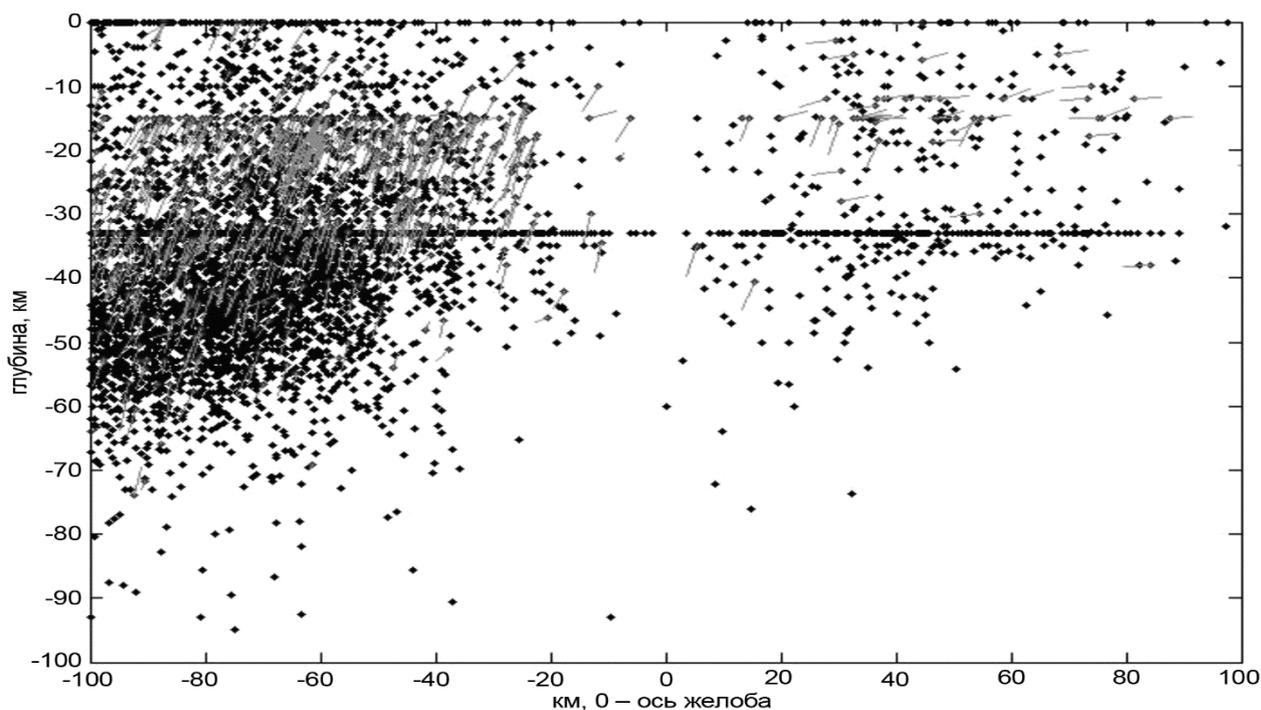


Рис. 15. Схема сейсмичности на профиле поперёк Алеутской хоны субдукции. Точки – гипоцентры землетрясений, чёрточки – ориентация осей растяжения. Концентрация очагов на глубине 33 км отвечает хуже определяемым данным.

Ещё более эффектный пример связан с Командорским участком этой же зоны субдукции. На рис.16, по данным GСMT каталога, представлены данные по расположению неглубоких и глубоких землетрясений, об активных вулканах и о направлении движения субдуцирующей океанической плиты. Неглубокие ($H < 50$ км) землетрясения распространены вдоль всех участков зоны – Алеутского, Командорского и

Камчатского. Однако глубокие землетрясения ($H > 50\text{ км}$) и современные вулканы имеются только на Алеутском и Камчатском участках зоны. На Командорском участке, где направление движения плиты почти параллельно простиранию островной дуги, глубоких землетрясений и вулканов нет. При том, что скорость проскальзывания плиты вдоль желоба довольно высокая (около 8 см/год), и механизмы очагов неглубоких землетрясений не противоречат предположению, что они связаны с проскальзыванием плиты вдоль цепи Командорских островов. На Камчатке цепь активных вулканов резко обрывается вулканом Шивелуч, самым северным и очень активным вулканом Камчатской группы вулканов. Обращают на себя внимание резкость окончания цепи вулканов и высокая активность вулкана Шивелуч, что естественно сопоставить с относительно большими объемами погружающейся и испытывающей дегидратацию плиты в области ее резкого перегиба.

Вулканизм островной дуги принято связывать с водным флюидом, выделяющимся при субдукции в процессе дегидратации. В свете вышесказанного естественно заключить, что отсутствие землетрясений на Командоском участке зоны субдукции связано с отсутствием здесь собственно процесса погружения плиты и связанных с этим изменений P, T условий и превращений, в частности процессов дегидратации.

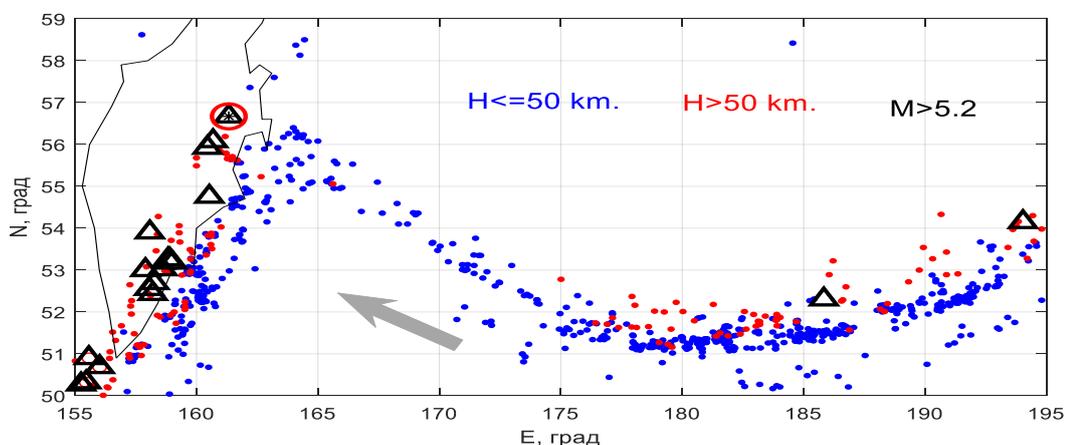


Рис. 16. Соотношение развития приповерхностной и более глубокой сейсмичности (синие и красные точки соответственно) и активных вулканов (треугольники). Стрелкой дано направление движения Тихоокеанской плиты. Красным кружком обведён вулкан Шивелуч.

Подчеркнем, что связь между зонами сейсмической активности и областями превращений не ограничивается, по-видимому, процессами дегидратации. Давно известен факт приуроченности максимумов сейсмичности зон субдукции к глубинам основных

фазовых превращений в верхней мантии [Калинин и др., 1989 и др.]. А в [Nikitina et al., 2020] показана типичность развития в погружающихся литосферных плитах планарных сейсмогенных структур (рис. 17)., расчётные глубинные температура и давления, для которых соответствует положению границ основных фаций метаморфизма (рис. 18).

Ранее мы рассматривали распределение количества землетрясений в зависимости от глубины и расстояния до верхней границы погружающейся плиты. Теперь мы рассмотрим эти распределения совместно; построим распределение плотности числа землетрясений в координатах: глубина и расстояния до верхней границы субдуцирующей плиты (рис.5). При этом, естественно, статистическая значимость уменьшается, и некоторые особенности пространственного распределения могут стать статистически незначимыми.

На рис. 5 выделяются наклонные полосы повышенной сейсмичности для обеих зон А и В. Аналогичная тенденция в пространственном расположении сейсмичности была ранее выявлена нами для зоны субдукции Северного острова Новой Зеландии [Никитина, Родкин, 2020. Возникновение такие структур вряд ли можно приписать случайности. При этом такие структуры отвечают определённому соотношению между температурой и давлением (глубиной); таким образом, подобные структуры могут отвечать некоторым фронтам метаморфических превращений в погружающихся плитах [Никитина, Родкин, 2020].

