

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

УДК 550.34
Рег. N НИОКТР 121122300165-2
Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТПЗ РАН
чл.-корр. РАН

_____ П.Н. Шебалин
« ____ » _____ 2023 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, РАЗРАБОТКА И
АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
(заключительный)

Руководитель НИР,
директор, гл. науч. сотр.,
и.о. зав. лаб.
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

_____ П.Н. Шебалин
Подпись, дата

Москва 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,
директор, гл. науч. сотр.,
и.о. зав. лаб.
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Подпись, дата

П.Н. Шебалин
(введение, разделы 1.2, 1.3,
3.1, 3.4-3.8, заключение)

Исполнители темы

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

С.В. Баранов
(разделы 1.3, 3.1, 3.8)

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

А.И. Горшков
(разделы 2.5-2.6)

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

В.Г. Кособоков
(разделы 1.1, 1.4-1.5, 2.1-2.4,
3.10-3.11)

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

Г.М. Молчан
(разделы 2.7 и 3.2)

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

В.Ф. Писаренко
(раздел 2.8)

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

М.В. Родкин
(разделы 1.4-1.5, 2.9, 3.8,
3.9, 3.14 и 3.15)

вед. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

И.А. Воробьева
(разделы 1.3, 3.4-3.8)

вед. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

А.К. Некрасова
(разделы 1.4, 2.3-2.4, 3.15)

вед. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

М.Г. Шнирман
(раздел 3.13)

ст. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

О.В. Новикова
(разделы 2.5-2.6)

ст. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

О.В. Селюцкая
(раздел 1.6)

ст. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

А.А. Скоркина
(раздел 2.8)

науч. сотр.

Подпись, дата

Т.В. Прохорова
(раздел 3.12)

| | | |
|--------------------------------------|---------------|------------------------------------|
| науч. сотр. | _____ | Т.А. Рукавишникова (раздел 2.8) |
| | Подпись, дата | |
| науч. сотр., канд. физ.-мат. наук | _____ | В.А. Тимофеева (раздел 1.3) |
| | Подпись, дата | |
| мл. науч. сотр. | _____ | А.С. Агаян (раздел 3.15) |
| | Подпись, дата | |
| мл. науч. сотр. | _____ | А.О. Антипова (раздел 1.3) |
| | Подпись, дата | |
| мл. науч. сотр. | _____ | К.В. Крушельницкий (раздел 1.6) |
| | Подпись, дата | |
| мл. науч. сотр. | _____ | С.Д. Маточкина (раздел 3.3) |
| | Подпись, дата | |
| мл. науч. сотр. | _____ | П.Д. Щепалина (раздел 1.4) |
| | Подпись, дата | |
| и.о.мл. науч.сотр. | _____ | Е.М. Греков (раздел 1.3) |
| | Подпись, дата | |
| и.о.мл. науч.сотр. | _____ | П.А. Малютин (раздел 1.3) |
| | Подпись, дата | |
| и.о.мл. науч.сотр. | _____ | А.П. Молокова (раздел 1.7) |
| | Подпись, дата | |
| лаборант-иссл. | _____ | И.А. Цветков (раздел 2.3) |
| | Подпись, дата | |
| Нормоконтролер | _____ | О.В. Селюцкая |
| | Подпись, дата | |

РЕФЕРАТ

Отчет 132 с., 1 кн., 77 рис., 14 табл., 106 источн., 2 прил.

АЛГОРИТМЫ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗА, ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, АФТЕРШОКИ, ЗАКОН ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ГРАФИК ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, МАКСИМАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНАЯ МАГНИТУДА; СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПОТОК; МОДЕЛИ СЕЙСМИЧНОСТИ

Исследования по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений» в 2019-2023 годах проводились по трем направлениям: разработка и применение методов прогноза землетрясений; оценка сейсмической опасности и сейсмического риска; изучение и моделирование сейсмичности. В рамках первого направления проводился эксперимент по применению алгоритма среднесрочного прогноза сильнейших землетрясений мира (M7.5+ и M8+) в реальном времени, продолжалось изучение и прогноз афтершоковой активности после сильных (M6.5+) землетрясений мира с использованием автоматизированной системы AFCAST с учетом закона продуктивности, изучалась динамика сейсмичности до и после сильных землетрясений, решалась задача определения новых предвестников землетрясений и вулканических извержений. По второму направлению продолжалось развитие и применение разных подходов к оценке сейсмической опасности на разных территориях; актуализировались карты сейсмической опасности отдельных регионов; проводилось сравнение и оценка эффективности карт сейсмического районирования, полученных разными методами; подробно исследовались параметры сейсмического поля. В рамках третьего направления работ продолжалось исследование и развитие моделей сейсмичности, включая моделирование с учетом закона продуктивности, моделирование с помощью блоковой модели, исследование прогнозируемости сильных событий в модели Манн; изучались физические механизмы разноглубинных землетрясений, решалась задача техногенной сейсмичности, исследовались постсейсмические процессы.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ | 7 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 8 |
| ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ..... | 11 |
| 1. Разработка и применение методов прогноза землетрясений..... | 11 |
| 1.1 Эксперимент по применению алгоритма M8..... | 11 |
| 1.2 Применение и анализ алгоритма RTP..... | 23 |
| 1.3 Изучение и прогноз афтершоковой активности..... | 24 |
| 1.4 Динамика сейсмичности до и после сильных землетрясений..... | 34 |
| 1.5 Интеграция сейсмологических и геодезических данных для среднесрочного прогноза землетрясений..... | 36 |
| 1.6 Поиск новых предвестников землетрясений..... | 38 |
| 1.7 Поиск предвестников вулканических извержений..... | 40 |
| 2. Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска..... | 41 |
| 2.1. Взаимосвязь сейсмической опасности, риска и прогноза..... | 41 |
| 2.2 Применение неопределенностного метода оценки сейсмической опасности (NDSHA)..... | 44 |
| 2.3 Оценка сейсмической опасности и рисков на основе Общего закона подобия для землетрясений..... | 46 |
| 2.4 Оценка сейсмического риска для железнодорожной системы Прибайкалья..... | 55 |
| 2.5 Определение мест возможного возникновения сильных землетрясений..... | 57 |
| 2.6 Определение сейсмической опасности плато Шиллонг..... | 62 |
| 2.7 Теоретические аспекты сейсмического риска..... | 63 |
| 2.8 Анализ параметров сейсмического поля..... | 65 |
| 2.9 Оценка сейсмической опасности регионов: Алайская долина, Киргизия, Северное Прииссыккулье (Тянь-Шань)..... | 73 |
| 3. Моделирование сейсмичности..... | 74 |
| 3.1 Закон продуктивности землетрясений..... | 74 |
| 3.2 Моделирование сейсмичности с учетом закона продуктивности..... | 75 |
| 3.3 Моделирование сейсмичности с учетом закона продуктивности в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород..... | 77 |
| 3.4 Исследование связи формы графика повторяемости землетрясений вдоль Камчатского слаба с сейсмическим сцеплением..... | 80 |
| 3.5 Моделирование сейсмичности с помощью модели блоковой динамики..... | 84 |
| 3.6 Дефицит сильных афтершоков как индикатор афтерслипа в очагах землетрясений зон субдукции..... | 87 |
| 3.7 Мультимасштабный анализ нового каталога землетрясений Малой Антильской дуги..... | 88 |

| | |
|--|-----|
| 3.8 Техногенная сейсмичность..... | 90 |
| 3.9 Глубокие землетрясения..... | 92 |
| 3.10 Лунно-солнечные приливы и сейсмичность..... | 94 |
| 3.11 Вулканическая активность..... | 96 |
| 3.12 Сейсмичность и геодинамика..... | 97 |
| 3.13 Прогнозируемость сильнейших событий в модели Манны..... | 99 |
| 3.14 Неравномерность интенсивности потока землетрясений..... | 101 |
| 3.15 Пространственная кластеризация землетрясений..... | 103 |
| 3.16 Кластеризация как один из сценариев развития неустойчивости на примере землетрясения..... | 103 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 104 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 107 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 116 |
| Приложение А – Публикации по теме НИР, изданные с 2019 по 2023 гг..... | 116 |
| Приложение Б – Доклады на конференциях по теме НИР с 2019 по 2023 гг..... | 124 |

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применены следующие сокращения и обозначения:

| | | |
|----------|---|---|
| ГИС | – | геоинформационная система |
| ИТПЗ РАН | – | Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН |
| ОЗПЗ | – | Общий закон подобия для землетрясений |
| AFCAST | – | Автоматизированная система прогноза активности афтершоков |
| ANSS | – | Advanced National Seismic System |
| CSES | – | China Seismic Experimental Site |
| DGA | – | designed ground acceleration (расчетное ускорение грунта) |
| GEPA | – | места возможного возникновения сильных землетрясений (англ. Great Earthquake-Prone Areas) |
| GIS | – | геоинформационная система (англ. Geographic Information System) |
| NDSHA | – | neo-deterministic seismic hazard assessment (нео-детерминистская оценка сейсмической опасности) |
| PGV | – | пиковая скорость грунта (англ. Peak Ground Velocity) |
| PGVM | – | метод оценки PGV (англ. PGV Estimation Method) |
| PSHA | – | probabilistic seismic hazard assessment (вероятностная оценка сейсмической опасности) |
| QGIS | – | Quantum GIS – свободная кроссплатформенная геоинформационная система |
| RTP | – | Reverse Tracing of Precursors |
| UTC | – | Всемирное координированное время (англ. Coordinated Universal Time) |

ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогнозирования землетрясений по-прежнему остается одной из важных нерешенных проблем геофизики. Несмотря на огромный объем накопленных данных, на расширение сетей сейсмических наблюдений, развитие подходов к решению задачи прогнозирования, землетрясения остаются одним из самых катастрофических и недостаточно прогнозируемых природных явлений. Надежных алгоритмов краткосрочного прогноза землетрясений в мире пока не существует, а точность и надежность методов долгосрочного и среднесрочного прогноза пока не достаточны для защиты населения и объектов инфраструктуры. Привлечение новых данных, таких как данные спутниковой геодезии, для более точного моделирования сейсмичности, является одним из необходимых условий эффективного продвижения в исследованиях по прогнозу землетрясений. Принципиальная возможность решения проблемы прогнозирования землетрясений уже не вызывает сомнений, что делает эту задачу весьма актуальной.

В рамках работ по теме в 2019-2023 годах рассматривался широкий круг задач по изучению критических (экстремальных) явлений в твердой Земле, прогнозу землетрясений, анализу сейсмичности, а также по исследованию сейсмической опасности и риска. В режиме реального времени продолжался эксперимент по среднесрочному прогнозу землетрясений M8, с помощью алгоритма M8 определяются области, в которых сильнейшие землетрясения мира наиболее вероятны. Большое внимание уделялось прогнозированию афтершоковой активности сразу после сильных землетрясений. Во многих случаях именно афтершоки становятся причиной огромных человеческих и экономических потерь, что и обуславливает актуальность этой задачи. Рассмотрены три важнейшие задачи прогноза опасности сильных афтершоков: оценка опасной области пространства, наибольшей ожидаемой магнитуды и продолжительности опасного периода, в течение которого следует ожидать сильные афтершоки.

Адекватная оценка сейсмической опасности конкретных сейсмоопасных регионов является другой важнейшей проблемой, связанной с сокращением возможного ущерба от землетрясений. Существующая система оценки сейсмической опасности, основанная на вероятностном подходе к оценке сейсмической опасности (PSHA), была разработана в середине 90-х и, по общему признанию, требует коренной модификации. Таким образом, создание новых и совершенствование существующих методов оценки сейсмической опасности является весьма актуальным. Одним из возможных направлений совершенствования оценок сейсмической опасности является – комбинирование вероятностного (PSHA) и детерминистского подходов. В рамках PSHA оценивается вероятность того, что в течение определенного периода времени будут превышены

различные уровни сотрясаемости, вызванной землетрясениями. Сотрясаемость может оцениваться как в баллах сейсмической интенсивности, так и в величинах пиковых ускорений грунта, пиковой скорости грунта. Детерминистский метод позволяет смоделировать воздействие конкретных модельных землетрясений на конкретные здания и сооружения. Одним из вариантов комбинации двух подходов является метод не-детерминистской оценки сейсмической опасности NDSHA. Одним из ключевых условий успешного применения NDSHA является наличие адекватной информации о возможных местах сильных землетрясений в исследуемом регионе. Гибкость NDSHA позволяет инкорпорировать эту информацию, получаемую с помощью различных методов, что значительно сокращает существующие пробелы в получаемом из каталогов знании о сейсмичности. Для получения этой информации применяются методы распознавания образов и оценка коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений.

Часто обнаруживаются ошибки в оценке сейсмической опасности. Заниженная оценка сейсмического потенциала обычно происходит из-за учета данных о сильных землетрясениях прошлого, а сильные землетрясения, как правило, не ожидаются там, где их еще не было. Но возможны также и ошибки в сторону завышения оценок сейсмического потенциала. Такие ошибки связаны с неполнотой каталогов землетрясений или коротким периодом, в течение которого каталог является полным на достаточно низком уровне представительной магнитуды, и с несовершенными методами обработки таких данных. Использование современных подходов к моделированию и параметризации сейсмического потока, включая оценку максимальной возможной магнитуды, наклона графика повторяемости, интенсивность сейсмического поля, для оценки сейсмического потенциала территорий, разработка новых подходов для таких оценок, является весьма актуальной задачей.

Научная новизна выполняемых исследований состоит в разработке и применении новых методов, привлечении новых типов данных и применении методов к ранее не исследованным сейсмоактивным регионам.

Работы по **теме в 2019 – 2023 годах** включали: продолжение экспериментов по применению разработанных ранее алгоритмов для оперативного прогноза землетрясений в режиме реального времени, в том числе прогноз сильнейших землетрясений мира (M7.5+ и M8+) и прогноз активности афтершоков после сильных (M6.5+) землетрясений мира; поиск новых предвестников землетрясений и вулканических извержений; пополнение и актуализация карт изменяющейся сейсмической опасности отдельных регионов на территории РФ на базе многомасштабного оценивания параметров сейсмичности в рамках обобщенного закона Гутенберга-Рихтера, сравнение и оценку

эффективности карт сейсмического районирования (вероятностных, нео-детерминистских и полученных на базе многомасштабного оценивания параметров сейсмичности в рамках обобщенного закона Гутенберга-Рихтера) по данным о фактических землетрясениях и их последствиях; анализ физических механизмов разноглубинных землетрясений, исследования техногенной сейсмичности, совершенствование методики оценки параметров сейсмического поля; исследование и развитие моделей сейсмичности, изучение постсейсмических процессов.

Полученные результаты должны привести к разработке новых подходов в области прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности. На этой основе могут быть определены мероприятия по сокращению ущерба от сейсмических катастроф.

По теме «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений» подготовлены следующие промежуточные отчеты:

Отчет по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений», этап 2019, рег.№ ИКРБС АААА-Б20-220070790065-0.

Отчет по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений», этап 2020, рег.№ ИКРБС 221040700068-8.

Отчет по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений», этап 2021, рег.№ ИКРБС 222020900106-6.

Отчет по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений», этап 2022, рег.№ ИКРБС 223020700262-0.

Исследования по теме выполнялись в рамках направлений фундаментальных исследований п.1.5.1.6. «Изучение и прогнозирование катастрофических явлений (землетрясения, извержения вулканов, цунами); оценки сейсмической, вулканической и цунами опасности» и п.1.5.2.5. «Математическое моделирование геодинамических процессов» Приложения 1 к Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 - 2030 годы), утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 г. № 3684-р).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Разработка и применение методов прогноза землетрясений

1.1 Эксперимент по применению алгоритма M8

В 2019 – 2023 годах был продолжен Глобальный эксперимент по применению алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений M8 [1, 2] с последующей детализацией с помощью алгоритма MSc [2-4], который ведется вот уже более 30 лет с 1992 года в ИТПЗ РАН [2, 5-7]. Эксперимент направлен на прогноз землетрясений с магнитудой $M \geq 8.0$ (M8.0+) и прогноз землетрясений с $7.5 \leq M < 8.0$ (M7.5+).

На сегодняшний день статистика результатов, полученных в Глобальном тесте, с достоверностью выше 99% свидетельствует о достаточно высокой эффективности прогнозов по алгоритму M8, а также в его комбинации с алгоритмом MSc, уточняющим локализацию очаговой зоны ожидаемого землетрясения.

Высокая статистическая значимость методов среднесрочного прогнозирования землетрясений, достигнутая в ходе текущих экспериментальных испытаний во всем мире, подтверждает следующие парадигмы: предвестники сильнейших землетрясений существуют; размер области, в которой ранние предвестники проявляются намного (примерно в десять раз) больше, чем размер зоны очага готовящегося сильного землетрясения; многие предвестниковые признаки сейсмичности схожи в регионах с разной сейсмической и тектонической обстановкой; и некоторые предвестники сейсмичности универсальны. Их аналоги предвещают катастрофические события и в других сложных нелинейных системах.

Результаты диагностики по алгоритмам M8 и MSc территорий, где сильнейшие землетрясения мира ожидаются в текущем полугодии, публикуются на сайте ограниченного доступа ИТПЗ РАН (<http://www.mitp.ru/en/index.html>), о чем информируются более сотни геофизиков из ведущих сейсмологических центров мира.

На рисунках 1 и 2 приведены карты, полученные на 01.01.2019, а на рисунках 3 и 4 приведены карты, полученные на 01.07.2019.

**Regions of Increased Probability of Magnitude 8.0+ Earthquakes
as on January 1, 2019 (subject to update on July 1, 2019)**

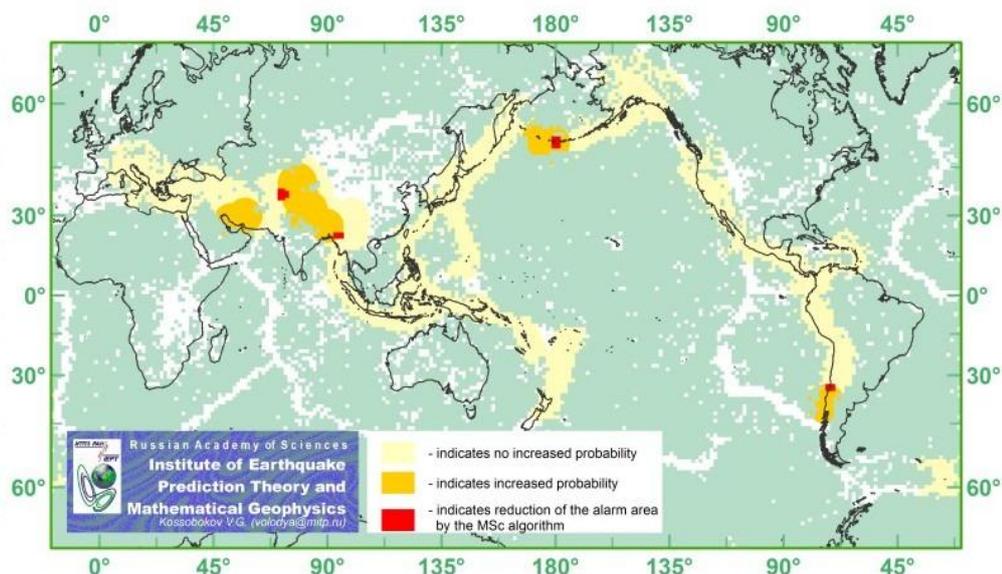


Рисунок 1 – Прогноз землетрясений с $M \geq 8.0$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2019. Области тревоги показаны желтым цветом, и его уточнение с помощью алгоритма MSc показано красным цветом

**Regions of Increased Probability of Magnitude 7.5+ Earthquakes
as on January 1, 2019 (subject to update on July 1, 2019)**

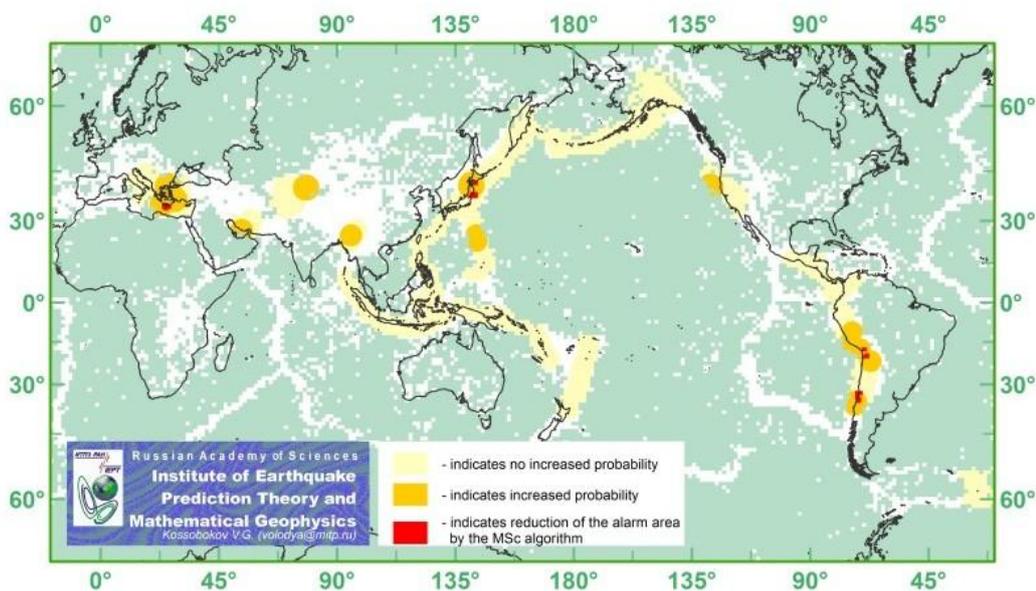


Рисунок 2 – Прогноз землетрясений с $M \geq 7.5$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2019. Области тревоги показаны желтым цветом, и его уточнение с помощью алгоритма MSc показано красным цветом

**Regions of Increased Probability of Magnitude 8.0+ Earthquakes
as on July 1, 2019 (subject to update on January 1, 2020)**

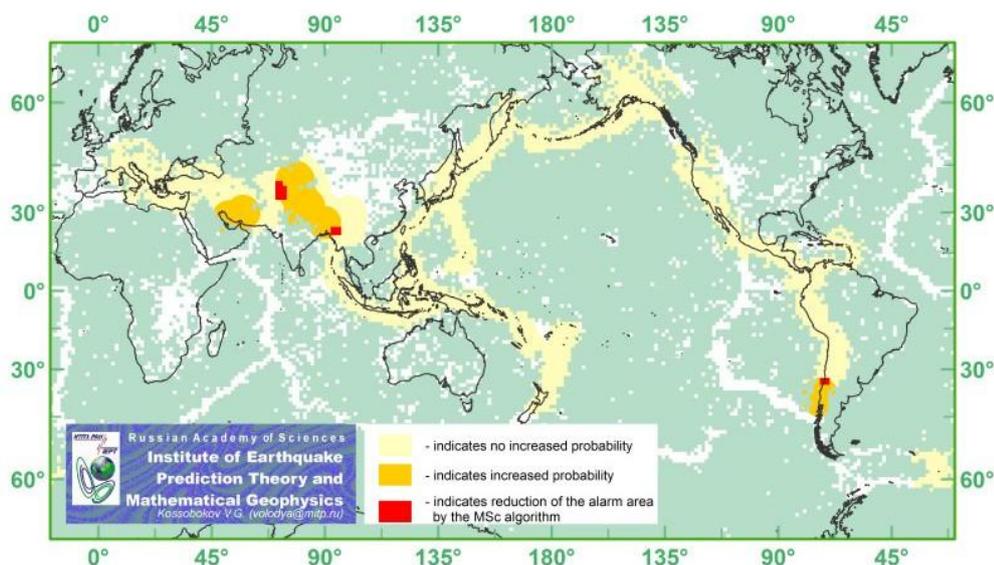


Рисунок 3 – Прогноз землетрясений с $M \geq 8.0$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2019. Области тревоги показаны желтым цветом, и его уточнение с помощью алгоритма MSc показано красным цветом

**Regions of Increased Probability of Magnitude 7.5+ Earthquakes
as on July 1, 2017 (subject to update on January 1, 2018)**

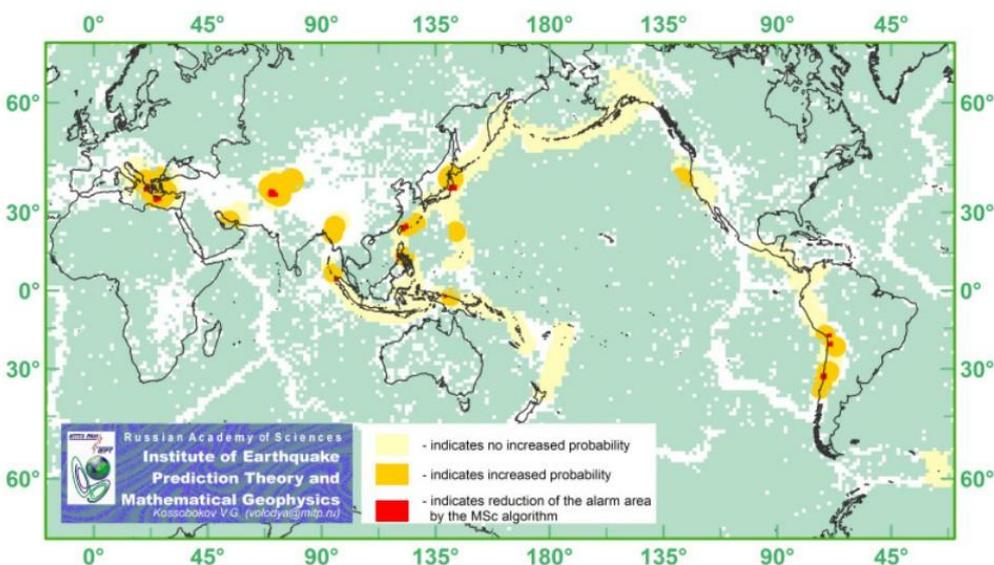


Рисунок 4 – Прогноз землетрясений с $M \geq 7.5$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2019. Области тревоги показаны желтым цветом, и его уточнение с помощью алгоритма MSc показано красным цветом

По данным Геологической службы США в 2019 году произошло два землетрясения с магнитудой $7.5 \leq M < 8.0$ и одно землетрясение с $M \geq 8.0$. Их параметры приведены в таблице 1, а положения эпицентров показаны на рисунке 5. Все эти три эпицентра лежат вне областей тревоги как для диапазона M7.5+, так и для диапазона M8.0+, и отсюда

следует вывод, что в 2019 году произошли два пропуска цели в прогнозе событий $M7.5+$ и один пропуск цели в прогнозе событий $M8.0+$. В тоже время следует отметить, что по данным Службы срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd.htm>) приведенные в таблице 1 землетрясения 22.02.2019, 14.05.2019 и 26.05.2019 имеют магнитуды 7.1, 7.4 и 7.4 соответственно. Если использовать эти значения магнитуд, то все три события не попадают ни в диапазон $M7.5+$, ни в диапазон $M8.0+$, и, соответственно, в 2019 году в Глобальном эксперименте нет пропусков цели. Полученные в соответствии с [8] оценки эффективности применения алгоритмов M8 и M8-MSc при прогнозе землетрясений $M7.5+$ и $M8.0+$ приведены в таблице 2. При этом для землетрясений из таблицы 1 использованы их магнитуды, приведенные в этой таблице, т.е. эти землетрясения отнесены к пропускам цели.

Таблица 1 – Землетрясения с магнитудой $M \geq 7.5$, которые произошли в 2019 году (по данным Геологической службы США)

| Дата и время (UTC) | Широта | Долгота | Глубина, км | Магнитуда и место землетрясения |
|---------------------|---------|-----------|-------------|--|
| 22.02.2019 10:17 | 2.186°S | 77.050°W | 145.0 | $M = 7.5$; 111 km ESE of Palora, Ecuador |
| 14.05.2019 12:58 | 4.051°S | 152,597°E | 10.0 | $M = 7.6$; 46 km SSE of Namatanai, Papua New Guinea |
| 26.05.2019 07:41 | 5.812°S | 75.270°W | 122.6 | $M = 8.0$; 78 km SE of Lagunas, Peru |



Рисунок 5 – Эпицентры землетрясений (показаны кругами) с магнитудой $M \geq 7.5$, которые произошли в 2019 году

Таблица 2 – Оценка эффективности прогнозов по алгоритмам M8 и M8-MSc в 2019 г.

| Период теста | Сильные события | Доля объема | Вероятность p , % ² |
|--------------|-----------------|-------------|----------------------------------|
|--------------|-----------------|-------------|----------------------------------|

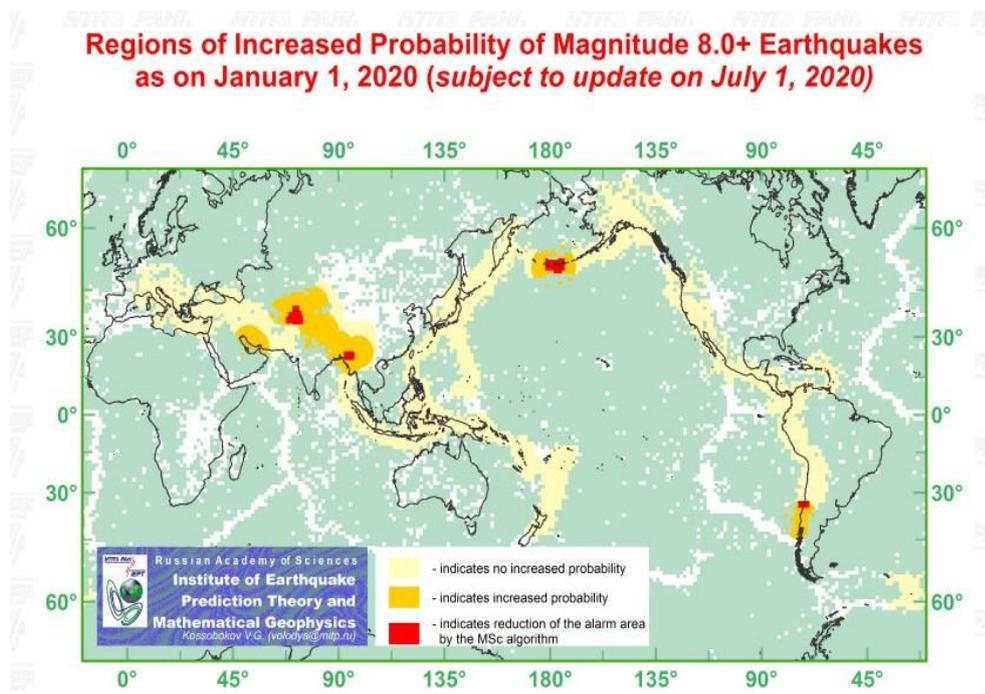
² Вероятность получения случайным образом результата прогноза, не уступающего полученному при тестировании.

| | Всего, N | Предсказано, N_s | | тревоги τ , % ¹ | | M8 | M8-MSc |
|----------------|---------------|--------------------|--------|---------------------------------|--------|-------|--------|
| | | M8 | M8-MSc | M8 | M8-MSc | | |
| Диапазон M8.0+ | | | | | | | |
| 1985-2019 | 28 | 17 | 11 | 30.92 | 14.59 | 0.06 | 0.09 |
| 1992-2019 | 26 | 15 | 9 | 28.13 | 12.66 | 0.09 | 0.25 |
| Диапазон M7.5+ | | | | | | | |
| 1985-2019 | 87 | 43 | 17 | 29.22 | 9.12 | 0.006 | 0.20 |
| 1992-2019 | 75 | 33 | 11 | 25.33 | 8.34 | 0.034 | 4.62 |

Инициировано возобновление мониторинга сейсмичности с помощью алгоритма M8 в районе Вранча (Румыния) по оперативным данным сети сейсмических наблюдений Румынии (каталог ROMPLUS) с целью прогноза сильных землетрясений, сотрясения от которых ощутимы в Европейской части России, в частности, в Москве. Установлено, что тревога на землетрясения с $M \geq 6.0$ (M6.0+), приведенная в работе [9], завершилась лишь в конце 2018 года. Причем вместо ожидаемого землетрясения с $M \geq 6.0$ в области тревоги произошло четыре события несколько меньшей магнитуды, а именно, с $M = 5.7$ (22.11.2014) и с $M = 5.8$ (23.09.2016, 27.12.2016 и 28.10.2018).

По результатам выполнения Глобального эксперимента сделаны доклады [66-67, Приложение Б]. В докладе [68, Приложение Б] рассмотрена возможность использования данных GPS-наблюдений для повышения точности и надежности результатов прогноза.

На рисунках 6 и 7 приведены карты, полученные на 01.01.2020, а на рисунках 8 и 9 приведены карты, полученные на 01.07.2020.



¹ Здесь и далее. Оценка пространства при вычислении процента объема тревоги выполнена с использованием наиболее консервативной меры, учитывающей эмпирическое распределение эпицентров.

Рисунок 6 – Прогноз землетрясений с $M \geq 8.0$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2020 (области тревоги показаны желтым цветом), и уточнение областей тревоги с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом)

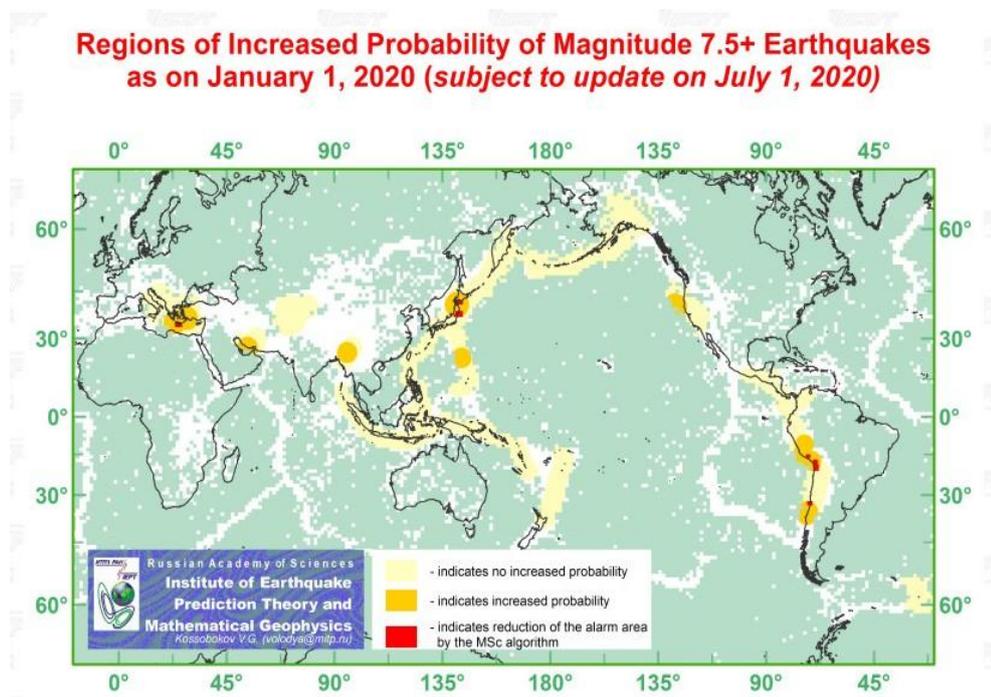


Рисунок 7 – Прогноз землетрясений с $M \geq 7.5$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2020 (области тревоги показаны желтым цветом), и уточнение областей тревоги с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом)

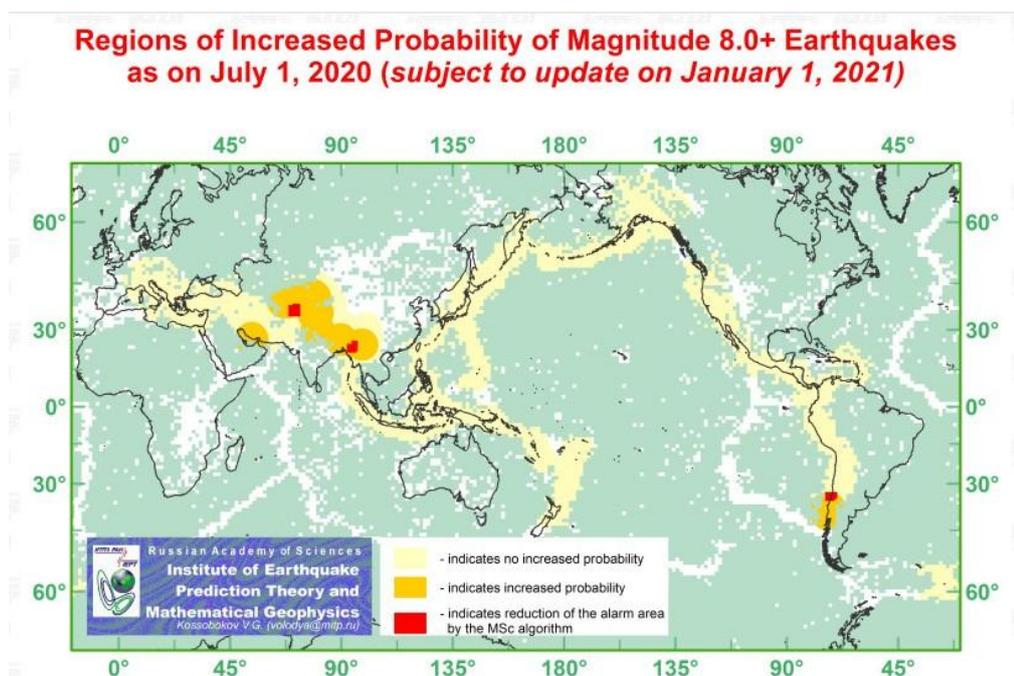


Рисунок 8 – Прогноз землетрясений с $M \geq 8.0$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2020 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом)

**Regions of Increased Probability of Magnitude 7.5+ Earthquakes
as on July 1, 2020 (subject to update on January 1, 2021)**

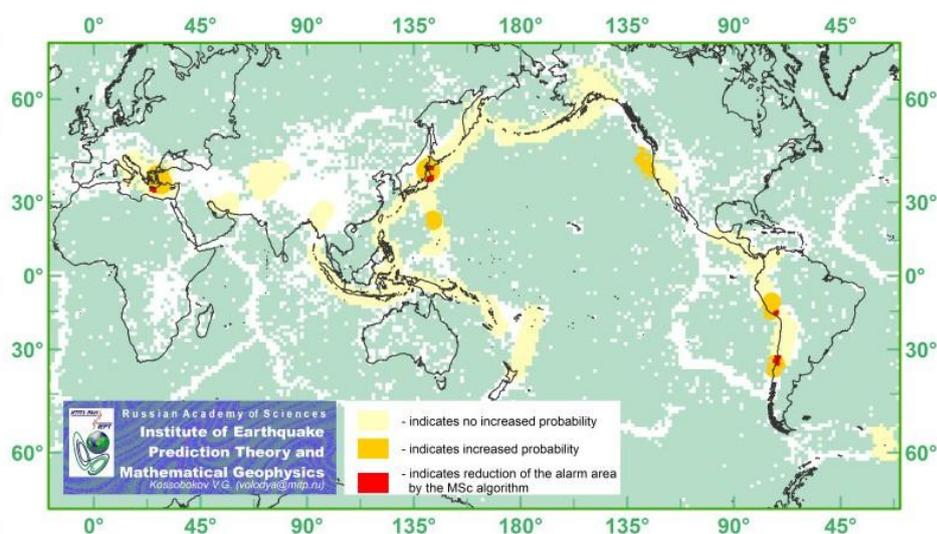


Рисунок 9 – Прогноз землетрясений с $M \geq 7.5$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2020 (области тревоги показаны желтым цветом), и уточнение областей тревогис помощью алгоритма MSc (показано красным цветом)

Полученные оценки эффективности применения алгоритмов M8 и M8-MSc при прогнозе землетрясений $M7.5+$ и $M8.0+$ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Оценка эффективности алгоритмов M8 и M8-MSc в 2020 г.

| Период теста | Сильные события | | | Доля объема тревоги τ , % | | Вероятность p , % | |
|------------------------------------|-----------------|--------------------|--------|--------------------------------|--------|---------------------|--------|
| | Всего, N | Предсказано, N_s | | M8 | M8-MSc | M8 | M8-MSc |
| | | M8 | M8-MSc | | | | |
| <i>Диапазон $M8.0+$</i> | | | | | | | |
| 1985-2019 | 27 | 17 | 11 | 30.92 | 14.59 | 0.06 | 0.09 |
| 1992-2019 | 25 | 15 | 9 | 28.13 | 12.66 | 0.09 | 0.25 |
| <i>Диапазон $M7.5+$</i> | | | | | | | |
| 1985-2019 | 85 | 43 | 17 | 29.22 | 9.12 | <0.01 | 0.16 |
| 1992-2019 | 73 | 33 | 11 | 25.33 | 8.34 | 0.02 | 3.90 |

По данным Геологической службы США в 2020 году не было землетрясений с $M \geq 8.0$, и произошли три землетрясения с магнитудой $7.5 \leq M < 8.0$. Их параметры приведены в таблице 4, а положения эпицентров показаны на рисунке 10. Эпицентры всех этих трех землетрясений лежат вне областей тревоги для диапазона $M7.5+$, и отсюда следует вывод, что в 2020 году произошли три пропуска цели в прогнозе событий $M7.5+$.

Таблица 4 – Землетрясения с магнитудой $M \geq 7.5$, которые произошли в 2020 году (по данным Геологической службы США)

| Дата и время (UTC) | Широта | Долгота | Глубина, км | Магнитуда и место землетрясения |
|--------------------|----------|-----------|-------------|---|
| 28.01.2020 19:10 | 19.419°N | 78.756°W | 14.9 | $M = 7.7$; 123 km NNW of Lucea, Jamaica |
| 22.07.2020 06:13 | 55.072°N | 158.596°W | 28.0 | $M = 7.8$; 99 km SSE of Perryville, Alaska |

| | | | | |
|-------------------|----------|-----------|------|---|
| 19.10.2020:5 5 | 54.602°N | 159.626°W | 28.4 | $M = 7.6$; 99 km SE of Sand Point, Alaska |
|-------------------|----------|-----------|------|---|



Рисунок 10 – Эпицентры землетрясений (показаны кругами) с магнитудой $M \geq 7.5$, которые произошли в 2020 году

Отметим, что положения эпицентров землетрясений, которые произошли 22.07.2020 и 19.10.2020 у побережья Аляски практически совпадают.