Для проверки этого предположения мы использовали изотермы из 2-D тепловых моделей для зоны субдукции Аляски [Ponko, Peacock, 1995; Peacock, 1996; Oleskevich et al, 1999; Gutscher, Peacock, 2003; Hacker et al., 2003]. Это позволило нам представить расположение этих протяжённых структур повышенной сейсмической активности в координатах давления (глубина) и температуры. Такие данные можно уже сравнить с положением границ фаций (фронтов) метаморфизма и положением основных границ метаморфических превращений. Такое сравнение проведено на рис. 6, на котором видно, определённое соответствие между границами метаморфических превращений и протяжёнными областями высокой сейсмической активности в зонах субдукции Аляски и Новой Зеландии.

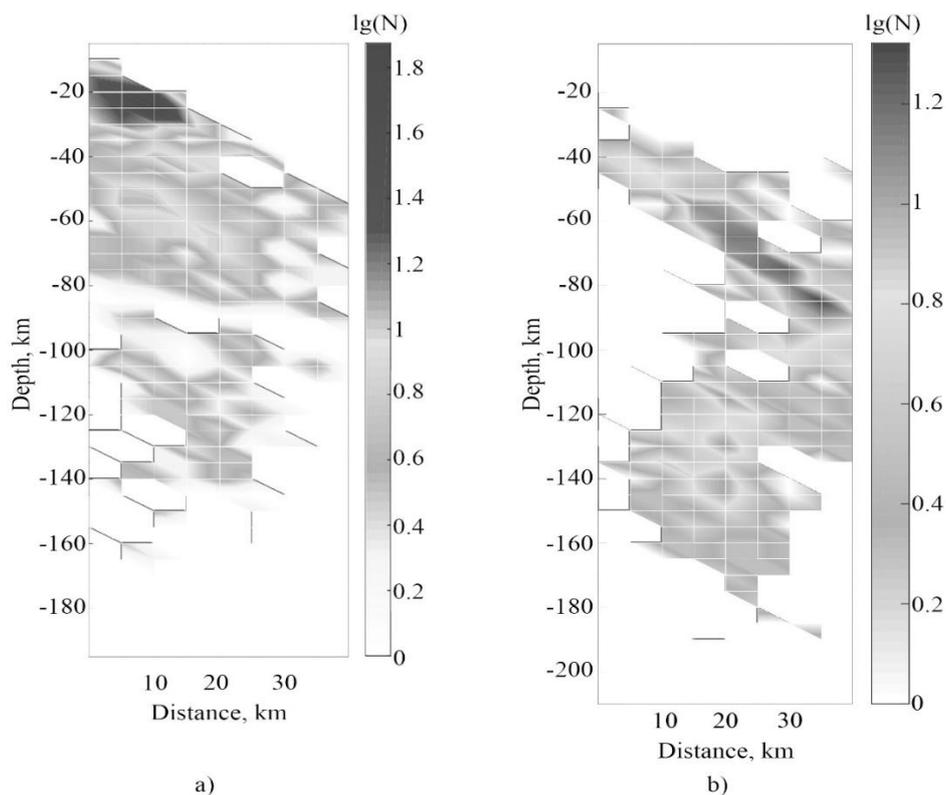


Рис. 17. Двумерное распределение плотности числа землетрясений от глубины и расстояния до верхней границы погружающейся плиты для южной зоны (А) и северной зоны (В). Виден пример развития в теле погружающейся плиты планарной высокосейсмичной структуры.

В совокупности приведенные данные вполне убедительно указывают на тесную связь (не наиболее приповерхностных) землетрясений с метаморфическими превращениями, в частности с реакциями дегидратации, происходящими в средней и нижней коре.

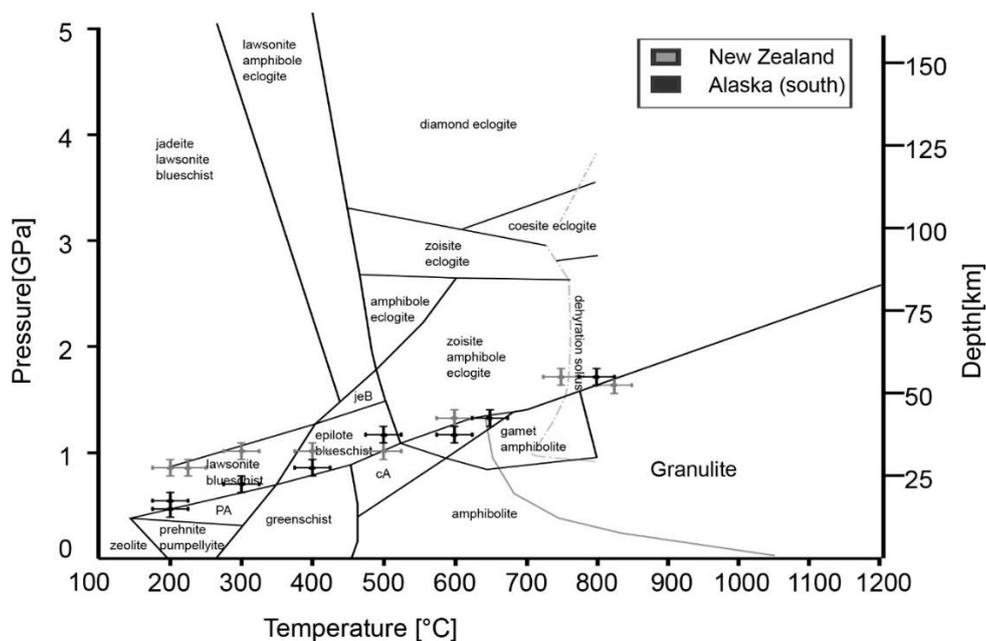


Рис. 18. Сравнения РТ условий границ метаморфических фаций для базальтового слоя срединно-океанического хребта [Hacker et al., 2003] и РТ параметру основных протяжённых зон высокой сейсмичности для южной Аляски и Северного острова Новой Зеландии.

По разделу 3 отчета в 2020 были опубликованы следующие работы:

Ivankina T.I., I.Yu.Zel, M.Petruzalek, M.V. Rodkin, M.A. Matveev, T.Lokajicek. Elastic anisotropy, permeability, and freeze-thaw cycling of rapakivi granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 136, 104541.

Родкин М.В., Андреева М.Ю., Григорьева О.О. Анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения по региональным данным, Курило-Камчатский регион. *Вулканология и сейсмология*, 2020, № 6, с. 67–77.

Nikitina M.A., M.V. Rodkin, I.G. Shmakov. The connection of the seismicity of the subduction zone in Alaska with metamorphism and the deep fluid regimes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, Vol. 56, No. 6, pp. 892–899.

Никитина М.А., М.В. Родкин. Среднеглубинные землетрясения и связь сейсмичности зоны субдукции с метаморфизмом и глубинным флюидным режимом для Северного острова Новой Зеландии. *Геосистемы переходных зон*, 2020, 4, 1, 103-115.

Родкин М.В. Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация. *Вулканология и сейсмология*. 2020, 1, 64-76.