По результатам выполнения Глобального эксперимента в 2020 г. опубликованы две статьи [43, 52, Приложение А].

Прогнозы в рамках Глобального эксперимента в 2021 г. охватывали беспрецедентно малую территорию: лишь 3 из 262 кругов в тесте $M8.0+$ и пять кластеров кругов меньшего диаметра находились в состоянии тревоги. В течение 2021 г. по данным Геологической службы США произошло два землетрясения с $M \geq 8.0$, и четыре землетрясения с магнитудой $7.5 \leq M < 8.0$. Эпицентры всех этих землетрясений лежат вне соответствующих областей тревоги. Таким образом, в 2021 зафиксировано два пропуска цели в прогнозе событий $M8+$ и четыре пропуска цели в прогнозе событий $M7.5+$.

В рамках Меморандума о сотрудничестве ИТПЗ РАН с Национальным институтом океанографии и прикладной геофизики Италии в 2021 г. был продолжен также эксперимент по применению стабилизированной версии алгоритма $M8$, получившей название $M8S$ [10], в Италии. Подведены итоги эксперимента по применению алгоритма в Италии в период 1972-2020 гг. (таблица 5). Рассматривается три варианта целей прогноза: землетрясения с магнитудой $M \geq 6.5$ ($M6.5+$), $M \geq 6.0$ ($M6+$) и $M \geq 5.5$ ($M5.5+$).

Таблица 5 – Результаты теста алгоритма $M8S$ в Италии в 2002-2020 гг. τ - доля пространства-времени тревог, N – число землетрясений – целей прогноза, n – число предсказанных землетрясений.

| | $M6.5+$ | | $M6+$ | | $M5.5+$ | |
|--|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| | τ (%) | n/N | τ (%) | n/N | τ (%) | n/N |
| Ретроспективный тест, 1972-2001 гг. | 36 | 2/2 | 39 | 1/2 | 38 | 9/14 |
| Перспективные прогнозы, | 14 | 0/1 | 27 | 0/3 | 24 | 5/10 |

| | | | | |
|-----------------------------|----|-----|----|-------|
| 2002-2020 гг. | | | | |
| Все прогнозы, 1972-2020 гг. | 27 | 2/3 | 35 | 1/5 |
| | | | 33 | 14/24 |

Представленные результаты были опубликованы в главе книги [37, Приложение А].

В 2022 году в мире произошло ни одного землетрясения магнитудой $M \geq 8$ и лишь два землетрясения $7.5 \leq M < 8$. Гипоцентр первого землетрясения 10.09.2022 г. находился на глубине 116 км в 70 км от г. Кайнанту, Папуа Новая Гвинея - в области, где землетрясения-цели не ожидалось в первом полугодии 2022 года, а эпицентр второго 19.09.2022 г. в 35 км от г. Аквилллла, Мексика – там, где сейсмологических данных недостаточно для надежной диагностики по алгоритму M8 (рисунок 11).

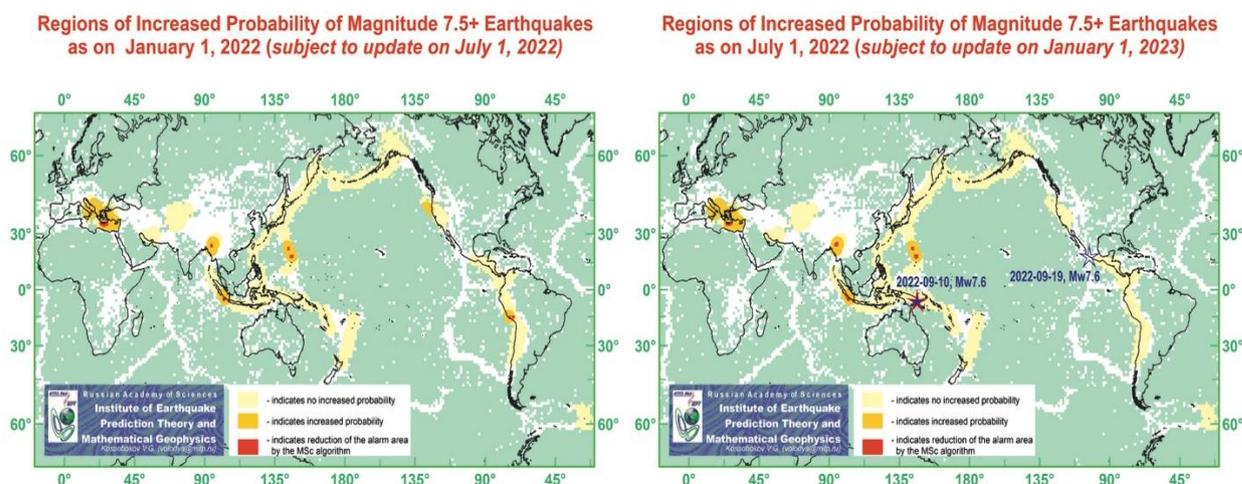


Рисунок 11 – Территории повышенной вероятности возникновения землетрясений магнитудой $M7.5+$ в первой и второй половинах 2022 года и землетрясения-цели 10 и 19 сентября 2022 – соответственно, «пропуск-цели» и за пределами мониторинга диагностики по алгоритму M8

Один пропуск цели в 2022 г. не изменил положительную статистику глобального тестирования алгоритмов M8 и MSc (таблица 6).

Таблица 6 – Эффективность прогнозов M8 и M8-MSc (по состоянию на 31 декабря 2022 г.)

| Период тестирования | Землетрясения-цели | | | Пространственно-временной объем превог, μ | | Достоверность | |
|------------------------------|--------------------|----|--------|---|--------|---------------|--------|
| | Total | M8 | M8-MSc | M8 | M8-MSc | M8 | M8-MSc |
| Магнитудный диапазон $M8.0+$ | | | | | | | |
| 1985-2022 | 30 | 17 | 11 | 28.63% | 13.41% | 99.88% | 99.88% |
| 1992-2022 | 28 | 15 | 9 | 25.62% | 11.42% | 99.85% | 99.70% |
| Магнитудный диапазон $M7.5+$ | | | | | | | |
| 1985-2022 | 99 | 43 | 17 | 27.71% | 8.59% | 99.96% | 99.60% |
| 1992-2022 | 87 | 33 | 11 | 23.93% | 7.78% | 99.80% | 93.03% |

Представленные результаты были доложены в приглашенной лекции на совместной ассамблее 17-ой Европейской конференции по сейсмостойкости и 38-ой

Генеральной ассамблеи Европейской сейсмологической комиссии в Бухаресте [34, Приложение Б].

Прогнозные Карты по состоянию на 01 января 2023 года приведены на рисунке 12.
Regions of Increased Probability of Magnitude 8.0+ Earthquakes as on January 1, 2023 (subject to update on July 1, 2023)
Regions of Increased Probability of Magnitude 7.5+ Earthquakes as on January 1, 2023 (subject to update on July 1, 2023)

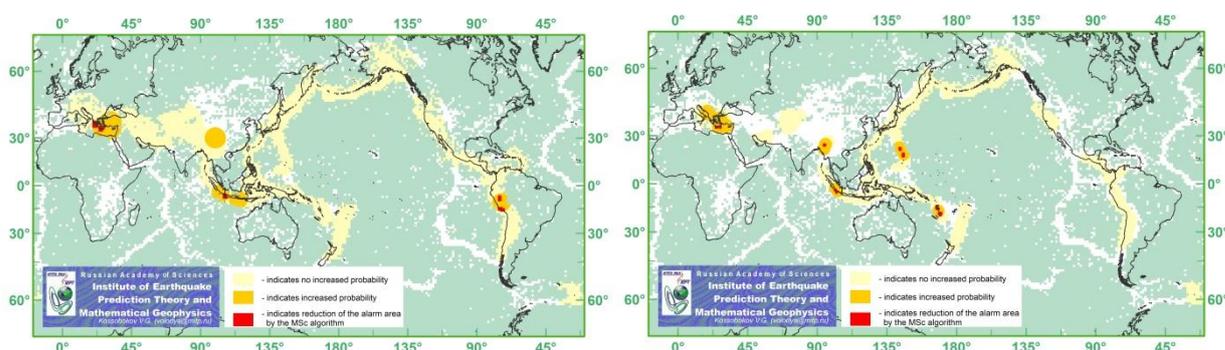


Рисунок 12 – Территории повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира в первой половине 2023 года в результате диагностики по алгоритму М8 (темно-желтый) и в его сочетании с уточнением локализации по алгоритму MSc (красный цвет). (Светло-желтым и белым отмечены территории, где землетрясения-цели не ожидаются и где землетрясений, зарегистрированных глобальной сетью сейсмографов недостаточно для надежной диагностики, соответственно.)

Карты по состоянию на 01 июля 2023 года приведены на рисунке 13.
Regions of Increased Probability of Magnitude 8.0+ Earthquakes as on July 1, 2023 (subject to update on January 1, 2024)
Regions of Increased Probability of Magnitude 7.5+ Earthquakes as on July 1, 2023 (subject to update on January 1, 2024)

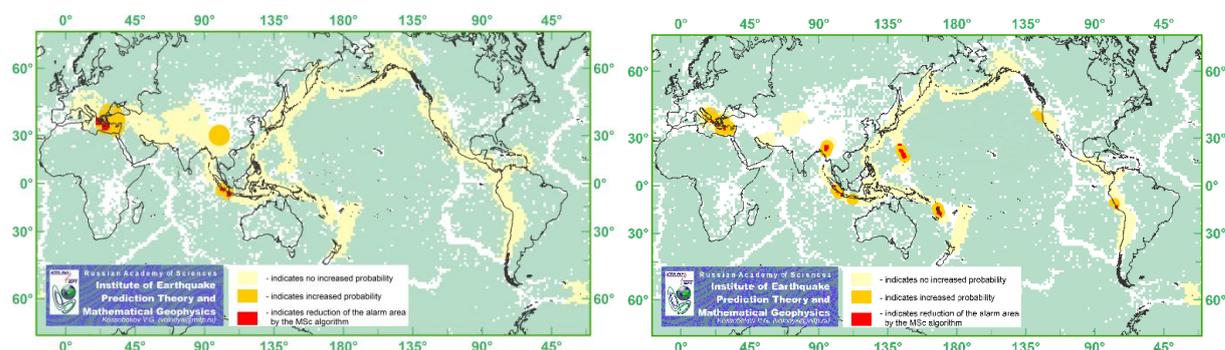


Рисунок 13 – Территории повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира во второй половине 2023 года в результате диагностики по алгоритму М8 (темно-желтый) и в его сочетании с уточнением локализации по алгоритму MSc (красный цвет). (Светло-желтым и белым отмечены территории, где землетрясения-цели не ожидаются и где землетрясений, зарегистрированных глобальной сетью сейсмографов недостаточно для надежной диагностики, соответственно.)

В 2023 году в мире произошло пять сильнейших землетрясений.

Таблица 7 – Сильнейшие землетрясения 2023 г.

| Время, UTC | Широта, °N | Долгота, °E | Глубина, км | Магнитуда | Район |
|------------------------|------------|-------------|-------------|--------------|--|
| 2023-01-09 17:47:35 | -7.06 | 130.01 | 105 | 7.6Mww/7.0Ms | Pulau Pulau Tanimbar, Indonesia |
| 2023-02-06 01:17:34 | 37.23 | 37.01 | 10 | 7.8Mww/8.0Ms | Pazarcik earthquake, Kahramanmaras, Turkey earthquake sequence |

| | | | | | |
|------------------------|--------|---------|-----|---------------------------------------|---|
| 2023-02-06 10:24:49 | 38.01 | 37.20 | 7 | 7.5M _{ww} /7.8M _s | Elbistan earthquake, Kahramanmaras, Turkey sequence |
| 2023-05-10 16:02:00 | -15.63 | -174.49 | 210 | 7.6M _{ww} /6.9M _s | 82 km WNW of Hihifo, Tonga |
| 2023-05-19 02:57:03 | -23.21 | 170.74 | 18 | 7.7M _{ww} /7.6M _s | southeast of the Loyalty Islands |

По данным ФИЦ ЕГС РАН относительно глубокие землетрясения 9 января и 10 мая 2023 года вряд ли относятся к диапазону M7.5+, а первое из турецких землетрясений 6 февраля 2023 года, наверное, следует отнести к событиям из диапазона M8.0+, что подтверждается независимым определением Mw 8.0 по данным GEOSCOPE и исключительно высокими определениями макросейсмической интенсивности XII (по шкале MMI). При этом эпицентры сильнейших событий Кахарамамарасской серии находятся за пределами области мониторинга диапазона M7.5+, где сейсмологических данных недостаточно для надежной диагностики по алгоритму M8 (рисунок 14). Можно утверждать «успешный прогноз» главного толчка Кахарамамарасской серии из M8.0+ и «пропуск цели» 19 мая 2023 года к юго-востоку от о-ов Луайоте.

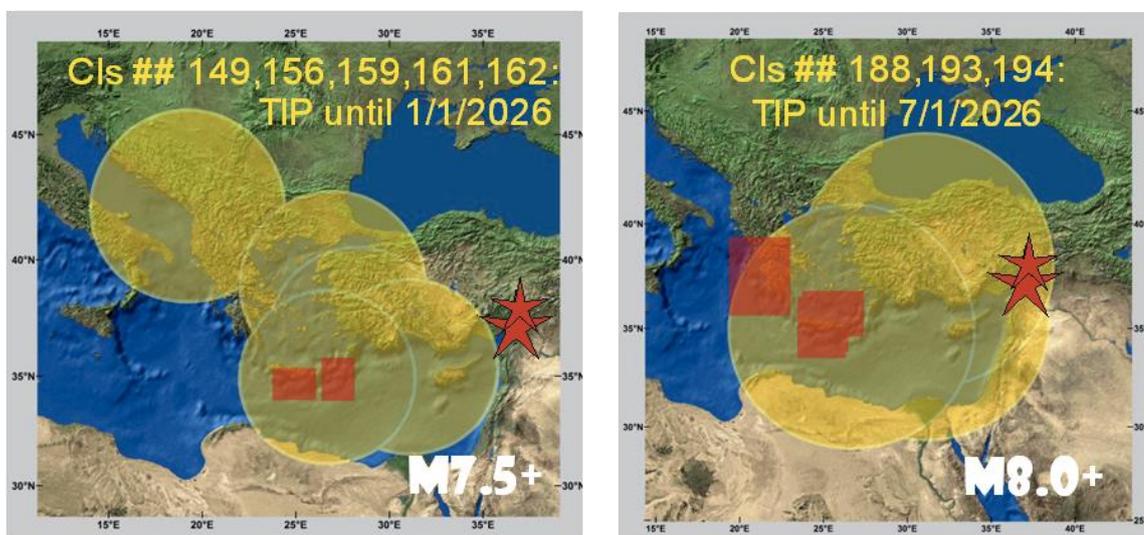


Рисунок 14 – Территории повышенной вероятности возникновения землетрясений магнитуды M7.5+ и M8.0+ в первой половине 2023 года и землетрясения 6 февраля 2023 в Кахарамамарасе (Турция)

Примечания: (1) Прогнозы относятся исключительно к сейсмически активным районам в пределах 180 и 262 кругов радиуса 427 и 667 км, глобального мониторинга событий M7.5+ и M8.0+ соответственно. (2) Оба толчка произошли за пределами территории кругов мониторинга в диапазоне M7.5+ (слева) и в пределах кластера трех из

262 кругов, где ожидалось землетрясения M8.0+ (справа). (3) Красным отмечена ошибка уточнения по алгоритму MSc.

Таким образом, вклад 2023 года в статистику глобального тестирования алгоритмов M8 и MSc привел к весьма незначительным изменениям оценок достоверности этих среднесрочных прогнозов:

Таблица 8 – Эффективность прогнозов M8 и M8-MSc (по состоянию на 3.11.2023 г.)

| Период тестирования | Землетрясения-цели | | | Пространственно-временной объем превог, μ | | Достоверность | |
|----------------------------|--------------------|----|--------|---|--------|---------------|--------|
| | Total | M8 | M8-MSc | M8 | M8-MSc | M8 | M8-MSc |
| Магнитудный диапазон M8.0+ | | | | | | | |
| 1985-2022 | 31 | 18 | 11 | 28.63% | 13.41% | 99.94% | 99.84% |
| 1992-2022 | 29 | 16 | 9 | 25.62% | 11.42% | 99.93% | 99.61% |
| Магнитудный диапазон M7.5+ | | | | | | | |
| 1985-2022 | 100 | 43 | 17 | 27.71% | 8.59% | 99.93% | 99.50% |
| 1992-2022 | 88 | 33 | 11 | 23.93% | 7.78% | 99.69% | 92.06% |

Ежегодно проводятся работы по архивации и визуализации прогнозов Глобального эксперимента в системе ГИС-проектов ИТПЗ РАН, реализуемых на сайте Института (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/global-test>, проект «Глобальный тест для прогнозирования в реальном времени сильнейших землетрясений в мире»), а также по пополнению интерактивных карт и баз данных, используемых в задачах прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности. Раздел Global test web-gis охватывает результаты за период с 1985 г. по настоящее время и состоит из двух проектов QGIS Desktop: «Common Access 2000-2014» и «Special Access 2015 и позже», а также набора архивных карт за 1985 - 1999 период, сгруппированный как файлы JPEG. Доступ к данным ИТПЗ РАН организован по группам пользователей и разделен в зависимости от актуальности данных. Данные глобального теста для прогнозирования в реальном времени сильнейших землетрясений в мире с M 7.5 и M 8.0, 2000-2014 гг., доступны по ссылке (https://www.itpz-ran.ru/en/results/maps-and-databases/global-test-for-real-time-prediction-of-the-worlds-strong-earthquakes/earthquakes-data-m-8_0-7_5-2000-2014/), интерфейс для M 7.5 показан на рисунке 15. Результаты представлены [25, Приложение А], [14, 29, 51, Приложение Б].

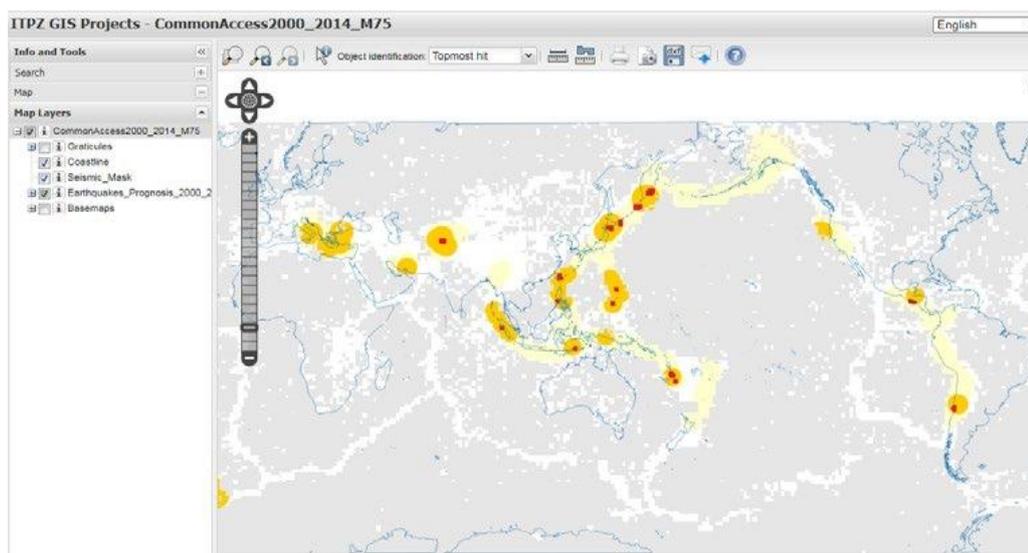


Рисунок 15 – Скриншот интерфейса Глобального эксперимента по среднесрочному прогнозу землетрясений $M7.5+$ в мире по алгоритмам M8-MSc на 2000-2014 гг.

1.2 Применение и анализ алгоритма RTP

Обобщен опыт по заблаговременному прогнозу землетрясений в период 2003-2019 гг. в пяти регионах мира по алгоритму Reverse Tracing of Precursors (RTP), в основе которого лежит явление увеличения радиуса корреляции сейсмичности перед землетрясениями [11-14]. Мониторинг выполнялся в пяти регионах, где прогнозировались землетрясения с $M \geq M_0$: Курилы-Камчатка ($M \geq 7,2$); Хонсю-Хоккайдо-Южные Курилы ($M \geq 7,2$); Калифорния-Орегон-Невада ($M \geq 6,4$); Центральные Апеннины, Альпы, Северные Динариды и долина По ($M \geq 5,5$); восточном Средиземноморье ($M \geq 6,0$). Цель мониторинга состояла в оценке достоверности прогнозов по алгоритму RTP и поиск способов его уточнения и повышения надежности. В 2019 г. не было диагностировано ни одной тревоги в тестируемых регионах. Землетрясений указанных магнитуд в рассматриваемых областях в 2019 г. также не произошло.

Качество прогноза можно оценить с помощью двух характеристик τ и η (таблица 9). Величина τ характеризует долю пространства-времени, занятого тревогами, но учитывает, что пространственное распределение эпицентров землетрясений неравномерно [15]. Эту величину можно считать также вероятностью случайного успеха прогноза [16] при данной модели распределения вероятности землетрясений. В качестве такой модели используется обычно сглаженное фактическое распределение эпицентров магнитудой выше заданного порога [15]. В данной задаче в сглаживании нет необходимости из-за достаточно больших размеров областей тревоги. Величина η – это доля пропусков цели, то есть доля землетрясений с магнитудой $M \geq M_0$, не попавших в пространственно-временную область тревоги относительно общего числа таких

землетрясений в регионе за период теста. Для случайных прогнозов сумма $\tau + \eta$ близка к 1. Чем меньше эта сумма, тем ближе результаты прогнозов к идеальному. Отметим, что в соответствии с таблицей 9 ни в одном из регионов эта сумма не превосходит 0.4.

Таблица 9 – Результаты теста алгоритма RTP в пяти регионах в 2003-2019 гг.

| Регион | M_0 | Число целей | τ | η | $\tau + \eta$ |
|-------------------------------------|-------|-------------|--------|--------|---------------|
| Курилы-Камчатка | 7.2 | 7 | 0.08 | 0.29 | 0.37 |
| Хонсю-Хоккайдо-Южные Курилы | 7.2 | 8 | 0.30 | 0 | 0.30 |
| Калифорния-Орегон-Невада | 6.4 | 8 | 0.15 | 0.25 | 0.40 |
| Долина По, Альпы, Северные Динариды | 5.5 | 5 | 0.13 | 0.20 | 0.33 |
| Восточное Средиземноморье | 6.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Всего за период теста произошло 28 сильных землетрясений, из них 23 в областях и в периодах тревог, диагностированных по алгоритму. При этом вероятность случайного успеха в этих регионах не превышала 30% и в среднем составляла около 15%. Эти результаты подтверждают эффективность алгоритма RTP. Тесты показали также высокую степень неслучайности совпадения сильных землетрясений и предшествующих им индикаторов увеличения радиуса корреляции – цепочек землетрясений.

1.3 Изучение и прогноз афтершоковой активности

В продолжение серии работ по оценке опасности афтершоков рассмотрена задача оценки времени, в течение которого после сильного землетрясения следует ожидать афтершоки, которые могут представлять самостоятельную опасность (афтершоки с магнитудой $M \geq M_m - 2$, где M_m – магнитуда основного толчка). Построена модель распределения этой величины, зависящая от трех параметров закона Омори–Утсу [17], который описывает убывание с течением времени t числа афтершоков в единицу времени $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = K/(t+c)^p, \text{ где } K, c \text{ и } p \text{ – параметры закона.}$$

Модель хорошо совпадает с фактическими распределениями этой величины на глобальном и региональных уровнях при использовании соответствующих усредненных оценок параметров. Ключевым параметром в модели является ожидаемое число афтершоков заданной магнитуды. Эта величина от землетрясения к землетрясению варьирует в широких пределах, что определяет широкий доверительный вариант оценок по усредненным параметрам. Поэтому для целей прогноза длительности опасного периода предложено использовать два варианта оценок. Первый вариант основан только на усредненных оценках параметров для рассматриваемой области и значении магнитуды землетрясения. Его использование возможно непосредственно после сильного

землетрясения. Во втором варианте используется информация об афтершоках за первые часы после землетрясения, что позволяет значительно улучшить прогноз.

В результате исследования разработана методика оценки длительности опасного периода τ_2 возможного возникновения афтершоков с магнитудой $M \geq M_m - 2$, где M_m – магнитуда основного толчка. При необходимости оценка может быть пересчитана для произвольного порога магнитуды. Оценка проводится в два этапа. На первом этапе, сразу после сильного землетрясения, используется усредненная модель распределения величины τ_2 . Входной информацией для этой модели может являться только глубина очага. Параметры модели заранее определены. На втором этапе прогноз величины τ_2 может быть уточнен за счет информации о первых афтершоках, например, в течение первых 12 часов после землетрясения. Параметры модели для серий с большим числом афтершоков в принципе могут быть оценены, но оказалось, что результаты лучше совпадают с реальными значениями времени последнего афтершока, если использовать заранее заданные значения параметров, по возможности зависящие от глубины очага. Поэтому фактически для оценок на втором этапе используется только число афтершоков представительной магнитуды.

Для практического применения методики оценены параметры модели по глобальному каталогу землетрясений и отдельно для Курило-Камчатского, Байкальского и Кавказского регионов. Для глобального каталога, Курил и Камчатки параметры зависят от глубины очага. Ретроспективная проверка первого этапа методики показала хорошее совпадение теоретической модели с эмпирическими распределениями величины τ_2 . Уточнение прогноза на втором этапе, как показал второй ретроспективный тест, действительно целесообразно, поскольку позволяет получить информационный выигрыш в среднем около 50%. Полученные результаты использованы при разработке автоматизированной системы прогнозирования опасности афтершоков AFCAST (www.afcast.org). Также получены новые результаты, которые могут послужить уточнению физических представлений о сейсмогенезе. В частности, установлена сильная зависимость от глубины очага среднего количества афтершоков с относительным порогом магнитуды. Эта величина экспоненциально уменьшается с глубиной, изменяясь более чем на порядок. Важным отрицательным результатом является вывод о неправомерности использования широко распространенной, особенно в западной научной литературе, модели ETAS (epidemic-type aftershock sequence – последовательность афтершоков эпидемического типа) [18-21] для прогноза длительности опасного периода афтершоков. Главная причина в том, что количество афтершоков у каждого события определенной магнитуды считается параметром модели, однако в природе эта величина варьирует в

очень широких пределах, подчиняясь экспоненциальному распределению, имеющему максимум в нуле.

Значительное внимание уделено проблеме идентификации афтершоков. Была проведена модификация метода Заляпина–Бен-Зиона [22, 23], в которой неявным образом учитываются размеры и направление простирания очага сильного землетрясения. Этот алгоритм позволяет выделять последовательности афтершоков, близко совпадающие при большом числе афтершоков с последовательностями, выделенными с методом Молчана–Дмитриевой [24], при этом алгоритм лишен его недостатков при малом числе афтершоков. Оказалось, однако, что пороговое значение функции близости примерно на два порядка меньше порога в стандартном методе. Это фактически означает, что «иерархическая» схема выделения афтершоков в методе Заляпина–Бен-Зиона в виде ветвящейся цепочки «родитель-потомки» фактически имеет лишь чисто технический смысл, без фактических причинно-следственных связей. Таким образом, методика Заляпина–Бен-Зиона и иерархические модели афтершокового процесса вообще требуют переосмысления.

По полученным результатам опубликована статья [58, Приложение А] и сделан доклад [62, Приложение Б].

Исследована связь вероятности возникновения сильных афтершоков с сейсмичностью, предшествующей основному толчку. Под сильным понимается афтершок в смысле закона Бота [25] с магнитудой не ниже средней разности магнитуд сильнейших афтершоков и их основных толчков. Предложена и проверена гипотеза о том, что сильные афтершоки с большей вероятностью происходят после основных толчков, приуроченных к местам с высокой фоновой сейсмичностью. На глобальном уровне проверка гипотезы осуществлялась по данным каталога землетрясений ANSS ComCat Геологической службы США; на региональном - по данным каталогов землетрясений ФИЦ ЕГС РАН для ряда сейсмоопасных регионов России (Камчатка и Курильские острова, Байкал и Забайкалье, Северный Кавказ). Было протестировано несколько функций, характеризующих фоновую сейсмическую активность, предшествующую основному толчку, значения которых рассматривались как возможный предвестник или антипредвестник сильного афтершока. Эффективность предвестника (антипредвестника) оценивалась по специально разработанному критерию, представляющему собой отношение суммы всех удачных прогнозов к числу всех неудачных. Значение, на котором достигается максимум эффективности, принималось в качестве порогового. Значение предшествующей активности выше порогового считалось предвестником сильного афтершока, ниже – антипредвестником. По результатам выполненного исследования гипотеза была подтверждена на глобальном и региональном уровнях независимо от способа измерения

предшествующей сейсмической активности. Наиболее информативной характеристикой активности является отношение накопленного сейсмического момента фоновых землетрясений, предшествующих основному толчку, к моменту основного толчка, нормированное на площадь круга, ограничивающего область фоновой сейсмичности. Вероятность ожидаемых повторных толчков в зависимости от времени и магнитуды оценивалась по модели Ризенберга-Джонс [26]. Параметры модели для Земли в целом и для ряда сейсмоопасных регионов России оценивались как с учетом, так и без учета предшествующей активности. Сопоставление фактических и расчетных значений вероятности возникновения хотя бы одного сильного афтершока на разных интервалах времени показало хорошее соответствие модели фактическим данным. С помощью выигрыша по вероятности показано, что предпочтительнее использование модели Ризенберга-Джонс с учетом предшествующей фоновой сейсмичности. По полученным результатам опубликована статья [67, Приложение А].

В 2019 г. опубликована монография [66, приложение А], в которой рассмотрены три важнейшие задачи прогноза опасности сильных афтершоков: оценка опасной области пространства, наибольшей ожидаемой магнитуды и продолжительности опасного периода, в течение которого следует ожидать сильные афтершоки. Приведен ряд фундаментальных результатов, которые были получены в процессе решения этих задач.

В 2019 году завершена работа по созданию автоматизированной информационной системы оценки опасности афтершоков AFCAST (URL: <https://itpz-ran.ru/afcast/>), с помощью которой выполняется прогноз афтершоковой активности в режиме времени, близком к реальному.. Система получает оперативные данные глобального каталога ANSS ComCat (URL: <https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/>) Геологической службы США (USGS) каждые 2 часа. Прогноз афтершоковой активности осуществляется для всех землетрясений с магнитудой 6.5 или выше.

Далее приведены примеры работы системы.

В 2021 г. произошло 46 таких событий (рисунок 16).



Рисунок 16 – Землетрясения с $M \geq 6.5$, произошедшие в 2021 г. по данным глобального каталога ANSS ComCat (USGS). Оранжевые (белые) кружки – землетрясения, инициировавшие 5 или более (менее 5) афтершоков за 12 ч после основного толчка; синие кружки – землетрясения, произошедшие более, чем за год до текущего времени

Как только информация о землетрясении с $M \geq 6.5$ поступает в систему, AFCAST по данным об этом землетрясении выполняет следующие оценки [27-33]:

- области, где ожидается афтершоковая активность - черная окружность на рисунке 17);
- магнитуды сильнейшего афтершока (рисунок 18), ожидаемого за время $(t, 365)$ суток после основного толчка $(t = 0.01, 2^j, j = -2, \dots, 7)$ с вероятностью 10, 50 и 90% используется динамический закон Бота;
- оценка длительности опасного периода для землетрясений с $M_m - 2$ или выше (M_m – магнитуда основного толчка) с вероятностями 10, 50 и 90%, пример показан на рисунке 19 (синяя кривая).

Estimated areas of strong aftershocks calculated using data for 12 hours after the mainshock

| On/Off | Code | Region - Strategy | Description | Quantile | Area, km ² |
|-------------------------------------|------|----------------------------|---|----------|-----------------------|
| <input type="checkbox"/> | 3 | Ellipse - Soft strategy | Ellipse by quantile: center at the Rupture center | 0.87 | 8552.11 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 3 | Ellipse - Neutral strategy | Ellipse by quantile: center at the Rupture center | 0.95 | 17577.20 |
| <input type="checkbox"/> | 3 | Ellipse - Hard strategy | Ellipse by quantile: center at the Rupture center | 0.99 | 18141.30 |
| <input type="checkbox"/> | 4 | Stadium - Soft strategy | Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value | 0.87 | 12754.20 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 4 | Stadium - Neutral strategy | Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value | 0.95 | 24209.00 |
| <input type="checkbox"/> | 4 | Stadium - Hard strategy | Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value | 0.99 | 28212.30 |

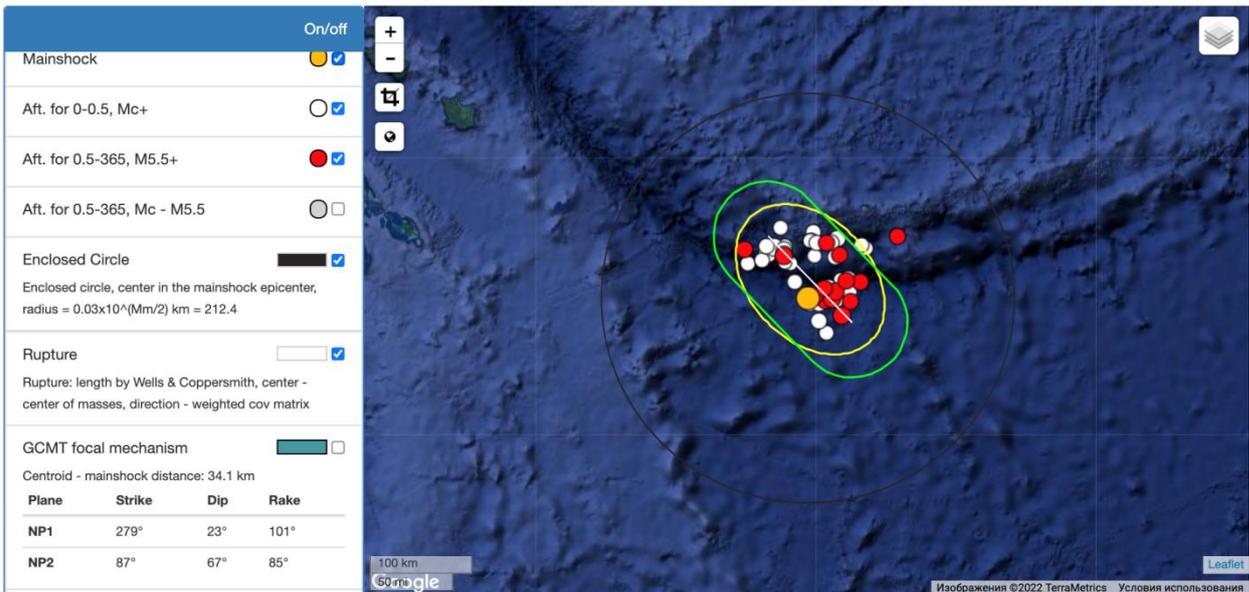


Рисунок 17 – Пример областей, где ожидаются афтершоки с $M \geq 5.5$, инициированные землетрясением $M 7.7$, произошедшим 2021-02-10 13:20:00 UTC к юго-востоку от островов Луайоте (легенда показана сверху и слева)

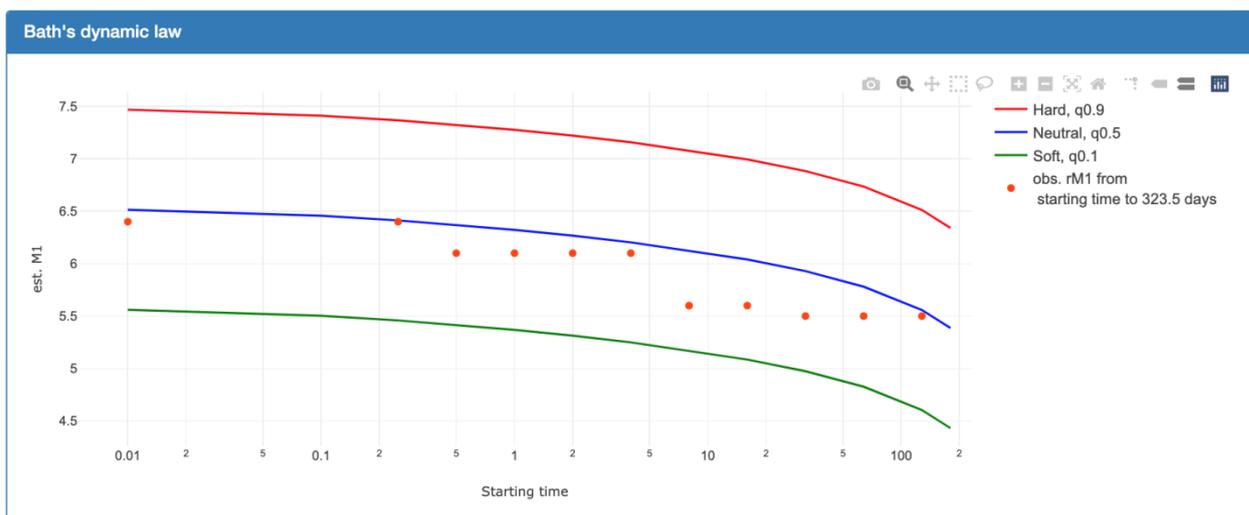


Рисунок 18 – Пример оценки по динамическому закону Бота магнитуды ожидаемого сильнейшего афтершока, инициированного землетрясением $M 7.7$, произошедшим 2021-02-10 13:20:00 UTC к юго-востоку от островов Луайоте (легенда показана справа)

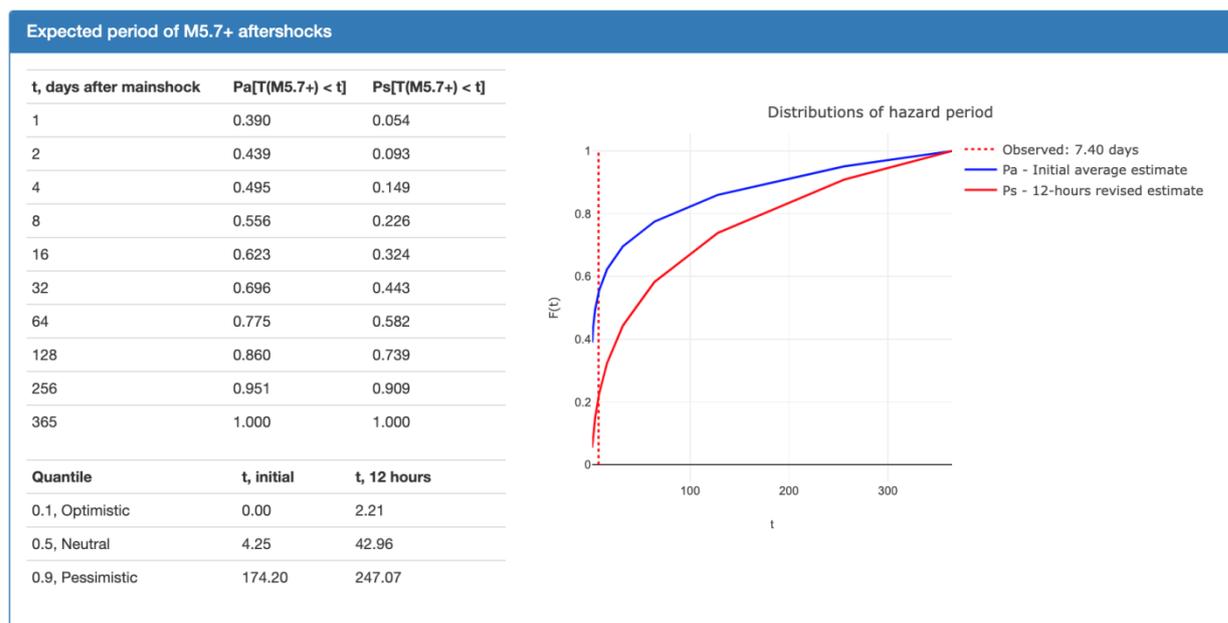


Рисунок 19 – Пример оценки длительности опасного периода, в течении которого ожидаются афтершока с $M \geq 5.7$, инициированные землетрясением $M 7.7$, произошедшим 2021-02-10 13:20:00 UTC к юго-востоку от островов Луайоте (легенда показана справа)

Оценки магнитуды сильнейшего афтершока и длительности опасного периода основаны на установленном законе продуктивности [33, 34], согласно которому число инициированных толчков с магнитудой $M \geq M_m - \Delta M \geq M_c$ (M_m – магнитуда основного толчка, $\Delta M > 0$, M_c – представительная магнитуда) подчиняется экспоненциальному распределению, а не распределению Пуассона как обычно предполагается.

По прошествии 12 ч после основного толчка система AFCAST уточняет оценки, выполненные по информации об основном толчке, с использованием данных о первых афтершоках. Уточнение выполняется при достаточном количестве данных. Так если за 12 ч произошло не менее 10 афтершоков с $M \geq M_c$, то в системе AFCAST уточняется форма области, где ожидаются афтершоки с $M \geq 5.5$ по методике работы [27]. Рассчитываются два типа областей (эллипс и стадион), размеры которых определяются согласно «мягкой», «нейтральной» и «жесткой» стратегиям. «Жесткая» стратегия рекомендуется к применению, если сильный афтершок может привести к катастрофическим последствиям при отсутствии соответствующих превентивных мер – низкая вероятность пропуска цели. В случае, если необходимым минимизировать размер области тревоги с целью сокращения расходов на превентивные меры, то рекомендуется применять «мягкую» стратегию. Если же последствия пропуска сильного афтершока и затраты на превентивные меры примерно равны или неизвестны, то наиболее подходящей является «нейтральная» стратегия. Типичные пример оценки области афтершоковой активности показан на рисунке 17. (зеленые области).

Уточнение оценки магнитуды сильнейшего афтершока ожидаемого в течении (2^j , 365) суток после основного толчка выполняется по данным за 2^j , $j = -2, \dots, 7$ суток [28]. Оценивание производится для вероятностей 10, 50 и 90%. Расчёты выполняются при условии достаточности данных (не менее 5 представительных афтершоков из области ожидаемой афтершоковой активности), иначе используется оценка по динамическому закону Бота. Пример оценки показан на рисунке 20.

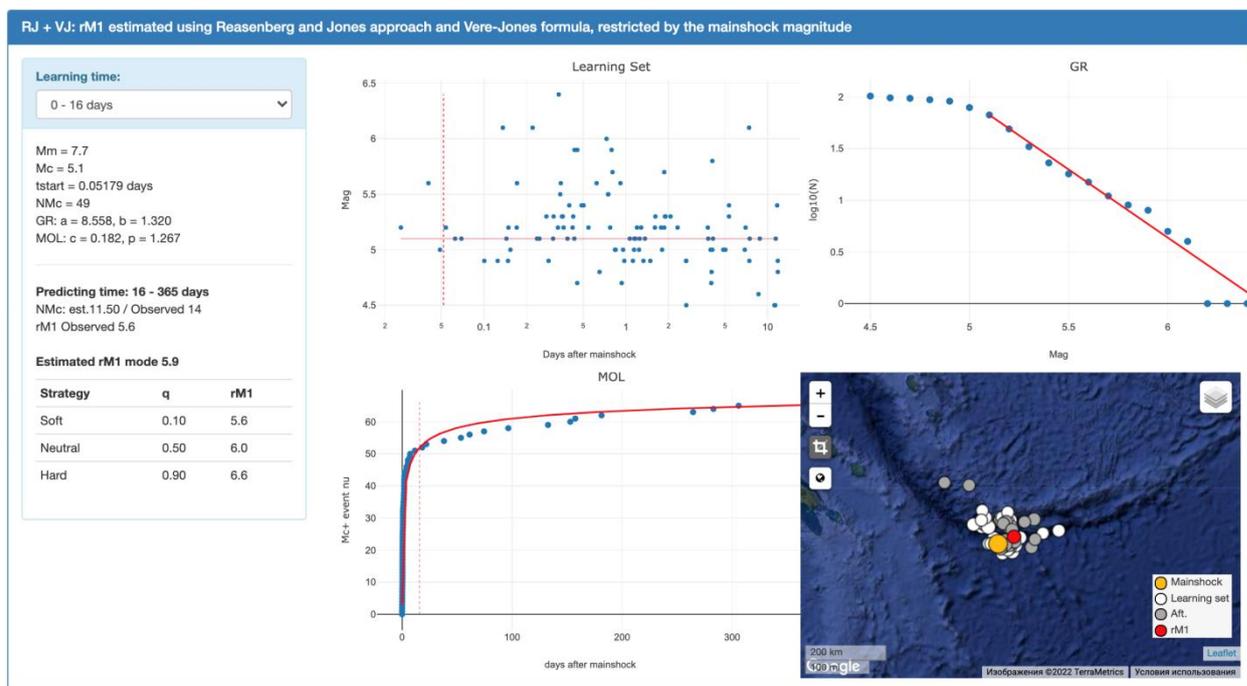


Рисунок 20 – Пример оценки ожидаемого сильнейшего афтершока, инициированного землетрясением М 7.7, произошедшим 2021-02-10 в 13:20:00 UTC к юго-востоку от островов Луайоте (легенда показана слева)

Для каждого из зарегистрированных в 2021 году 46 землетрясений с $M \geq 6.5$ (рисунок 16) выполнены оценки опасности сильных афтершоков по информации об основном толчке; для 16 событий оказалась, что эти оценки возможно уточнить по данным о первых афтершоках, произошедших в течение 12 ч после основного толчка. Анализ прогнозов областей распространения афтершоков показывает, что из общего числа афтершоков с $M \geq 5.5$ – 117 – только 4 (3%) не попали в прогнозные области.

Из 460 прогнозов по динамическому закону Бота (10 прогнозов на каждую серию), только 83 (18%) вышли за границы интервала магнитуд, определяемых вероятностями 10 и 90%. Примерно такая же статистика наблюдалась в ретроспективных оценках [28]. Все 46 прогнозов длительности опасного периода, укладываются в прогнозный 90-процентный доверительный интервал.

В 2022 г. зарегистрировано 42 землетрясения с $M \geq 6.5$ (рисунок 21). Для каждого такого землетрясения были выполнены оценки опасности сильных афтершоков по информации об основном толчке; для 8 событий оказалась, что эти оценки возможно

уточнить по данным о первых афтершоках, произошедших в течение 12 ч после основного толчка. Анализ прогнозов областей распространения афтершоков показывает, что из общего числа афтершоков с $M \geq 5.5$ – 117 – только 4 (3%) не попали в прогнозные области.

Из 420 прогнозов по динамическому закону Бота (10 прогнозов на каждую серию), только 73 (17%) вышли за границы интервала магнитуд, определяемых вероятностями 10 и 90%. Все 42 прогноза длительности опасного периода, укладываются в прогнозный 90-процентный доверительный интервал.

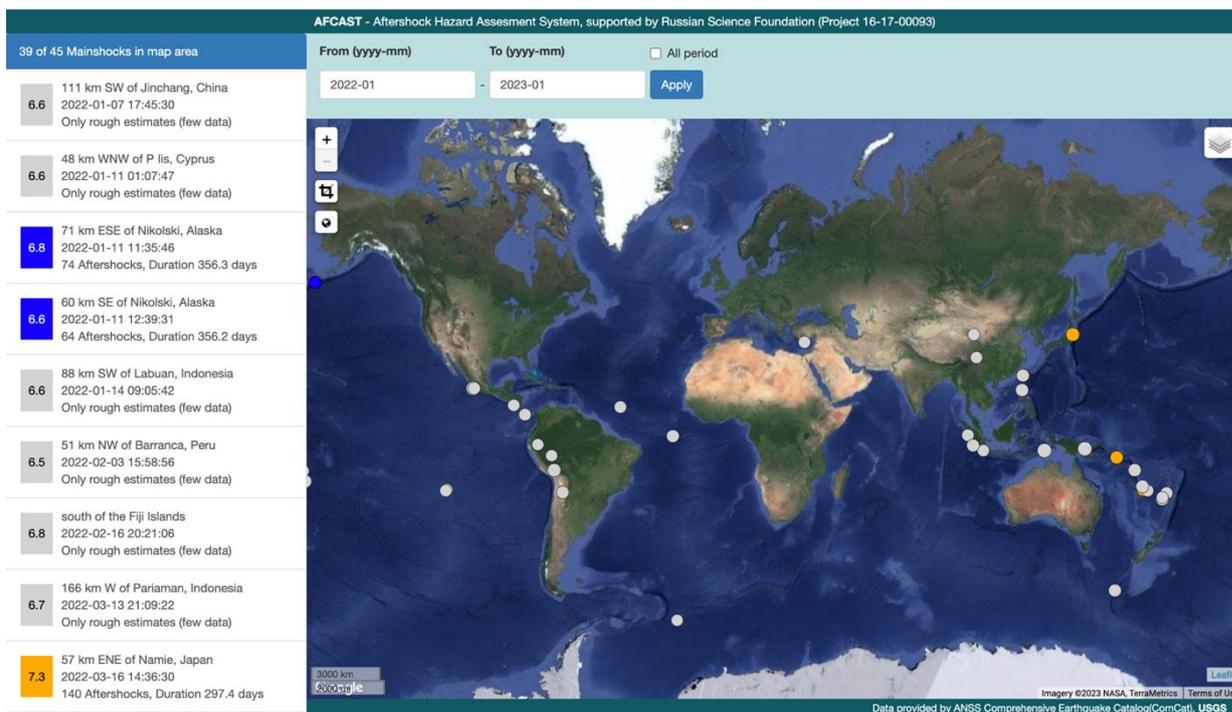


Рисунок 21 – Землетрясения с $M \geq 6.5$, произошедшие в 2022 г. по данным глобального каталога ANSS ComCat (USGS). Оранжевые (белые) кружки – землетрясения, инициировавшие 5 или более афтершоков за 12 ч после основного толчка; синие кружки – землетрясения, произошедшие более, чем за год до текущего времени

В 2023 году из 380 прогнозов по динамическому закону Бота (10 прогнозов на каждую серию), только 57 (15%) вышли за границы интервала магнитуд, определяемых вероятностями 10 и 90%. Это примерно соответствует пропорции, наблюдавшейся в ретроспективных оценках (рисунок 22)

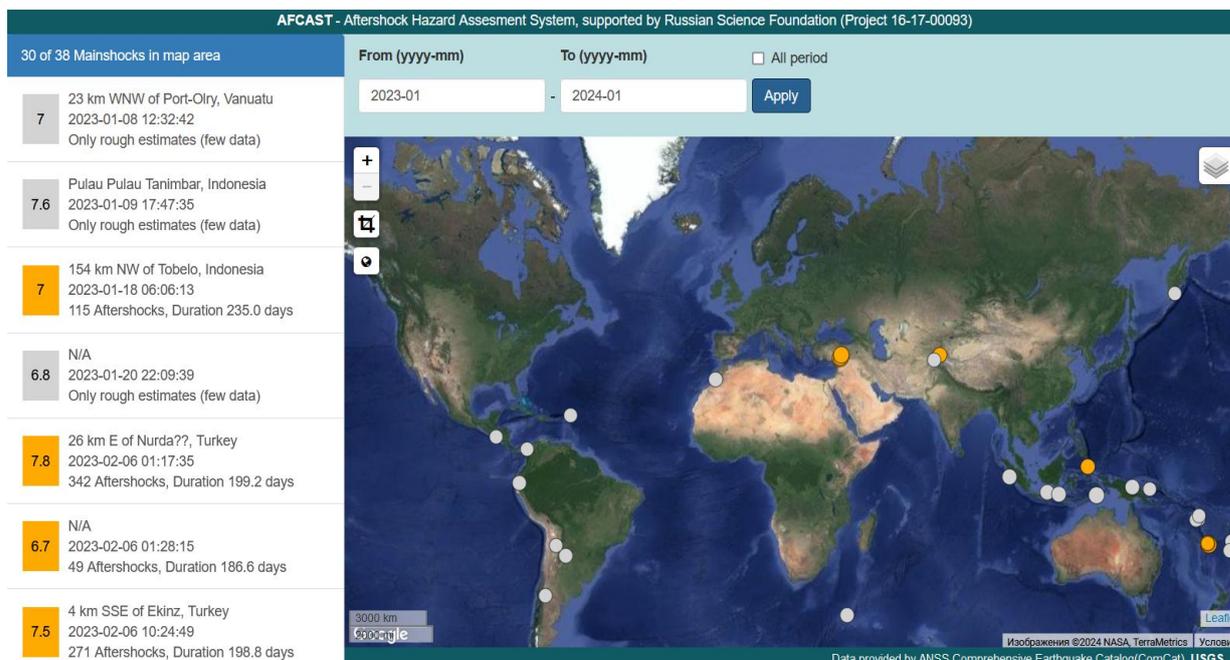


Рисунок 22 – Землетрясения с $M \geq 6.5$, произошедшие в 2023 г. по данным глобального каталога ANSS ComCat (USGS). Оранжевые (белые) кружки – землетрясения, инициировавшие 5 или более (менее 5) афтершоков за 12 ч после основного толчка

Пример успешного прогноза активности афтершоков - землетрясение 6 февраля 2023 г. в Турции. На рисунках приведены оценки магнитуды сильнейших будущих афтершоков по динамическому закону Бота и оценка на основе модели Ризенберга-Джонс, сделанная по данным за первые 64 дня на период 365 дней. Все оценки находятся вблизи оптимальных значений (рисунки 23 и 24).

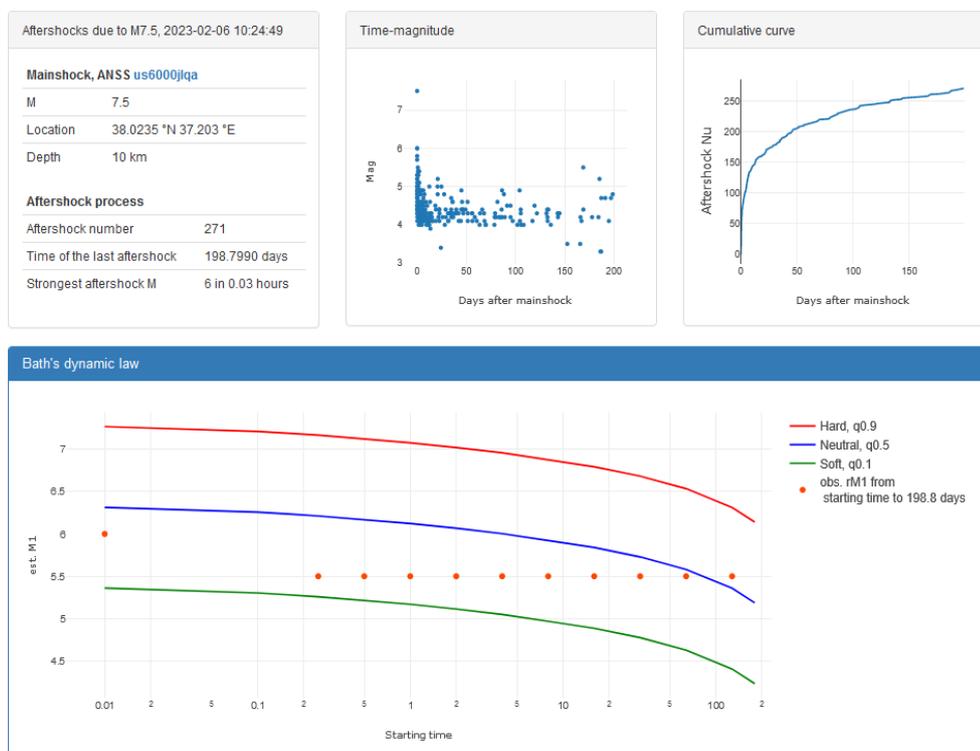


Рисунок 23 – Оценка магнитуды ожидаемого сильнейшего афтершока, инициированного землетрясением $M 7.8$, произошедшим 06 февраля 2023 г. в Турции

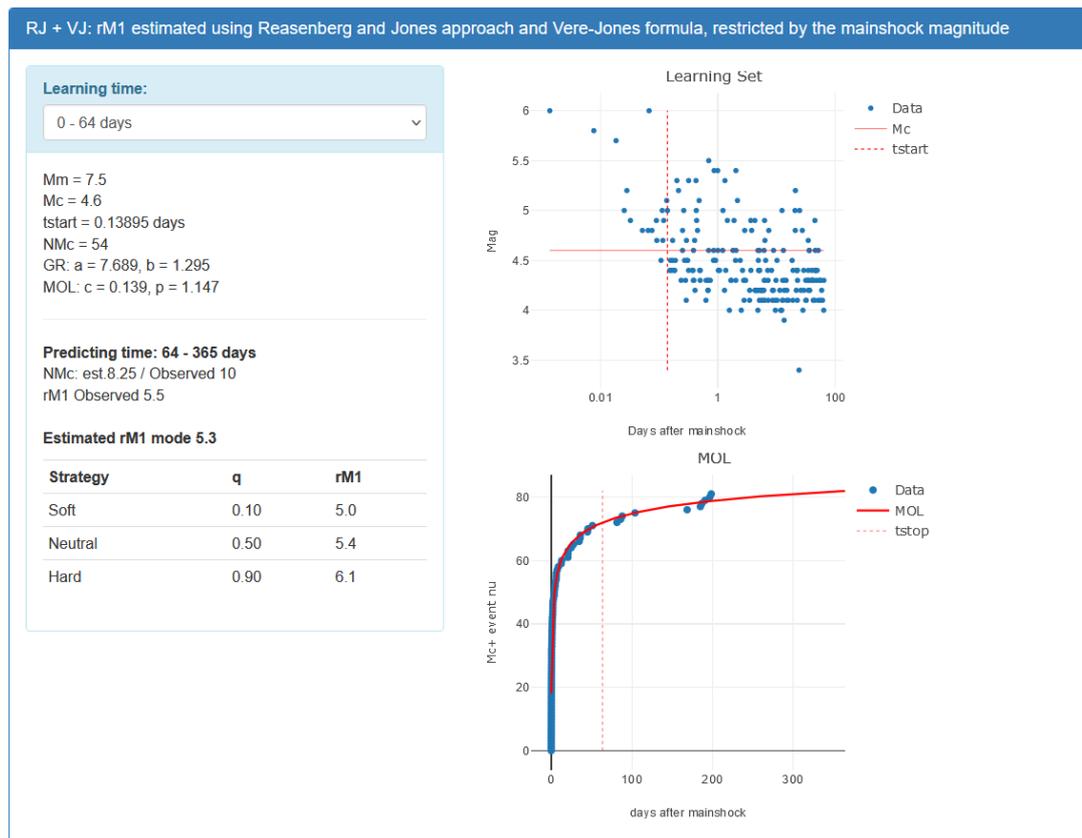


Рисунок 24 – Оценка ожидаемого сильнейшего афтершока, инициированного землетрясением М 7.8, произошедшим 06 февраля 2023 г. в Турции

В базе данных системы AFCAST помимо текущих прогнозов содержатся результаты прогнозирования для афтершоковых серий, начиная с 2004 г. (до 2019 г. – ретроспективно). Результаты работы системы могут быть использованы при планировании мер по снижению ущерба после сильного землетрясения. Результаты работы AFCAST доступны в сети Internet, URL: <https://itpz-ran.ru/afcast/>. Все элементы методики расчетов, используемых в системе AFCAST, опубликованы в виде главы в книге издательства Wiley [36, Приложение А].

1.4 Динамика сейсмичности до и после сильных землетрясений

Для определения количественных характеристик динамики последовательностей форшоков и афтершоков рассмотрены пространственно-временные окрестности эпицентров 156 крупнейших землетрясений в мире ($M \geq 7.5$, глубина < 300 км) в 1985-2020 гг. [40, Приложение А]. Используется многопараметрическое описание сейсмической активности: (i) количество событий N ; (ii) высвобождение деформации Бениоффа, Σ ; (iii) времена между событиями τ ; (iv) параметр закона Гутенберга-Рихтера, b ; и (v) управляющий параметра η Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ) [35-37], обобщающего соотношение Гутенберга-Рихтера и учитывающего естественное

фрактальное распределение очагов землетрясений. Эти параметры определяются в кругах радиуса $R=0.5(e^{M-5.6}+1)$ в градусах земного меридиана, что примерно в 5–10 раз больше размеров очага землетрясения, но лишь около 1/4 общепринятой оценки зоны его подготовки [38]. Исследование подтверждает существование пространственно-временных закономерностей и различных режимов регионального сейсмического энерговыделения; в частности, стабильность уровней управляющего параметра η , которые прерываются средне- или даже краткосрочными всплесками активности, связанными с крупными катастрофическими событиями, а также изменчивость сейсмической активности до и после основных толчков.

На рисунке 25 показана эмпирическая функция распределения времен от последнего и от предпоследнего $t^* - t_{m-1}$, а также время задержки $t^* - t_{m-2}$ от предпоследнего землетрясения с магнитудой $\geq 4,5$. Из рисунка следует, что около трети крупнейших землетрясений имеют форшок в общем смысле буквально за сутки до времени их возникновения и более 75% за 10 дней и менее.

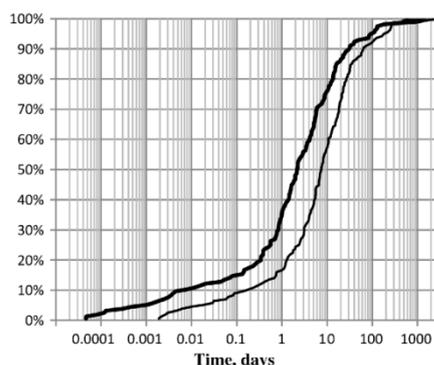


Рисунок 25 – Эмпирическое распределение времени от последнего (жирная линия) и предпоследнего (тонкая линия) землетрясений с $M \geq 4,5$, предшествующих основному толчку с $M \geq 7,5$

В работе [35, Приложение А] по данным каталога GCMT [39] получен схожий результат, более того, отмечается экспоненциальный рост числа форшоков по мере приближения по времени к основному толчку. В работе [38, Приложение А], однако, отмечается, что эффект является достаточно ярким, поскольку, во-первых, положение эпицентра основного толчка заранее известно, а во-вторых, эффект является результатом сложения схожих, но очень слабых эффектов от большого числа основных толчков. Для каждого отдельного землетрясения этот эффект сильно замаскирован доминирующей случайной компонентой сейсмического режима. Для применения этого эффекта в реальном прогнозе проблема состоит в выделении информативной систематической компоненты на фоншума.

1.5 Интеграция сейсмологических и геодезических данных для среднесрочного прогноза землетрясений

Комплексный подход, основанный на интеграции сейсмологических и геодезических данных, имеет большие перспективы в решении проблем прогноза землетрясений. В пилотном исследовании [29, Приложение А] сравниваются до- и постсейсмические смещения, связанные с сильнейшими землетрясениями и полученные из наблюдений GPS и сейсмических каталогов. Используются данные GPS со станций Глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) вместе с интегральными характеристиками регионального сейсмического режима, включая накопленные смещения, полученные из каталогов параметров гипоцентров землетрясений. В работе не обнаружено каких-либо заметных переходных процессов в ежедневных геодезических измерениях, зарегистрированных перед шестью землетрясениями (2004 Sumatra-Andaman Mw9.2, 2011 Tohoku Mw9.1, 2010 offshore Maule Mw8.8, 2015 Illapel Mw8.3, 2018 Kodiak Mw7.9, 2016 Kaikoura Mw7.8) на ближайших к ним станциях GNSS. Однако, установлено, что (а) в рассмотренных шести случаях наблюдаются разные модели корреляции между GPS и сейсмическими смещениями до и после сильных землетрясений; (б) наблюдается заметная высокая изменчивость корреляции между геодезическими $\rho(t)$ и сейсмическими $\Sigma(t)$ интегралами, что указывает на частичный вклад землетрясений в естественно спорадическое движение литосферных блоков разного размера, и (с) данные GPS подтверждают существование прерывистых длительных периодов регионально стабильных уровней сейсмического режима, отраженных в управляющем параметре Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ) [35-37], которые могут переключиться в результате среднесрочных или даже краткосрочных всплесков активности, связанных с катастрофическими событиями. По результатам исследований динамики сейсмичности до и после землетрясений опубликованы статьи [28, 29, 35, 38, 40, Приложение А].

Ретроспективный анализ сейсмического кризиса 2016–2017 гг. в Центральной Италии и последовательности Эмилия в Италии в 2012 году реализован на основе геодезических наблюдений высокой плотности (GNSS и SAR) и сейсмологической информации. Интеграция сейсмологической и геодезической информации может обеспечить то, что называется среднесрочным прогнозированием землетрясений в узком диапазоне. Протяженность зон тревоги, идентифицированных для сильных землетрясений с помощью алгоритмов прогнозирования землетрясений на основе закономерностей сейсмичности, может быть уменьшена с линейных размеров в несколько сотен до нескольких десятков километров (рисунки 26 и 27). Результаты подробно описаны в пятой

главе монографии «Earthquakes and Sustainable Infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) Approach Guarantees Prevention Rather Than Cure» [24, Приложение А].

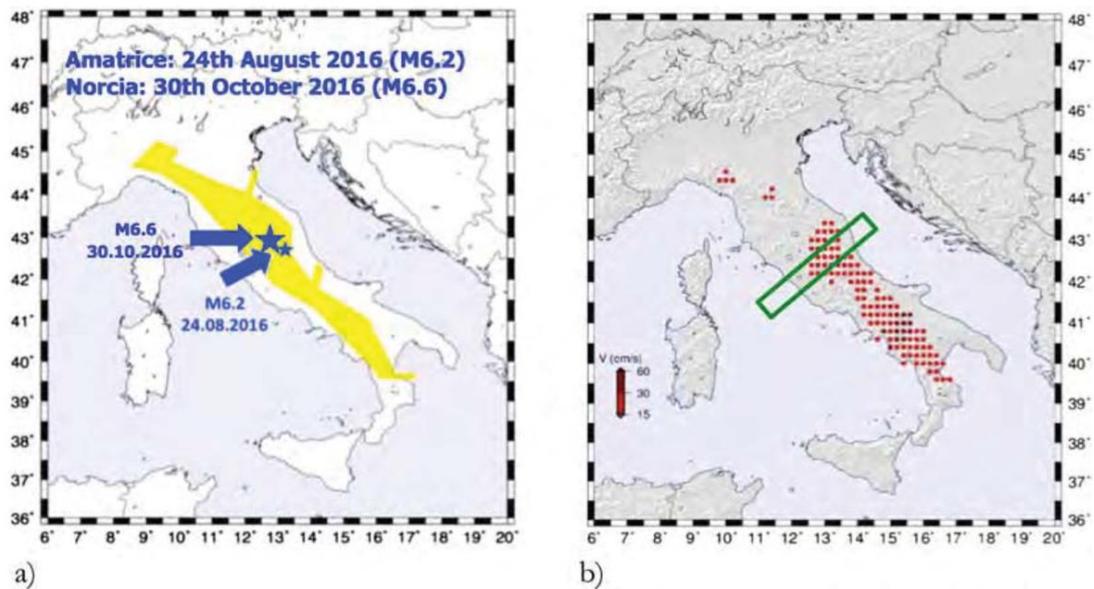


Рисунок 26 – Комплексный анализ сейсмологической и геодезической информации: (а) зона тревоги по алгоритму КН (желтый многоугольник) и эпицентры землетрясений Амаatrice 24.08.2016 г., $M=6.2$ и Норсия 30.10.2016, $M=6.6$ (синие звездочки); (б) пересечение трансекты Амаatrice, выделенной по геодезическим признакам (зеленый прямоугольник) и сценарием сотрясения земли по методу NDSHA в пределах зоны тревоги по алгоритму КН. Область пересечения может трактоваться как область, где должны быть сосредоточены превентивные действия

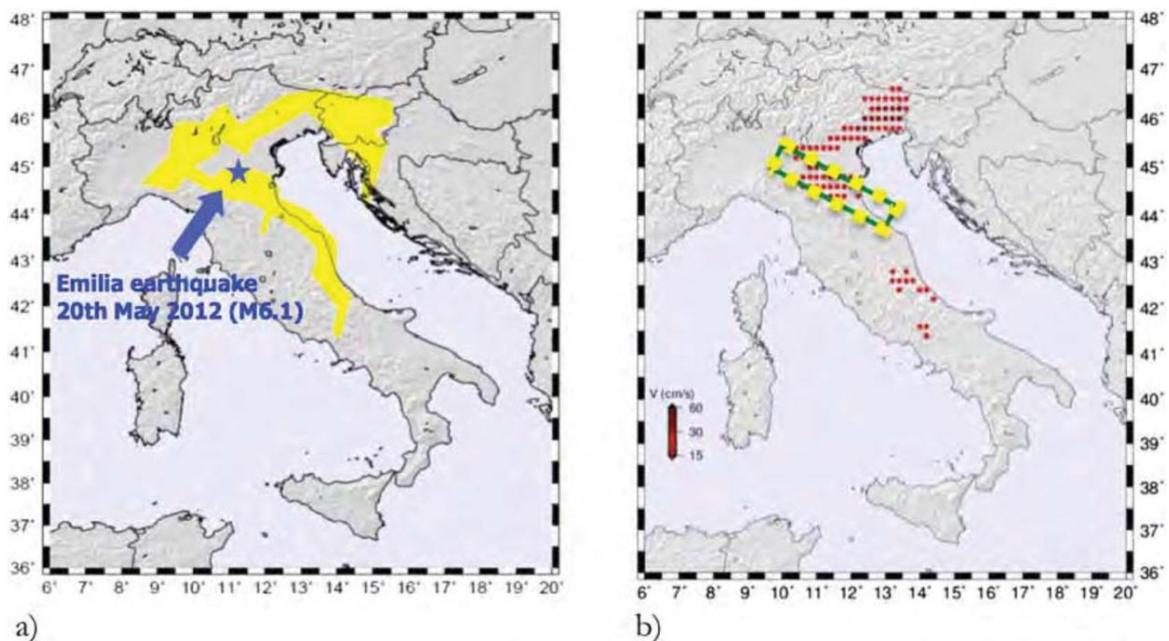


Рисунок 27 – Комплексный анализ сейсмологической и геодезической информации: (а) зона тревоги CN (желтый многоугольник) и эпицентры землетрясения в Эмилии (синие звезды); (в) пересечение трансекты (желтый пунктирный прямоугольник) с возможным геодезическим признаком (подлежит подтверждению) и сценарием сотрясения земли по методу NDSHA в пределах зоны тревоги по алгоритму КН. Область пересечения может трактоваться как область, где должны быть сосредоточены превентивные действия

1.6 Поиск новых предвестников землетрясений

В областях подготовки недавних сильных землетрясений Камчатки, Курил и Японии было исследовано пространственно-временное распределение параметра «коэффициент кластеризации» (среднее по пространственно-временному объему значение продуктивности землетрясений – параметра экспоненциального закона продуктивности землетрясений [33]). С этой целью были построены карты параметра с усреднением за разные интервалы времени и в кругах разного радиуса с центрами на регулярной сетке по данным каталога Американской геологической службы ComCat ANSS. В широком диапазоне параметров (интервал и радиус круга осреднения, параметр DM) картина оказалась достаточно устойчивой. На Камчатке для интервала усреднения 1996-2016 гг. наиболее высокие значения коэффициента кластеризации находятся вблизи эпицентров двух сильных землетрясений 2017 г.: Южно-Озерновского, 29.03.2017, $M=6.8$ и Ближне-Алеутского, 17.07.2017, $M=7.6$ (рисунок 28). Затем были выделены области повышенных значений коэффициента кластеризации вблизи недавних сильных землетрясений Камчатки, Курил, Японии в 10-летние интервалы, предшествующие этим землетрясениям и в скользящем временном окне размером 5 лет были построены графики изменения параметра во времени (рисунок 29). Были рассмотрены Южно-Озерновское, и Ближне-Алеутское землетрясения 2017 г. вблизи Камчатки, Симуширское землетрясение на Курильских островах, 15.11.2006 г, $M=8.3$, землетрясения Токачи-Оки, 26.09.2003, $M=8.1$ и Тохоку, 11.03.2011, $M=9.1$ вблизи Японии. Обращают на себя внимание резкие пики значений коэффициента кластеризации перед сильными землетрясениями. Эти предварительные результаты представляются весьма перспективными, так как временные вариации параметра исследовались внутри области повышенных значений параметра, а не в области, привязанной к эпицентру будущего сильного землетрясения.

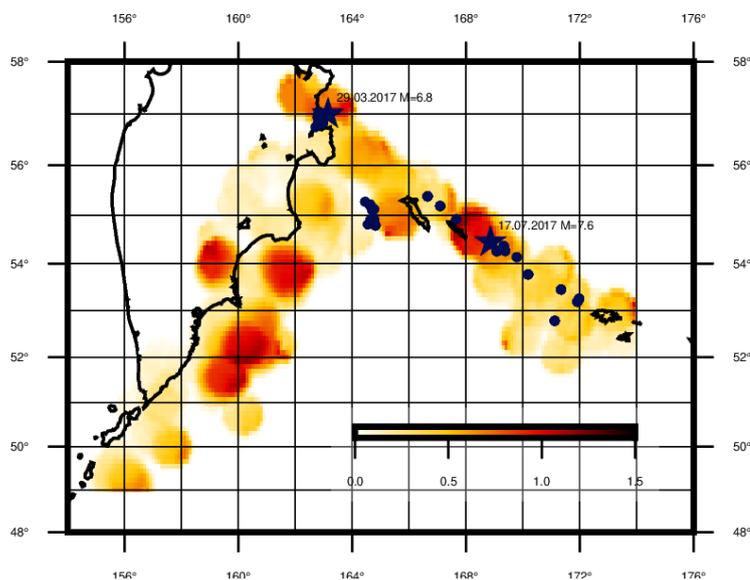


Рисунок 28 – Карта коэффициента кластеризации в районе Камчатки: период усреднения 1996-2016, радиус круга осреднения 50 км. Звездочками обозначены эпицентры сильных землетрясений в 2017 г.



Рисунок 29 – Временные вариации коэффициента кластеризации вблизи эпицентров землетрясений (слева направо): Южно-Озерного, 29.03.2017, $M=6.8$, Ближне-Алеутского, 17.07.2017, $M=7.6$, Токачи-Оки, 26.09.2003, $M=8.3$, Тохоку, 11.03.2011, $M=9.1$, Симуширского, 15.11.2006 г, $M=8.3$. Значения коэффициента кластеризации для разных землетрясений построены с разными значениями параметров из-за разных значений представительной магнитуды в каталоге

Необходимо также отметить, что обнаруженный эффект возрастания коэффициента кластеризации перед сильными землетрясениями вблизи их эпицентров вполне согласуется с известным ранее предвестником «взрыв афтершоков» [40], но использование закона продуктивности землетрясений сокращает число свободных параметров, необходимых для построения прогнозного алгоритма.

Дальнейшие исследования были сосредоточены на проверке качественных результатов. С этой целью был сформулирован прогнозный алгоритм. Суть алгоритма состоит в следующем. Строится равномерная по пространству сетка, покрывающая всю исследуемую область. В каждом узле сетки производится расчет средней продуктивности, усредненной в круге радиуса R с центром в узле сетки за длительный период времени (1980-2020 гг.) – эта величина показывает, как в среднем ведет себя величина средней продуктивности на большом временном интервале. Обозначим эту величину \bar{L}_i . Также будем считать среднюю продуктивность, усредняя ее за более короткий интервал времени в таком же круге. Обозначаем эту величину $L_i(t)$. Далее сравниваем $L_i(t)$ и \bar{L}_i . Критерий объявления тревоги: если $L_i(t) > n * \bar{L}_i$, то объявляется тревога в круге радиуса R с центром в том же узле сетки на период времени $(t; t+T)$. То есть тревога объявляется, если средняя продуктивность превышает среднюю продуктивность за длительный интервал времени, умноженную на коэффициент n .

В алгоритме есть несколько свободных параметров: 1) радиус круга, в котором объявляется тревога R ; 2) период тревоги T ; 3) минимальная магнитуда землетрясений-целей прогноза; 4) порог продуктивности n . Путем варьирования свободных параметров по ретроспективным данным были построены диаграммы ошибок в двух регионах: Камчатка ($M \geq 7$) и Япония ($M \geq 7.5$) (рисунок 30). Каждая точка на диаграмме ошибок

соответствует определенному набору свободных параметров. Точки вблизи диагонали на диаграмме ошибок соответствуют случайному прогнозу.

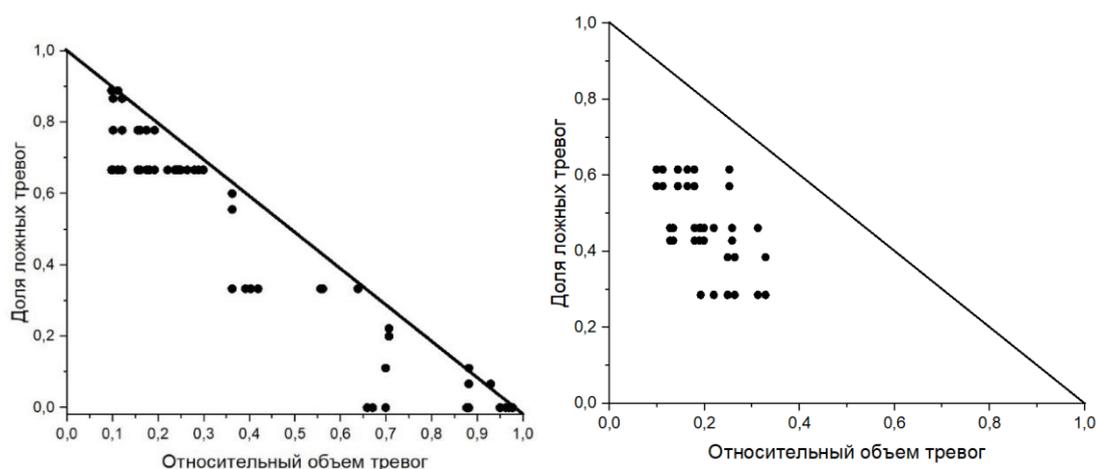


Рисунок 30 – Диаграмма ошибок для прогноза на территории Камчатки (слева) и Японии (справа)

Для Японии результаты тестирования демонстрируют высокую эффективность предвестника. Для Камчатки результаты тестирования оказались значительно хуже. Это объясняется, по-видимому, тем, что сильные землетрясения на Камчатке за период тестирования происходили вблизи границ региона, за пределами которого каталог землетрясений не является полным для рассматриваемых магнитуд. Результаты обсуждались на конференции [23, 35, 37, Приложение Б].

1.7 Поиск предвестников вулканических извержений

Результаты анализа активных процессов, происходящих в вулканах, очень важны для мониторинга вулканической активности с целью выявления подготовки извержений. Анализ сейсмических сигналов дает информацию о глубинных вулканических процессах. В рамках эксперимента KISS была проведена идентификация типов вулканических землетрясений под вулканами Ключевской группы на Камчатке. Было установлено 83 временных автономных сейсмостанций и записано 2136 событий. Исследовались длиннопериодные (ДП) землетрясения, т.к. их характеристики такие, как интенсивность, спектральный состав сигналов, частоты повторяемости событий, местоположение источников, несут информацию о состоянии магматических и геотермальных флюидов, которые, в свою очередь, во многом контролируют эруптивную активность, а глубокая ДП сейсмичность часто рассматривается как один из наиболее ранних признаков активизации магматических систем перед извержениями, и поэтому также может играть важную роль в мониторинге вулканов. ДП землетрясения сгруппированы по четырем источникам: под вулканом Толбачик, под вулканом Безымянный, под вулканом

Ключевской и глубокие ДП землетрясения. Однако в результате анализа землетрясений, записанных в рамках проекта KISS, была найдена еще одна группа источников длиннопериодных землетрясений – ДП под вулканом Крестовский. Интересная ситуация была обнаружена под вулканом Толбачик. В то время, как у остальных вулканов группы источники ДП землетрясений расположены скоплением, у вулкана Толбачик источники протягиваются на глубину до 20 км, что говорит о том, что под ним расположена довольно глубокая питающая система.

При анализе землетрясений помимо записей, в которых было четко выражено событие, также встречались записи, которые даже после фильтрации не могли быть проанализированы вследствие больших шумов. Чтобы исключить такие записи из анализа, проводилась качественная оценка соотношения между сигналом и шумом. Рассматривались два отрезка времени одинаковой длины – запись самого события и запись шума до этого события – для высокочастотного землетрясения (рисунок 31, А) и для длиннопериодного землетрясения (рисунок 31, Б). Соотношение между сигналом и шумом у записей, в которых четко выражено событие, принималось больше 2.

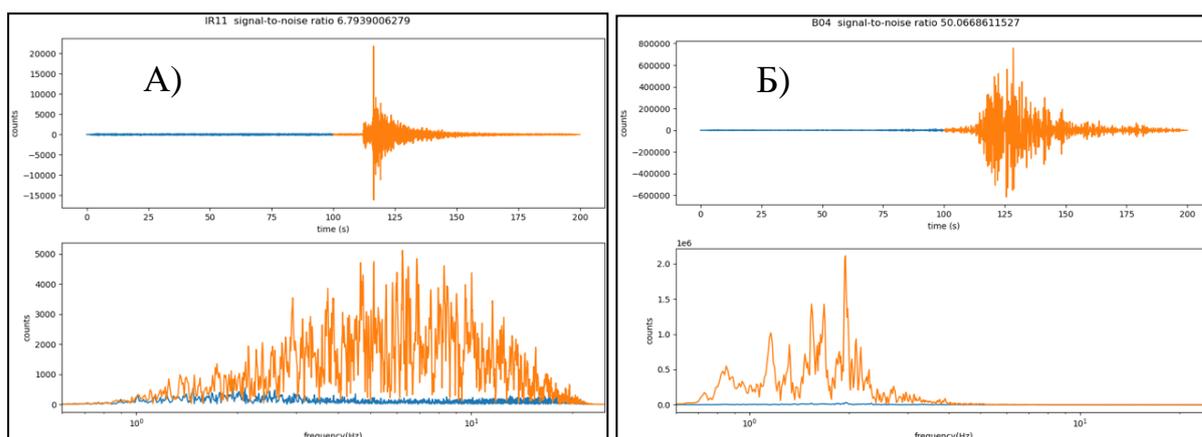


Рисунок 31 – Оценка соотношения между сигналом и шумом.

Синий – запись шума, оранжевый – запись события.

- А) Высокочастотное вулканическое землетрясение 2015-08-18T02:46:09.030, глубина 22.2 км, магнитуда 1,9.
- Б) Длиннопериодное вулканическое землетрясение 2015-11-28T15:54:05.000, глубина -0.2 км, магнитуда 1.4

Результаты представлены на конференции [22, приложение Б].