4. Детальные исследования очаговых характеристик землетрясений

Были построены модели очагов двух региональных землетрясений: в Акабе (27 июня 2015 года, $M_w=5.5$) и в Мертвом море (4 июля 2018 года $M_w=4.8$) по записям поверхностных волн. Для этой цели были использованы записи фундаментальных мод волн Лява и Рэлея, зарегистрированные станциями сетей IRIS, GEOSCOPE и GEOFON. На первом этапе мы описываем источник в нулевом приближении тензора момента, рассматривая мгновенную точечную сдвиговую дислокацию (двойной диполь) на заданной глубине. По амплитудным спектрам поверхностных волн были получены четыре эквивалентных решения. Для однозначного выбора решения были использованы дополнительные данные, такие как знаки первых вступлений Р-волны (для землетрясения в Акабе) или для каждого из решений рассчитаны фазовые спектры (для землетрясения в Мертвом море). По минимальным значениям построенных совместных невязок для каждого события было выбрано единственное решение. На рис.19 представлен пример обработки для одного из событий. Затем, рассматривая очаг в предположении плоского источника, были получены следующие интегральные параметры: продолжительность процесса в очаге, длины большой и малой осей источника, скорость мгновенного центраида, угол между большой осью источника и осью простираия, угол между направлением движения мгновенного центраида и осью простираия. Качество полученных решений оценивается с помощью функции нормированной невязки. Данная функция характеризует отличие теоретических амплитудных спектров от наблюдаемых. В случае землетрясений в Мертвом море разрешение данной функции для некоторых параметров оказалось настолько мало, что получить решение не удалось. Также для рассматриваемых землетрясений была проанализирована неоднозначность, связанная с существенным превышением длин поверхностных волн над глубиной мелкофокусного источника.

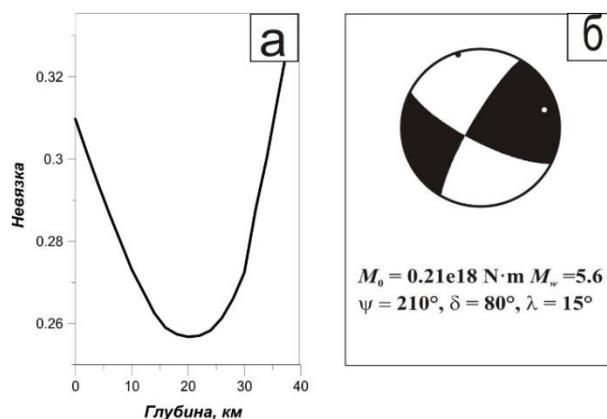


Рис. 19. Функция невязки глубины и фокальный механизм в проекции нижней полусферы для землетрясения в Акабе 27.06.2015 года

По данному направлению работ за 2020 год были опубликованы следующие работы:

Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Сравнительный анализ Аляскинских землетрясений 2018 г. по записям поверхностных волн //Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.07>

Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Зависимость погрешности определения параметров землетрясений от набора записей поверхностных волн //Физика Земли. – 2020. – №1. – С. 109-117. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333720010019>

Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Определение параметров очагов региональных землетрясений по записям поверхностных волн // Российский сейсмологический журнал. – 2020.– Т. 2, № 4. – С. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.02>

Bukchin BG, Fomochkina AS, Kossobokov VG and Nekrasova AK (2020) Characterizing the Foreshock, Main Shock, and Aftershock Sequences of the Recent Major Earthquakes in Southern Alaska, 2016–2018. *Front. Earth Sci.* 8:584659. doi: 10.3389/feart.2020.584659

5. Мало-апертурные группы, исследование слабых событий

Совместно с сотрудниками ИДГ РАН, в ходе проведения экспедиционных измерений при помощи микрогруппы сейсмометров, была исследована наведённая сейсмичность, возбуждаемая мощными промышленными взрывами, проводимыми в шахтах комбината «КМАруда». С помощью современных методов детектирования и оценки параметров многомерных сейсмических сигналов по наблюдениям группы датчиков удалось показать, что математическая модель сигналов, генерируемых микроземлетрясениями и регистрируемых сейсмометрами группы, представленная в виде многомерной линейной системы с одним входом (событие) и несколькими выходами (регистраторы) достаточно точно описывает наблюдаемые процессы. Помимо этого основного результата были получены также и промежуточные:

1) Распределение очагов во времени не противоречат закону Омори об убывании частоты афтершоков (рис. 20,а).

2) Показано, что механизмы очагов, сигналы которых обнаружены на фоне сейсмических помех, имеют сложную диаграмму излучения, т. е. их фокальный механизм отличен от равномерного расширения (рис. 21).

3) Результаты локации очагов по многомерным наблюдениям группы показывают, что события концентрируются вблизи линий геологических разломов

(рис.20,б). При этом попутно показано, что очаги имеют сложный фокальный механизм отличный от равномерного расширения.

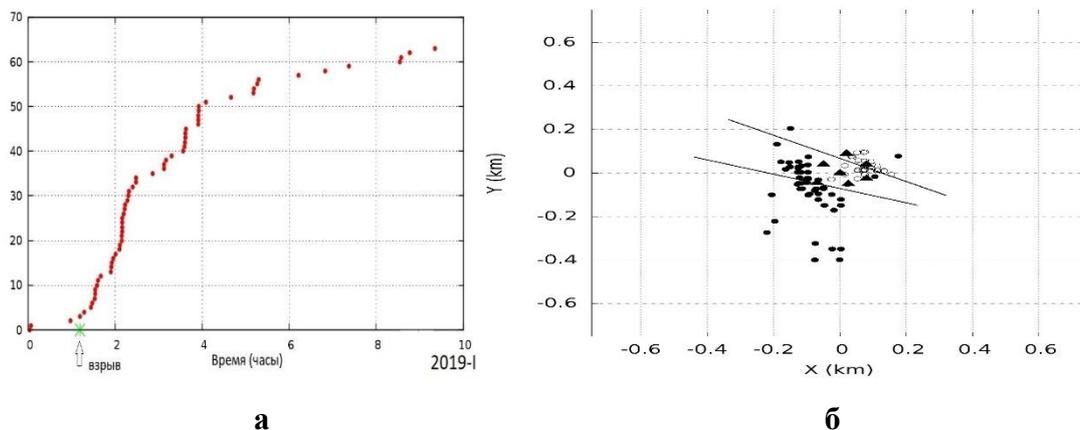


Рис. 20. Кумулятивный график распределения во времени всех микросейсмических событий, обнаруженных эксперименте - 2019 г. (а); датчики группы (б), ---- положение разломной зоны и проекции очагов микро-событий на земную поверхность. Датчики показаны треугольниками, очаги микро-событий – кругами (для эксперимента 2017 г.) и окружностями (для экспериментов 2019 г.).

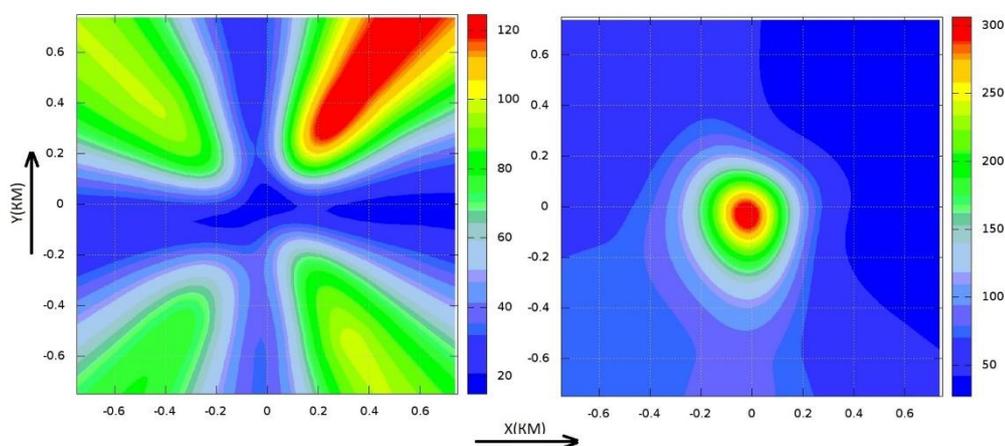


Рис. 21. Слева - пример целевой функции ФРА для локации очага в зависимости от горизонтальных координат, рассчитанной по сейсмограммам одного из событий без учета знаков вступлений Р-волн на датчики. Справа - функция ФРА этого же события, рассчитанная с учётом «правильного» распределения знаков вступления Р-волн.