2 Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска

2.1 Взаимосвязь сейсмической опасности, риска и прогноза

Борьба с возможными последствиями разрушительных землетрясений может реализовываться в виде оценки сейсмической опасности (сейсмического районирования), расчетов сейсмического риска, которые, помимо оценки степени воздействия

землетрясений, включают оценки разного вида потерь, и прогноза землетрясений, целью которого является предотвращение последствий землетрясений. Рисунок 32 иллюстрирует существенные связи риска, определяемого как вероятность травмы, ущерба или потери. Рисунок дополняет пятым основным компонентом времени четыре компонента, представленные [41], которые определяют риск как «вероятность потери». В страховых исследованиях Риск определяется как «стоимость структур и содержимого, прерывание бизнеса, жизни и т.д.» и Уязвимость как «чувствительность к опасностям в определенном месте» (т. е. «положение воздействия относительно опасности»). Поскольку Опасность может иногда причинять ущерб и убытки, Время возникновения и продолжительность опасного события могут стать решающими при его преобразовании в Бедствие.



Рисунок 32 – Узел, связывающий воедино Опасность (Hazard), Местонахождение (Location), Время (Time), Воздействие (Exposure) и Уязвимость (Vulnerability) вокруг Риска (Risk).

Концепция связи этих компонент является важной теоретической основой работ по оценке сейсмической опасности, расчетам сейсмического риска и прогнозу землетрясений, она подробно рассмотрена в главе монографии «Earthquakes and Sustainable Infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) Approach Guarantees Prevention Rather Than Cure» [23, Приложение А]. В работе приведен пример очень грубого, но информативного приближения оценки риска, которому подвергается население – пространственное распределение землетрясений, достаточно сильных, чтобы нанести первичный ущерб (рисунок 33).

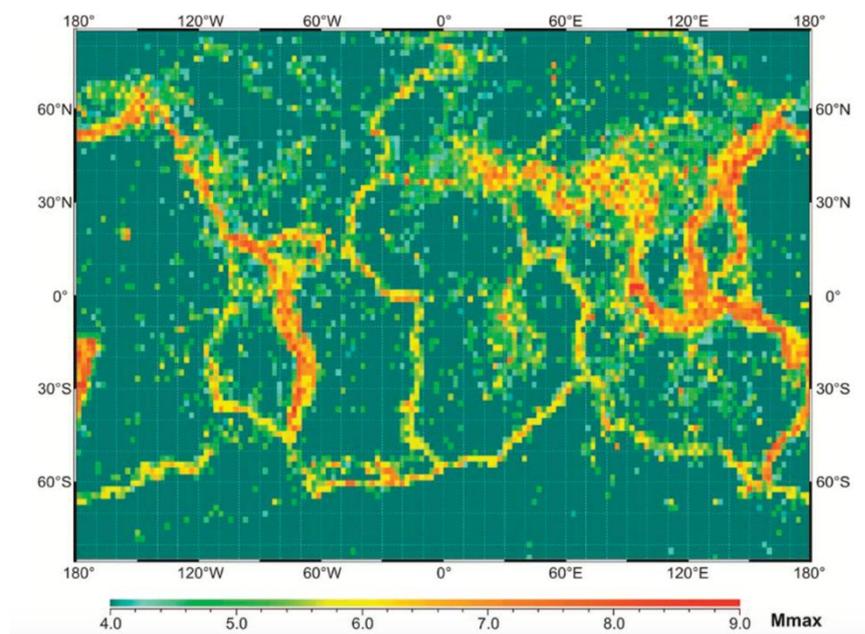


Рисунок 33 – Глобальная карта зарегистрированной в 1963–2020 гг. максимальной магнитуды

Нео-детерминистическая оценка сейсмической опасности (NDSHA), появившаяся на рубеже тысячелетий, представляет собой новый междисциплинарный подход, основанный на сценариях и физике, для оценки сейсмической опасности и обеспечения безопасности, гарантирующий «предотвращение, а не лечение». Когда происходят землетрясения, сотрясение, конечно, не зависит ни от спорадических явлений в пределах исследуемой территории, ни от антисейсмических (сейсмостойких) проектных параметров, масштабированных иным образом на вероятностные модели периода повторяемости и вероятности землетрясений, принятые в широко распространенном применении метода вероятностный анализ сейсмической опасности на основе модели (PSHA). Таким образом, с точки зрения политики предотвращения, последовательной и совместимой с наиболее передовыми теориями наук о Земле, важно, чтобы, по крайней мере, инфраструктурные объекты и общественные сооружения были спроектированы так, чтобы противостоять будущим сильным землетрясениям. В обзоре, посвященном столетнему юбилею российского геофизика Владимира Исааковича Кейлис-Борока (1921–2013), чьи математико-геофизические открытия сыграли важную роль в инновационной парадигме недетерминистской оценки сейсмической опасности, основное внимание уделяется вопросам определения и прогнозированию опасностей и рисков, понимание которых имеет важное значение для эффективного применения самых современных знаний в задачах предотвращения стихийных бедствий [5, Приложение А].

2.2 Оценка сейсмической опасности для территории CSES методом NDSHA

В рамках Меморандума о сотрудничестве ИТПЗ РАН и IEF CEA (Китайская Народная Республика) для Китайской сейсмической экспериментальной площадки (CSES) выполнено сейсмическое районирование первого порядка на основе нео-детерминистской оценки сейсмической опасности (NDSHA) в области (рисунок 34), ограниченной $94^{\circ} \sim 108^{\circ}$ в.д. и $19^{\circ} \sim 35^{\circ}$ с.ш., включая юго-восточную окраину Тибетского нагорья и регион Сычуань-Юньнань. Сейсмическая опасность отображается картами пикового смещения грунта (PGD), пиковой скорости грунта (PGV) и расчетного ускорения грунта (DGA, рисунок 35), извлеченных из синтетических сейсмограмм, рассчитанных в региональном масштабе и нанесенных на карту регулярной сетки $0,2^{\circ} \times 0,2^{\circ}$. Для расчета синтетических сейсмограмм использовалась вся обновленная и доступная геофизико-геолого-тектоническая информация, включая исторические и инструментальные каталоги землетрясений, сейсмогенные зоны, сейсмоопасные морфологические узлы, механизмы очагов и геофизические данные структурных моделей. Расчеты проведены для двух вариантов модели (А и В), различающихся вариантами входного параметрического каталога. Эффективность оценок проверена всеми доступными данными, включая, полученные после Великого Венчуаньского (12 мая 2008 г., $M_s = 8.0$) и Лушаньского (20 апреля 2013 г., $M_s = 7.0$) землетрясений. Результаты зонирования на основе NDSHA первого порядка могут служить в качестве базы знаний для поддержки действий по обеспечению готовности как на крупном, так и на среднем уровне, а также более детального расчета нескольких конкретных сценариев для объектов инфраструктуры на территории CSES.

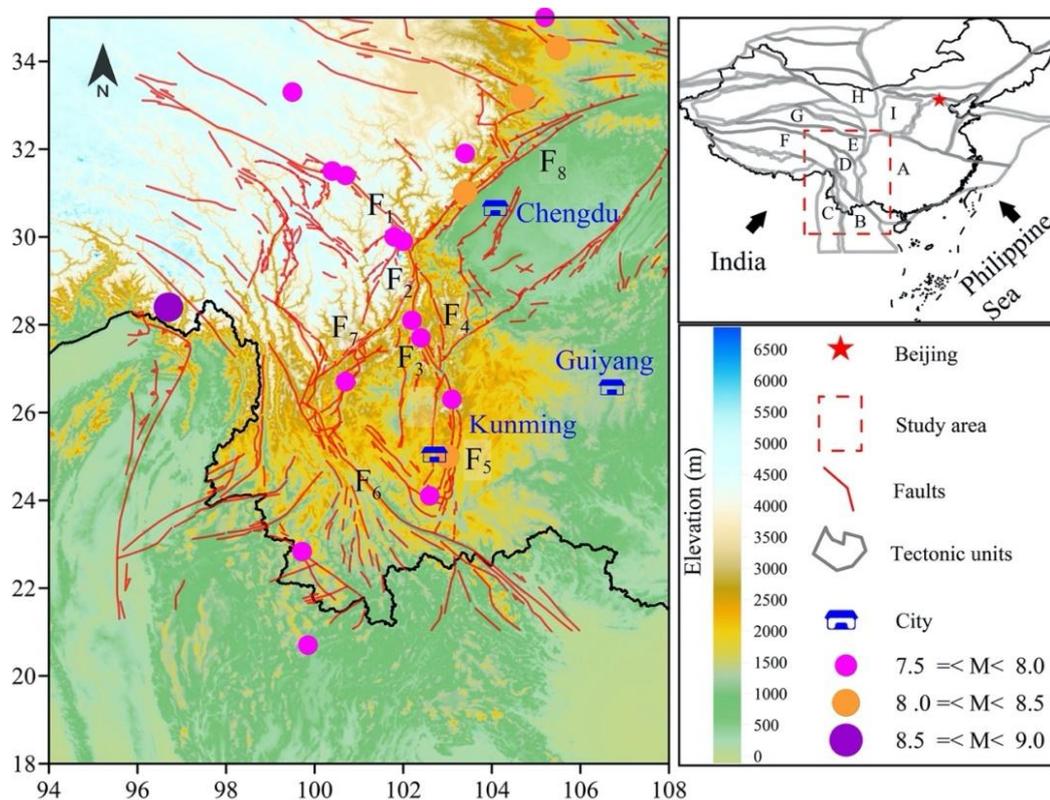


Рисунок 34 – Район исследования ($94^{\circ} \sim 108^{\circ}$ в.д., $18^{\circ} \sim 35^{\circ}$ с.ш.). Основные активные системы разломов отмечены F_x (при $x = 1, \dots, 8$): F_1 — зона разлома Сяньшуйхэ; F_2 — зона разлома Аннинхэ; F_3 — зона разлома Земухе; F_4 , зона разлома Даляньшань; F_5 — зона разлома Сяоцзян; F_6 — зона разлома Хунхэ; F_7 , зона разлома Лицзян-Сяоцзиньхэ; F_8 , зона разлома Лунмэньшань. Различные цветные кружки показывают пространственное распределение сильных землетрясений с $M \geq 7,5$, произошедших с 1000 по 2019 год нашей эры. Три синих символа в форме зданий указывают на расположение городов Чэнду, Гуйян и Куньмин. На верхнем правом подрисунке красная пунктирная рамка показывает соответствующее местоположение изучаемой территории на материковом Китае. Две черные стрелки указывают приблизительное направление движения плит Индийского и Филиппинского морей. Размер не имеет практического значения. Неправильные серые линии обозначают границы различных тектонических единиц, таких как: А: Южно-Китайский блок, В: Южный блок Юньнань, С: Блок Западный Юньнань, D: Блок Чуандянь (Сычуань-Юньнань), E: Блок Баян-Хар, F: блок Qiangtang, G: блок Qaidam, H: блок Алах и I: блок Ordos. Красная звезда указывает на расположение Пекина. Тектонические данные взяты из [42]. Каталог землетрясений создан Департаментом по предотвращению землетрясений Управления по землетрясениям Китая (1995 г.), Департаментом по предотвращению землетрясений Управления по землетрясениям Китая (1999 г.) и Китайским сетевым центром по вопросам землетрясений (CENC). Данные о неисправностях взяты из [43]. Данные о высоте взяты из источника <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/> (последний доступ 2 марта 2021 г.)

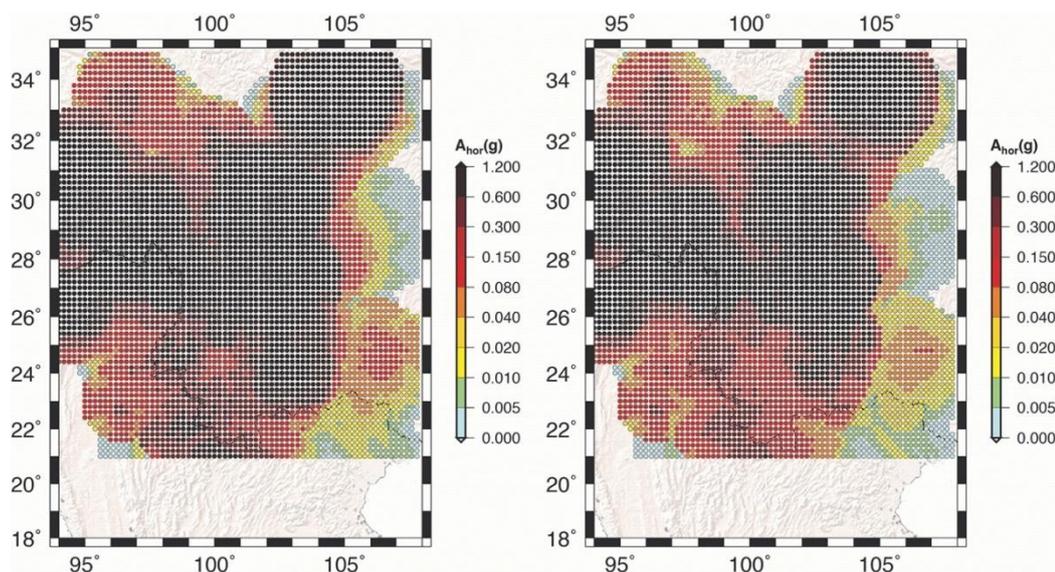


Рисунок 35 – Расчетная карта расчетного ускорения грунта (DGA) с учетом CSESeventV2020 и сейсмогенных узлов, связанных с Mdesign ($\gamma_{EM} \neq 0$). (Слева: использование модели А; справа: использование модели В)

Проведенные в исследовании тесты на стабильность показали, что на расчеты сейсмической опасности в основном не влияет разумное изменение входного параметрического каталога, что подтверждает долгосрочную эффективность полученных карт опасностей и прогностическую силу NDSHA. Тесты, проведенные для оценки потенциального влияния крупных событий за пределами исследуемой области (т. е. землетрясений 1920 г., 16 декабря, $M_s = 8,5$, Хайюань и 1927 г., 23 мая, $M_s = 8,0$, Гуланских землетрясений), показали, что влияние незначительно. Основной результат работы состоит в том, что значения DGA могут достигать $0,6g$ вокруг основных разломов и/или зон разломов, включая зоны разломов Лунмэньшань, Сяньшуйхэ, Аньнинхэ, Цзэмухэ, Сяоцзян и Хунхэ, что указывает на то, что высокая сейсмическая опасность является важной особенностью региона. Результаты исследования опубликованы в журналах *Engineering Geology* и *Journal of the Geological Society of India* [27 и 32, Приложение А].

2.3. Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска на основе Общего закона подобия землетрясений

Распределение числа сейсмических событий по магнитуде – закон Гутенберга–Рихтера играет наиважнейшую роль в оценке сейсмической опасности территории. Обобщение этого закона – Общий закон подобия для землетрясений (ОЗПЗ) [2] – позволяет учитывать специфику распределения эпицентров сейсмических событий при изменении масштаба рассмотрения. ОЗПЗ уточняет эмпирическое соотношение Гутенберга–Рихтера, учитывая естественное фрактальное распределение сейсмичности.

На базе локальных оценок коэффициентов ОЗПЗ актуализируются карты сейсмической опасности и рисков. Результаты глобального и регионального анализа [35-37] показывают, что среднегодовое число землетрясений, $N(M, L)$, с магнитудой M в сейсмоактивной области линейного размера L , для широкого диапазона магнитуд M из интервала (M_-, M_+) и размеров L из интервала (L_-, L_+) , довольно хорошо согласуется со следующей формулой ОЗПЗ: $\lg N(M, L) = A + B \times (5 - M) + C \times \lg L$, где A, B, C – константы, локально характеризующие соответственно логарифм среднегодовой частоты землетрясений магнитуды 5.0 и выше в области линейного размера в 1 градус Земного меридиана, баланс числа землетрясений разных магнитуд и фрактальную размерность носителя эпицентров землетрясений. Оценки коэффициентов A, B и C могут быть использованы для расчетов характеристик сейсмической опасности в терминах достоверно определенной максимальной магнитуды землетрясения, которое возможно в данном месте системы разломов, а также ассоциированных с ним сотрясений на территории и рисков для населения и инфраструктуры.

Получены оценки коэффициентов A, B и C для территории Камчатского региона. Изучены пространственно-временные вариации их значений. А именно, по данным региональной сейсмической сети Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН с 1996 г. по н.в. выполнены оценки коэффициентов ОЗПЗ для пяти (из десяти, выделенных в [44]) различных зон сейсмичности: сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки; северной части Камчатской сейсмофокальной зоны; командорского сегмента Алеутской дуги; континентальной области Камчатки; Корякского сейсмического пояса. Эмпирические функции вероятности распределения коэффициентов ОЗПЗ для указанных областей приведены на рисунке 36. Отметим, что значения коэффициентов ОЗПЗ для разных областей Камчатского региона существенно отличаются.

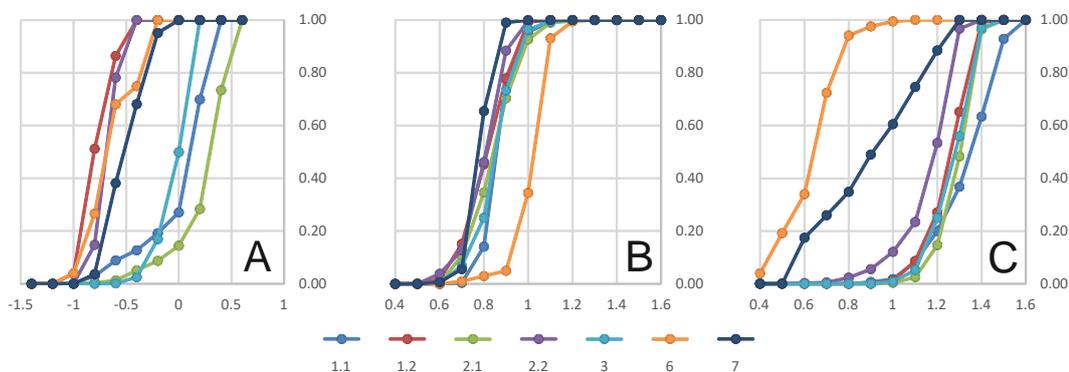


Рисунок 36 – Эмпирические функции вероятности распределения коэффициентов A, B и C ОЗПЗ для сейсмически активных зон Камчатского региона: сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки (1.1 – глубины до 70 км включительно, 1.2 – глубины от 70 км и более); северной части Камчатской сейсмофокальной зоны (2.1 – глубины до 70 км и более); командорского сегмента Алеутской дуги (2.2 – глубины до 70 км и более); континентальной области Камчатки (3 – глубины до 70 км и более); Корякского сейсмического пояса (6 – глубины до 70 км и более, 7 – глубины от 70 км и более).

км включительно, 2.2 – глубины от 70 км и более); командорского сегмента Алеутской дуги (3); континентальной области Камчатки (6); Корякского сейсмического пояса (7)

На рисунке 37 представлены временные вариации контрольного параметра ОЗПЗ $\eta = N^{-1} \times 10^{B \times (5-M)} \times L^C$ для наиболее активных сейсмических зон Камчатского региона – сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки и северной части Камчатской сейсмофокальной зоны; и сейсмически менее активных регионов – командорского сегмента Алеутской дуги и Корякского сейсмического пояса. Во всех четырех сейсмических зонах, отличающихся по своим геодинамическим и тектоническим характеристикам, за рассматриваемый период инструментальных наблюдений произошли значительные сейсмические события с магнитудой $M_w > 7.0$. А изменения уровня значений контрольного параметра η до и после сильнейших событий в рассматриваемых зонах различно даже внутри одной выделенной зоны.

Временные вариации коэффициентов ОЗПЗ раскрывают сложные корреляционные связи нелинейной динамики иерархической системы разломов и блоков литосферы Земли. Мониторинг сейсмической активности Камчатки в терминах временных интервалов между последовательными сейсмическими событиями τ , накопленной энергии по формуле Бениоффа Σ ; контрольного параметра ОЗПЗ η и других интегральных геотектонических параметров отдельных зон может служить основой оперативной оценки рисков для населения и инфраструктуры.

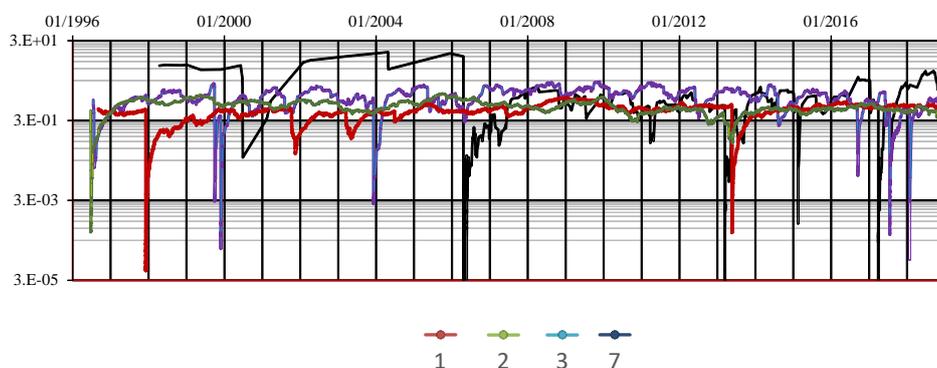


Рисунок 37 – Временные вариации контрольного параметра ОЗПЗ η для сейсмических зон Камчатского региона: 1 – сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки (скользящее среднее по 150 событиям); 2 – северной части Камчатской сейсмофокальной зоны (скользящее среднее по 200 событиям); 3 – командорского сегмента Алеутской дуги (скользящее среднее по 50 событиям); 7 – Корякского сейсмического пояса (скользящее среднее по 25 событиям)

По полученным результатам опубликована статья [62, Приложение А] и сделаны доклады [60, 61, 70, 71, Приложение Б].

Зарегистрирована база данных, содержащая значения коэффициентов A , B и C , вычисленные на основе каталога USGS GHDB неглубоких землетрясений с $M \geq 4$, произошедших в 1964-2002 гг.:

Anastasia K. Nekrasova, Vladimir G. Kossobokov Unified Scaling Law for Earthquakes: Global Map of Parameters, ISC's Seismological Dataset Repository, 2019, doi:10.31905/XT753V44, http://www.isc.ac.uk/dataset_repository/recent_submissions.php.

При применении ОЗПЗ для изучения сейсмического режима в пространственном и временном масштабах используется алгоритм робастной оценки коэффициентов ОЗПЗ Scaling Coefficients Estimation (SCE) [45]. Свободные параметры алгоритма, накладывают определенные ограничения на возможность его применения и используемые исходные данные. В частности, для корректного применения алгоритма SCE необходим каталог сейсмических событий за продолжительный период (от десятка лет и более) при наличии однородной, по техническим параметрам сети, регистрации. Результаты расчетов зависят: от полноты регистрации сейсмических событий, от изменений порога регистрации в процессе технических изменений и совершенствования параметров сети сейсмографов, от точности определения координат эпицентра и, в меньшей степени, глубины сейсмических событий. Используемый каталог во многом определяет предварительный выбор оптимального набора свободных параметров алгоритма. Анализ данных каталога является обязательным предварительным этапом применения алгоритма SCE. Так например, при глобальном картировании коэффициентов ОЗПЗ были использованы данные о всех сейсмических событиях с магнитудой 4.0 и выше из каталога Геологической службы США за 1964-2002 годы. Коэффициенты ОЗПЗ оценивались в масштабе элементов глобальной плитовой тектоники размера от 50 до 1000 км с использованием 5 ступеней пространственной иерархии ячеек линейного размера от $\frac{1}{2}$ до 8 градусов земного меридиана. Согласно [36, 46], логарифмическая оценка сейсмической активности (коэффициент A) изменяется в основном в пределах от -2.5 до -1.2 (рисунок 38а), что соответствует повторяемости землетрясений с магнитудой 5.0 от менее одного в 300 лет до трех в пятьдесят лет. Значения наклона графика повторяемости (коэффициент B) сосредоточены в основном между 0.6 и 1.1 (рисунок 38б), а фрактальная размерность множества сосредоточения эпицентров (коэффициент C) изменяется от менее 1.0 до 1.4 и выше (рисунок 38в). Полученные оценки ошибок коэффициентов ОЗПЗ демонстрируют (рисунок 38г) практически по всему миру высокую степень согласия с данными мировых наблюдений в широком диапазоне магнитуд и размеров области исследования.

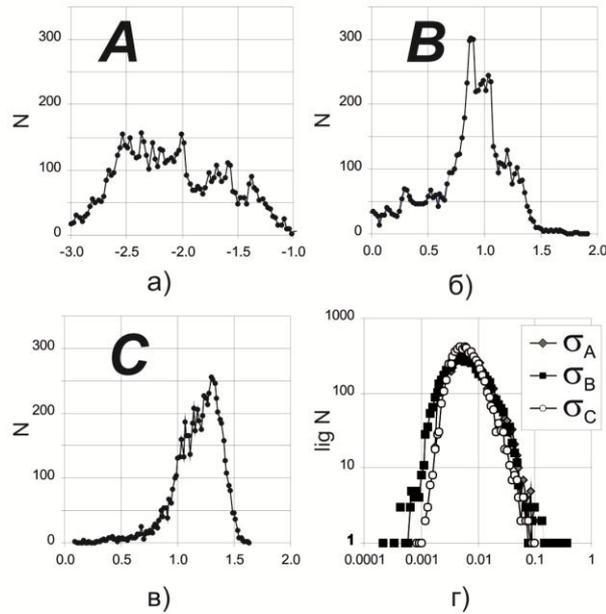


Рисунок 38 – Гистограммы глобального распределения параметров ОЗПЗ а) A ; б) B ; в) C ; г) σ_A , σ_B , σ_C (график в би-логарифмическом масштабе).

Получены локальные оценки коэффициентов ОЗПЗ для итальянской автономной области Фриули-Венеция-Джулия на основе данных регионального каталога землетрясений Национального института океанологии и экспериментальной геофизики за период с 1996 по март 2018 года с использованием событий с магнитудой 2.0 и выше для пространственных ячеек линейного размера $1/16$ градуса земного меридиана (порядка 6.9 км) и 5-ти ступеней пространственной иерархии. Детальность и точность регистрации локального каталога позволила оценить значения коэффициентов ОЗПЗ для последовательных шестилетних временных интервалов со сдвигом в 1 год. На рисунке 39 представлены значения коэффициентов A , B и C для двух шестилетних интервалов времени (первого 1996-2001 гг., для которого надежные оценки получены в 214 ячейках, и последнего 2012-2017 гг., для которого надежные оценки получены в 311 ячейках), а также их проекции на координатные плоскости. Следует отметить, что для первого интервала землетрясение, произошедшее 12 апреля 1998 г. (сильнейшее в регионе за исследуемый период), и его многочисленные афтершоки безусловно повысили значения коэффициентов A и B и одновременно понизили значение коэффициента C в ячейках из области высокой концентрации эпицентров. При отсутствии сильных событий в течение последнего интервала значения коэффициентов ОЗПЗ более концентрированы: A около 0, B от 0.6 до 1.0, и C выше 1. Сложное взаимное расположение в 3D значений коэффициентов ОЗПЗ указывает на нетривиальность корреляционных связей между

параметрами и значительное разнообразие характеристик сейсмического потока в пределах рассматриваемого региона, а также очевидно свидетельствует в пользу существенной изменчивости в динамике последовательности землетрясений во времени. Критический переход, ассоциированный с землетрясением 12 апреля 1998 г., характеризуется изменением контрольного параметра ОЗПЗ η в полтора раза от уровня среднего значения η менее 0.2 в 1997 г. до более 0.3 в 2002-2004 гг.

Построены карты сейсмической опасности на территории Российской Федерации, основанное на результатах применения методов ОЗПЗ и распознавания образов в сочетании с данными исторического каталога сейсмических событий, использовалось для Крыма и Большого Кавказа, Прибайкалья, Алтая и Саян [45, 47, 48].

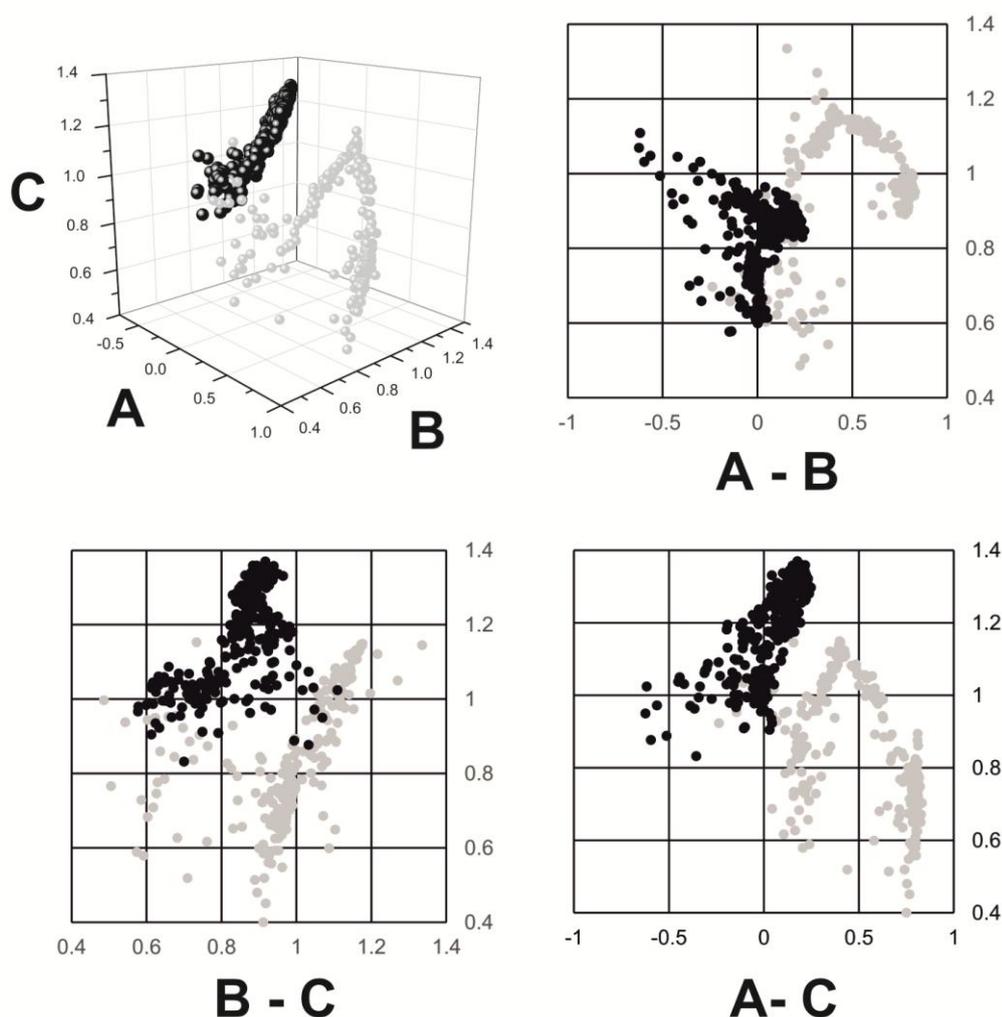


Рисунок 39 – Значения коэффициентов ОЗПЗ в автономной области Фриули-Венеция-Джулия для первого (1996-2001 гг., серые символы) и последнего (2012-2017 гг., черные символы) интервалов времени

По итогам выполненных исследований опубликованы статьи [46, 47, 53, Приложение А] и сделан доклад [57, приложение Б].

Получено новое представление о закономерностях сейсмической активности на Северо-Западе Тихого океана. Оценена изменчивость коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ) в 3D на трех отдельных сейсмоочаговых зонах – Южном и Северном сегменте Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны и Командорском сегменте Алеутской дуги. Полученные результаты свидетельствуют об отчетливых статистически значимых различиях распределения коэффициентов ОЗПЗ в трех областях. Результаты представлены на конференции [9, Приложение Б]

Выполнено сравнение карт Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP, 1999) и Глобальной Модели Землетрясений (GEM, 2018). Сравнение выполнено для мест 20 наиболее смертоносных землетрясений XXI столетия. Различие для двух карт со средним значением 1,8 и медианой 1,6 указывают на явное повышение оценок сейсмической опасности на карте GEM 2018 года по сравнению с картой GSHAP 1999 года в местах произошедших землетрясений. Землетрясения 6 февраля 2023 г., M7.8 - 27 км к востоку от Нурдаги и M7.5 - 4 км к юго-юго-востоку от Экинозю, Турция и землетрясение 8 сентября 2023 г., M6.8 вблизи Укаймеден, Марокко, делят 5-6 и 14 место в Списке 19 самых смертоносных землетрясений мира с 2000 года. Наблюдаемые сотрясения грунта были намного больше, чем максимальные оценки PGA с вероятностью превышения 10% в 50 лет в местах землетрясений на картах Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP, 1999) и Глобальной Модели Землетрясений (GEM, 2018). Следует отметить, что возникновение разрушительных землетрясений в Турции ожидалось в дизъюнктивном D-узле A39 схемы морфоструктурного районирования Анатолии, распознанном Гельфандом и др. в 1973 г. и расположенном в пределах двух из 262 кругов исследования, охватывающих большую часть глобальных сейсмических поясов, где в продолжающемся Глобальном Тестировании алгоритма M8, в режиме реального времени, начиная с июля 2021 г. было определено Время Повышенной Вероятности землетрясения из магнитудного диапазона M8.0+ (подтверждено в последующих полугодовых обновлениях, последний раз в январе 2023 г.). Результаты представлены на конференциях [4-7, приложение Б].

Для четырех сейсмоактивных регионов Российской Федерации – Большой Кавказ, Алтай-Саяны, Прибайкалье, Камчатка и ее окружение – ранее получены региональные оценки коэффициентов ОЗПЗ (рисунок 40). В 2023 году проведено сравнение монофрактальных – «блочной», D_0 и корреляционной, D_2 , размерностей, полученных для эпицентров четырех регионов, с региональными оценками коэффициента C общего закона подобия для землетрясений.

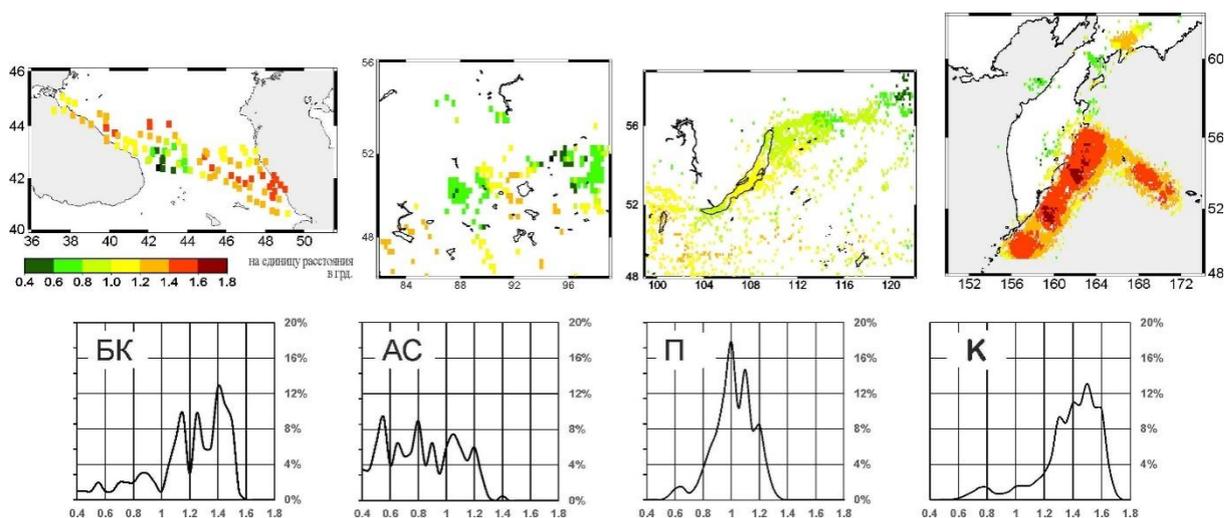


Рисунок 40 – Региональное пространственное распределение фрактальной размерности множества сосредоточения эпицентров, коэффициент C , ОЗПЗ (вверху) и распределение плотности вероятности региональных значений коэффициента C (внизу)

Расчеты значений монофрактальной размерности выполнены программой [49]. В таблице 10 приведены значения D_0 и D_2 , максимальные значения и значения 95% доверительного интервала плотности вероятности распределения региональных значений коэффициента C . Отметим, что для всех четырех регионов оценки D_0 и D_2 находятся в 95% доверительном интервале значений параметра C .

Таблица 10– Региональные оценки фрактальной размерности множества сосредоточения эпицентров

| Регион | °, с.ш. | °, в.д. | макс. l, ° | мин. l, ° | N | D_0 , R^2 (%) | D_2 , R^2 (%) | C (ОЗПЗ) | |
|----------------|---------|---------|------------|-----------|-------|-------------------|-------------------|----------|--------------|
| | | | | | | | | макс. | 95% дов. инт |
| Большой Кавказ | 40–46 | 36–51.5 | 2 | 1/4 | 16537 | 1.42 (99.9) | 1.02 (99.2) | 1.4 | 0.70–1.55 |
| Алтай-Саяны | 48–56 | 82–100 | 4 | 1/4 | 4740 | 1.32 (99.1) | 0.56 (97.7) | 0.6, 0.8 | 0.40–1.20 |
| Прибайкалье | 48–58 | 99–122 | 2 | 1/8 | 8130 | 1.17, (99.1) | 0.88 (99.6) | 1.0 | 0.75–1.25 |
| Камчатка | 46–58 | 150–174 | 2 | 1/4 | 49535 | 1.48, (>99.9) | 1.64 (>99.9) | 1.5 | 1.15–1.70 |

Дополнительно получены оценки значений монофрактальных размерностей D_0 и D_2 , для систем активных разломов (АР) в пределах рассмотренных четырех регионов. Значения D_0 и D_2 , получены для АР в окрестности которых были зафиксированы сейсмические события, представленные в региональных каталогах. Значения D_0 и D_2 , получены, как для всего набора АР, так и для подсистем АР, определенных по типам основных современных вертикальных и латеральных движений. Рассмотренные системы

АР представлены на рис. 45. Полученные оценки монофрактальных размерностей для систем АР приведены в таблице 11.

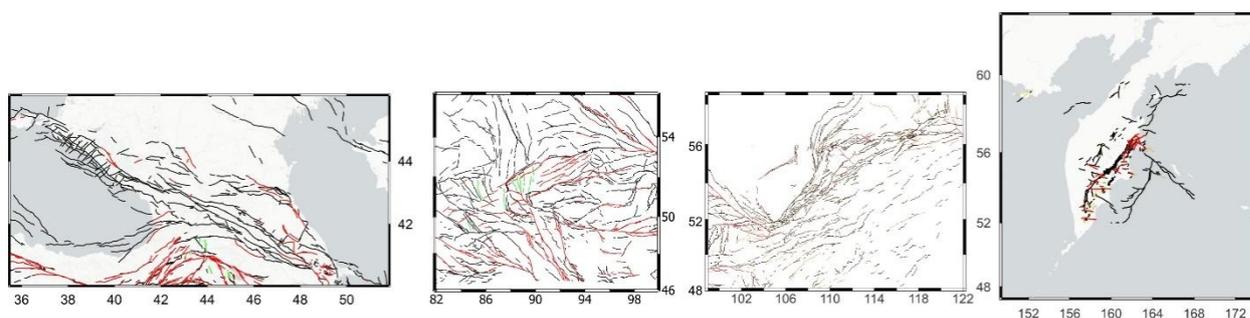


Рисунок 41 – Региональные системы активных разломов: Большой Кавказ, Алтай-Саяны, Прибайкалье, Камчатка и ее окрестности [50]. Черные линии - вертикальные движения, красные линии - латеральные движения, зеленые линии - движения растяжения

На рисунке 42 представлены значения фрактальных размерностей D_0 и D_2 региональных систем АР, связанных с зарегистрированными землетрясениями, для Большого Кавказа, региона Алтай-Саяны, Прибайкалья и Камчатки. Третий столбик в каждой из трех категорий АР соответствует наибольшему значению параметра C ОЗПЗ. Регион Алтай-Саяны характеризуется двумя максимумами коэффициента C . Вертикальный маркер соответствует значениям в пределах 95% доверительного интервала.

Анализируя рисунки 42, таблицы 10 и 11 видно, что значения параметра C и размерностей D_0 и D_2 расходятся в каждом из четырех регионов. Для Большого Кавказа, региона Алтай-Саяны и Прибайкалья фрактальная размерность АР имеет большие значения по сравнению с фрактальной размерностью эпицентров землетрясений. Напротив, для систем АР Камчатки и ее окрестностей фрактальная размерность эпицентров землетрясений превосходит оценки D_0 и D_2 .

Таблица 11 – Монофрактальные размерности D_0 , и D_2 региональных систем активных разломов

| Регион | °, с.ш. | °, в.д. | макс. 1,° | мин. 1,° | D_0 (число точек) | | | D_2 | | |
|----------------|---------|-----------|-----------|----------|---------------------|----------------|----------------|-------|------|-------|
| | | | | | все | лат. | верт. | все | лат. | верт. |
| Большой Кавказ | 40 – 46 | 36 – 51.5 | 2 | 1/4 | 1.33 (1353) | 0.88 (167) | 1.36 (1023) | 1.59 | 1.03 | 1.50 |
| Алтай-Саяны | 48 – 56 | 82 – 100 | 4 | 1/4 | 1.47 (2947) | 1.18 (1063) | 1.35 (1682) | 1.50 | 1.20 | 1.38 |
| Прибайкалье | 48–58 | 99–122 | 2 | 1/8 | 1.22 (2144) | 0.88 (308) | 1.13 (1688) | 1.48 | 1.08 | 1.47 |
| Камчатка | 46–58 | 150–174 | 2 | 1/4 | 1.14 (1282) | 0.91 (176) | 1.06 (896) | 1.37 | 1.28 | 1.30 |

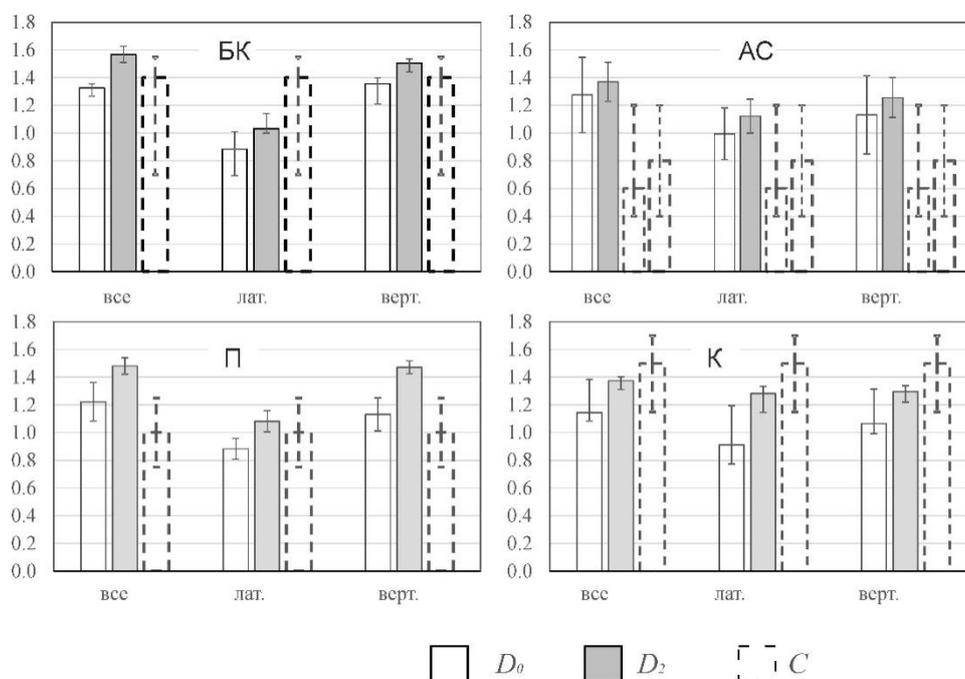


Рисунок 42 – Фрактальные размеры региональных систем активных разломов и региональные значения параметра C ОЗПЗ. Гистограммы оценок D_0, D_2 и C приведены с маркерами 95% доверительного интервала

Проведенный анализ позволяет сделать следующие предварительные выводы:

- С сейсмологической точки зрения региональные системы АР, связанные с актуальной сейсмической активностью, отражают очевидную тектоническую фрагментацию литосферы со значительной избыточностью;

- Повышенные значения фрактальной размерности систем региональных АР, по сравнению с фрактальной размерностью эпицентров землетрясений, свидетельствуют о преобладании запертых, спящих и неактивных разломов.

Важно подчеркнуть, что региональные оценки коэффициента C ОЗПЗ и монофрактальные размерности систем АР не обнаруживают заметной корреляции, однако, наблюдаются очевидные корреляции параметра C и монофрактальных размерностей множества эпицентров. Эти выводы в совокупности дают важные представления о сложной природе тектонических систем АР и их взаимосвязи с сейсμοдинамикой. Результаты доложены на конференциях [8, 12, 15, 28, Приложение Б].

2.4 Оценка сейсмического риска для железнодорожной системы Прибайкалья

На основе Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ) проведена оценка рисков потери работоспособности объектов инфраструктуры в регионах, прилегающих к Байкало-Амурской и Транссибирской магистралям, из-за сейсмических событий максимальной макросейсмической интенсивности, ожидаемой в течение 50 лет с

вероятностью 10%, 5% и 1%. Используются данные Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, которые позволяют достаточно полно определить землетрясения с $M = 2,5$ и более за период 1994–2019 гг. для надежного расчета коэффициентов A , B и C ОЗПЗ (рисунок 43). На основе оценок A , B и C составлены карты максимальной магнитуды (рисунок 44) с учетом модели анизотропного сейсмического воздействия на объекты инфраструктуры региона. Построены карты сейсмической опасности в традиционных терминах макросейсмической интенсивности и связанного с ней сейсмического риска для объектов инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской магистрали.

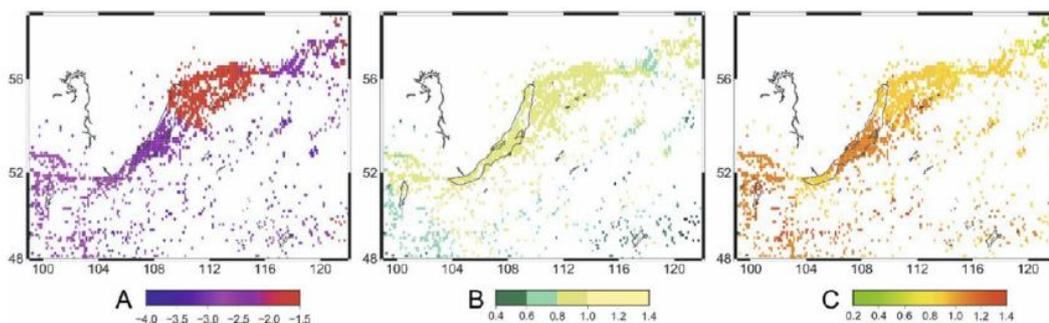


Рисунок 43 – Локальные оценки коэффициентов Общего закона подобиия для землетрясений (A , B и C)

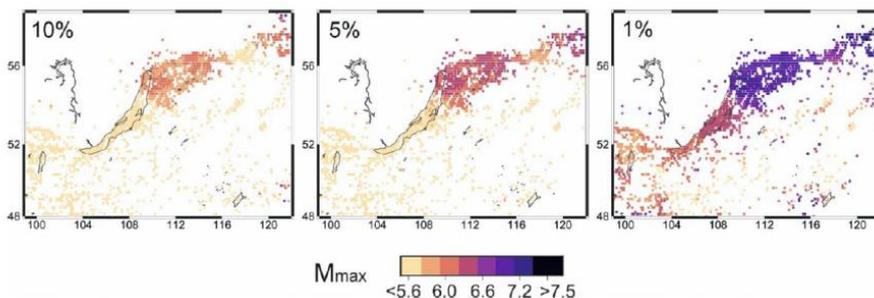


Рисунок 44 – Локальные оценки M_{max}

Проведено сравнение карт сейсмической опасности, построенных на основе ОЗПЗ карт ОСР-2016. Выполнено сравнение сейсмического риска для железнодорожной системы Прибайкалья на основе сравниваемых карт. Отношение площадей на территории Прибайкалья, для которых можно ожидать сейсмическое воздействие с интенсивностью VIII и выше, для карт ОСР-2016 и карт на основе ОЗПЗ составляет 8.2, 2.8 и 2.9 для 10%, 5% и 1% вероятности превышения за 50 лет, соответственно. Отношение максимально накопленного ущерба для восстановления железнодорожного полотна для территории Прибайкалья по модели ГОСР-2016 к максимальному ущербу по модели на основе ОЗПЗ составляют 3.3, 4.0 и 2.8 для карт с 10%, 5% и 1% вероятностью превышения в 50 лет, соответственно. Оценка суммарного ущерба по картам ОСР-2016 превышает полученную на основе ОЗПЗ более чем в 3 раза (рисунок 45).

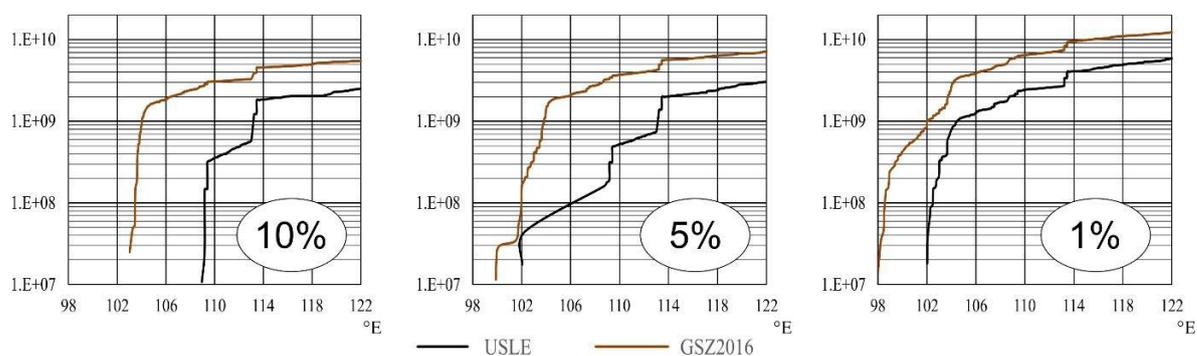


Рисунок 45 – Совокупные общие затраты на реконструкцию как функция долготы на основе моделирования ОЗПЗ (черная линия) и ОСП-2016 (красная линия).

(Примечания: Затраты приводятся в условных единицах. Максимальное расхождение затрат на восстановление железнодорожных путей, мостов и тоннелей приходится на западную часть Прибайкалья.)

Результаты представлены в публикациях и докладах [3, 4, Приложение А; 11 и 13, Приложение Б].

2.5 Определение мест возможного возникновения сильных землетрясений

Для оценки сейсмической опасности важно знать, где в рассматриваемом регионе могут произойти сильные (с магнитудой $M \geq M_0$, где M_0 – некоторый порог) землетрясения. Поскольку период инструментальных сейсмологических наблюдений составляет немногим более 100 лет, то естественно предположить, что за это время не все такие места «проявили» себя сильными землетрясениями и, соответственно, возникает задача их определения. Подходы к решению этой задачи, основанные на построении схемы морфоструктурного районирования исследуемого региона с целью выделения объектов, среди которых могут быть места возможного возникновения сильных землетрясений, и последующем применении методологии распознавания образов для определения таких мест, были сформулированы в начале 70-х годов прошлого века в результате сотрудничества математиков во главе с И.М.Гельфандом, геофизиков во главе с В.И.Кейлис-Бороком и геоморфологов во главе с Е.Я.Ранцман [51-55]. Ранее такая задача была сформулирована и решена для ряда сейсмоактивных регионов. В 2019-2021 гг. эти исследования были продолжены в рамках этой темы НИР под руководством чл.-корр. РАН А.А. Соловьева.

Рассмотрен французский Центральный массив – внутриплитовая область Средиземноморья с сейсмичностью от низкой до умеренной. Целью исследования было выявление сейсмогенных узлов, способных генерировать землетрясения с интенсивностью в эпицентре $I_0 \geq VI$. Применен феноменологический подход, основанный на распознавании образов. Объекты распознавания – морфоструктурные узлы – определены методом морфоструктурного районирования, позволяющим получить

иерархическую блочную структуру региона, сеть ограничивающих блоков морфоструктурных линеаментов и положения узлов, которые сформированы на пересечениях линеаментов. В некоторых из узлов известны землетрясения с $I_0 \geq VI$. С помощью алгоритма распознавания «Кора-3» [33] определены другие узлы, где такие землетрясения возможны, но еще не были зарегистрированы. Результат представлен на рисунке 46.

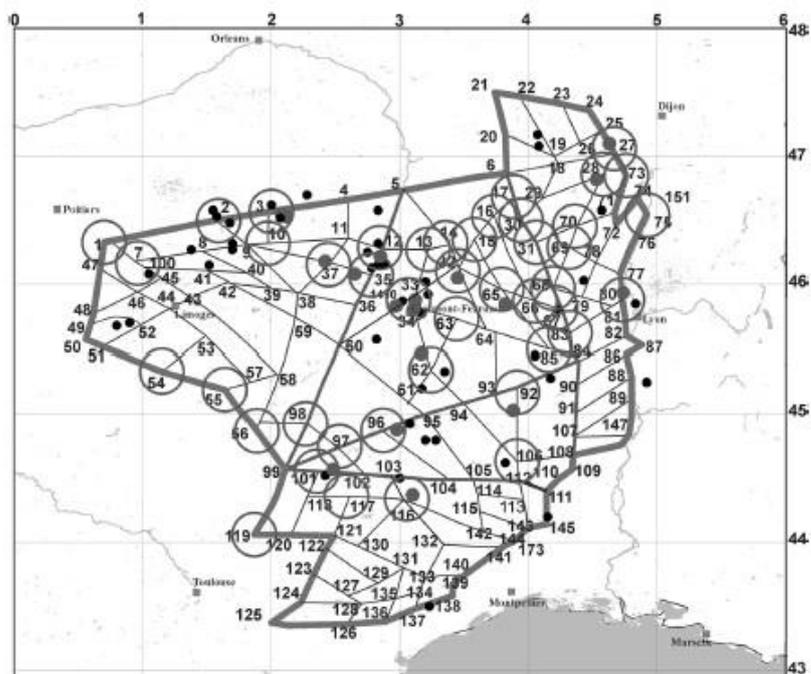


Рисунок 46 – Результат распознавания мест возможного возникновения землетрясений с интенсивностью в эпицентре $I_0 \geq VI$ во французском Центральном массиве. Толстыми линиями показаны линеаменты первого ранга, средними линиями – линеаменты второго ранга, тонкими линиями – линеаменты третьего ранга. Черные точки обозначают эпицентры известных землетрясений с $V \leq I_0 < VI$, а серые – эпицентры землетрясения с $I_0 \geq VI$. Узлы, в которых в соответствии с результатами распознавания возможны землетрясения с $I_0 \geq VI$, обозначены кружками

Распознанные сейсмогенные узлы расположены в основном в восточной части массива и связаны с линеаменами высокого ранга, разделяющими более крупные блоки Центрального массива. Также была определена совокупность геоморфологических признаков, типичных для сейсмогенных узлов. По результатам исследования, дающим информацию о потенциальных местах возникновения землетрясения, которая важна для адекватной долгосрочной оценки сейсмической опасности, опубликована статья [60, Приложение А] и сделан доклад [64, Приложение Б].

В рамках сотрудничества с ГЦ РАН выполнено распознавание мест возможного возникновения сильных (с $M \geq 6.0$) землетрясений на Кавказе с помощью нового алгоритма распознавания образов «Барьер-3» [56], разработанного в ГЦ РАН. Осуществлено сравнение этого результата с полученным ранее результатом решения

аналогичной задачи с помощью алгоритма распознавания образов «Кора-3» [57]. Предложено определить интерпретацию интегрального результата распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» как нечеткое множество объектов распознавания, в окрестностях которых могут произойти сильные землетрясения на Кавказе. Соответствующая функция принадлежности для такого множества имеет следующий вид:

$$\mu_{B_B, B_C}(w) = \begin{cases} 1, & w \in B_B \cap B_C \\ 0.5, & w \in B_B \square B_C = (B_B \cup B_C) \setminus (B_B \cap B_C) \\ 0, & w \notin B_B \cup B_C \end{cases}$$

где $w \in W$ – объекты распознавания,

а B_B, B_C – те из них, которые распознаны как высокосейсмичные (где возможны землетрясения с $M \geq 6.0$) с помощью алгоритмов «Барьер-3» и «Кора-3» соответственно.

На рисунке 47 показан пример такой интерпретации двух результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе в виде нечеткого множества. По результатам исследования опубликована статья [42, 59, Приложение А].

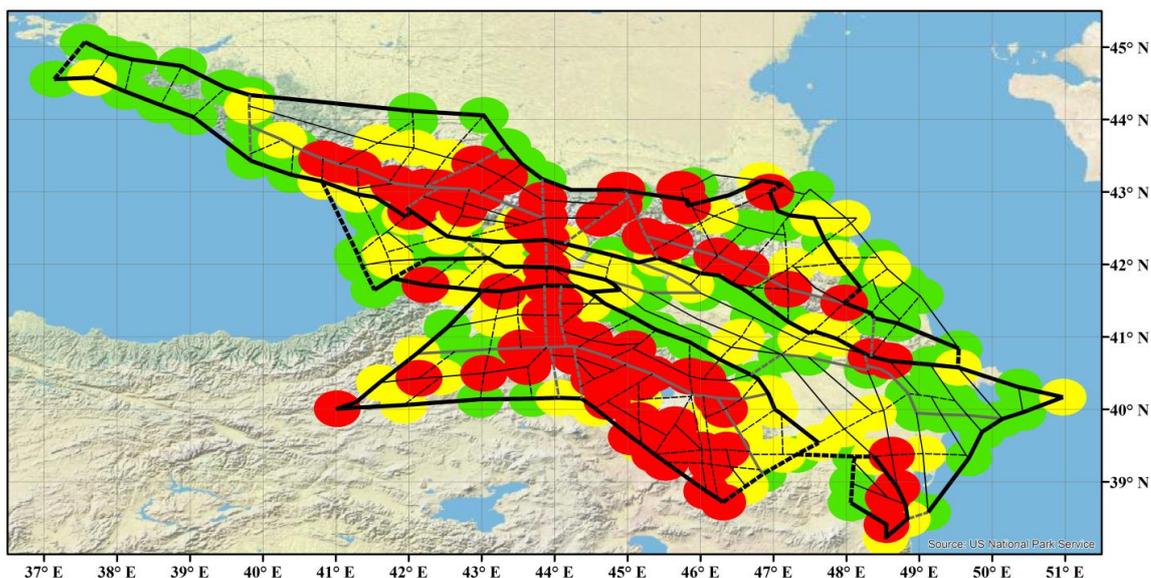


Рисунок 47 – Представление совместной интерпретации двух результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе, полученных с помощью алгоритмов «Барьер-3» и «Кора-3», в виде нечеткого множества окрестностей пересечений морфоструктурных линеаментов. Красным, желтым и зеленым цветами показаны окрестности пересечений, у которых функция принадлежности (1) равна 1, 0.5 и 0 соответственно

Для целей оценки сейсмической опасности совместно с ГЦ РАН было создано программное обеспечение:

1. ГИС-ориентированная база данных для многокритериальной оценки сейсмической опасности / Правообладатель: ГЦ РАН / Авторы: Соловьев Ан.А. (ГЦ РАН), Соловьев Ал.А. (ИТПЗ РАН), Гвишиани А.Д. (ГЦ РАН), Кособоков В.Г. (ИТПЗ РАН), Некрасова А.К. (ИТПЗ РАН), Горшков А.И. (ИТПЗ РАН), Николова Ю.И. (ГЦ РАН), Дзобоев Б.А. (ГЦ РАН), Николов Б.П. (ГЦ РАН) (свидетельство о государственной регистрации № 2019621466 от 16.08.2019).

2. Программа для ЭВМ: Toolbox «Многокритериальная оценка сейсмической опасности» для работы в среде ArcGIS / Правообладатель: ГЦ РАН / Авторы: Соловьев Ан.А. (ГЦ РАН), Соловьев Ал.А. (ИТПЗ РАН), Гвишиани А.Д. (ГЦ РАН), Кособоков В.Г. (ИТПЗ РАН), Некрасова А.К. (ИТПЗ РАН), Горшков А.И. (ИТПЗ РАН), Николова Ю.И. (ГЦ РАН), Дзобоев Б.А. (ГЦ РАН), Николов Б.П. (ГЦ РАН) (свидетельство № 2019619517 от 18.07.2019 о государственной регистрации).

В рамках продолжения работ по этому направлению определены места возможного возникновения сильных землетрясений для территории Эллинид, расположенных в южной части Балканского полуострова, определены геолого-геоморфологические критерии мест, в которых возможно возникновение землетрясений с $M \geq 7.0$ (рисунок 48).

В качестве сейсмогенерирующих структур рассматриваются пересечения зон морфоструктурных линеаментов, которые были определены методом морфоструктурного районирования. Геолого-геоморфологические параметры были единообразно определены для всех пересечений линеаментов. Установлено, что эпицентры землетрясений с $M \geq 7.0$ приурочены к пересечениям линеаментов. Те пересечения, с которыми связаны зарегистрированные землетрясения с $M \geq 7.0$, использованы для обучения алгоритма распознавания образов «Кора-3». На основе геолого-геоморфологических параметров алгоритмом распознавания были найдены характерные признаки, по которым все пересечения линеаментов были разделены на высоко (В) и низкосейсмичные (Н) относительно пороговой магнитуды 7.0. В результате к высокосейсмичным были отнесены все пересечения, в окрестностях которых известны землетрясения с $M \geq 7.0$, а также еще 24 пересечения, в которых события с $M \geq 7.0$ ранее не наблюдались. В частности, такие пересечения распознаны на острове Эвбея, где западная ветвь Северо-Анатолийского разлома подступает к берегам центральной Греции. Еще одна группа В-пересечений расположена в центральной части Коринфского залива – наиболее тектонически активной области региона, в которой однако землетрясений с $M \geq 7.0$ до сих пор не зафиксировано. Характерные признаки В- и Н-пересечений (критерии сейсмичности) сформированы морфометрическими параметрами. Интервалы значений этих параметров, присущие В-пересечениям, косвенно свидетельствуют о процессах

опускания и растяжения, доминирующих в областях расположения таких пересечений [58].

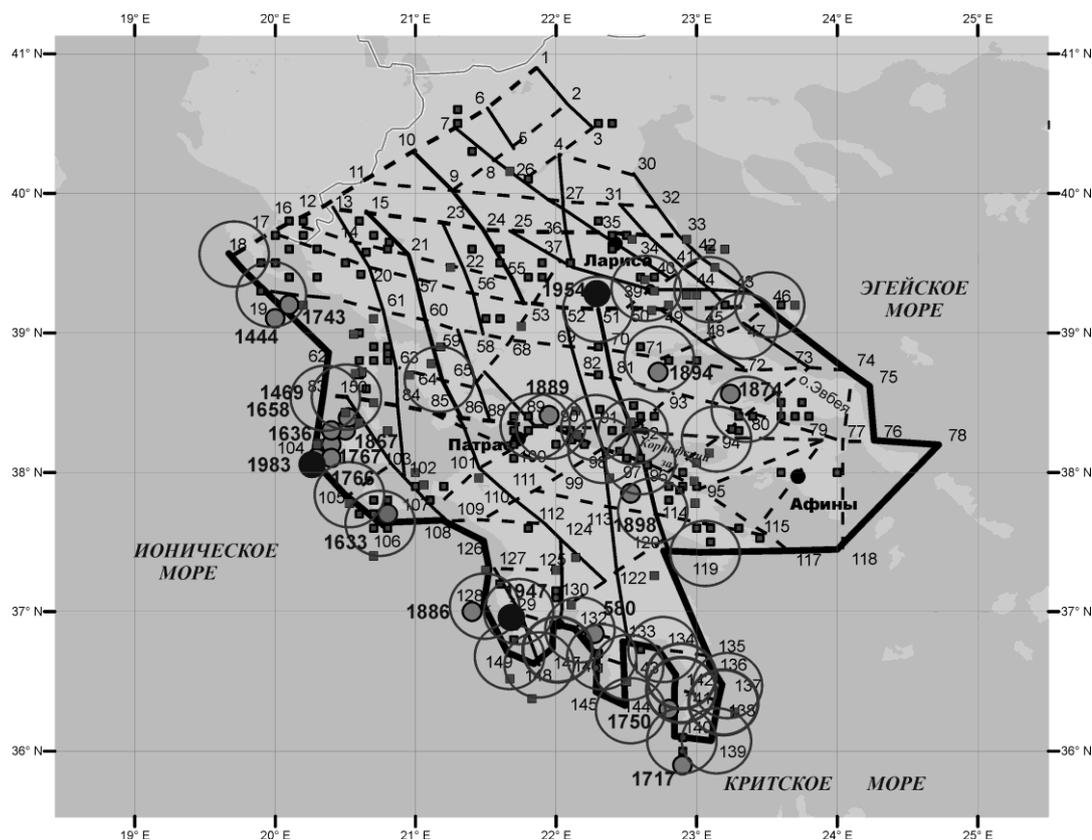


Рисунок 48 – Схема морфоструктурного районирования Эллинид и пересечения линеаментов, отнесенные к классу В для $M \geq 7.0$.

Линиями показаны линеаменты. Толщина линий соответствует рангу линеаментов: самые толстые – первый ранг; средней толщины – второй ранг; тонкие – третий ранг. Сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные. Кругами отмечены распознанные высокосейсмичные пересечения для $M \geq 7.0$. Черными кружками показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 7.0$ после 1900 г., светлыми - эпицентры землетрясений с $M \geq 7.0$ до 1900 г. Темные и светлые квадратики обозначают эпицентры землетрясений с $6.0 \leq M < 6.99$, которые произошли после и до 1900г., соответственно. 1 – 150 номера пересечений линеаментов

Была решена задача по определению мест возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ на территории Болгарии на основе схемы МСР Болгарского региона, отображающей положение пересечений линеаментов (далее для краткости используется термин «узлы») в линеаментно-блоковой структуре изучаемой территории. Определено 178 узлов, которые составили множество объектов для задачи распознавания. На территории Болгарского региона за период с I до конца XX веков известно 30 землетрясений с $M \geq 6$. Эпицентры этих землетрясений приурочены к 16 узлам, которые составили материал обучения высокосейсмичного класса для алгоритма распознавания Кора-3. Классификация узлов на высоко- и низкосейсмичные относительно порога $M=6.0$ получена на основе морфометрических, геологических, гравитационных и

магнитных параметров, а также параметров, характеризующих геометрию линеаментно-блоковой структуры Болгарского региона, установленную в результате МСР. В результате распознавания из 178 узлов региона к сейсмоопасным для $M \geq 6$ отнесено 59 узлов, включая 15, входивших в материал обучения (Рисунок 49). Большинство распознанных сейсмоопасных узлов расположено на линеаментах высших (первого и второго) рангов, которые разделяют наиболее крупные блоки земной коры. Большая часть сейсмоопасных узлов расположены в горных областях региона: массивах Рила и Родопы, а также в горном хребте Стара Планина. Сейсмоопасные узлы характеризуются «большими» значениями размаха высот и градиента рельефа в сочетании с «большими» значениями градиентов гравитационных и магнитных аномалий. Совокупность установленных распознаванием характерных признаков сейсмогенных узлов для M_6+ указывает на высокую контрастность неотектонических движений земной коры и наличие в ней глубинных неоднородностей в окрестностях таких узлов. Результаты исследования опубликованы в работе [39, Приложение А] и сделан доклад на Конгрессе балканского геофизического общества [49, Приложение Б].

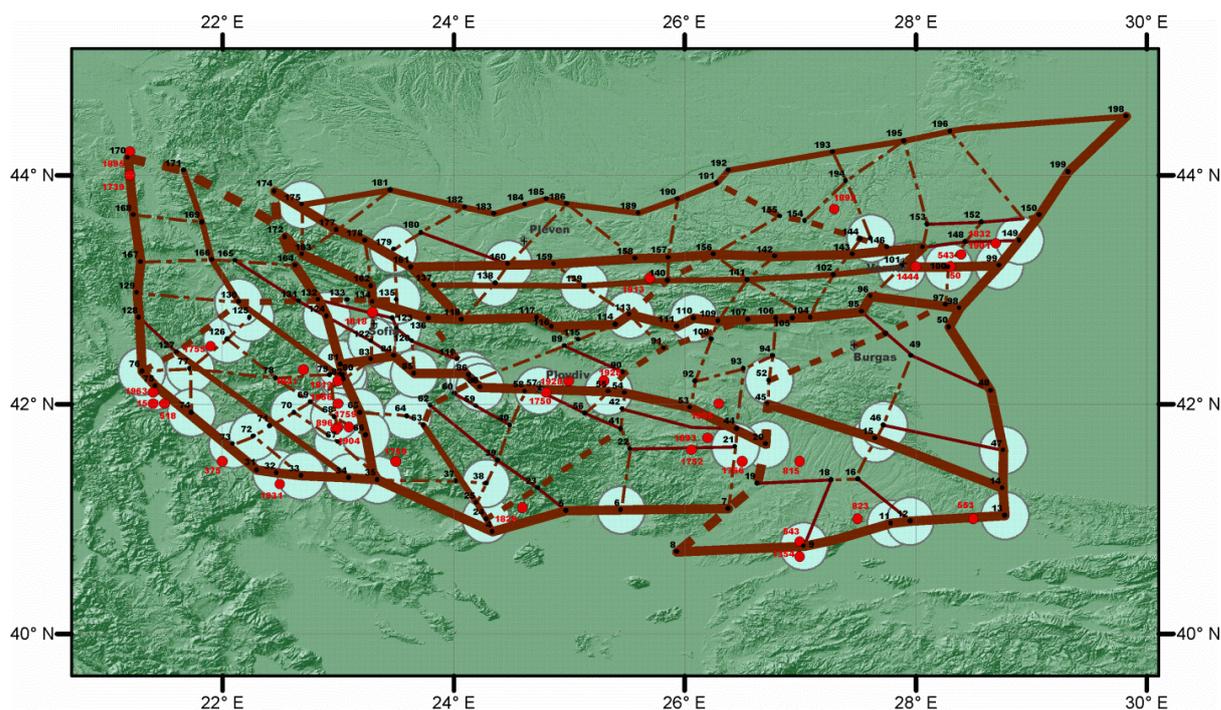


Рисунок 49 – Сейсмогенные узлы Болгарского региона для M_6+ . Кругами показаны узлы, в которых возможны землетрясения M_6+ . Красные кружки - эпицентры землетрясений M_6+ . Линиями показаны морфоструктурные линеаменты

2.6 Оценка сейсмической опасности плато Шиллонг

Получена вероятностная оценка сейсмической опасности плато Шиллонг (штат Мегхалая, Индия) с целью предоставления научной информации инженерным сообществам и сообществам по управлению рисками стихийных бедствий.

Сеймотектонические процессы в регионе находились под влиянием гималайской орогении, индо-бирманской субдукции и эволюции Бенгальского бассейна, что привело к высокой сейсмической активности. Результаты анализа сейсмической опасности используются для определения колебаний грунта в густонаселенных районах плато Шиллонг и, в частности, в городах Шиллонг, Нонгпох и Тура. Этот анализ основан на использовании исторических и инструментально зарегистрированных региональных землетрясений начиная с 1411 года и имеет дело с неопределенностями, связанными с магнитудами землетрясений, местами разрыва и частотой превышения скорости движения грунта. Построенные кривые сейсмической опасности показывают, что разлом Барапани обладает самой высокой частотой превышения скорости движения грунта для городов Шиллонг и Нонгпоха, а Эоценовая шарнирная зона и разлом Дауки ответственны за самую высокую частоту сейсмической опасности в г. Туре. Результаты оценки опасности вместе с результатами, полученными ранее с использованием детерминированного подхода, показывают, что хотя Олдхэмский разлом, расположенный вблизи г. Тура, может вызвать сильное, но редкое землетрясение, лишь немногие другие близлежащие разломы способны вызвать события меньшей магнитуды но с более высокой вероятностью их проявления. По результатам выполненных исследований опубликована статья [49, Приложение А].

2.7 Теоретические аспекты оценки сейсмического риска

Исследованы локальные особенности функции очага, порождающие одновременно (а) квадратичное затухание спектра и (б) потерю направленности излучения в дальней зоне на высоких частотах. Вопрос моделирования сейсмического источника, для которого упругое смещение в дальней зоне обладает этими двумя свойствами, был поставлен А.Гусевым [59-61]. Первое свойство традиционно называют омега-квадрат поведением, поскольку высокочастотный спектр спадает, как ω^{-2} , где ω – частота, а второе потерей направленности излучения. Квадратичное затухание спектра общепринято в инженерной практике, хотя не исключается конечность частотного диапазона такого поведения [62]. Аналогично обстоит дело и с универсальностью второго свойства. В работах [63,64] приведены контр-примеры, относящиеся к частотному диапазону $\omega > \omega_0$, где ω_0 есть угловая частота Брюна [65]. А.Гусев предложил две кинематические модели очага с элементами стохастического поведения [60, 61]. Они позволили воспроизвести ключевые свойства высокочастотного излучения: существование двух угловых частот, плоский участок спектра ускорения после второй угловой частоты (что эквивалентно свойству (а)), и слабый (в модели [60]) эффект направленности излучения. В этих моделях важную роль

играет фрактальная природа фронта разрыва. Чтобы воспроизвести указанные особенности, фронт по терминологии А.Гусева должен быть «кружевным», т.е. очень изрезанным и многосвязным. Поскольку анализ и настройка моделей осуществлялись численно, ответ на вопрос о природе свойств (а) и (б) остался открытым. В частности, неясно, насколько сложной должна быть кружевная структура фронта разрыва.

Проведенное исследование позволило показать, что для реализации свойства (а) достаточно иметь слегка негладкий фронт разрыва, а для реализации свойства (б) достаточно гладкость распределений шумовой компоненты фронта. Из чего следует заключение, что, фрактальные модели удачно дополняют классические гладкие модели очага [66]. Причина в том, что в классических моделях свойство (а) неустойчиво, а свойство (б), как правило, отсутствует. Однако добавление слегка негладкой шумовой компоненты фронта позволяет устранить эту неустойчивость и дополнительно реализовать свойство (б). Это наблюдение содержится в работе [67]. Выполненный в рамках рассматриваемого исследования анализ обладает большей общностью и простотой.

Рассмотрены гладкие и фрактальные локальные особенности функции очага. Особенности первого типа позволяют при определенных условиях воспроизвести омега-квадрат поведение спектра в дальней зоне. Источником такого поведения может быть нестандартное условие, при котором скорость фронта разрушения превышает скорость S -волны. В гладких моделях асимптотика спектра зависит от направленности излучения; при этом локальный источник степенной асимптотики проявляется, в лучшем случае, в приемниках, образующих отрезок одномерной дуги. Введение фрактальности в модель функции очага оказывает стабилизирующее влияние на решение рассмотренной задачи. Более точно, фрактальность позволяет устойчивым образом воспроизвести в дальней зоне и квадратичное затухание спектра, и потерю направленности излучения. Омега-квадрат поведение можно реализовать (условно говоря) и в активной фазе разрушения, и на стадии залечивания. Однако требования к гладкости фронтальной поверхности не одинаковы: $H = 2/3$ (активная фаза) против $H \approx 1$ (фаза залечивания), что физически вполне естественно. Но в обоих случаях высокая степень негладкости ($H < 1/2$) фронтальной поверхности не совместима с омега-квадрат поведением спектра. Что касается свойства потери направленности излучения, здесь важно сочетать негладкость ($H < 1$) фронтальной поверхности с гладкостью распределений, описывающих приращения шумовой компоненты этой поверхности. Эти заключения вполне конструктивны для целей моделирования функции очага. Результаты исследования опубликованы в статье [44, Приложение А]. В работе [45, Приложение А] исследованы некоторые теоретические

аспекты фрактальности и дается критический анализ её приложений к задачам сейсмического риска на основе учета фрактальных свойств сейсмичности при картировании долговременной интенсивности землетрясений.

2.8 Анализ параметров сейсмического поля (интенсивность, наклон графика повторяемости и наибольшая возможная магнитуда)

В задачах вероятностной оценки сейсмической опасности (PSHA) остро стоит задача адекватной оценки интенсивности сейсмического потока. В областях редкого проявления сейсмической активности для оценки интенсивности приходится использовать информацию о числе землетрясений в больших пространственных объемах. При использовании простых (линейных) методов сглаживания это неизбежно приводит к эффекту «размазывания» - завышению интенсивности сейсмического потока на больших площадях и, наоборот, ее занижению в реально высокосейсмичных зонах. Предложен модифицированный метод k -ближайших соседей, обеспечивающий эффективную нелинейную оценку интенсивности точечного процесса. Метод применяется для проведения детального статистического анализа пространственной структуры поля интенсивности сейсмического потока. Предложенный метод не требует ни предварительного оконтуривания территории, ни процедуры нормализации оценок. В отличие от многих интерполяционных методов оценки, основанные на предложенном методе, являются статистически обоснованными. Для метода в явном виде установлена «связь неопределенностей» между эффектом пространственного сглаживания и случайными ошибками. Предложена процедура выбора числа ближайших соседей k , контролирующего эффективный радиус сглаживания. Предлагаемый метод применен для анализа поля сейсмической активности в двух сейсмогенных районах, окружающих Курильские острова (рисунок 50) и Японию, в период с 1904 по 2011 гг. Новым методом локализованы очаги повышенной сейсмической активности в этих районах и определены некоторые количественные статистические характеристики. Методика и результаты исследования опубликованы в журнале *Pure and Applied Geophysics* [30, Приложение А].

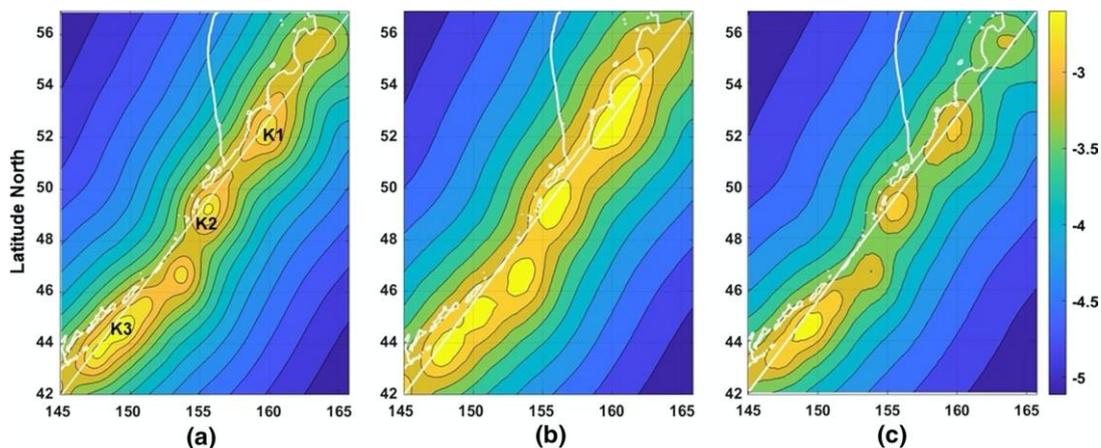


Рисунок 50 – Карты изолиний логарифмической интенсивности потока землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ [1/100 лет · 100 км²] для Курильской области: а) 1904–2014 гг., б) 1904–1958 гг., в) 1959–2014 гг. К1, К2, К3 — пятна с высокой сейсмической интенсивностью; белая диагональ - это профиль К

Обзор статистического и палео-сейсмологического подходов к оценке максимально возможной магнитуды региональных землетрясений представлен в статье [26, Приложение А] в рамках специального выпуска «Lithosphere Dynamics and Earthquake Hazard Forecasting» («Динамика литосферы и прогноз сейсмической опасности») журнала «Surveys in Geophysics» [15, Приложение А].

В рамках статистического подхода сравниваются метод статистических моментов, метод Байеса, и метод, основанный на теории экстремальных значений (EVT). В качестве стабильной альтернативы потенциально неробастному значению M_{\max} рассмотрены квантили $Q_q(T)$ максимального землетрясения в будущем временном горизонте T (рисунок 51). Квантили позволяют выбрать временной горизонт и уровень достоверности применительно к данной задаче оценки максимально возможной магнитуды землетрясения. Установлена удобная для практики связь между квантилями одиночного события и максимальным событием в будущем интервале времени T . Также проанализирован ряд наиболее представительных палео-сейсмологических исследований, в результате анализа которых выявлены свидетельства возможности реализации землетрясений с магнитудой, значительно превышающей значение M_{\max} , получаемое для усеченного закона Гутенберга-Рихтера.

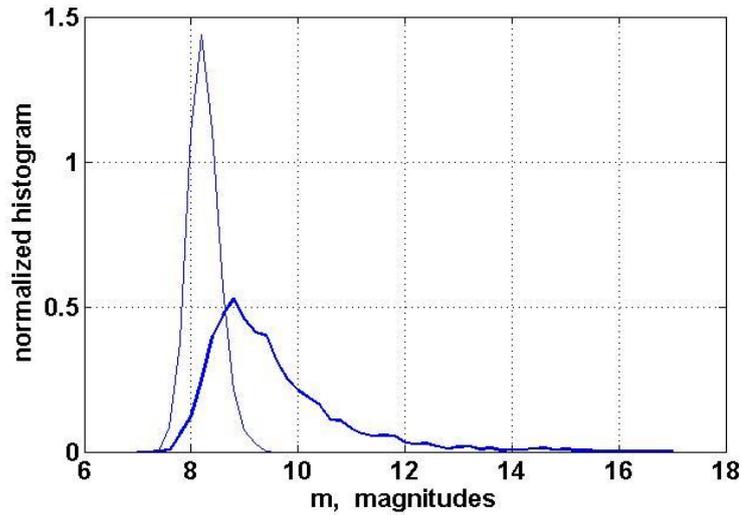


Рисунок 51 – Иллюстрация типичного распределения величин M_{\max} (жирная линия) и квантиля $Q_{50}(0.95)$ (тонкая линия). Видна лучшая робастность значений квантиля

В статье [14, Приложение А] предложена новая оценка параметра M_{\max} , обозначаемая \bar{M} , основанная на оценке максимального правдоподобия с поправкой на смещение, для которого выведена точная формула в виде конечной суммы некоторых функций от максимального значения выборки μ_n и минимальной рассматриваемой магнитуды m_0 :

$$\bar{M} = \mu_n - \frac{\bar{s}}{u^n} [\log(1 - \bar{U}) + \bar{W}_n],$$

$$\text{где } \bar{U} = 1 - \exp[-(\mu_n - m_0)/\bar{s}]; \bar{W}_n = \bar{U} + \frac{\bar{U}^2}{2} + \dots + \frac{\bar{U}^n}{n}.$$

В работах большого числа авторов введены оценки параметра M_{\max} , полученные по принципу статистических оценок моментного типа. Для их получения выписывается выражение для среднего значения (или некоторого старшего момента) некоторой состоятельной оценки, сходящейся по вероятности к истинному значению при $n \rightarrow \infty$. Например, с помощью интегрирования по частям получается выражение для среднего значения максимального значения выборки μ_n (величина M_{\max} здесь обозначена M):

$$E\{ \mu_n \} = \int_{m_0}^M x \cdot d[F(m/M, s)]^n = M - \int_{m_0}^M [F(m/M, s)]^n dx.$$

Здесь $s = \lg e/b$ – величина, обратная параметру наклона закона Гутенберга-Рихтера. Далее, в этом уравнении заменяют $E\{ \mu_n \}$, s соответственно на μ_n , \bar{s} , обосновывая это тем, что при $n \rightarrow \infty$ обе величины сходятся к своему математическому ожиданию, и получают уравнение для неизвестного параметра M :

$$M = \mu_n + \int_{m_0}^M [F(m/M, \bar{s})]^{n-1} dm.$$

Решая это уравнение относительно M различными приближенными способами, можно получить статистическую оценку неизвестного параметра M . Рассматривается вариант решения уравнения, предложенный в работах [68, 69]. Соответствующая оценка M обозначена МК. Также широко распространены Байесовские оценки M_{max} . В работе [70], введена несмещенная оценка максимальной магнитуды M , обладающая наименьшей дисперсией среди всех несмещенных оценок:

$$\bar{M} = \mu_n + \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{f(\mu_n / \mu_n, s)}.$$

Далее используется усеченный вариант этой оценки M_P , а также оценки МК (усечение на значении μ_{n+1}). Было проведено сравнение новой оценки \bar{M} с перечисленными оценками параметра M_{max} и показана её достаточно высокая эффективность (рисунок 52).