Методом статистического синтеза были получены новые алгоритмы оценивания координат сейсмических очагов по наблюдениям мало-апертурных групп. Рассматривалась локация источников ближнего поля, когда регистрируемый волновой фронт отличен от плоского и является комплексным ввиду сложной скоростной

структуры среды распространения сейсмических волн. Результаты численного моделирования и метода независимых испытаний Монте-Карло показали, что новые алгоритмы локации обладают более высокой помехоустойчивостью (рис. 22) по сравнению с известным beamforming алгоритмом SRP-PHAT, который по сей день находит широкое применение в различных приложениях array signal processing, например, в акустике, радио и лишь совсем недавно в сейсмологии. Рассматривалась задача определения координат источников волнового поля с использованием фаз комплексного преобразования Фурье сигналов, регистрируемых датчиками антенной решётки. Алгоритмы фазовой локализации источника обладают важным свойством робастности: они обеспечивают качество определения координат источника, которое слабо зависит от статистических характеристик случайных помех, воздействующих на датчики решётки. По этой причине фазовые алгоритмы широко используются для локализации источников волнового излучения в радио и акустических приложениях, а в последнее время и в сейсмологии. Естественно, следует отдавать предпочтение фазовым алгоритмам локализации источника, обеспечивающим наименьшие средние ошибки при оценке координат источника. Такие алгоритмы могут быть построены и проанализированы с использованием методов математической статистики. В работе был синтезирован фазовый статистически оптимальный алгоритм (PSO), который представляет собой модификацию асимптотически эффективного (ASE) статистического алгоритма для оценки координат микросейсмических источников, предложенные авторами (Int J Geomath 4 (2): 201–225, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13137-013-0049-6>). В отличие от алгоритма ASE, алгоритм PSO не требует дополнительных наблюдений «чистого» шума и устойчив к статистическим свойствам случайных помех. Также установлено, что алгоритм PSO является расширенной версией хорошо известного фазового алгоритма SRP-PHAT [Brandstein and Ward, 2008], который широко используется в акустических приложениях. В работе выполнено моделирование методом Монте-Карло, цель которого была сравнить точности определения координат микросейсмических источников различными фазовыми алгоритмами. Это моделирование показало, что предложенный алгоритм PSO обеспечивает гораздо лучшую точность локации источника, чем традиционный алгоритм

SRP-PHAT. При этом показано, что алгоритм PSO имеет точность локации источника сравнимую с алгоритмом PML, который недавно был опубликован авторами в (Int J Geomath 9 (2): 335–358, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13137-018-0108-0>). Однако, алгоритм PSO обладает более высокой вычислительной эффективностью, чем алгоритм PML, что позволяет использовать его на практике для обработки данных антенных решёток в режиме реального времени.

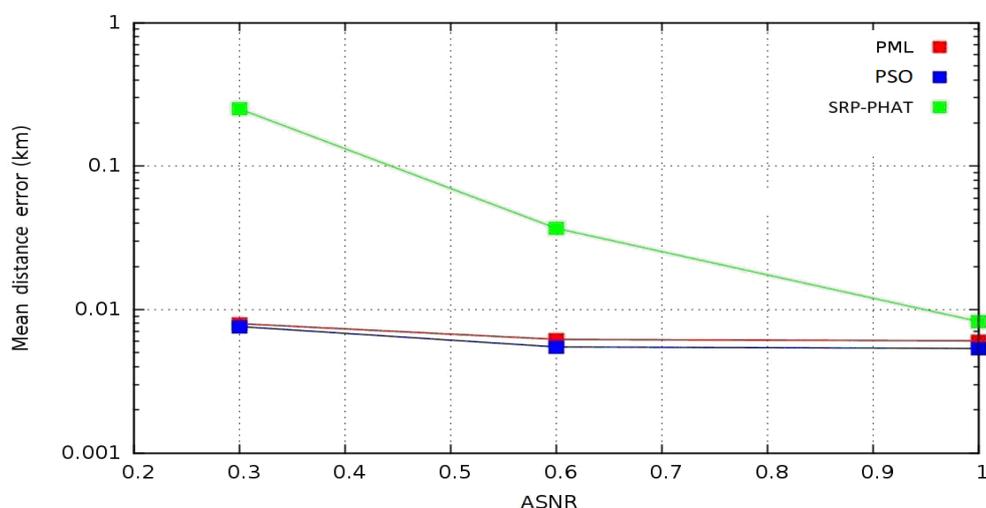


Рис. 22. Средняя абсолютная ошибка оценивания координат источника алгоритмами PML, PSO, SRP-PHAT в зависимости от усреднённого отношения сигнал-помеха ASNR.

Ведётся работа по подготовке статьи, где исследуются асимптотические свойства статистических оценок параметров $\mathbf{u} \in R^q$ случайных временных рядов $Z_t \in R^m$, $t \in \mathbf{Z}$, удовлетворяющих условию сильного перемешивания. Исследовался класс оценок $\hat{\mathbf{u}}_n^\delta(\mathbf{z}_n)$, $\mathbf{z}_n = (z_{l,t}, l \in \overline{1,m}, t \in \overline{1,n})$, $z_{l,t} \in R^1$, которые основаны на функциях $\delta_n(\mathbf{z}_n, \mathbf{u}) = \text{grad } H_n(\mathbf{z}_n; \mathbf{u})$ и имеют в асимптотике $n \rightarrow \infty$ ту же точность, что и M-оценки, однако во многих случаях много проще в вычислительном отношении. Планируется проведение численного эксперимента Монте-Карло по сравнению ошибок оценивания векторного параметра, с помощью известного алгоритма Кейпона, которая может быть получена двумя различными путями:

- 1) Расчёт ошибки через её явный аналитический вид по заданным характеристикам рассматриваемой модели.
- 2) Расчёт ошибки через многократное оценивание вектора как аргумента максимума целевой функции Кейпона.

По данному направлению опубликованы нижеследующие работы:

Adushkin, V.V., Varypaev, A.V., Kushnir, A.F., Sanina, I.A. Identification of Induced Seismicity in the Fault Zone of the Korobkovskoye Deposits (Kursk Magnetic Anomaly) Based

on Observations of a Small-Aperture Seismic Array. *Doklady Earth Sciences*, 2020, 493(1), p. 548-551.

Sanina, I.A., Riznichenko, O.Y., Kushnir, A.F., Varypaev A. V., Sergeev, S.I., Volosov, S.G. Recognizing of Microseismic Source Types Based on Small-Aperture Seismic Array Data *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, 56(2), p. 260-278.

Varypaev, A., Kushnir, A. Statistical synthesis of phase alignment algorithms for localization of wave field sources *Multidimensional Systems and Signal Processing*, Springer, 2020, 31(4), p. 1553-1578.

6. Аппаратное и аппаратно-программное обеспечение исследований

Аппаратное исследование стоит несколько особняком от основной тематики данной темы. Алгоритмы автоматической обработки сейсмических записей постоянно совершенствуются, задачи анализа данных усложняются. При этом большинство используемых алгоритмов требуют предварительной подготовки данных. Эта обработка является либо довольно простой, такой как частотная фильтрация, либо высокоспециализированной, выделяющей специфические особенности сигнала. Удачная предобработка может на порядки повысить эффективность дальнейшего анализа. Однако специфическая предобработка не может использоваться для решения иных задач или с другими алгоритмами постобработки. Отсюда встает задача поиска решений, которые не приводят к значительным потерям информации, разработки таких вариантов предобработки, которые можно использовать при решении любых задач.

Основными целями предварительной обработки являются снижение уровня шума, устранение помех антропогенного происхождения и уменьшение размерности данных, то есть устранение их избыточности. Очевидно, что при этом необходимо применять весь арсенал методов и средств по снижению паразитных шумов в современных информационно-измерительных системах. Примером реализации такого подхода может служить выделение полезного геогидроакустического сигнала на фоне помех, реализуемое применением адаптивных фильтров [Кислов и др., 2020]. Схема такой фильтрации представлена на рисунке ниже.

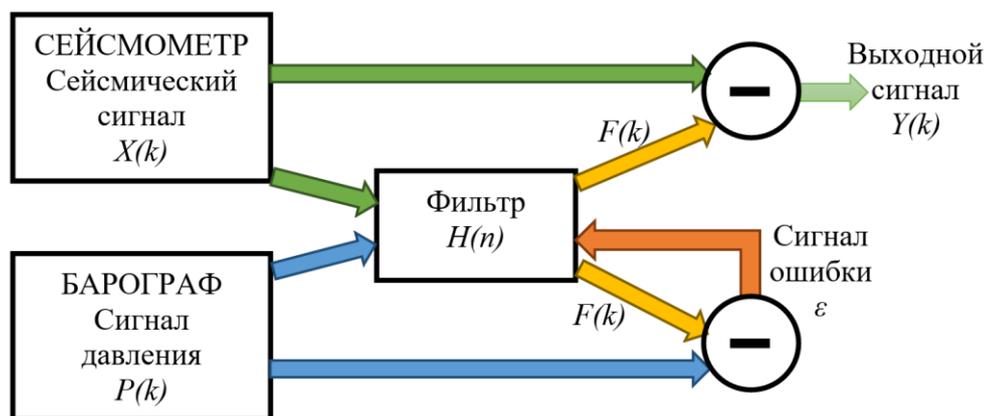


Рис. 23. Упрощенная структурная схема адаптивного фильтра фильтрации барических помех.

Другой пример обработки представлен на рис. 24. В данном примере для предобработки сигнала использован вариант предобработки информации на основе вейвлет-преобразования [Гравиров., Кислов, 2020].

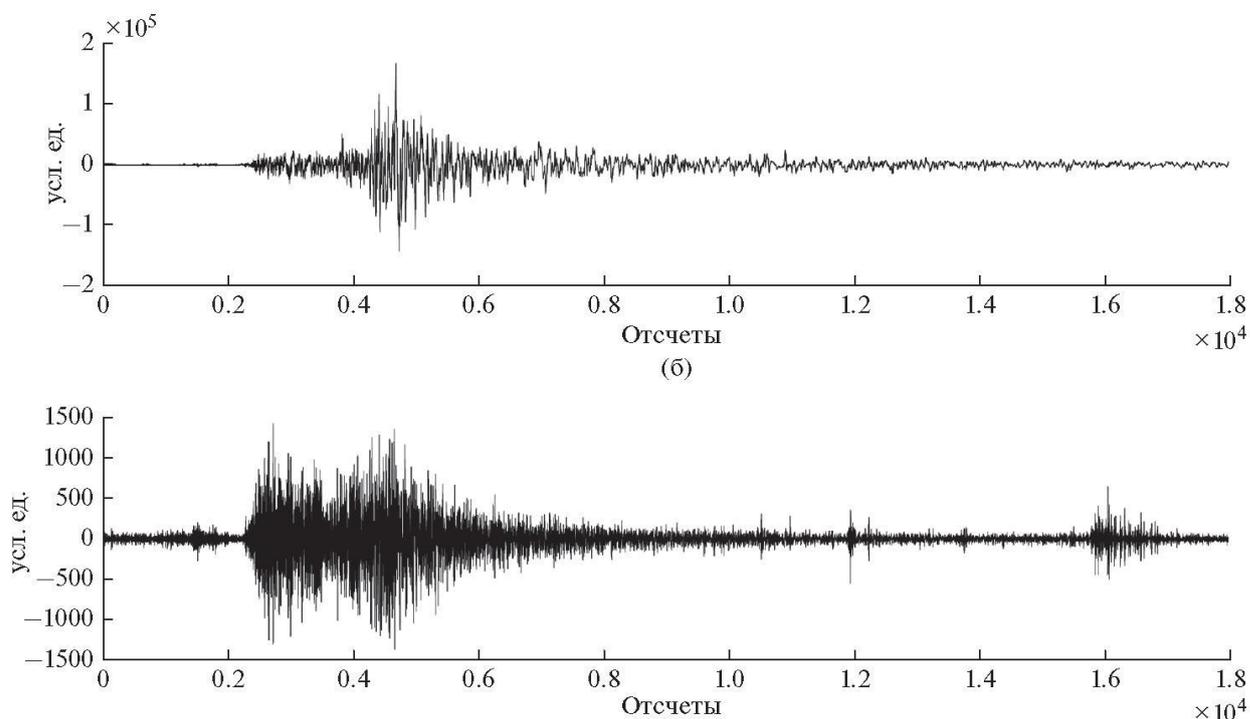


Рис. 24. (а) – запись землетрясения на сейсмической станции АСАР. Магнитуда землетрясения $M = 5.0$ (Оахака, Мексика, 12.02.2005 г., $M = 5.0$, глубина 20.0 км); (б) – тот же сигнал, восстановленный после вейвлет-преобразования по порядку № 64.

Специальный интерес представляет изучение вращательных движений, вызванных землетрясениями, взрывами или иными причинами, что является относительно новым полем деятельности. Вращательные движения представляет интерес и для телесеismicких широкополосных исследований, и для изучения сильных движений, и для изучения механизмов очагов землетрясений. Это требует разработки новых сейсмических приборов, методик экспериментов, методов обработки данных. Цель сделанного обзора [Кислов, Гравиров, 2020а] было инициировать интерес к этому направлению среди сейсмологов. Была предпринята попытка кратко рассказать, что такое вращательная сейсмология, какую пользу она может дать сейчас, и какие у нее перспективы, какими средствами могут быть записаны вращательные движения. Особый акцент сделан на перспективах развития вращательной сейсмологии и на необходимых для проведения этих исследований сейсмометрических инструментах; на рис.25 представлен вариант шестикомпонентного сейсмометра с принципиальной возможностью регистрации наклонов.

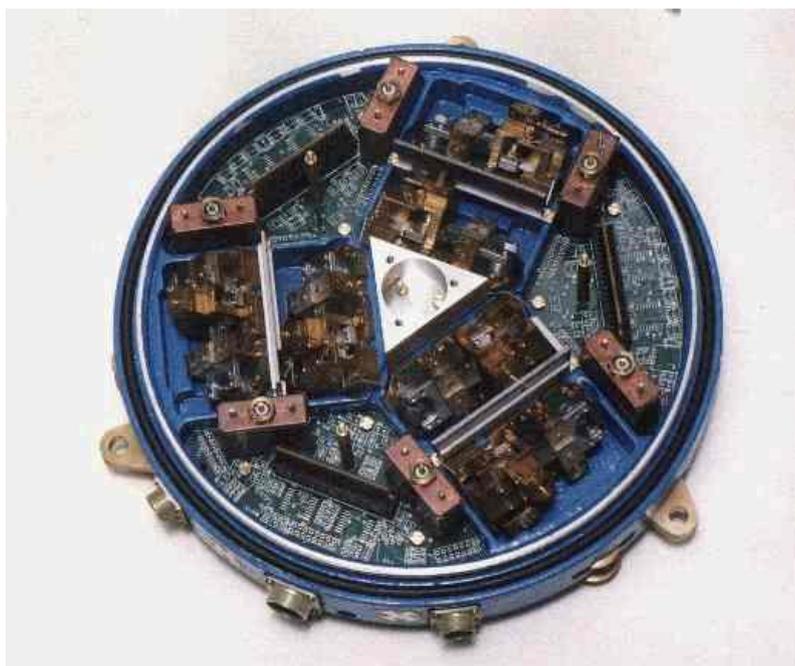


Рис.25. Шестикомпонентный сейсмометр KSM-1 с возможностью вычисления наклонов (ИТПЗ РАН).

По данному разделу отчета были опубликованы следующие работы:

Кислов К.В., Гравиров В.В. Вращательная сейсмология. Обзор достижений и перспектив // Сейсмические приборы. 2020а, Т. 56, № 3 С.5–25. <https://doi.org/10.21455/si2020.3-1>

Kislov K.V., Gravirov V.V. Some Remarks on the Seismometric Experiments Taking into Account the Thickness of the Frozen Layer Soil/ // In: Yanovskaya T., Kosterov A., Bobrov N., Divin A., Saraev A., Zolotova N. (eds) Problems of Geocosmos–2018. Springer Proceedings in

Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham 2020, P. 263–269. DOI: 10.1007/978-3-030-21788-4_22.