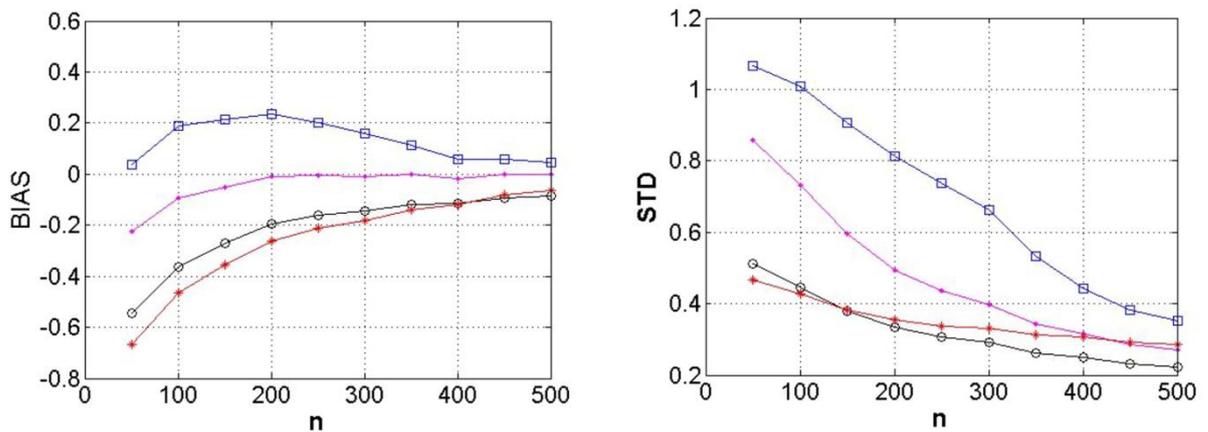


Рисунок 52 – Смещения (Bias; слева) и средне-квадратичное отклонение (STD; справа) для 4-х оценок максимальной магнитуды M по искусственным каталогам ($N = 10000$); $m_0 = 6.0$, $M = 8.0$, $s = 0.4$. Кружки - \bar{M} ; квадраты – МК; звездочки - Байесовские оценки; точки – M_P . Наиболее эффективной является оценка \bar{M} , близка к ней Байесовская оценка, наименее эффективной оказывается оценка МК

Для региона Курильских островов и Камчатки ($42.81 \leq \text{широта} \leq 53.56$; $146.38 \leq \text{долгота} \leq 161.06$) получена оценка квантиля $QT(q)$ максимальной магнитуды землетрясения в заданном будущем интервале времени T (рисунок 53). Показано существенное искажение плотности распределения магнитуд на концах диапазона при использовании модели возмущения магнитуд с помощью случайных ошибок (рисунок 54).

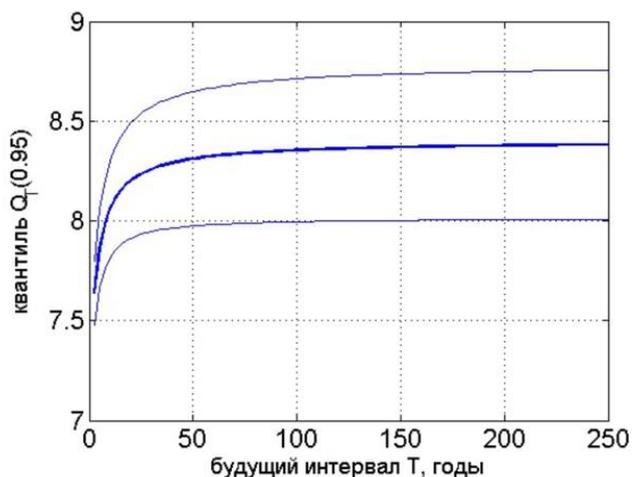


Рисунок 53 – График оценки квантиля $Q_T(0.95) \pm STD$

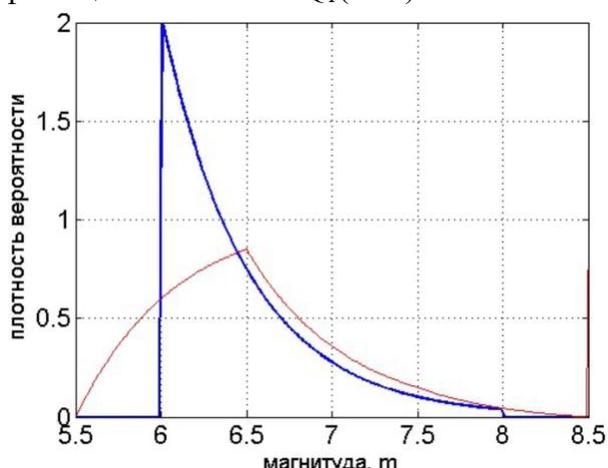


Рисунок 54 – Плотности вероятности УГР (жирная линия) и УГР, с магнитудой, искаженной случайной ошибкой $\Delta = 0.5$. Параметры УГР: $m_0 = 6.0$; $M = 8.0$; $s = 0.5$

Предложена статистически обоснованная процедура выбора интервала линейности для закона Гутенберга-Рихтера и оценивания параметра b (наклон графика повторяемости землетрясений в логарифмическом масштабе) на этом интервале (непрерывный и дискретный варианты). Как показывают примеры анализа каталогов, этот интервал заметно меньше всего интервала регистрации землетрясений. Это следует учитывать при оценке параметра b . Включение в интервал оценки магнитуд малых значений, для которых представительность регистрации неполная, приводит к занижению оценки b , а включение самых больших магнитуд, как правило, к завышению. Следует отметить, что использование непредставительных малых магнитуд сказывается на оценке максимального правдоподобия сильнее, чем использование магнитуд в таком же по ширине верхнем интервале, так как оно в силу экспоненциального убывания распределения магнитуд сопровождается добавлением в правдоподобие гораздо большего количества смещенных наблюдений. Поэтому для оценки параметра b точность оценки левой границы интервала гораздо существенней точности оценки правой границы.

На рисунке 55 проиллюстрирован предложенный метод выбора левой границы интервала магнитуд для оценки b , основанный на отношении правдоподобия. Правая граница интервала определялась аналогичным способом.

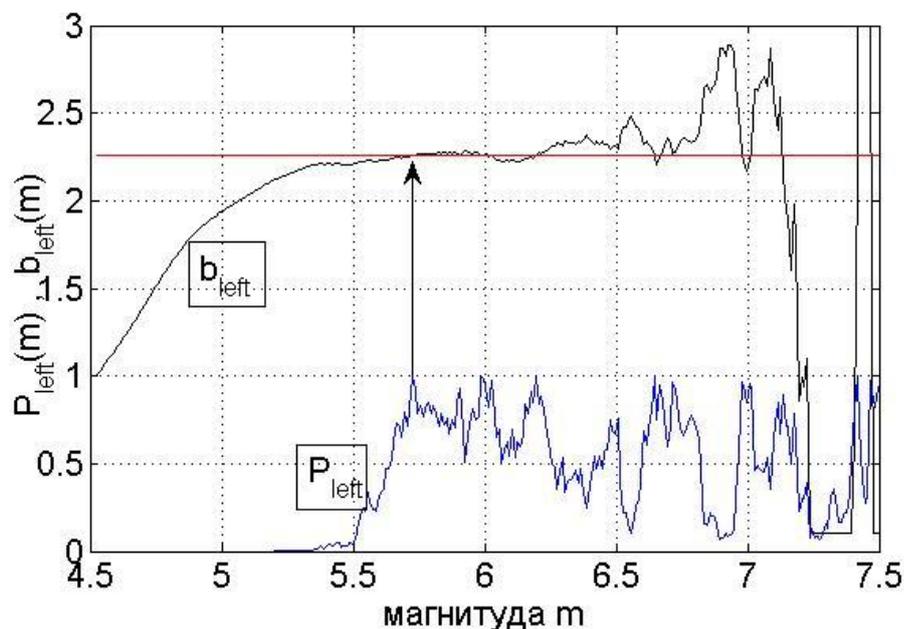


Рисунок 55 – Оценка $b_{left}(m)$ в текущем интервале времени (верхняя черная кривая), график функции правдоподобия $P_{left}(m)$ (нижняя синяя кривая) и оценка $b_0 = 2.26$ в оптимально выбранном интервале [5.7 - 7.25] (прямая красная линия) для глобального каталога СМТ 1976-2022. Точка окончательного выхода $P_{left}(m)$ и $b_{left}(m)$ из зоны малых значений правдоподобия отмечена стрелкой

Результаты исследования представлены в работе [2, Приложение А].

Проведен анализ сейсмического режима Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) с использованием современных инструментальных данных (1963- 2021 гг.), исторических и палео-данных по землетрясениям. С помощью модифицированного метода к-ближайших соседей и статистических методов исследована структура сейсмического поля БРЗ. Пространственная разрешающая способность составила в областях высокой сейсмичности 100-120 км. Были выявлены (рисунок 56) пятна сейсмической активности, перемежающиеся с областями относительного сейсмического затишья (сейсмическими брешами). Эти пятна образуют иерархическую структуру. На высшем уровне (масштаб 500-1800 км, время существования 300 лет и больше) в БРЗ наблюдаются 3 главных пятна, определяющие Саянский, Байкальский и Муйский субрегионы. Более мелкая структура пятен имеет масштаб 100-500 км, время существования 50-200 лет. Пятна сейсмической активности являются отражением сегментации геологической среды в сейсотектонической эволюции. Проведено сравнение оценок максимальной региональной магнитуды M_{max} , полученных по инструментальным данным 1963-2021 гг. и

по палео-данным. Показано, что оценки квантилей $Q_q(T)$ максимальных землетрясений в будущем интервале времени T являются более предпочтительными чем оценки M_{\max} для проблем сейсмического риска. Методика и результаты исследования опубликованы в журнале Физика Земли [19, Приложение А].

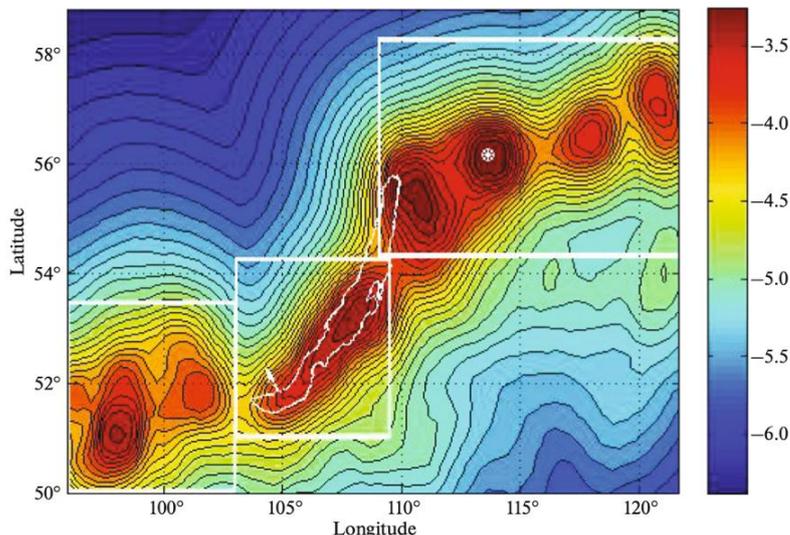


Рисунок 56 – Контуры оценок поля десятичного логарифма интенсивности потока сейсмических событий $\log(\lambda(x, y)) 10^{-4}$ годы $^{-1}$ км $^{-2}$) на сетке 20×20 км, полученных модифицированным методом k-ближайших соседей ($k=30$)

Получены оценки параметра оценки квантилей для Байкальской рифтовой зоны и ее субрегионов (рисунок 57).

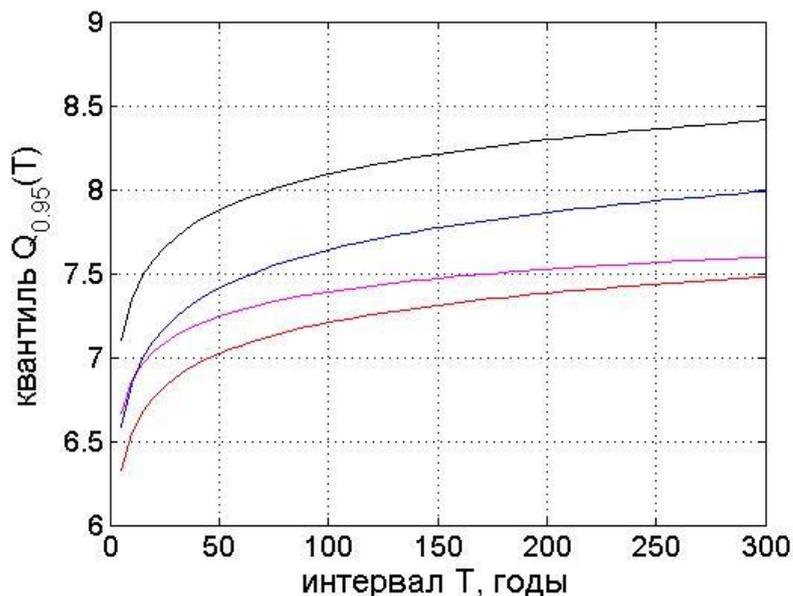


Рисунок 57 – Квантили уровня 0.95 $Q_{0.95}(T)$ максимальных землетрясений в будущем интервале времени T для Байкальской рифтовой зоны и для 3-х её субрегионов (снизу вверх: субрегионы Северомуйский, Байкальский, Саянский, весь регион) Результаты представлены в докладе [3, Приложение Б].

Проведен анализ пространственной структуры сейсмического поля в высоко-сейсмичном регионе в окрестности Японии, ограниченном координатами: широта $28^{\circ} \div 50^{\circ}\text{N}$; долгота $130^{\circ} \div 150^{\circ}$ с использованием некоторых новых статистических методов (рисунок 58).

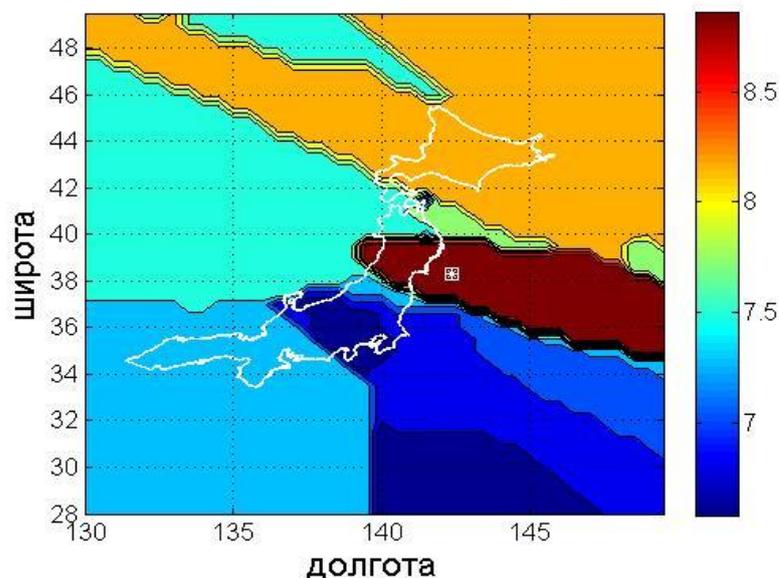


Рисунок 58 – Оценки параметра M_{max} для землетрясений с глубинами очага землетрясения $0 \div 100$ км, полученные по методу k -ближайших соседей. Белым квадратиком отмечен эпицентр мега-землетрясения Тохоку

Проведенный анализ выявил следующие особенности поля сейсмичности рассматриваемого региона. Интенсивность, наклон графика повторяемости и наибольшая возможная магнитуда имеют разные пространственные масштабы изменчивости и, соответственно, к ним должны применяться различные масштабы пространственного осреднения. Наименьший из всех масштабов имеет сейсмическая интенсивность. В высокосейсмичных зонах радиус осреднения в методе k -ближайших соседей, обеспечивающий надежное осреднение, может принимать значения $33 \div 100$ км; в зонах пониженной сейсмичности значение этого радиуса увеличивается. Наблюдаемые пятна высокой сейсмичности являются отражением сегментации активных разломов в процессе сеймотектонической эволюции земной коры. Такие пятна повышенной сейсмичности могут существовать на временных интервалах порядка 50 – 200 лет. Полученные оценки поля интенсивности сейсмического потока показывают, что с изменением глубины пространственная область максимальных значений интенсивности может сдвигаться по горизонтали на расстояния порядка сотен километров, причем в разных направлениях на разных глубинах. Наиболее высокие значения интенсивности порядка $10^{-4} \frac{1}{\text{год-км}^2}$ сосредоточены в интервале глубин $0 \leq h \leq 100$ км и проявляются в окрестности мега-

землетрясения Тохоку. Наклон графика повторяемости пространственно локализован не столь сильно, как сейсмическая интенсивность. Для надежной оценки наклона графика повторяемости необходимо использовать крупные ячейки осреднения. Предложен оригинальный способ определения радиуса осреднения, основанный на использовании статистического коэффициента изменчивости. Такой радиус определяется минимальным числом ближайших соседей k , которое приводит к коэффициенту изменчивости меньше выбранного порога 0.2. Для максимальной возможной региональной магнитуды M_{\max} по региону Японии (широта $28^{\circ} \div 50^{\circ}\text{N}$; долгота $130^{\circ} \div 150^{\circ}\text{E}$) получена оценка с учетом поправки на смещение $M_{\max} = 9.60 \pm 0.41$. Результаты исследования опубликованы в журнале Физика Земли [1, Приложение А].

2.9 Оценка сейсмической опасности регионов: Алайская долина, Киргизия, Северное Прииссыккулье (Тянь-Шань)

В сотрудничестве с коллегами из Киргизии проведено исследование пиковых скоростей грунта (PGV) и оценки опасности землетрясений для нескольких районов западной части Алайской долины на основе данных о гипотетических смещениях блоков коренных пород, связанных с землетрясением, с использованием метода PGVEM (метод оценки PGV).

PGVEM был разработан для выявления и анализа сейсмических перемещений блоков коренных пород. Первым шагом в анализе является устранение всех других возможных возбуждений; в частности, смещения, которые можно объяснить силой тяжести, не рассматриваются. Еще один фильтр, который следует применить, — это диапазон значений смещения; небольшие смещения также могут быть вызваны различными факторами (например, морозным растрескиванием). Случайные аномально большие смещения (свыше 5 м) также отвергаются как возможно не связанные с землетрясениями и часто вызывающие сомнения в интерпретации. Набор простых механических (кинематических) моделей (заведомо неполный) приводится в описании метода PGVEM [71].

Результаты исследования и полученные оценки опубликованы в работе [16, Приложение А]. В дополнение к преобладающим поперечным (относительно простираания долины) сейсмическим импульсам, согласующимся с надвиговыми деформациями, мы также выявили сдвиговые деформации вдоль структур Алайской долины. Наблюдается некоторое увеличение PGV (и ощутимой интенсивности) в области повышенной сейсмичности, связанной с Главным Памирским эшелонированным надвигом. В целом квантили $Q_{0,8}$ и $Q_{0,95}$ полученных оценок PGV согласуются с $I = 9,5$, что на половину

балла выше оценки сейсмической интенсивности на карте общего сейсмического районирования (ОСР) Киргизии по состоянию на 2018 г. Результаты показывают, что метод PGVEM обещает уточнение карт GSZ на основе оценок PGV для более старых сильных событий.

Совместно с коллегами из ИФЗ РАН, Института геоэкологии РАН, учеными Литвы и Киргизии исследованы морфоструктуры северного склона хребта Кунгей Ала-Тоо и его южные предгорья (адыры). Анализ данных радиоизотопного датирования (радиоуглеродного и инфракрасного люминесцентного) в пройденных горных выработках показал латеральную миграцию сильной сейсмической активности вдоль зоны Культорского разлома (Северное Прииссыккулье). Было подтверждено, что современная сильная сейсмическая активность сосредотачивается в адырной зоне и приурочена к адырным разломам. Получены оценки максимальных палеосейсмических воздействий (значений пиковых скоростей колебания грунта, PGV). Получение и подтверждение этих результатов важно как в практическом плане площадной оценки сейсмической опасности, так и в плане понимания характера сейсмогеодинамики исследуемого района и областей современной орогении в целом. За голоценовое время вдоль исследованной разломной зоны произошло, по крайней мере, семь морфогенетических землетрясений. В нашей эре повторяемость морфогенетических землетрясений составляла 200–300 лет. При этом в VII и XV веках вдоль этого дизъюнктива, по всей видимости, имели место сильнейшие сейсмические катастрофы с $M \sim 7.5$ ($I_0 = X$ баллов), во время которых сейсмические очаги выходили на поверхность, образуя сейсмоуступы длиной до 70–80 км. В рамках данной темы НИР проведена оценка величин палеосейсмических воздействий (PGV значений) по данным полевых наблюдений смещения скальных отдельностей. Результаты работ опубликованы [8, Приложение А].

3. Изучение и моделирование сейсмичности

3.1 Закон продуктивности землетрясений

Одним из постулатов практически всех моделей сейсмического режима и афтершоковых последовательностей, включая широко известную модель ETAS [72-74], до сих пор было предположение, что землетрясения одинаковой силы инициируют примерно одинаковое число зависимых событий (афтершоков). Показано, что это предположение неверно. По-видимому, именно это приводит к завышенным оценкам сейсмической опасности на основе таких моделей. Разброс числа инициируемых событий очень велик. Но, как оказалось, он закономерен и это число устойчиво подчиняется, аналогично магнитуде землетрясения, экспоненциальному распределению (рисунок 59), если подсчет

вести в интервале магнитуд определенной ширины относительно магнитуды инициирующего землетрясения. Эта закономерность получила название «Закон продуктивности землетрясений». Модель ETAS модифицирована путем включения в нее закона продуктивности. Новая модель ETAS-e позволила получить синтетический каталог, который, воспроизводит реалистичное распределение числа инициируемых землетрясений, в отличие от исходной модели ETAS, в которой для этого числа заложено распределение Пуассона.

Полученные результаты опубликованы в статье [50, Приложение А].

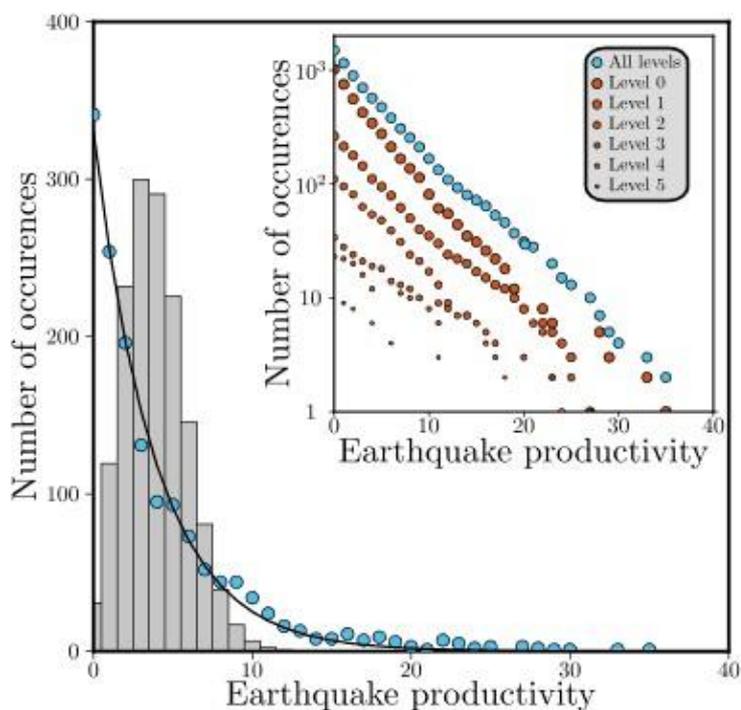


Рисунок 59 – Продуктивность землетрясений во всемирном каталоге. Точками показано распределение числа инициированных событий для землетрясений с $M \geq 6.5$ с использованием магнитудного интервала $\Delta M = 2$. Сплошная линия – это экспоненциальный закон с параметром Λ_2 , средним числом инициированных событий, полученным на основе данных. На гистограмме показано распределение Пуассона с параметром Λ_2 . На вставке показаны распределения совокупной продуктивности для первичных и вторичных запускающих событий

3.2 Моделирование сейсмичности с учетом закона продуктивности

Теоретическому анализу продуктивности сейсмических событий в рамках различных модификаций модели ETAS посвящено исследование [13, Приложение А], [24, Приложение Б]. Продуктивность события магнитуды m определяют числом спровоцированных им событий с магнитудой не ниже $m - \Delta$: это могут быть как прямые ‘потомки’ числом ν_Δ , так и все потомки числом V_Δ . Эмпирический анализ в серии недавних исследований свидетельствует в пользу дискретного экспоненциального

распределения для статистики ν_{Δ} и статистики V_{Δ} , связанной с афтершоками (случай кластера с доминирующей начальной магнитудой). Появление указанных законов повторяемости, аналогичных закону Гутенберга-Рихтера, является серьезным вызовом для их сейсмо-статистического обоснования. Была рассмотрена общая модель ETAS, адаптированная к любому (не обязательно Пуассоновскому) распределению ν_{Δ} . Первый основной результат исследования показывает, что ветвящаяся структура афтершоковой динамики не допускает совпадения типов распределения статистик ν_{Δ} и V_{Δ} (скажем, наблюдаемый экспоненциальный или пуассоновский тип). Второй результат относится к поведению хвостов распределения V_{Δ} . Оно принципиально различно для кластеров общего типа и кластеров с доминантной начальной магнитудой: хвост тяжелый в первом случае и легкий во втором. Эмпирические данные подтверждают заключение такого рода.

Понятие Δ -продуктивности связано с априорными представлениями о структуре кластера сейсмических событий в виде случайного ветвящегося дерева. Такое представление не является единственно возможным. Таким образом, геометрическое распределение ν_{Δ} можно рассматривать как полезную альтернативу в рамках обобщенной модели ETAS(F). Другая характеристика Δ -продуктивности, а именно V_{Δ} для основных толчков, является более объективной и стабильной.

Для большого класса моделей ETAS(F) в исследовании дан ответ на вопрос, когда распределение общей Δ -продуктивности имеет легкие хвосты для основных толчков и тяжелые хвосты для произвольных событий. Реальные данные демонстрируют возможности такого рода.

В исследовании обращается внимание на трудности обоснования упомянутых геометрических законов для ν_{Δ} и V_{Δ} . Они связаны как с декластеризацией сейсмичности, так и с эффектом усреднения распределений ν_{Δ} и V_{Δ} при группировании данных.

О первой трудности можно судить по экспериментам работы [75] с методом ближайших соседей. Этот метод, адаптированный к структуре ETAS, имеет 40-процентную ошибку неправильного определения родителя события. Устойчивость выводов в этом случае может зависеть от строгого подобия реальной иерархической структуры сейсмического кластера.

Вторая трудность выражается в том, что смесь геометрических распределений сохраняет исходное свойство монотонности, но перестает быть геометрической. Это неизбежно, если параметр распределения зависит от местоположения или величины исходного события. Поэтому можно более уверенно говорить о легком хвосте V_{Δ} -распределения для основных толчков.

Наконец, теоретический результат для модели ETAS(F) показывает, что типы распределений ν_{Δ} и V_{Δ} не могут быть одинаковыми из-за ветвящейся структуры кластеров. Результаты исследования представлены [11, Приложение А; 24, Приложение Б]

3.3 Моделирование сейсмичности с учетом закона продуктивности в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород

Проведено экспериментальное исследование закона продуктивности землетрясений [76] в лабораторных условиях. Лабораторные условия, в отличие от натуральных, позволяют управлять напряженно-деформированным состоянием среды и варьировать механические свойства образцов. Используются данные экспериментов, проведенных при различных уровнях напряжений, соотношениях осевых напряжений и напряжений всестороннего сжатия, на сухих и водонасыщенных образцах различных горных пород (гранит и песчаник).

Первый образец. BS02. Лаборатория геомеханики и реологии (GFZ, Potsdam). Водонасыщенный цилиндрический образец диаметром 50 мм и высотой 125 мм. Песчаник Бенхайм. Первая стадия: формирование сдвигового макроразрыва в результате естественного разрушения материала образцов вдоль наклонной плоскости. Образование макроразрыва сопровождалось проскальзыванием по разрыву со сбросом осевых напряжений. Вторая стадия эксперимента (со сформированными «разломными зонами»): моделирование афтершоковых последовательностей [77].

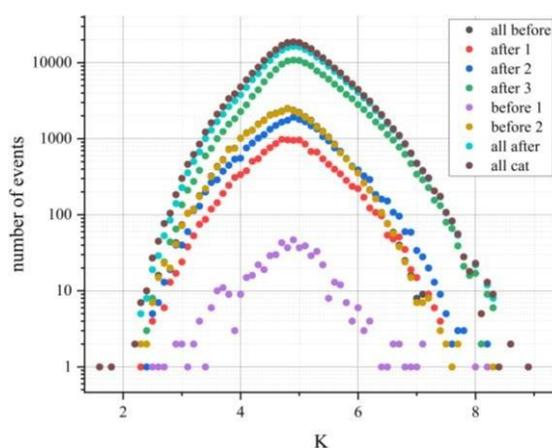


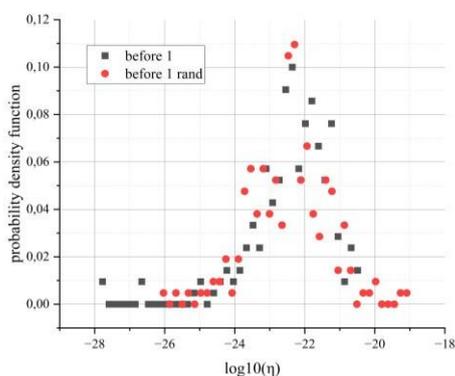
Рисунок 60 – Графики повторяемости для различных этапов эксперимента: all before – первая стадия нагружения (области черного и синего прямоугольников вместе); all after – области after 1, after 2 и after 3 вместе; all cat – весь каталог эксперимента

Построены графики повторяемости (рисунок 60), найдены пороговые значения энергетического класса K_c , параметры закона Гутенберга-Рихтера b , корреляционные фрактальные размерности d (таблица 12), построены распределения функции близости (рисунок 61): реальное (p_{real}) и рандомизированное (p_{rand}). Наблюдается одногорбое

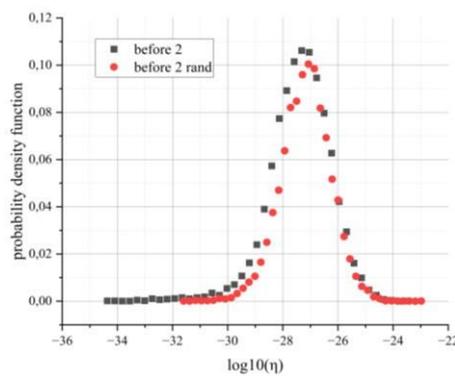
распределение, для которого еще не выявлен способ нахождения порогового значения функции близости для последующего расчета продуктивностей и анализа событий.

Таблица 12 – Значения параметров для BS02

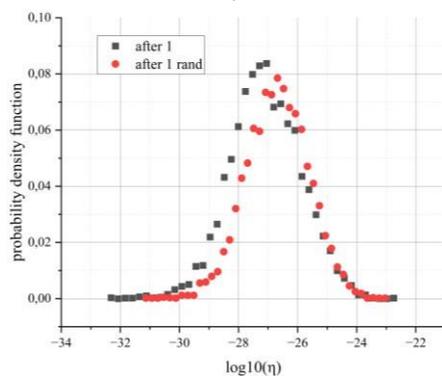
| | all cat | all before | before 1 | before 2 | all after | after 1 | after 2 | after 3 |
|----|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Кс | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| d | 2.92 ±0.04 | 2.71 ±0.02 | 2.07 ±0.06 | 2.72 ±0.02 | 2.92 ±0.04 | 2.60 ±0.07 | 2.43 ±0.08 | 2.83 ±0.05 |
| b | 0.782 ±0.002 | 0.976 ±0.009 | 0.95 ±0.07 | 0.977 ±0.009 | 0.766 ±0.002 | 0.835 ±0.011 | 0.83 ±0.08 | 0.746 ±0.003 |



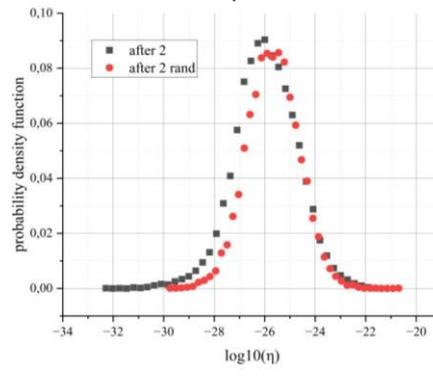
а)



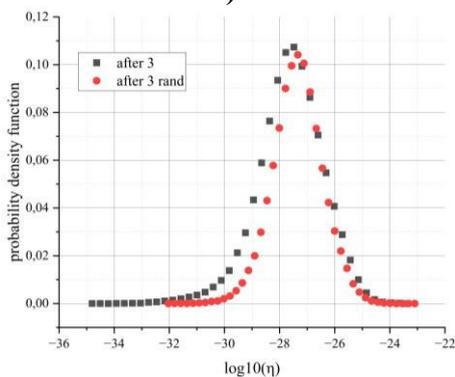
б)



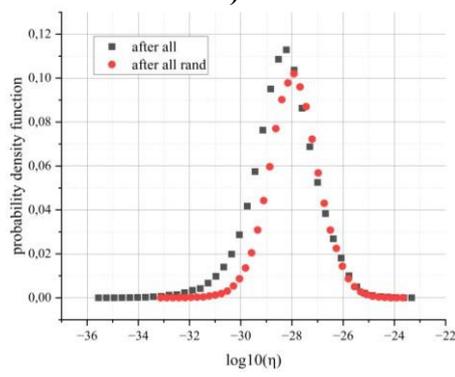
в)



г)



д)



е)

Рисунок б1 – Графики распределения функции близости для двух этапов первой стадии нагружения образца (а, б), трех этапов второй стадии нагружения образца (в, г, д) и для всего каталога (е). Черными квадратами изображены графики, построенные по исходному каталогу, красными кружками – по рандомизированному [4, 5]

Второй образец. АЕ42. в Лаборатории трения горных пород (Rock friction laboratory, USGS, Menlo Park, USA) [78]. Цилиндрической формы диаметром 76.2 мм и высотой 190.5 мм из гранита Вестерли. Деформация проводилась одноосной нагрузкой в условиях постоянного всестороннего сжатия 50 МПа. Сухой, обводнение не проводилось. Нагружение выполнялось в режиме с обратной связью по активности акустической эмиссии [78]. Для анализа данных были взяты события из двух временных областей: 4000-12400 секунд; 14490-15460 секунд (before и after соответственно). Анализ проводился аналогично первому образцу (рисунок 62, таблица 13). Видно, что графики распределения функции близости также имеют одногорбый вид (рисунок 63).

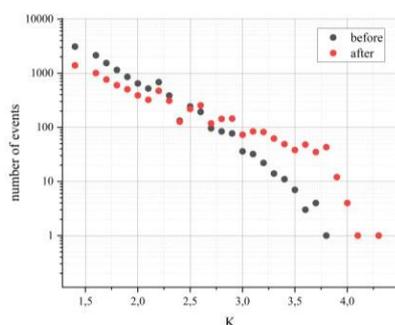
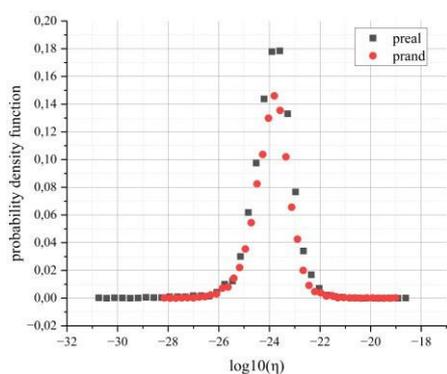


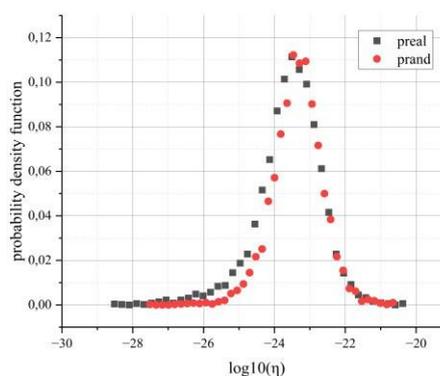
Рисунок. 62 – Графики повторяемости для двух этапов нагружения (черные кружки – период before (4000-12400 секунд), красные – after (4000-12400 секунд))

Таблица 13 – Значения параметров для АЕ42

| | before | After |
|-------|-------------------|-------------------|
| K_c | 1.6 | 1.6 |
| d | 3.07 ± 0.05 | 2.63 ± 0.07 |
| b | 1.086 ± 0.013 | 0.678 ± 0.010 |



а)



б)

Рисунок 63 – Графики распределения функции близости для двух этапов нагружения образца АЕ42: а) – первого; б) – второго.

Черными квадратами изображены графики, построенные по исходному каталогу, красными кружками – по рандомизированному [76]

Одногорбое распределение функции близости рандомизированного каталога немного сдвигается вправо относительно графика исходного каталога, что свидетельствует

о том, что функция близости группированных событий мало отличается от функции для независимых событий. Небольшой сдвиг означает небольшую долю группируемых событий. Результаты обсуждались на конференции [21, Приложение Б].

3.4 Исследование связи формы графика повторяемости землетрясений вдоль Камчатского слаба с сейсмическим сцеплением

Сейсмический потенциал в зонах субдукции зависит от величины и характера каплинга (сцепления) взаимодействующих тектонических плит. Было установлено [79], что на различных участках зон субдукции характер сброса напряжений во время больших землетрясений может быть различным в зависимости от размеров «зацепов» (асперити, *asperity* в англоязычной литературе). Во время землетрясений на «зацепах» происходят максимальные по амплитуде подвижки. Для объяснения этого явления была предложена геотектоническая концепция, в соответствии с которой именно на «зацепах» происходит накопление напряжений [80]. В дальнейшем, быстро развивающиеся исследования по деформациям земной поверхности с помощью спутниковых технологий подтвердили эту концепцию, сформировалось представление о «зацепах» как зонах дефицита проскальзывания («slip deficit») [81].

Исследование зон каплинга имеет большой практический смысл для оценки сейсмо- и цунамиопасности вблизи зон субдукции. С одной стороны, именно на краю или внутри таких зон обычно находятся гипоцентры сильных землетрясений. С другой стороны, именно такие зоны, с максимальной подвижкой при землетрясении дают основной вклад в образование волн цунами [82]. Это, в свою очередь, дает возможность выявления зон каплинга по инверсии мареограмм, фиксирующих амплитуды цунами в разных точках береговой линии [82], а также по палеоданным об осадочных отложениях, вызванных цунами [83]. Результаты многочисленных исследований говорят в пользу того, что положение «зацепов» стабильно в течение длительного времени [81].

В Камчатской зоне субдукции выявление зон каплинга ведется с конца 90-х годов сейсмическими методами [84], по GPS-наблюдениям [85, 86], на основе анализа мареограмм [82] и осадочных отложений цунами [83]. Однако, получаемые решения не являются однозначными из-за недостаточного покрытия территории станциями GPS и из-за отсутствия прямых измерений скоростей деформации на дне океана.

В пионерской работе [79], давшей объяснение различий в сейсмичности разных зон субдукции разным характером сцепления взаимодействующих тектонических плит, южная часть Камчатки, в которой был расположен очаг катастрофического Камчатского землетрясения 4 ноября 1952 г., $M=9.0$, отнесен к типу обширной связной зоны сцепления,

тогда как северная Камчатка характеризуется более локализованными зонами сцепления и, соответственно, меньшим сейсмическим потенциалом. В более поздних исследованиях было обнаружено, что величина подвижки в очаге землетрясения 1952 г. неоднородна и составляла от 0 до 15 м; при этом в южной части очага, скорее всего, подвижка в среднем больше, чем в северной [82, 83]. Исследования интер-сейсмических деформаций по данным GPS [86] подтверждают, что зоны полного сцепления взаимодействующих блоков совпадают с областями максимальной подвижки при сильных землетрясениях, и что эти зоны составляют лишь небольшую часть очагов землетрясений, трассируемых облаками афтершоков.

В исследованиях, проводимых по теме, предложен новый подход для выявления «зацепов» в зонах субдукции. Он основан на недавно обнаруженном явлении загиба графика повторяемости, связанного с дефицитом относительно сильных событий, в областях больших скоростей асейсмичного проскальзывания [87]. Сделано предположение, что в зонах субдукции участки меньшего сцепления также характеризуются дефицитом сильных событий, тогда как в зонах «зацепов» нелинейность графика повторяемости не наблюдается, или возможен некоторый относительный избыток сильных событий.

Рассмотрены землетрясения Камчатской зоны субдукции, выделенные по работе [88]. Для анализа использован каталог землетрясений Единой информационной системы сейсмологических данных Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/sdis>). Рассмотрены два варианта каталога – полный и каталог основных толчков, в котором удалены афтершоки по методу работы [22].