Кислов К.В., Гравиров В.В., Винберг Ф.Э. Возможности предподготовки сейсмических данных для анализа глубокой нейронной сетью // Физика Земли, 2020, № 1, с. 1–13. DOI: 10.1134/S0002333720010056

Гравиров В.В., Кислов К.В. Применение техники адаптивной фильтрации в геогидроакустических системах // Подводное морское оружие. Научно-технический сборник. Специальный выпуск, 4 (52), ГНЦ РФ Концерн Морское подводное оружие АО «Гидроприбор», Санкт-Петербург, 2020, с. 102-111.

Кислов К.В., Гравиров В.В. Раннее предупреждение о землетрясении: стратегии, методы, возможности, и перспективы // Наука и жизнь. 2020б, №3. С.36 – 42.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом НИР за 2020 год следует, видимо, полагать дальнейшее развитие методов расчета параметров сейсмической опасности на основе использования методов теории экстремальных значений. В рамках этого направления в 2020 году была предложена и опробована составная модель графика повторяемости землетрясений M2 и проведено сопоставление точности расчета параметров сейсмической опасности разными методами. Модель M2 удовлетворяет всем требованиям к закону повторяемости землетрясений и при этом имеет строгое статистическое обоснование.

Было проведено сравнение точности и робастности определения характеристик сейсмической опасности на основе M2 модели и в рамках широко используемой модели обрезания закона Гутенберга-Рихтера со статистическим анализом на основе метода Байеса. Впервые для решения этой задачи был использован метод искусственных каталогов с известными статистическими характеристиками. В качестве прообразов для искусственных каталогов использовались каталоги ICS-GEM по 6 регионам с различными сеймотектоническими характеристиками. Было показано, что в области интервала прогноза 50 лет, с уровнем надежности $q=0.9$ оба метода дают близкие результаты. При этом погрешность оценки отвечает практическим требованиям.

Для больших диапазонов времени и более высокого уровня надежности q различия возрастают; причем рост этот имеет место в регионах с малыми по абсолютной величине значениями параметра формы Обобщенного распределения Парето (ОРП). Фактически, это отвечает регионам, где в области редких сильных событий имеется некий относительный рост такого рода событий или где за анализируемый интервал времени произошло аномально сильное землетрясение (такое, как мега-землетрясение Тохоку). В этих случаях разброс возможных оценок сейсмической опасности также возрастает.

В целом, расчет на основе обрезанного закона Г-Р дает более консервативную оценку и меньший рост величин M_{max} . Возможно, именно это различие и будет в дальнейшем являться ключевым при выборе решения рекомендовать тот или иной подход. В пользу варианта обрезанного закона Г-Р говорят соображения о вероятном исчерпании энергетического потенциала для реализации экстремально сильных сейсмических событий. В пользу варианта модели M2 говорит теоретическая общность теории экстремальных значений и предельных распределений. Выбор между двумя моделями описания решится тем, произойдут ли где аномально сильные события, отвечающие длинному узкому «клюву», характерному для ОРП закона распределения при близких к нулю отрицательных значениях (и не предполагаемые в модели резкого обрезания закона Г-Р).

В плане региональных сеймотектонических исследований и оценок сейсмоопасности и цунами-опасности были проведены детальные исследования ряда недавних сильных землетрясений Камчатки и прилегающих территорий. Важной и интересной особенностью является несколько необычное расположение этих землетрясений на океанической части плиты в районе передового вала. Делается вывод о систематичности реализации здесь сильных землетрясений (хотя и менее опасных с практической точки зрения). На основе использования всего объема современных и палеоданных методом численного моделирования была рассчитана цунами-опасность области строительства терминала в районе бухты Бечевинка (Камчатка).

Принято полагать, что основой как оценок сейсмической опасности, так и для прогнозов землетрясений должна служить физическая модель землетрясения. При этом почти общепринято, что удовлетворительной физической модели сейсмического процесса на настоящее время не существует. По данным для Северо-Западной части Тихого океана выявлено несколько сеймотектонических ситуаций, указывающих, что наличие соответствующего напряженного состояния не является достаточным условием для возникновения сейсмичности. В случае землетрясений глубже 20-40 км (в зависимости, видимо, от уровня напряжений) для возникновения землетрясений необходима также и реализация тех или иных метаморфических превращений, в частности, реакций дегидратации. Выявление таких примеров довольно убедительно свидетельствует в пользу флюидометаморфогенной модели сейсмогенеза [Калинин и др., 1989; Родкин, 1993; Родкин, Рундквист, 2017].

Продолжалась разработка методов уточнения фокальных характеристик землетрясений по данным записи фундаментальных мод волн Лява и Рэлея. Новые методы анализа данных использовались и по данным мало-апертурных групп сейсмометров для оценки параметров слабых близких событий. В данном случае использовались фазовые алгоритмы и было реализовано их развитие, такие подходы ранее использовались для локализации источников волнового излучения в радио и акустических приложениях, и только в последнее время начали применяться также и в сейсмологии.

Продолжилось также развитие аппаратурно программных возможностей наблюдения. По данному направлению за отчетный период было опубликовано 6 статей. Специальный интерес здесь представляет изучение вращательных движений, вызванных землетрясениями, взрывами или иными причинами, что является относительно новым полем деятельности. Вращательные движения представляет интерес как для телесеизмических широкополосных исследований, так и для изучения сильных движений,

и для изучения механизмов очагов землетрясений. Предложены системы наблюдений таких движений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андреева М.Ю., Родкин М.В. К сейсмотектонической обстановке на океанической стороне глубоководных желобов. Тихоокеанская Геология, 2017, Т.36, № 1, 13-20.
2. Горшков А.И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе. М.: КР АС АНД, 2010. 472 с. (Вычисл. сейсмология; Вып. 40).
3. Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде// М., Наука, 1989, 158с.
4. Касахаора К. Механика землетрясений. М., Мир, 1985. 264 с.
5. Писаренко ВФ, Родкин МВ Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф. Вычислительная сейсмология, Вып.38, М., ГЕОС, 2007, 240 с.
6. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Декластеризация потока сейсмических событий, статистический анализ. Физика Земли, 2019, 5, 1-15.
7. Писаренко В.Ф., М.В.Родкин, Т.А.Рукавишникова. Стабильная модификация закона повторяемости землетрясений и перспективы ее применения в сейсморайонировании. Физика Земли, 2020, №1, 62-76.
8. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. ИКЦ Академкнига, Москва, 2007 г., 406 стр., УДК: 551.21.3, ISBN: 978-5-94628-200-0
9. Родкин М.В. Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике// М., Нац. Геоф. Ком., 1993, 194 с.
10. Родкин М.В., Д.В. Рундквист. Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Изд-во «Интеллект», Долгопрудный, 2017, 288 с.
11. Родкин М.В. Прогноз землетрясений – старые предвидения и новые результаты // Наука и технологические разработки. 2020. Т. 99, № 3. С.7–20.
12. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений, 1993, М., Наука, 314 с.
13. Brandstein and Ward. Microphone arrays signal processing techniques and applications, Springer, Berlin, 2001, Chapter 8; Zhang et al. in IEEE Trans Multimedia 10(3):538–548, 2008
14. Di Giacomo,D., E.R. Engdahl and D.A. Storchak (2018). The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project, Earth Syst. Sci. Data, 10, 1877-1899, doi: 10.5194/essd-10-1877-2018.

15. Ellsworth W.L. Characteristic earthquakes and long-term earthquake forecasts: Implications of central california seismicity. *Urban Disaster Mitigation: The Role of Engineering and Technology* 1995, 1-14.
16. Embrechts P, Kluppelberg C, Mikosch T (1997) *Modelling extremal events*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 645 pp
17. Gumbel, E.J. (1958) *Statistics of extremes*. New York:Columbia University Press. (1958)
18. Hacker, B.R., Peacock, S.M., Abers, G.A., Holloway, S.D., Subduction factory. 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, vol. 108, no. B1, p. 2030.
19. Kagan YY (1999) Universality of the seismic moment-frequency relation. *Pure Appl Geophys* 155:537–573
20. Kijko, A. (2011). Seismic hazard. In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics* (pp. 1107-1121). Gupta, H.K (Ed.), Springer, Dordrecht.
21. Kijko, A. & Singh, M. (2011). Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation. *Acta Geophysica*, 59, pp. 674-700. DOI: 10.2478/s11600-011-0012-6.
22. Lyubushin A.A., T.M. Tsapanos, V.F. Pisarenko and G.Ch. Koravos (2002) Seismic hazard for selected sites in Greece: A Bayesian estimates of seismic peak ground acceleration – *Natural Hazard*, January 2002, vol.25, No.1, pp.83-89.
23. Lyubushin A.A. and I.A. Parvez. (2010) Map of Seismic Hazard of India using Bayesian Approach – *Natural Hazard*, vol. 55, No 2, pp.543-556, DOI 10.1007/s11069-010-9546-1.
24. Pisarenko V.F., Lyubushin A.A., V.B.Lysenko, T.V.Golubeva. (1996) Statistical estimation of seismic hazard parameters: maximal possible magnitude and related parameters. - *Bullet. of Seismological Society of America*, June of 1996, v.86, No.3, 691-700.
25. Pisarenko V.F. and A.A.Lyubushin. (1999) Bayesian Approach to Seismic Hazard Estimation: Maximum Values of Magnitudes and Peak Ground Accelerations. - *Earthquake Research in China (English Edition)*. 1999. Vol.13. No.1, pp.47-59. http://www.oriprobe.com/journals/zgdzyj-e/1999_1.html
26. Pisarenko V, Rodkin M (2010) Heavy-Tailed Distributions in Disaster Analysis. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Volume 30, Springer, Dordrecht-Heidelberg-London-New York.
27. Pisarenko VF, Sornette D, Rodkin MV (2010). Distribution of maximum earthquake magnitudes in future time intervals: application to the seismicity of Japan (1923–2007). *Earth Planets Space*, 62, 567–578.

28. Pisarenko V., Rodkin M. Statistical Analysis of Natural Disasters and Related Losses. Springer Briefs in Earth Sciences. Springer, Dordrecht-Heidelberg-London-New York, 2014, 82 pp
29. Rodkin M.V. Crustal earthquakes induced by solid-state transformations // J. Earth. Predict. Res., v.4, 215-223, 1995.
30. Rodkin M.V. Contradictions in the Present Seismogenetical Notions. Phys. Chem. Earth., v.21, No.4, 257-260, 1996.
31. Role of water in earthquake generation. Special Issue, Bull. Earth. Res. Inst., 2001, 76, N3-4.
32. Sornette D. Mechanochemistry: A Hypothesis for Shallow Earthquakes. In: «Earthquake Thermodynamics and Phase Transformations in the Earth's Interior», R. Teisseyre & E. Majewski (Eds.), 2001, ACADEMIC PRESS, 329–366.
33. Yukinobu Okamura, Yuichi Namegaya. Reconsideration of the 17th century Kuril multi-segment earthquake. AIST, Geological Survey of Japan, 11, 15-20, 2011.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации по теме НИР «РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ЦЕЛЯХ ИЗУЧЕНИЯ ОЧАГА, СРЕДЫ, СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ», изданные в 2020 г.

Публикации в российских и международных журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus, РИНЦ:

1. Adushkin, V.V., Varypaev, A.V., Kushnir, A.F., Sanina, I.A. Identification of Induced Seismicity in the Fault Zone of the Korobkovskoye Deposits (Kursk Magnetic Anomaly) Based on Observations of a Small-Aperture Seismic Array. *Doklady Earth Sciences*, 2020, 493(1), p. 548-551.
2. Sanina, I.A., Riznichenko, O.Y., Kushnir, A.F., Varypaev A. V., Sergeev, S.I., Volosov, S.G. Recognizing of Microseismic Source Types Based on Small-Aperture Seismic Array Data *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, 56(2), p. 260-278.
3. Varypaev, A., Kushnir, A. Statistical synthesis of phase alignment algorithms for localization of wave field sources *Multidimensional Systems and Signal Processing*, Springer, 2020, 31(4), p. 1553-1578.
4. Pisarenko V.F., M.V. Rodkin. Statistics and spatial-temporal structure of ground acceleration caused by earthquakes in the North-Western Pacific region. *Pure Appl Geophys.* *Pure Appl. Geophys.* 2020, 177, 6, 2563-2578. ISSN: 0033-4553eISSN: 1420-9136
5. Pisarenko V., Rodkin M. A Collection of Statistical Methods for Analysis of the Disaster Damages and the Seismic Regime. *Geographies of the Anthropocene*, Vol. 2, No. 2 (2019), pp. 43-63.
6. Писаренко В.Ф., М.В.Родкин, Т.А.Рукавишникова. Стабильная модификация закона повторяемости землетрясений и перспективы ее применения в сейсморайонировании. *Физика Земли*, 2020, №1, 62-76.
7. Rodkin, M.V. Dependence of Losses from Natural Hazards on the Prosperity of Societies: A Brief Review. *Journal of Anthropological and Archaeological Sciences.* 1, 5, 134-137.
8. Чебров Д.В., Ю.А. Кугаенко, А.В. Ландер, И.Р. Абубакиров, С.Я. Дрознина, С.В. Митюшкина, В.М. Павлов, В.А. Салтыков, Ю.К. Серафимова, Н.Н. Титков. Землетрясение углового поднятия 20 декабря 2018 г. $M_w = 7.3$ в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* 2020. № 1. Вып. 45. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-1-45-1-18.

9. Ivankina T.I., I.Yu.Zel, M.Petruzalek, M.V. Rodkin, M.A. Matveev, T.Lokajicek. Elastic nisotropy, permeability, and freeze-thaw cycling of rapakivi granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 136, 104541.
10. Родкин М.В., Андреева М.Ю., Григорьева О.О. Анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения по региональным данным, Курило-Камчатский регион. *Вулканонология и сейсмология*, 2020, № 6, с. 67–77.
11. Nikitina M.A., M.V.Rodkin, I.G.Shmakov. The connection of the seismicity of the subduction zone in Alaska with metamorphism and the deep fluid regimes. *Physics of the Earth. Physics of the Solid Earth*, 2020, Vol. 56, No. 6, pp. 892–899.
12. Никитина М.А., М.В.Родкин. Среднеглубинные землетрясения и связь сейсмичности зоны субдукции с метаморфизмом и глубинным флюидным режимом для Северного острова Новой Зеландии. *Геосистемы переходных зон*, 2020, 4, 1, 103-115.
13. Родкин М.В. Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация. *Вулканонология и сейсмология*. 2020, 1, 64-76.
14. Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Сравнительный анализ Аляскинских землетрясений 2018 г. по записям поверхностных волн // *Российский сейсмологический журнал*. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.07>
15. Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Зависимость погрешности определения параметров землетрясений от набора записей поверхностных волн // *Физика Земли*. – 2020. – №1. – С. 109-117. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333720010019>
16. Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Определение параметров очагов региональных землетрясений по записям поверхностных волн // *Российский сейсмологический журнал*. – 2020.– Т. 2, № 4. – С. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.02>
17. Bukchin BG, Fomochkina AS, Kossobokov VG and Nekrasova AK (2020) Characterizing the Foreshock, Main Shock, and Aftershock Sequences of the Recent Major Earthquakes in Southern Alaska, 2016–2018. *Front. Earth Sci.* 8:584659. doi: 10.3389/feart.2020.584659.
18. Кислов К.В., Гравиров В.В. Вращательная сейсмология. Обзор достижений и перспектив // *Сейсмические приборы*. 2020а, Т. 56, № 3 С.5–25. <https://doi.org/10.21455/si2020.3-1>
19. Kislov K.V., Gravirov V.V. Some Remarks on the Seismometric Experiments Taking into Account the Thickness of the Frozen Layer Soil/ // In: Yanovskaya T., Kosterov A., Bobrov N., Divin A., Saraev A., Zolotova N. (eds) *Problems of Geocosmos–2018*. Springer

Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham 2020, P. 263–269. DOI: 10.1007/978-3-030-21788-4_22.