Для определения формы графика повторяемости его наклоны $b_{M3.5}$ и $b_{M4.8}$ оценивались в двух диапазонах магнитуды одинаковой ширины [3.5, 4.7] и [4.8, 6.0], соответственно, по данным с 1962 по 2017 г. Использован метод максимального правдоподобия, основанный на анализе дифференциального магнитудно-частотного распределения, который дает несмещенную оценку наклона в ограниченном диапазоне магнитуды [89, 90]. Погрешности $\delta b_{M3.5}$ и $\delta b_{M4.8}$ (одно стандартное отклонение) определяются методом Монте-Карло. Для рассматриваемого региона, периода времени и используемого каталога магнитуда 3.5 является представительной. Значения $b_{M4.8}$ и $\delta b_{M4.8}$ определяются на регулярной сетке с шагом 5 км. В каждом узле использованы 50 ближайших событий; максимальный радиус составляет 50 км. Затем, в тех же кругах вычислены $b_{M3.5}$ и $\delta b_{M3.5}$. Постоянный размер выборки обеспечивает постоянство значения $\delta b_{4.8} \approx 0.2$. Отклонение графика повторяемости от прямолинейной формы мы характеризуем величиной загиба: $D_{\text{Sigma}} = (b_{M4.8} - b_{M3.5}) / \delta b_{M4.8}$

Абсолютное значение $|D_{\text{Sigma}}| > 1.64$ указывает на статистически значимый (на уровне 0.95) загиб графика повторяемости. Отрицательное значение D_{Sigma} соответствует избытку более сильных землетрясений, положительное - их дефициту.

Результаты анализа представлены на рисунке 64 по каталогу основных толчков и рисунке 65 по полному каталогу. Положение и форма областей обратного загиба графика повторяемости - предполагаемых областей сцепления - в двух вариантах различаются незначительно, что в дальнейшем избавляет от необходимости предварительной очистки каталогов от афтершоков.

Предполагаемые зоны сцепления покрывают почти всю территорию в южной части Камчатки (A1, A2, A3 на рисунках 64 и 65), что соответствует выводам работы по анализу мареограмм землетрясения 1952 г. [82], уточнений этого исследования по палео-данным об осадочных отложениях, вызванных цунами [83], а также по результатам обработки данных GPS и их сопоставления с гравитационными аномалиями [86]. Следующая зона, A4, выделяемая предложенным методом, расположена в северной части Авачинского залива. Ее положение согласуется с областью значительной подвижки в северной части очага землетрясения 1952 г., выделяемой в работе [82]. В работе [83], в качестве наиболее вероятных, указываются варианты с расположением этой зоны несколько восточнее и дальше в море. Соответствующая зона почти полного сцепления, выделяемая в работе [86], также расположена несколько восточнее. Еще одна аномалия, A5, расположена в Кроноцком заливе. Из-за недостатка данных эта область не выделяется в известных работах в качестве асперити, однако, именно здесь расположен очаг землетрясения 3 февраля 1923 г., $M=8.5$, вызвавшего цунами 6-8 м [91, 92], что несомненно говорит о значительной подвижке в очаге. Следующая аномалия, A6, практически совпадает с областью максимальной подвижки при Кроноцком землетрясении 5 декабря 1997 г., $M=7.8$ [84]. Интересно отметить, что афтершоки этого землетрясения расположены, главным образом, в зонах загиба графика повторяемости вниз (рисунок 65). С учетом значительного асейсмического проскальзывания, сопровождавшего афтершоковый процесс Кроноцкого землетрясения [85], это дополнительно подтверждает исходную гипотезу о связи формы графика повторяемости с характером деформаций. В северной части очага Кроноцкого землетрясения 1997 г., расположена еще одна аномалия, A7, которую можно ассоциировать с очагом цунамигенного землетрясения 13 апреля 1923 г. [91], тем более, что анализ данных о цунами позволяет предположить, что магнитуда этого землетрясения превышала значение 8 [92].

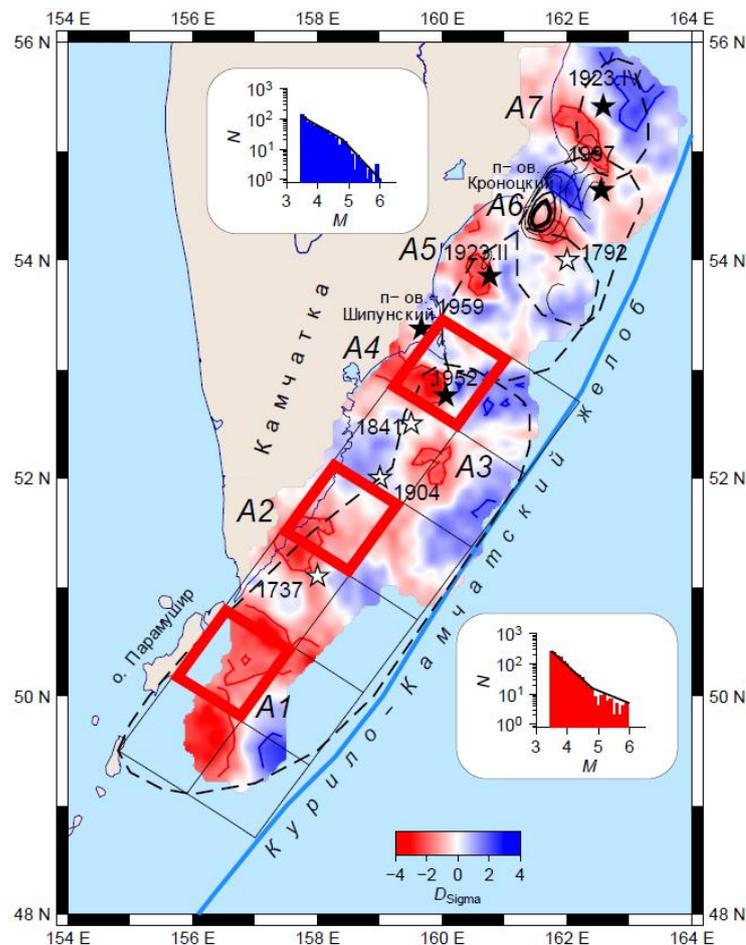


Рисунок 64 – Вариации формы графика повторяемости для каталога основных толчков. Красная и синяя линии очерчивают зоны статистически значимого излома графика повторяемости $|D_{Sigma}| \geq 1.64$. Красные зоны A1-A7 и синие зоны соответствуют избытку и дефициту сильных землетрясений соответственно; графики повторяемости из этих зон показаны на врезках. Черные звездочки – хорошо определенные эпицентры сильных землетрясений, белые звездочки – плохо определенные эпицентры исторических сильных землетрясений. Штриховые линии показывают очаги Камчатского землетрясения 1952г., землетрясений 1923г. и Кроноцкого землетрясения 1997 г. Распределение смещений в очаге Кроноцкого землетрясения [84] показано черными линиями. Зоны предполагаемых максимальных смещений в очаге Камчатского землетрясения показаны красными квадратами [82]. Вариации формы графика повторяемости для каталога основных толчков. Красная и синяя линии очерчивают зоны статистически значимого излома графика повторяемости $|D_{Sigma}| \geq 1.64$. Красные зоны A1-A7 и синие зоны соответствуют избытку и дефициту сильных землетрясений соответственно; графики повторяемости из этих зон показаны на врезках. Черные звездочки – хорошо определенные эпицентры сильных землетрясений, белые звездочки – плохо определенные эпицентры исторических сильных землетрясений. Штриховые линии показывают очаги Камчатского землетрясения 1952г., землетрясений 1923г. и Кроноцкого землетрясения 1997г. Распределение смещений в очаге Кроноцкого землетрясения [84] показано черными линиями. Зоны предполагаемых максимальных смещений в очаге Камчатского землетрясения показаны красными квадратами [82]

Лишь две из предполагаемых областей повышенного сцепления, A5 и A7, не выделяются в известных работах по данным о цунами или GPS-наблюдений, по-видимому, из-за недостатка данных. Однако, эти области могут быть ассоциированы с

очагами цунамигенных землетрясений, характеризующихся значительными подвижками. Значительные подвижки при землетрясениях, в свою очередь, характерны областям повышенного сцепления, которые сохраняют свое положение в течение длительного времени. Таким образом, разработанная методика может использоваться для выявления участков сцепления блоков океанической и континентальной коры в зонах субдукции в отсутствие или при неполноте прямых измерений деформаций по данным спутниковой геодезии и палео- исследований цунами, либо в дополнение к ним. В конечном итоге, это будет способствовать более точным расчетам сейсмической и цунами- опасности. По результатам исследований опубликована статья [56, Приложение А] и сделаны доклады [58, 69, Приложение Б].

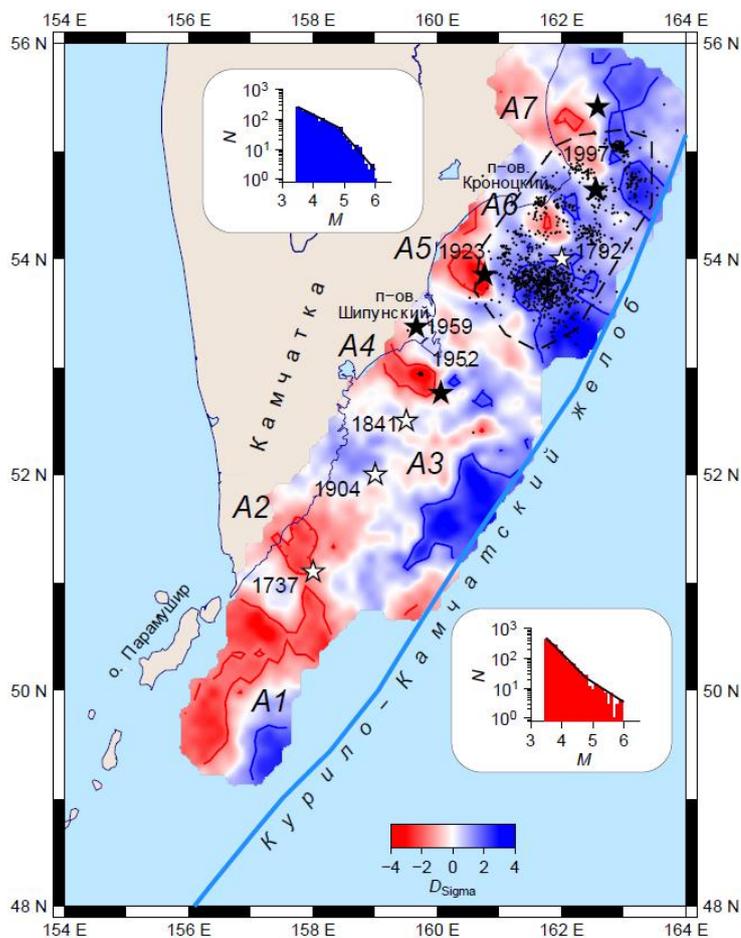


Рисунок 65 – Вариации формы графика повторяемости для полного каталога. Штриховая линия очерчивает афтершоковую зону Кроноцкого землетрясения 1997г. Черные точки – афтершоки за первую неделю ($M \geq 3.5$). Остальные обозначения как на рисунке 10

3.5 Моделирование сейсмичности с помощью модели блоковой динамики

Динамика литосферных плит, приводящая к локализации тектонических напряжений и их высвобождению при сильных землетрясениях, дает важную информацию для оценки сейсмической опасности. Численное моделирование динамики и

моделирование землетрясений изменили наши представления о возникновении сильных землетрясений в системе крупных региональных разломов и о времени повторения землетрясений. В рамках темы проведено обобщение работ по моделированию динамики литосферных блоков и разломов (BAFD), которые позволили лучше понять, как блоки реагируют на движение плит, как локализуются и высвобождаются напряжения при землетрясениях, как реологические свойства разломов зоны оказывают влияние на динамику землетрясений, где происходят крупные сейсмические события и какова периодичность этих событий. Это исследование опубликовано в журнале *Surveys in Geophysics* [28, Приложение A]. В работе определено несколько ключевых факторов, влияющих на последовательность землетрясений, кластеризацию и магнитуду, включая движущие силы литосферной плиты, геометрию зон разломов и их физические свойства. На нескольких примерах проиллюстрировано влияние ключевых факторов, проанализированы модели динамики блоков и разломов, примененные к нескольким сейсмоопасным регионам, таким как Карпаты, Кавказ, Тибет-Гималаи и Зондская дуга, а также к глобальной динамике тектонических плит. На Рисунке 66 показан пример модели BAFD для Закавказья.

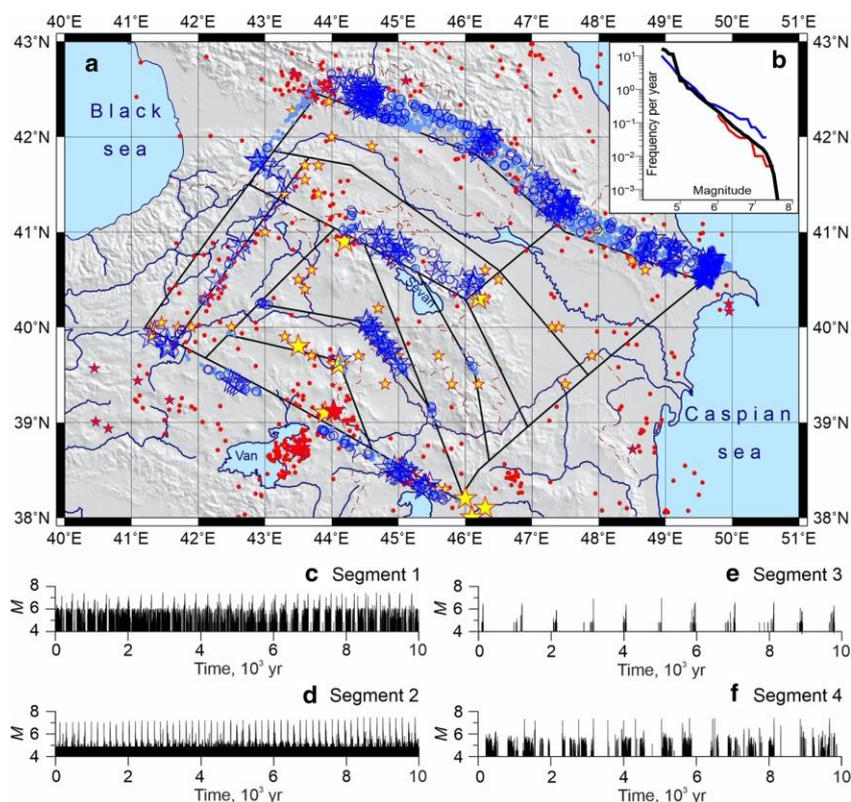


Рисунок 66 – Модель BAFD Закавказского региона

(а) Карта представляет блочную модель (коричневые линии). Инструментально зарегистрированные землетрясения отмечены красными точками (магнитудой $M_{4,5+}$), малыми красными звездами (M_{6+}) и большими красными звездами (M_{7+}) (каталог ANSS за период 1974–2017 гг.). Исторические сильные землетрясения, а также инструментально

зарегистрированная сейсмичность за период с 1000 г. по 1973 г. отмечены маленькими желтыми звездами ($M6+$) и большими желтыми звездами ($M7+$) [42]. Синтетическая сейсмичность ($M>6$), наложенная на карту наблюдаемой сейсмичности: голубые звезды — события магнитудой $M7+$, синие кружки — события $M6,5+$, голубые точки — события $M6+$.

(b; вставлено в панель а) Зависимость частоты от магнитуды землетрясений: синяя кривая представляет данные из каталога землетрясений ANSS; красная пунктирная кривая — данные каталога с 1800 г., $M\geq 6,0$; жирная черная кривая соответствует синтетическим событиям. На нижних панелях представлены синтетические времена и магнитуды землетрясений для трех сегментов разломов, где (c) произошло Рачинское землетрясение 1991 г., (d) Шамахинское землетрясение 1902 г. и (e) Спитакское землетрясение 1988 г., а также (f) Нахичеванский разлом.

Результаты моделирования показали, что синтетические сильные землетрясения хорошо имитируют региональную сейсмичность (рисунок бба); наклон графика повторяемости магнитуды для синтетических событий показал хорошее соответствие с графиком для наблюдаемой региональной сейсмичности в диапазоне магнитуд от 5 до 7,5 (рисунок ббб); а механизмы очагов синтетической сейсмичности подтвердили региональную картину напряженного состояния. Модель BAFD предсказывает землетрясения с магнитудой $M7+$ на участке 4, связанном с Нахичеванским разломом (рисунок ббф), где среднее время повторения сильных синтетических сейсмических событий оценивается примерно в 700 лет. Возникновение сильных землетрясений достаточно периодически на участках разломов 1, 2 и 3, но нерегулярно на участке 4, что является примером нелинейной сложной динамики блоково-разломной структуры. Из результатов проведенного исследования также следует, что Нахичеванский разлом может представлять серьезную опасность для Еревана, столицы Армении, и города Нахичевани в Азербайджане.

Еще один вывод работы состоит в том, что оптимизация несоответствия между наблюдаемыми и смоделированными подвижками разломов путем настройки реологических параметров моделей разломов может помочь в прогнозировании будущей сейсмичности в пределах естественных литосферных блоково-разломных структур. При этом необходимо учитывать, что временной интервал между последовательными крупными сейсмическими событиями может существенно различаться как в модельной, так и в естественной сейсмичности. Следовательно, при оценке сейсмической опасности время повторения следует использовать с осторожностью, учитывая его вариации.

Хотя общий подход к оценке сейсмической опасности основан на знании зарегистрированных и некоторых исторических данных за несколько сотен лет, такой анализ влечет за собой неспособность оценить опасность экстремальных сейсмических событий, которые случаются редко (и, следовательно, не регистрируются), но их

последствия огромны. Моделирование землетрясений может стать надежным источником информации об экстремальных явлениях в сети региональных разломов и улучшить оценку сейсмической опасности. Все это потребует постоянного совершенствования моделирования и прогнозирования землетрясений по модели VAFD, а также оценок сейсмической опасности.

3.6 Дефицит сильных афтершоков как индикатор афтерслипа в очагах землетрясений зон субдукции

Пост-сейсмические процессы могут проявляться как в повторных толчках (афтершоках), так и в асейсмических деформациях [93-94], при этом рядом исследователей было показано, что афтершоки ответственны за очень малую часть пост-сейсмических деформаций, не более нескольких процентов [85]. Движущими механизмами пост-сейсмической деформации являются вязкоупругая релаксация в коре и верхней мантии Земли, и пост-сейсмическое проскальзывание (афтерслип), отражающее фрикционные свойства интерфейса тектонических плит в очаговой зоне сильного землетрясения [95-97]. В работе, выполненной совместно сотрудниками ИТПЗ РАН в рамках данной темы государственного задания и ИФЗ РАН при поддержке Мегагранта Министерства науки и высшего образования РФ №14.W03.31.0033 и опубликованной в журнале Доклады Академии наук [31, Приложение А], используется статистический анализ распределения магнитуд афтершоков. В работах [56, приложение А] и [87] была доказана связь распределений магнитуд с типом деформаций и сейсмическим сцеплением, в частности, показано, что значительное асейсмическое проскальзывание (крип) вызывает дефицит сильных событий и приводит к загибу графика повторяемости. В исследовании на примере трех сильных землетрясений в зонах субдукции было показано (рисунок 67), что имеется дефицит сильных афтершоков внутри зоны субдукции на начальной постсейсмической стадии, что говорит об определяющей роли афтерслипа на этой стадии. Характерная форма графика повторяемости ранних афтершоков свидетельствует о значительном асейсмическом проскальзывании, что может дополнительно увеличить вклад афтерслипа в наблюдаемые ранние пост-сейсмические движения. Медленные объемные деформации земной коры под воздействием вязко-упругой релаксации, по-видимому, имеют существенное значение на поздних стадиях пост-сейсмического процесса.

Полученный результат имеет существенное значение, в частности, для более точного прогнозирования активности афтершоков после сильных землетрясений и для моделирования сейсмичности в целом.

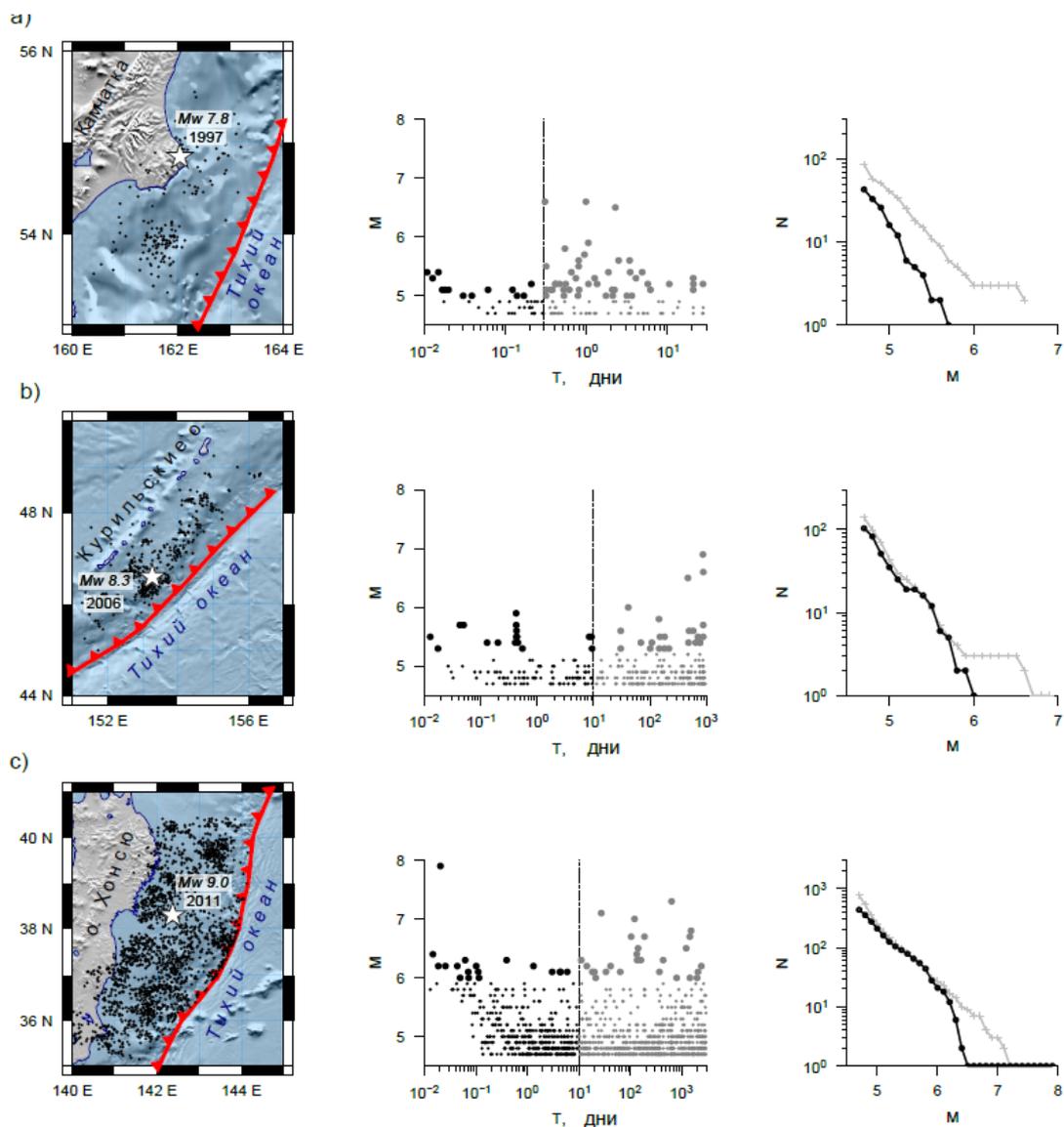


Рисунок 67 – Афтершоки трех сильных землетрясений (ANSS, $M \geq 4.7$).

А) Кроноцкое, Камчатка 1997, $M_w=7.8$; В) Симуширское, Курильские острова 2006, $M_w=8.3$; С) Тохоку, Япония 2011, $M_w=9.0$.

Карты афтершоков в слабе, временная последовательность магнитуд афтершоков и графики повторяемости ранних (черная линия, точки) и поздних (серая линия, +) афтершоков. Ранние и поздние афтершоки отделены штриховыми линиями

3.7 Мультимасштабный анализ нового каталога землетрясений Малой Антильской дуги

В рамках многолетнего сотрудничества ИТПЗ РАН с Парижским Институтом физики Земли (IPGP) был проведен мультимасштабный анализ полноты нового каталога землетрясений Малой Антильской дуги. Результаты опубликованы в журнале *Comptes Rendus – Geoscience* [33, Приложение А]. Мультимасштабный метод картирования пространственных вариаций магнитуды полной регистрации M_c основан на адаптации размера исследуемой зоны к диапазону магнитуд рассматриваемых событий [89]. С увеличением магнитуды производится увеличение области выборки данных на основе

эмпирических отношений, принятых в сейсмотектонике [98]. Затем для каждой точки в пространстве, анализируются графики повторяемости во всех пространственных масштабах в соответствующих диапазонах магнитуды. Высокая разрешающая способность достигается за счет определения минимального пространственного масштаба, в котором распределение землетрясений подчиняются закону Гутенберга-Рихтера. Таким образом, мультимасштабный метод автоматически определяет необходимую зону выборки событий в соответствии с локальным уровнем регистрации. Метод эффективен в регионах со смешанным типом сейсмичности (например, тектоническая и вулканическая), переменной плотностью эпицентров и значительными вариациями уровня регистрации. Кроме того, мультимасштабный анализ является эффективным инструментом для исследования качества каталогов землетрясений. Благодаря высокой разрешающей способности метод способен идентифицировать разрывы в уровне регистрации и потенциальные артефакты сейсмических каталогов. Метод был использован для тестирования нового объединенного каталога землетрясений Малой Антильской дуги. В процессе создания каталога был выявлен ряд ошибок в обработке сейсмических записей, что позволило улучшить качество итогового каталога. Анализ представительной магнитуды нового каталога (рисунок 68) показывает заметное улучшение по сравнению с рутинными каталогами сейсмических обсерваторий Мартиники и Гваделупы.

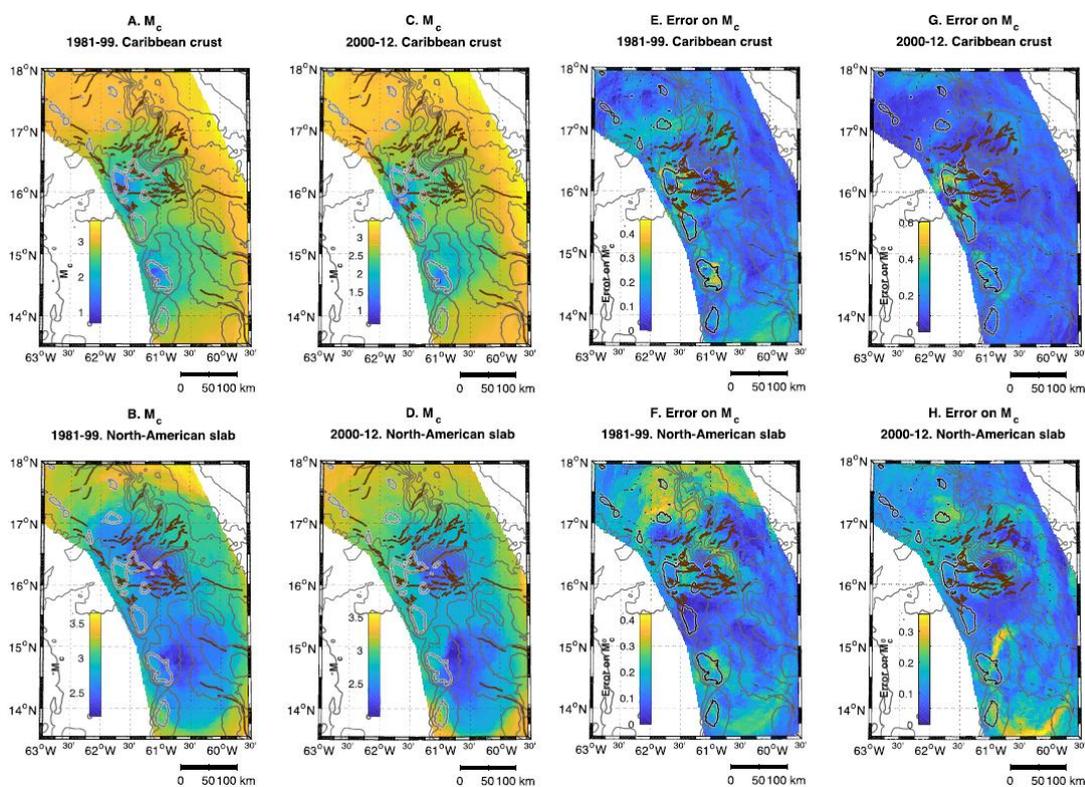


Рисунок 68 – Магнитуда полной регистрации M_c , (A–D) и ее погрешности (E–H) за два периода времени для коровых землетрясений Карибской плиты и субдукционных землетрясений в зоне субдукции.

3.8 Техногенная сейсмичность

Техногенная сейсмичность в регионах добычи полезных ископаемых является ответом земной коры на операции гидроразрыва пласта и последующей закачки отработанной жидкости на глубину. Землетрясения возникают вследствие повышения порового давления, а также перераспределения напряжений в земной коре.

Показано, что в Оклахоме, где резкое возрастание сейсмичности коррелирует с объемом операций нефтедобычи, график повторяемости существенно зависит от объема закачки (рисунок 69). Наклон графика повторяемости слабой сейсмичности $M < 3.5$ почти постоянен, тогда как более сильные землетрясения показывают значительные вариации наклона (от $b \approx 1$ до $b > 2$), и эти вариации сильно коррелированы с объемом закачиваемой жидкости (рисунок 70). Кроме того, сильнейшие наведенные события происходят на границе сейсмически активной территории, на расстоянии 15-20 км от областей интенсивной закачки. Эти наблюдения показывают, что дефицит сильных землетрясений в пространственно-временных областях максимальных объемов закачки может сопровождаться повышением уровня сейсмичности на окружающих разломах земной коры, где возникновение сильных триггерных землетрясений более вероятно.

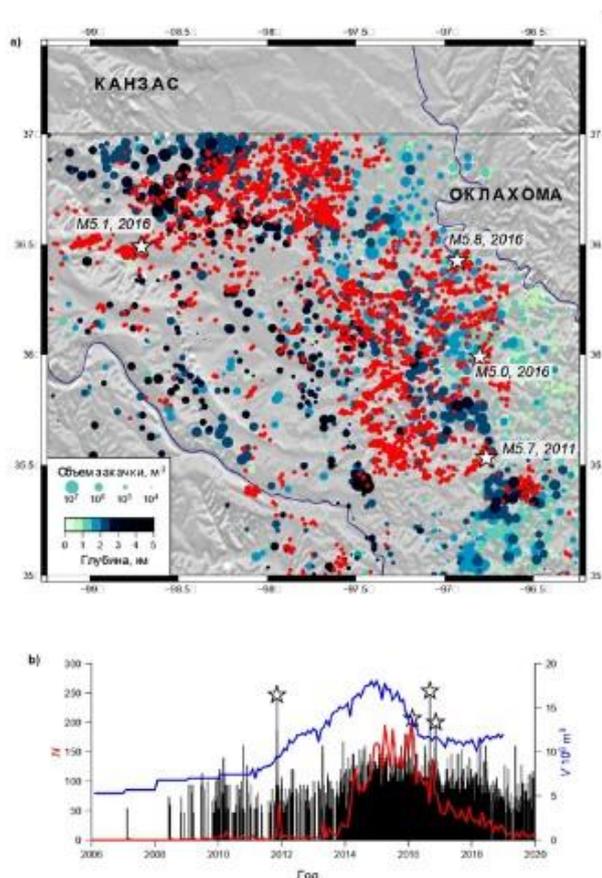


Рисунок 69 – Сейсмичность и закачка жидкости в Оклахоме.

(а) – Карта землетрясений и скважин закачки: землетрясения с магнитудой $M \geq 2.7$ каталог ANSS, 2006-2019 (красные точки); объемы закачки и глубина скважин 2006-2018

(b) – Последовательность землетрясений во времени (черные линии), месячное число землетрясений с магнитудой $M \geq 2.7$ (красная линия) и месячный объем закачки (синяя линия). Землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$ отмечены звездочками

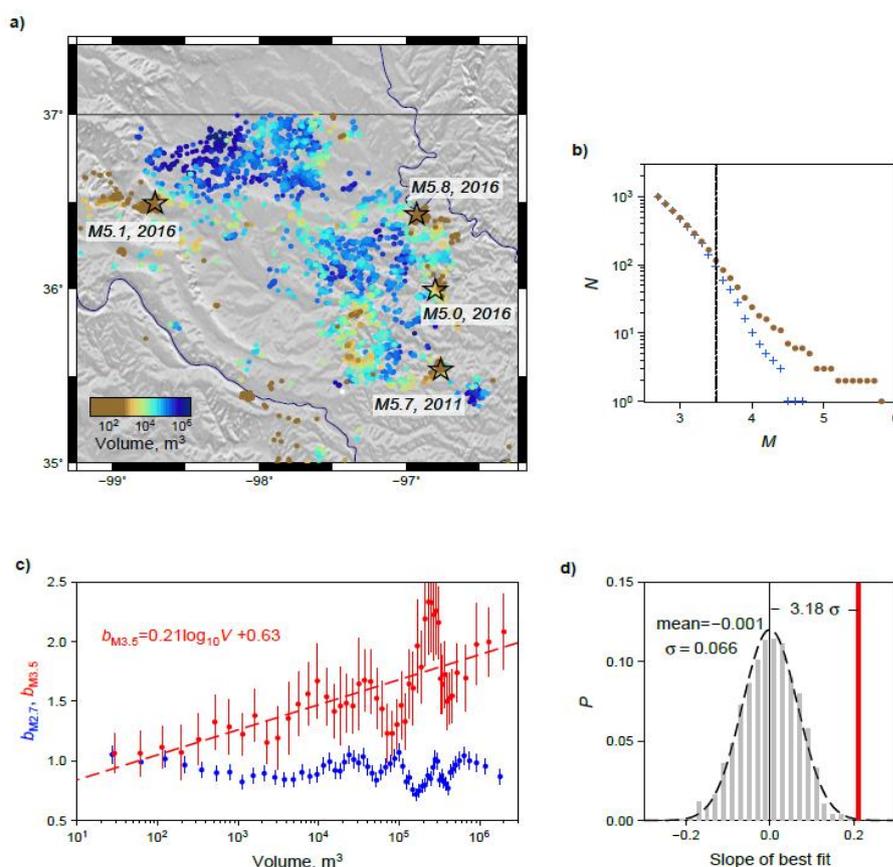


Рисунок 70 – Изменения распределения землетрясений по магнитуде в зависимости от интенсивности закачки: **(a)** – карта землетрясений с магнитудой $M \geq 2.7$, классифицированных по объему влияния; **(b)** – графики повторяемости для 1000 событий с минимальным (точки) и максимальным (+) объемом влияния; **(c)** – изменение наклонов графика повторяемости $b_{M3.5}$, $b_{M2.7}$ в двух магнитудных интервалах $[2.7;3.4]$ (синий) и $[3.5;M_{\max}]$ (красный) с ростом объема закачивания V_E . Погрешность – одно стандартное отклонение, оцененное методом Монте-Карло. Красная штриховая линия – наилучшее линейное приближение зависимости $b_{M3.5}$ от $\log_{10} V_E$; **(d)** – распределение случайного тренда для 1000 полу-синтетических каталогов, наблюдаемый тренд показан красной линией

Полученные результаты опубликованы в статье [51, Приложение А].

Вопросы возникновения вызванной сейсмичности в ранее слабосейсмичных или асейсмичных районах после заполнения водохранилищ, при интенсивной добыче нефти и газа, закачках воды и газа обсуждаются в докладах [16, 17, Приложение Б].

Совместно с ФИЦ ЕГС РАН исследована сейсмичность на апатитовых месторождениях Хибинского массива на основе данных многолетнего сейсмического мониторинга, проводимого Кировским филиалом АО «Апатит». Установлено, что затухание поствзрывной сейсмичности происходит быстрее, чем затухание постсейсмической активности по мере удаления от события-триггера. Практическая

значимость исследования определяется тем, что после взрыва часто возникают повторные сейсмические события, представляющие самостоятельную опасность, поскольку элементы горных выработок, получившие скрытые повреждения в результате основного толчка, могут быть разрушены серией менее сильных афтершоков. Результаты представлены в [12, Приложение А], [2, Приложение Б].

3.9 Глубокие землетрясения

Согласно широко известному парадоксу сейсмичности, землетрясения по механизму обычного хрупкого разрушения не могут возникать на глубинах более нескольких десятков километров. Для объяснения более глубоких землетрясений ранее было предложено несколько моделей. Эти модели, однако, не были убедительно подкреплены данными об изменении с глубиной параметров очагов землетрясений. В

В работе [7, Приложение А] даны примеры прекращения сейсмичности глубже 30-50 км, несмотря на несомненное продолжение аналогичных сдвиговых смещений и на больших глубинах. Также даны примеры устойчивой (на масштабе сотни лет) приуроченности глубоких землетрясений в ряде зон субдукции к достаточно узким интервалам глубины, что может соответствовать связи этих землетрясений с зонами фазовых (метаморфических) превращений, варьирующих по глубине в разных зонах субдукции. По мировым данным показано существенное различие ряда осредненных очаговых параметров землетрясений с глубиной. В частности, для области развития среднеглубоких землетрясений (примерно от 20-30 до 60-100 км), обусловленных выделением в ходе реакций дегидратации флюида, выявлена тенденция развития процесса испарывания в очагах землетрясений вверх, как это и следовало ожидать в связи с прорывом вверх флюида низкой плотности. Для землетрясений с глубинами вне этого интервала глубин устойчиво доминирует тенденция развития процесса испарывания в глубину, в область более высоких температур. Выявлена тенденция роста характерных величин кажущихся напряжений σ_a на глубинах вблизи 10-12, 40-50 и в районе 100 км. Еще один слабый максимум намечается вблизи 600 км. Первый максимум отвечает положению нижней границы области развития квазигидростатических давлений подземных вод и глубине «слоя отделителя» по С.Н.Иванову. Второй максимум на глубинах 40-50 км отвечает нижней границе возможности реализации землетрясений по механизму хрупкого разрушения. Третий максимум в окрестности 100 км близок к глубине границы между области преимущественной реализации землетрясений по модели гидроразрыва и по механизму фазовых превращений. Последний максимум на глубинах около 600 км отвечает области резкого уменьшения сейсмичности, полностью

прекращающейся в районе 700 км. Тем самым убедительно продемонстрировано различие (ранее только теоретически предполагавшееся) физических механизмов реализации разноглубинных землетрясений (рисунок 71).

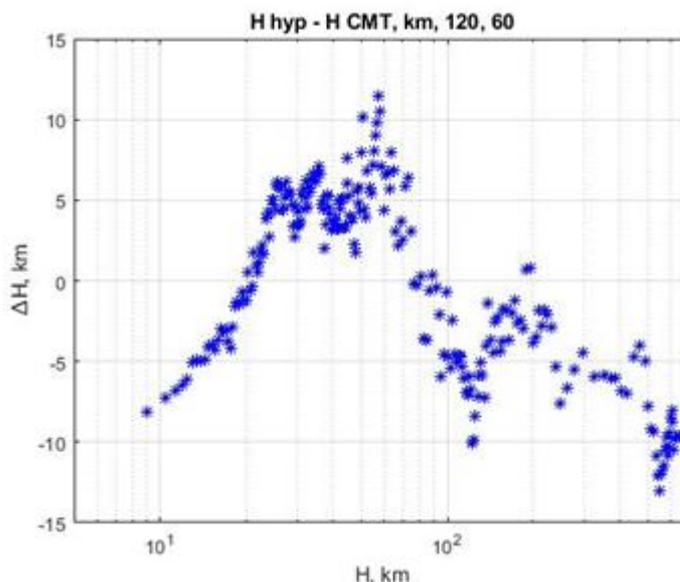


Рисунок 71 – Пример различия физических свойств разноглубинных землетрясений. Средние значения разницы глубин землетрясений по данным о положении гипоцентра и по решению сейсмического момента. Даны средние значения для групп из 120 последовательных по глубине событий с шагом 60 событий. Для землетрясений в интервале глубин 20-80 км хорошо видно преимущественное развития очагового процесса вверх; в других интервалах глубины землетрясения преимущественно развиваются вниз, в область больших температур.

Различие физических механизмов землетрясений предполагает возможное различие характера их предвестников. Такое различие было выявлено. По часовым данным станции вертикального зондирования ионосферы «Токио» за 1957-2020 гг. показано различие среднего сейсмоионосферного отклика для разноглубинных землетрясений (по данным о более 300 событий в районе станции) с разным доминирующим механизмом сейсмогенеза. Продемонстрирован статистически надежный различный характер ионосферного отклика на землетрясения с глубинами меньше и более 60 км, а также заметное различие сейсмоионосферного отклика для событий с глубинами до 35 км и от 35 до 60 км. Наиболее сильно выражена отрицательная аномалия foF2 для событий с глубиной очага от 35 до 60 км. Средняя амплитуда вариаций критической частоты foF2, необходимая для обеспечения возникновения наблюдаемых аномалий, составляет примерно 2-3% (рисунок 72).