20. Кислов К.В., Гравиров В.В., Винберг Ф.Э. Возможности подготовки сейсмических данных для анализа глубокой нейронной сетью // Физика Земли, 2020, № 1, с. 1–13. DOI: 10.1134/S0002333720010056

21. Гравиров В.В., Кислов К.В. Применение техники адаптивной фильтрации в геогидроакустических системах // Подводное морское оружие. Научно-технический сборник. Специальный выпуск, 4 (52), ГНЦ РФ Концерн Морское подводное оружие АО «Гидроприбор», Санкт-Петербург, 2020, с. 102-111.

22. Кислов К.В., Гравиров В.В. Раннее предупреждение о землетрясении: стратегии, методы, возможности, и перспективы // Наука и жизнь. 2020б, №3. С.36 – 42.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программы по теме НИР «РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ЦЕЛЯХ ИЗУЧЕНИЯ ОЧАГА, СРЕДЫ, СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ», зарегистрированные в 2020 г.

(1) Спектральный и спектрально-временной анализ сейсмограмм (SVANDI)

Программа предназначена для массовой спектральной и спектрально-временной обработки цифровых многоканальных сейсмических записей. Возможно выполнение следующих операций над исходными цифровыми волновыми формами:

- выбор рабочего временного интервала по заданному типу сейсмической волны;
- учет частотной характеристики прибора и, при необходимости, преобразование записей на единую частотную характеристику и чувствительность;
- расчет теоретического времени пробега и углов выхода из источника и подхода к приемнику для первых вступлений сейсмических волн с использованием стандартных или задаваемых пользователем моделей Земли;
- пересчет записей в произвольный пространственный базис, в частности, соответствующий теоретическому направлению распространения волн;
- частотная фильтрация;
- вычисление исходных и исправленных за прибор спектров сейсмических волн;
- вычисление сглаженных амплитудных спектров;
- вычисление аналитических сигналов, соответствующих записям,
- вычисление групповых времен, как функций частоты;

- дифференцирование и интегрирование записей;
- поиск пиковых значений записей в данных временных или скоростных интервалах;
- расчет СВАН-диаграмм (спектрально временной анализ) в частотно-временных и частотно-скоростных осях.

Программа позволяет обрабатывать произвольное число волновых форм. Допустимые входные форматы волновых форм: SEED, MINISEED, DATALESS, ASCII и др., в частности специальные форматы, используемые в Камчатском и Сахалинском филиалах ЕГС РАН. Результаты выдаются в виде числовых массивов, таблиц, графиков и двумерных диаграмм. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения. Язык программирования - ФОРТРАН-90.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615311. Автор: Ландер А.В. (RU). Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 21.05.2020 г.

(2) Оперативный расчет времен пробега волн цунами (TSDELAY)

Программа предназначена для быстрой предварительной оценки времен прихода волн цунами от землетрясения в произвольное число заданных пунктов наблюдения. Приближенная оценка времени пробега волны цунами строится по схеме, не требующей сеточного решения дифференциальных уравнений. Используется простейшее интегрирование медленности (обратной скорости) волны по параметрически заданному пучку трасс с окончательным выбором луча, соответствующего минимальному времени пробега волны между заданными точками. Локальная медленность вычисляется по встроенной в программу карте глубин мирового океана. Лучи, пересекающие участки суши автоматически отбраковываются. В общем случае производится вычисление времен пробега между источником и любым набором приемников, расположенных в акваториях или на побережье. Входными данными являются координаты землетрясения и станций наблюдения. Программа включает встроенный набор координат всех современных станций DART. Результаты выдаются в виде таблицы времен пробега на все станции, отсортированные по времени прихода волн цунами. Таблица включает также параметры использованных лучей и времена пробега сейсмических волн от заданного землетрясения. Для контроля выдается также ряд графических представлений результатов: карта выбранных лучей распространения волн, графики распределения глубин и скоростей вдоль лучей. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах

и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения. Язык программирования - ФОРТРАН-90.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615380. Автор: Ландер А.В. (RU). Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 22.05.2020 г.

(3) Выделение волны цунами на записях станций DART (DARTFILTER)

Программа предназначена для выделения волн цунами на стандартных цифровых записях колебаний уровня океана станциями DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis). Исходные записи уровня океана обычно содержат большую приливную составляющую, волны, порожденные колебаниями дна океана (сейсмическими), разнообразные колебания поверхности океана, в частности вызванные возможной проходящей волной цунами, шумовую составляющую. Основная цель программы разделение этих компонент записи. Входными данными являются временные ряды записей станций DART/ Продолжительность исходной записи может быть любой. Программа автоматически по заданному времени землетрясения выбирает интервал записи, на котором могут присутствовать сейсмическая волна и волна цунами от данного события. Для расчета времени прихода сейсмической волны используется встроенный в программу стандартный годограф волн P. Время прихода волны цунами оценивается по алгоритму, основанному на упрощенной лучевой модели поиска параметрически заданного луча, обладающего минимальным временем распространения. Для этого расчета в программу встроена карта глубин мирового океана. Продолжительность волны цунами определяется по эмпирической зависимости, построенной на основе реальных данных, и использующей магнитуду землетрясения. Выделение и устранение приливной составляющей проводится путем аппроксимации исходной записи длиннопериодным кубическим сплайном. При этом не требуется введения специальной информации об океанических приливах. Возможна частотная фильтрация записи.

Результаты выдаются в виде цифровых временных рядов (файлов) отдельных компонент записи. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения. Язык программирования - ФОРТРАН-90.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615463. Автор: Ландер А.В. (RU). Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 25.05.2020 г.

(4) Генератор случайных цунамигенных очагов землетрясений Камчатки (RANDEKA)

Программа предназначена для применения при решении задач цунамирайонирования, важнейшей частью которых является составление и использование случайного синтетического каталога землетрясений, моделирующего сейсмический процесс в исследуемом регионе. Программа позволяет создавать такие каталоги для цунамигенного региона Восточной Камчатки. Для этого предварительно исследованы реальные статистические распределения очаговых параметров землетрясений региона: координат, глубины, размеров и механизмов очагов. Выявлены тренды изменения большинства из этих параметров вдоль простирания зоны субдукции и построены эмпирические распределения, учитывающие эти тренды. Программа использует датчик равномерно распределенных случайных чисел, преобразуемых в последовательности с необходимыми распределениями. Каждый из параметров очага вырабатывается в соответствии с собственным эмпирическим распределением. В результате генератор в каждой точке заданной географической области вырабатывает очаги соответствующего типа и размера с частотой, приблизительно соответствующей той, которая установлена здесь за время инструментальных наблюдений. Поскольку частоты возникновения землетрясений разных магнитуд сильно отличаются для оптимизации решения задачи цунамирайонирования каждый запуск программы вырабатывает каталог, соответствующий фиксированной магнитуде. Размеры очагов определяются по магнитуде, исходя из стандартных эмпирических закономерностей. Длина (число событий) вырабатываемого каталога произвольна.

Результирующий каталог имеет вид таблицы, содержащей все необходимые параметры каждого землетрясения. Помимо таблицы программа вырабатывает файлы, подготовленные для построения карт центроидов синтетических землетрясений и проекций их очагов на дневную поверхность. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения. Язык программирования - ФОРТРАН-90.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615420. Автор: Ландер А.В. (RU). Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 22.05.2020 г.