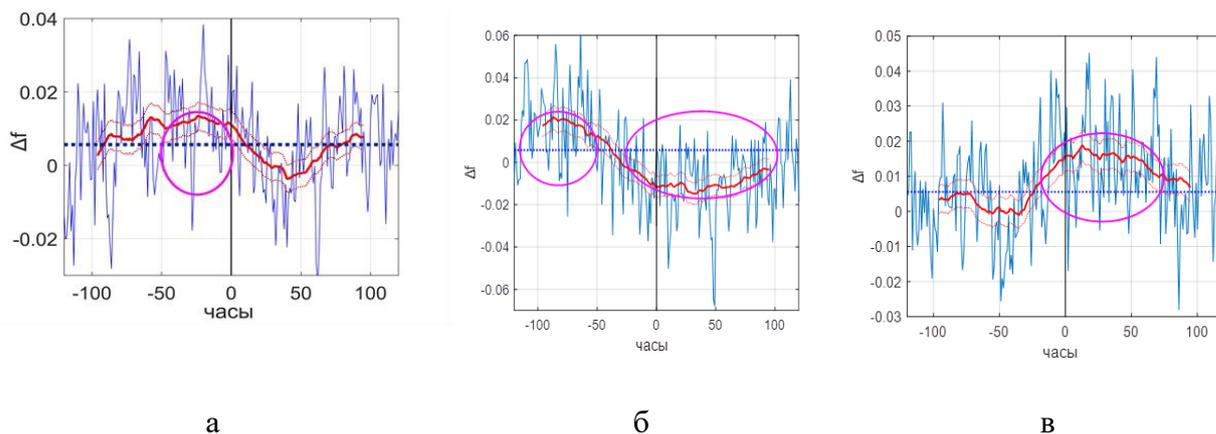


Рисунок 72 – Характер отклонения сглаженного значения Δf foF2 от среднего фонового для событий с глубиной $H < 35$ км (а), $35 \leq H \leq 60$ км (б), $H > 60$ км (в). Момент землетрясения $t=0$ показан черной линией; усредненные значения Δf для каждого часа (голубая штриховая линия); сглаженные по 3 суткам часовые значения для времени землетрясений и разброс в 2 среднеквадратичные отклонения (жирная красная линия и пунктиры). Значимые на уровне свыше 99% отклонения отмечены овалами. По оси x – отклонения по времени от момента среднего события ($t=0$), часы

Сейсмоионосферные аномалии, полученные с учетом возможного различия сейсмоионосферного эффекта разноглубинных землетрясений, статистически более значимы. В случае объединения разноглубинных аномалий статистическая значимость осредненной аномалии становится дискуссионной (что ранее отмечалось многими авторами). Заметим также, что различие средних значений параметров разноглубинных землетрясений и их сейсмоионосферного эффекта позволяет, в перспективе, подойти к прогнозу также и глубины ожидаемого землетрясения, что не предусматривается существующими алгоритмами прогноза землетрясений, предполагающими указание места, времени и силы события, но не его глубины. Результаты представлены в публикациях [7, 9, 10, Приложение А] и [18, Приложение Б].

3.10 Лунно-солнечные приливы и сейсмичность

В геодинатике роль земных приливов может иметь большое значение для понимания пространственно-временных характеристик сейсмического потока. С ростом сейсмической истории инструментальных наблюдений и расширением территории регистрации землетрясений появилась возможность статистической проверки гипотез о связи сейсмической активности с земными приливами. Наличие дополнительного касательного напряжения в астеносфере, вызванного лунными или солнечными приливами, может способствовать возникновению землетрясений. Вероятно, при учете влияния приливных сил можно рассматривать ослабление эффективного трения между литосферой и мантией [99, 100]. Горизонтальная составляющая твердого прилива поляризована из-за смещения внутренней структуры Земли, которая может обеспечить

достаточный сдвиг литосферы. Вертикальная составляющая генерирует колебания статической нагрузки литосферы, которые могут вызвать землетрясения при разломах в критическом состоянии. Отметим, что влияние лунно-солнечных приливов на процессы в иерархической системе разломов и блоков литосферы зависит от конкретной тектонической обстановки в регионе. Изучение вариаций параметров земных приливов в масштабах региона представляется актуальной задачей современной сейсмологии.

В работе [55, Приложение А] при глобальном рассмотрении всех сильнейших землетрясений с $M \geq 8.0$ и $M \geq 7.5$ за 1900–2018 годы сделан вывод о том, что статистика этих событий не позволяет отвергнуть нулевые гипотезы об их случайном возникновении в любой день Солнечного (Юлианский День, JD) или Лунного (фаза Луны, MP) циклов. Однако для сильных событий с магнитудой $M \geq 6.0$, произошедших в Северном полушарии за последние 40 лет, непараметрический тест Кёйпера позволяет отвергнуть эти нулевые гипотезы с вероятностями 98% и 99% соответственно.

Статистика критерия Кёйпера [101, 102], κ , не предполагает специальный класс распределений, чувствительна к различиям в форме функций распределения и инвариантна относительно циклических преобразований, что делает этот критерий особенно ценным, если наблюдения являются точками на окружности. Рассмотрим эмпирическую кумулятивную функцию распределения $F_n(x)$ для n независимых одинаково распределенных наблюдений X_i , определенных как $F_n(x) = \{\text{число } X_i \leq x\}/n$. Двухвыборочный тест Кёйпера оценивает несоответствие двух распределений, учитывая разницу $V = D^+ - D^-$ между обеими статистиками расхождений $D^+ = \max(F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x))$ и $D^- = \min(F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x))$ в определении $\kappa(D, n, m) = [nm/(n+m)]^{1/2}V$. Асимптотически, когда n и $m \rightarrow \infty$, совокупное распределение вероятностей сходится к вероятности $P_{\text{rob}}(\kappa \leq x) = 1 - 2 \sum_{k=1}^{\infty} (4k^2 x^2 - 1) \exp(-2k^2 x^2)$.

Когда вероятность превышения достигнутого значения статистики меньше, чем α , нулевая гипотеза отвергается на уровне значимости α . С точки зрения уровня достоверности $1-\alpha$ нулевая гипотеза отклоняется, если $P_{\text{rob}}(\kappa \leq x) > 1-\alpha$.

Непараметрическая статистика критерия Кёйпера для циклических вариаций применена к сейсмическим данным Прибайкалья, которые ежегодно пополняются и доступны на сайте Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<http://seis-bykl.ru>). А именно, эмпирические распределения времен возникновения землетрясения в диапазонах магнитуд $M \geq 4.5$, $M \geq 4$, $M \geq 3.5$, $M \geq 2.8$, зарегистрированных региональной сетью Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН в периоды (1) 01.01.1982 – 31.12.1997 и (2) 01.01.1994 – 31.12.2018 в наиболее сейсмически активной части региона $51-57^\circ$ с.ш. $99-122^\circ$ в.д. рассмотрены относительно Лунного и Солнечного циклов. Оба временных

интервала полны для землетрясений с энергетическим классом $K \geq 9$, что соответствует магнитуде $M \geq 2.8$.

В таблице 14 представлены результаты теста Кёйпера, полученные для четырех магнитудных интервалов двух каталогов на рассматриваемой территории. Для временного интервала 1982–1997 гг. и всех магнитудных диапазонов значения теста не позволяют отвергнуть нулевую гипотезу как для МР так и для JD. Для временного интервала 1994–2018 гг. распределения событий с $M \geq 2.8$ для МР и JD позволяют с уверенностью отвергнуть гипотезу случайного возникновения сейсмических событий в периоды Лунного и Солнечного циклов. Это утверждение сохраняется на сокращенной выборке для $M \geq 3.5$ для МР и JD, а в случае JD и для $M \geq 4.0$, тогда как для МР отрицание нулевой гипотезы становится достоверным лишь на уровне 92%.

Таблица 14 – Значения теста Кёйпера для сейсмичности Прибайкалья в области 51-57° с.ш. 99-122° в.д.

| Данные | | | МР | | | JD | | |
|------------------|------------|------|-------|---------------------------------------|----------|-------|---------------------------------------|----------|
| Интервал времени | M | N | V_N | $\kappa(\alpha) = V_N \times N^{1/2}$ | α | V_N | $\kappa(\alpha) = V_N \times N^{1/2}$ | α |
| 1982–1997 | ≥ 2.8 | 1394 | 0.05 | 1.69 | 0.07 | 0.04 | 1.32 | 0.35 |
| | ≥ 3.5 | 292 | 0.07 | 1.12 | 0.64 | 0.07 | 1.13 | 0.63 |
| | ≥ 4.0 | 99 | 0.11 | 1.11 | 0.78 | 0.09 | 0.93 | 0.90 |
| | ≥ 4.5 | 35 | 0.16 | 0.91 | 0.91 | 0.22 | 1.27 | 0.49 |
| 1994–2018 | ≥ 2.8 | 3634 | 0.07 | 3.93 | <0.01 | 0.08 | 4.90 | <0.01 |
| | ≥ 3.5 | 830 | 0.07 | 2.04 | 0.01 | 0.12 | 3.49 | <0.01 |
| | ≥ 4.0 | 296 | 0.10 | 1.64 | 0.08 | 0.14 | 2.47 | <0.01 |
| | ≥ 4.5 | 101 | 0.10 | 1.04 | 0.86 | 0.19 | 1.85 | 0.04 |

Число среднегодовых зарегистрированных сейсмических событий для двух рассмотренных временных интервалов в 15 лет и 24 года имеет соотношение примерно в 1.5 раза. Улучшение регистрации за последние годы, а также изменения в параметрах сейсмической сети Прибайкалья в начале 90-х годов XX века может служить возможным объяснением отсутствия выраженных признаков влияния лунных или солнечных приливов для временного интервала 1982–1997. Отметим, что величина расхождения функций распределения (статистика V_N) сопоставима для соответственных магнитудных диапазонов из двух временных интервалов, однако, для более короткого интервала времени размер выборки землетрясений по-видимому оказался недостаточным для утверждения о статистической значимости отличия от случайных, равномерных распределений по лунным и солнечным циклам. По полученным результатам сделан доклад [63, Приложение Б].

3.11 Вулканическая активность

Вулканическая активность является результатом сложного взаимодействия внутренних и внешних процессов, временные рамки которого охватывают несколько порядков. Предполагая глобальную перспективу взаимодействия и более длительные, чем несколько лет, временные масштабы и анализируя временные ряды с использованием сингулярного спектрального анализа делается вывод о том, что количество извержений вулканов Земли (NVE) между 1700 и 2022 годами, количество солнечных пятен (ISSN), а также движение полюсов (PM) и продолжительность дня (lod) имеют синхронизированные псевдопериодичности. Некоторые псевдопериодичности являются общими для NVE и ISSN, в дополнение к 11-летнему циклу Шваба, причем NVE разделяет еще больше периодичностей с PM в диапазоне от ~5 до ~130 лет. Аналитические результаты работы интерпретируются в свете парадигмы Лапласа и гипотезы о том, что, подобно движению оси вращения Земли, глобальная эруптивная активность модулируется соизмеримыми орбитальными моментами планет-гигантов, включая Плутон, влияние которого также обнаруживается в вариациях солнечной активности. Результаты представлены в статье [6, Приложение А].

3.12 Сейсмичность и геодинамика

Для понимания закономерностей сейсмичности региона, расположенного к востоку от геораздела 102-104° в.д. выполнено детальное исследование блокового строения региона и проведен анализ сейсмичности блоков и межблоковых зон, а также самого геораздела. Осуществлен сбор детальных данных по распределению значений теплового потока и установление направленности их изменения. Построены графики диссипации сейсмической энергии по данным каталога землетрясений NEIC2018 и глубинных сейсмических разрезов по данным каталога CMT2018 вдоль серии трансектов, пересекающих геораздел, блоки и межблоковые зоны к востоку от него. В результате уточнены блоковое строения и данные по сейсмоактивным разломам восточной части рассматриваемого региона (блоки Ордос, Тайханг-Шан и западные части Амурского блока, Северного Китая и Юго-Восточного Китая). Собраны данные по строению и роли в структуре региона восточного крыла геораздела 102-104° в. д., в том числе на границе между тибетскими блоками и блоком Юго-Восточного Китая. На основе анализа сейсмичности блоков и межблоковых зон, а также геораздела 102-104° в.д. определены объемы высвобождающейся сейсмической энергии. Построены сейсмические разрезы и графики диссипации сейсмической энергии вдоль пяти трансектов, пересекающих геораздел, блоки и межблоковые зоны к востоку от него, отличающиеся высоким уровнем

высвобождения сейсмической энергии, и установлены участки повышенной сейсмичности. Собраны детальные данные по распределению значений теплового потока к востоку от геораздела и установлены направления их изменения. Получены предварительные оценки связи современной геодинамики и сейсмичности восточного крыла геораздела с мобильностью блоков, геофизическими полями и глубинным строением литосферы, в том числе к западу от тихоокеанских зон субдукции, а также погруженным под азиатский континент слэбом. Выделены и рассмотрены 5 зон возможного образования землетрясений в частях региона на восточном крыле геораздела, характеризующихся наиболее высоким уровнем сейсмичности. Установлено принципиальное различие Центральноазиатской и Восточно-Азиатской транзитных зон, которое состоит в интенсивности сейсмичности, увеличивающейся к западу от геораздела 102-104° и уменьшающейся к востоку от него; в изменении в противоположном направлении интенсивности теплового потока (ТП); в неравномерном изменении замедления *S*-волн в литосферной и подлитосферной мантии в Восточно-Азиатской и на севере Центральноазиатской зон (рисунок 73). Это различие связано с влиянием давления Индостанского индентора на западе и с прослеживающимся по данным томографии неравномерном продолжении Тихоокеанского слэба в подлитосферной мантии на востоке, а также на севере Центральноазиатской зоны. Косвенными доказательствами продолжения, стагнации и постепенного распада слэба на глубине на значительном расстоянии от активной окраины являются сходство мантийной и нижнелитосферной деляминации с хорошо изученными данными вблизи этой окраины, проявления позднекайнозойского вулканизма, процессов растяжения с формированием рифтовых бассейнов и молодых депрессий, а также развитие повышенного ТП в пределах Восточно-Азиатской транзитной зоны. Результаты представлены в [41, 54, 65, Приложение А], [55, Приложение Б].

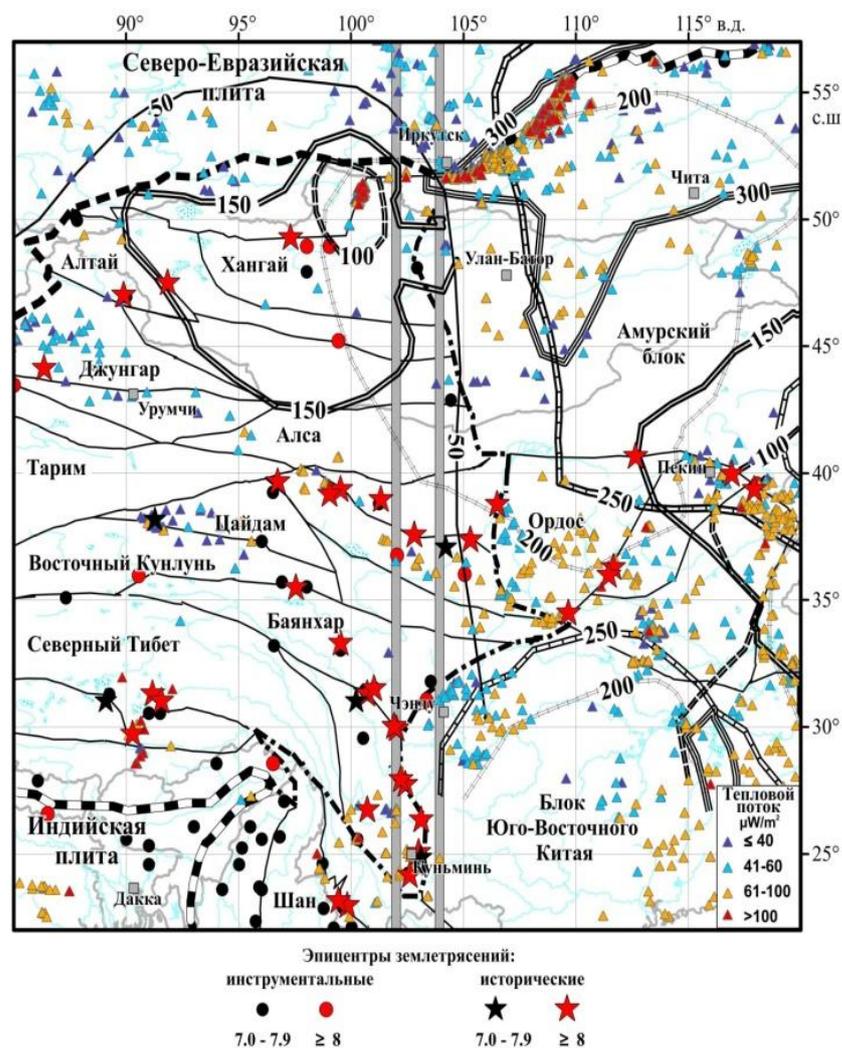


Рисунок 73 – Схема блоковой структуры Центральной Азии с границами литосферных плит, транзитных зон, блоков и геораздела. Показаны эпицентры землетрясений и данные ТП, а также проекции на поверхность Земли контуров замедления скоростей S -волн от 4.5 до 4.2 км /сек. на глубинах от 100 до 300 км.

3.13 Прогнозируемость сильнейших событий в модели Манны

Проблема прогнозируемости крупнейших дестабилизаций в больших системах, очевидно, является актуальной, как в плоскости теоретической, так и по сугубо практическим обстоятельствам. Самым явным примером этой проблемы является прогнозирование крупнейших землетрясений. Со времён первых публикаций по моделям типа куча песка [103] возникли вопросы: адекватна ли модель процессу сейсмической активности, и правда ли, что крупнейшие события в модели прогнозируемы. Впоследствии был развит целый класс родственных моделей (например, модель Манны [104]) и для них вопросы об адекватности и прогнозируемости так же изучались. Оставляя в стороне вопрос о степени адекватности модели реальной сейсмичности, сосредоточимся на прогнозируемости крупнейших событий в модели Манны, тем более ,

что существует стойкий предрассудок о непрогнозируемости моделей типа кучи песка вообще.

Модель Манны. На двумерной решётке выделяется квадрат со стороной L и рассматриваются целочисленные функции $h(i)$, эволюционирующие в целочисленном времени. Традиционно $h(i)$ называются числом песчинок в узле i . Изначально все $h(i)=0$. В каждый следующий момент времени в случайный узел решётки добавляется одна песчинка. Если число песчинок оказывается меньше чем 2, ничего другого в этот момент времени не происходит. Если же это условие нарушается, то система становится неустойчивой и начинается процесс перераспределения песчинок. Из данного узла i удаляются две песчинки и они, по одной, добавляются в случайно избранные соседние узлы. Если в каком-либо узле j $h(j)$ становится больше, то этот узел теряет устойчивость и там происходит процесс перераспределения и т.д., до перехода всех узлов в устойчивое состояние. Если неустойчивый узел находится на границе квадрата – песчинка перераспределяемая вовне квадрата теряется. Весь процесс перераспределения от начала до восстановления устойчивости в модели Манны называется лавиной (или событием). Размером лавины называется количество перераспределённых песчинок. Распределение событий по размерам является степенным, что похоже на график повторяемости землетрясений (рисунок 74). Это верно на основном множестве событий, но самые большие события встречаются достаточно редко и в степенной график не укладывается. Таким образом, речь идёт о системе с накачкой и диссипацией и графиком повторяемости, что делает систему похожей на сейсмический регион.

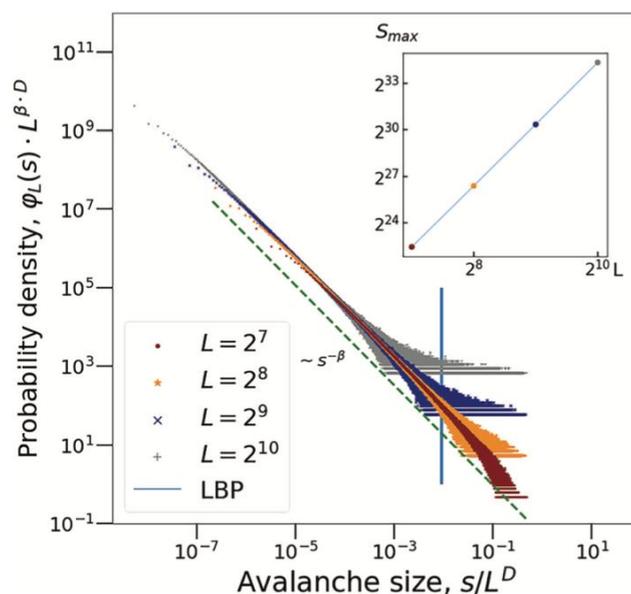


Рисунок 74 – Функция плотности вероятности размеров лавин в модели Манны. Врезка: размер лавин, произошедших в момент, когда $h(j)=1$, в зависимости от L . Вертикальной линией отмечен порог для прогнозирования лавин

В качестве прогнозного функционала рассматривается средняя по решётке высота столба песчинок в данный момент. Тревога объявляется если средняя высота превосходит некоторое значение. Получены зависимости суммарной ошибки прогноза от ренормализованного размера событий для разных размеров решётки (рисунок 75). Получено, что в широких пределах ошибка линейно падает с ростом ренормализованного размера s и практически не зависит от L . Суммарная ошибка прогноза в экспериментах падала до уровня 0.2 при достаточно больших размерах событий. Применение этого способа прогнозирования к модели [103] вместо модели Манна, даёт существенно худшие значения суммарной ошибки прогноза и порождает трудности в нормализации размеров событий для решёток с разными L . Публикация [20, Приложение А].

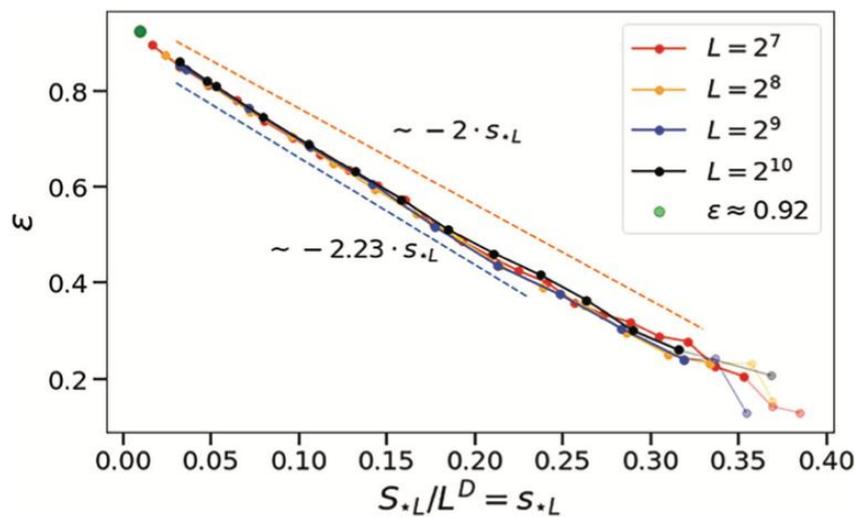


Рисунок 75 – Суммарная ошибка прогноза ϵ в модели Манна в зависимости от нормализованного размера целевых событий. – т

3.14 Неравномерность интенсивности потока землетрясений

Стационарность сейсмичности является ключевым предположением, используемым в оценках сейсмической опасности. В исследовании по данным регионального каталога неглубоких землетрясений Камчатского региона показано значительное отклонение режима основных землетрясений от стационарного Пуассоновского процесса [18, Приложение А]. Установлено, что характер отклонения одинаков для трех различных способов выделения афтершоков (рисунок 76). Величина отклонений имеет тенденцию к росту с увеличением времени усреднения. Было проведено сравнение трендов характерного пространственно-временного расстояния между землетрясениями для искусственных стационарных последовательностей независимых событий, реальных главных событий и последовательностей афтершоков. Параметры кластеров главных событий сильно отличаются от параметров последовательностей афтершоков, что, по-видимому, указывает на различие в том, как

физически возникают последовательности афтершоков и кластеры главных событий. Установлено, что характерное расстояние между последовательными землетрясениями в группах основных событий имеет тенденцию к увеличению по мере увеличения интенсивности потока событий (рисунок 77). По-видимому, эта тенденция согласуется с тем, что по мере увеличения интенсивности потока основных событий быстрее растут активность более крупных сейсмогенных структур и вероятность более крупных землетрясений. Описанная значительная нестационарность потока основных событий свидетельствует об определенной ограниченности общепринятого подхода к оценке сейсмической опасности.

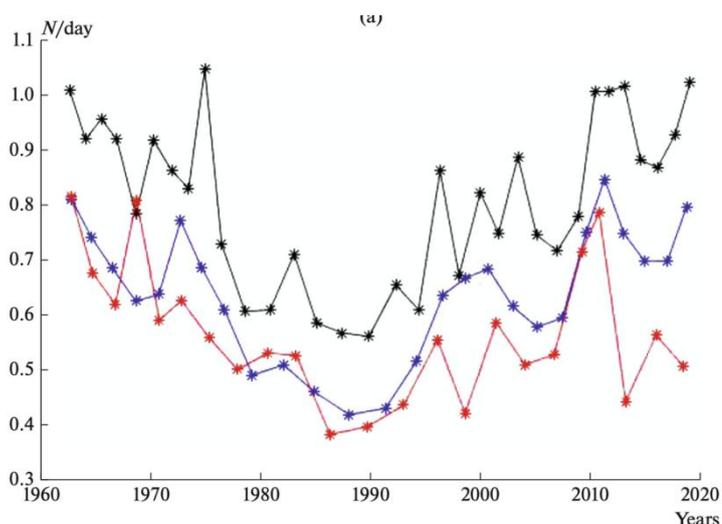


Рисунок 76 – Средняя плотность числа основных событий ($M \geq 4.0$) для последовательных во времени групп из 500 землетрясений; черные точки обозначают идентификацию афтершоков оконным методом [105], красные — алгоритмом работы [24], синие — методом работы [106]

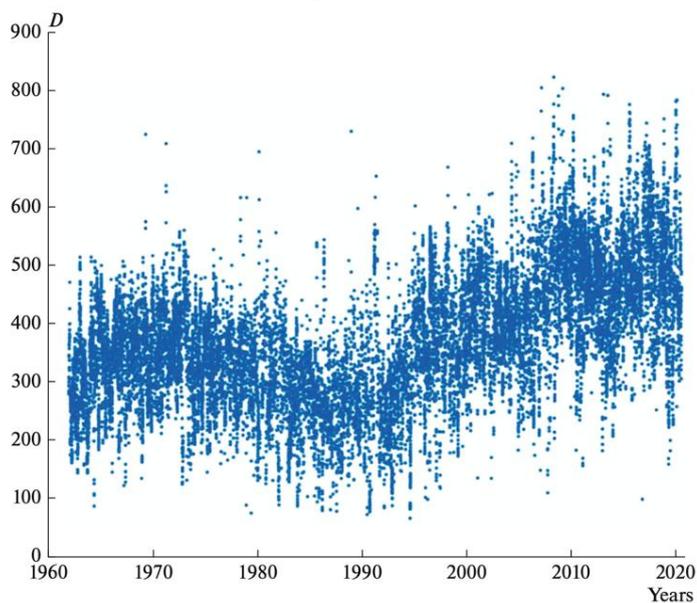


Рисунок 77 – Изменчивость среднего расстояния D между основными событиями во временных интервалах 15 дней

3.15 Пространственная кластеризация землетрясений

Проведен анализ пространственной кластеризации эпицентров сейсмических событий на северо-западе Тихого океана алгоритмом топологической фильтрации (алгоритм DPS). Получены стабильные области кластеризованных сейсмических событий не зависящие от временного интервала регистрации землетрясений. Эпицентры мелкофокусных землетрясений Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны разделены алгоритмом DPS на южный и северный кластеры, входящие в зоны сейсмичности, принятые в КФ ФИЦ ЕГС РАН. Эпицентры землетрясений промежуточной сейсмофокальной зоны не разделены алгоритмом DPS на южный и северный сегменты. Также проанализирована пространственная кластеризация сейсмических событий Байкальской Рифтовой Зоны (БРЗ). По результатам применения алгоритма DPS к эпицентрам землетрясений, зарегистрированных на территории БРЗ в течение шести непересекающихся временных интервалов в период с 1964 по 2018 г., выявлена изменчивость общего характера пространственного распределения эпицентров сейсмических событий региона. А именно, прослеживается переход выделения алгоритмом крупных структур с линейным размером порядка тысячи километров к более мелким – порядка десятков километров. Результаты доложены на конференциях [19, 20, 50, Приложение Б].

3.16 Кластеризация как один из сценариев развития нестабильности на примере землетрясения

Сценарии развития бифуркаций в разных природных системах считаются схожими. Одним из примеров развития бифуркации является случай землетрясений, пожалуй, наиболее изученный в силу его практической значимости и количества доступных данных. Однако даже в этом случае сценарий развития неустойчивости остается неясным. Для выявления типичного сценария развития сейсмической неустойчивости применен метод обследования генерализованной окрестности сильного землетрясения. Помимо форшоковых и афтершоковых каскадов были обнаружены два других типа поведения предвестников. Обнаружена временная кластеризация основных событий и умеренное увеличение фоновой сейсмичности за несколько лет до возникновения сильного землетрясения. Результаты этого исследования опубликованы в работе [17, Приложение А].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работ по теме в 2019-2023 годах рассматривался широкий круг задач по изучению и прогнозу сейсмических событий, оценке сейсмической опасности и риска, исследованию сейсмичности. Более 30 лет в режиме реального времени продолжается эксперимент по среднесрочному прогнозу землетрясений M8, с помощью алгоритма M8 определяются области, в которых сильнейшие землетрясения мира наиболее вероятны. Статистика результатов эксперимента подтверждает высокую эффективность прогнозов по алгоритму M8 и по комбинации M8 с алгоритмом MSc, уточняющим локализацию очаговой зоны ожидаемого землетрясения. В целом, результаты экспериментальной проверки алгоритмов среднесрочного прогноза являются косвенным подтверждением предсказуемости сильных землетрясений. Для более надежных и эффективных прогнозов помимо используемых в настоящее время данных каталогов землетрясений необходимо привлекать новые типы данных.

Продолжена работа по архивации и визуализации прогнозов Глобального эксперимента в системе ГИС-проектов ИТПЗ РАН, реализуемых на сайте Института (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/global-test>). Раздел Global test web-gis охватывает результаты за период с 1985 г. по настоящее время и состоит из двух проектов QGIS Desktop: «Common Access 2000-2014» и «Special Access 2015 и позже», а также набора архивных карт за 1985 г. -1999 период, сгруппированный как файлы JPEG. Доступ организован по группам пользователей и разделен в зависимости от актуальности данных.

Обобщен опыт эксперимента по заблаговременному прогнозу землетрясений в период 2003-2019 гг. в пяти регионах мира по алгоритму Reverse Tracing of Precursors (RTP), в основе которого лежит явление увеличения радиуса корреляции сейсмичности перед землетрясениями. Целью мониторинга является оценка достоверности прогнозов по алгоритму RTP и поиск способов его уточнения и повышения надежности. Результаты подтвердили эффективность алгоритма RTP.

Разработанная ранее автоматизированная информационная система оценки опасности афтершоков AFCAST, постоянно работающая в оперативном режиме, демонстрирует хорошие результаты прогноза области распространения афтершоков, максимальной магнитуды и длительности опасного периода, что подтверждает заложенные в систему AFCAST модели. В частности, получены точные прогнозы активности афтершоков после землетрясения 6 февраля 2023 года в Турции.

Разрабатываемые новые подходы к оценке сейсмической опасности, включая комбинирование вероятностного и детерминистского подходов, имеют важное значение

для сокращения ущерба от землетрясений и, соответственно, повышения защищенности общества от сейсмической опасности.

На основе Общего закона подобия для землетрясений и модели анизотропного сейсмического воздействия выполнена оценка рисков потери работоспособности объектов инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, из-за сейсмических событий максимальной макросейсмической интенсивности, ожидаемой в течение 50 лет с вероятностью 10%, 5% и 1%. Выполнено сравнение полученных оценок сейсмического риска с сейсмическим риском по данным вероятностных карт ОСР-2016.

Предложена новая методика оценки параметров сейсмичности, и на ее основе и получены оценки для регионов Байкальской рифтовой зоны и Японии. Разработка методики получения таких оценок является частью решения общей проблемы детального изучения пространственно-временной структуры сейсмичности. Полученные результаты свидетельствует об актуальности и перспективности предложенной методики для параметров сейсмической опасности. Данная методика может быть использована и в других областях физики Земли и обработки данных, где требуется построение непрерывных пространственных характеристик физических полей на основе точечных наблюдений.

Предложен новый подход для выявления зон повышенного сцепления («зацепов») в зонах субдукции. Он основан на явлении загиба графика повторяемости, связанного с дефицитом относительно сильных событий, в областях больших скоростей асейсмического проскальзывания. Рассмотрены землетрясения Камчатской зоны субдукции, сделано предположение, что в зонах субдукции участки меньшего сцепления также характеризуются дефицитом сильных событий, тогда как в зонах «зацепов» нелинейность графика повторяемости не наблюдается, или возможен некоторый относительный избыток сильных событий. Значительные подвижки при землетрясениях характерны областям повышенного сцепления, которые сохраняют свое положение в течение длительного времени. Таким образом, разработанная методика может использоваться для выявления участков сцепления блоков океанической и континентальной коры в зонах субдукции в отсутствие или при неполноте прямых измерений деформаций по данным спутниковой геодезии и палео- исследований цунами, либо в дополнение к ним. В конечном итоге, это будет способствовать более точным расчетам сейсмической и цунами- опасности.

Характерная форма графика повторяемости ранних афтершоков свидетельствует о значительном асейсмическом проскальзывании, что может дополнительно увеличить вклад афтерслипа в наблюдаемые ранние пост-сейсмические движения. Медленные

объемные деформации земной коры под воздействием вязко-упругой релаксации, по-видимому, имеют существенное значение на поздних стадиях пост-сейсмического процесса. Полученный результат имеет существенное значение, в частности, для более точного прогнозирования активности афтершоков после сильных землетрясений и для моделирования сейсмичности в целом.

Проведено обобщение работ по моделированию динамики литосферных блоков и разломов, которые позволили лучше понять, как блоки реагируют на движение плит, как локализуются и высвобождаются напряжения при землетрясениях, как реологические свойства разломов зоны оказывают влияние на динамику землетрясений, где происходят крупные сейсмические события и какова периодичность этих событий. Моделирование землетрясений может стать надежным источником информации об экстремальных явлениях в сети региональных разломов и улучшить оценку сейсмической опасности. Все это потребует постоянного совершенствования моделирования и прогнозирования землетрясений, а также оценок сейсмической опасности.

В связи с расширением работ по добыче сланцевой нефти представляет интерес изучение зависимости техногенной сейсмичности в регионах нефтеразработок от операций гидроразрыва пласта и последующей закачки отработанной жидкости на глубину. Землетрясения возникают вследствие повышения порового давления, а также перераспределения напряжений в земной коре.

По результатам выполненных исследований в период с 2019 по 2023 годы подготовлено 67 публикаций, включая 1 монографию и 6 глав в книгах, а также сделано 72 доклада на международных и всероссийских научных конференциях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Keilis-Borok, V.I., and V.G. Kossobokov, Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. 61. 1-2. P.73-83. DOI:10.1016/0031-9201(90)90096-G.
2. Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Часть I. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы // *Вычислительная сейсмология.* – М.: ГЕОС, 2005.— 179 с. (Вып. 36).
3. Kossobokov, V.G., V.I. Keilis-Borok, and S.W. Smith, Reduction of territorial uncertainty of earthquake forecasting // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. 61. 1-2. R1-R4. DOI:10.1016/0031-9201(90)90101-3.
4. Kossobokov, V.G., V.I. Keilis-Borok, and S.W. Smith, Localization of intermediate-term earthquake prediction // *J. Geophys. Res.* 1990. 95. B12: 19763-19772. DOI:10.1029/JB095iB12p19763.
5. Kossobokov, V.G., J.H. Healy, and J.W. Dewey, Testing an earthquake prediction algorithm // *Pure and Appl. Geophys.* 1997. 149. 1: 219-232. DOI:10.1007/BF00945168.
6. Kossobokov, V.G., L.L. Romashkova, V.I. Keilis-Borok, and J.H. Healy, Testing earthquake prediction algorithms: Statistically significant real-time prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992-1997 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. 111. 3-4: 187-196. DOI:10.1016/S0031-9201(98)00159-9.
7. Kossobokov, V.G. Earthquake prediction: 20 years of global experiment // *Natural Hazards.* 2013. 69: 1155-1177. DOI:10.1007/s11069-012-0198-1.
8. Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Об оценке результатов тестирования алгоритмов прогноза землетрясений // *Доклады Академии наук.* 2015. Т. 460. № 6. С. 710-712. DOI:10.7868/S0869565215060213.
9. Ghil, M., P. Yiou, S. Hallegatte, B.D. Malamud, P. Naveau, A. Soloviev, P. Friederichs, V. Keilis-Borok, D. Kondrashov, V. Kossobokov, O. Mestre, C. Nicolis, H.W. Rust, P. Shebalin, M. Vrac, A. Will, and I. Zaliapin, Extreme events: dynamics, statistics and prediction // *Nonlin. Processes Geophys.* 2011. 18: 295-350. DOI:10.5194/npg-18-295-2011.
10. Kossobokov, V.G., Romashkova, L.L., Panza, G.F., Peresan, A., 2002. Stabilizing intermediate-term medium-range earthquake predictions // *J. Seismol. Earthq. Eng.* 2002, 8: 11-19.
11. Keilis-Borok, V., P. Shebalin, A. Gabrielov, D. Turcotte, Reverse tracing of short-term earthquake precursors // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2004. 145. 1-4: 75-85. DOI:10.1016/j.pepi.2004.02.010.

12. Shebalin,P., V.Keilis-Borok, I.Zaliapin, S.Uyeda, T.Nagao, and N.Tsybin, Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, M = 8.1. A case history // *Earth, Planets and Space*. 2004. 56. 8: 715-724. DOI:10.1186/BF03353080.
13. Шебалин П.Н. Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // *Вулканология и сейсмология*. 2005. № 1. С. 3-15.
14. Шебалин П.Н. Методология прогноза землетрясений с периодом ожидания менее года. Алгоритмы прогноза землетрясений // *Вычисл. Сейсмология*. Вып. 37. М.: ГЕОС. 2006. С. 6-180.
15. Kossobokov,V., and P.Shebalin, Earthquake Prediction. In V.I.Keilis-Borok and A.A.Soloviev (eds), *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2003: 141-207.
16. Shebalin,P.N., C.Narteau, J.D.Zechar, and M.Holschneider, Combining earthquake forecasts using differential probability gains. *Earth, Planets and Space*, 2014, **66**, Article Number 37, DOI:10.1186/1880-5981-66-37.
17. Utsu,T.A. Statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geoph. Magazine*. – 1961. – 30: 521–605.
18. Ogata,Y. Statistical models for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis // *Tectonophysics*. 1989. 169. 1-3: 159-174. DOI:10.1016/0040-1951(89)90191-1.
19. Ogata,Y. Seismicity analysis through point-process modeling; a review // *Pure Appl. Geophys*. 1999. 155. 2-4: 471-507. DOI:10.1007/s000240050275.
20. Sornette,D., and A.Helmstetter, Occurrence of finite-time-singularity in epidemic models of rupture, earthquakes and starquakes // *Physical Review Letters*. 2002. 89. 15: 158501. DOI:10.1103/PhysRevLett.89.158501.
21. Zhuang,J., Y.Ogata, and D.Vere-Jones, Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction // *J. Geophys. Res*. 2004. 109. B5: B05301. DOI:10.1029/2003JB002879.
22. Zaliapin,I., and Y.Ben-Zion, A global classification and characterization of earthquake clusters // *Geophys J. Int*. 2016. 207. 1: 608-634. DOI:10.1093/gji/ggw300.
23. Zaliapin,I., and Y.Ben-Zion, Earthquake clusters in Southern California I: Identification and stability // *J. Geophys. Res*. 2013. 118. 6: 2847-2864. DOI:10.1002/jgrb.50178.
24. Molchan,G.M., and O.E.Dmitrieva, Aftershok identification: methods and new approaches // *Geophys. J. Int*. 1992. 109. 3: 501-516. DOI:10.1111/j.1365-246X.1992.tb00113.x.

25. Båth, M. Lateral inhomogeneities in the upper mantle // *Tectonophysics*. – 1965. – 2. – 6: 483-514. DOI:10.1016/0040-1951(65)90003-X.
26. Reasenber, P.A., and L.M.Jones, Earthquake hazard after a mainshock in California // *Science*. – 1989. – 242. – 4895: 1173-1176. DOI:10.1126/science.243.4895.1173.
27. Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 2. Оценка области распространения сильных афтершоков // *Физика Земли*. 2017. № 3. С. 43–61. DOI: 10.7868/S0002333717020028.
28. Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 3. Динамический закон Бота. // *Физика Земли*. 2018. № 6. С. 129–136. DOI: 10.1134/S0002333718060029.
29. Баранов С.В., Павленко В.А., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 4. Оценка максимальной магнитуды последующих афтершоков // *Физика Земли*. 2019. № 4. С. 15-32. DOI: 10.31857/S0002-33372019415-32.
30. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности пост-сейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН, 2019. 218 с.
31. Шебалин П.Н., Баранов С.В. О прогнозировании афтершоковой активности. 5. Оценка длительности опасного периода. // *Физика Земли*. 2019. № 5. С. 22-37. DOI: 10.31857/S0002-33372019522-37.
32. Shebalin P., Baranov S. Statistical Laws of Post-seismic Activity. In: Limnios N, Papadimitriou E, Tsaklidis WG (ed) *Statistical Methods and Modeling of Seismogenesis*, Wiley, Hoboken, 2021. pp 64-103 DOI:10.1002/9781119825050.ch3.
33. Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake Productivity Law // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 222. P. 1264–1269. DOI: 10.1093/gji/ggaa252.
34. Шебалин П.Н., Баранов С.В., Дзедобоев Б.А. Закон повторяемости количества афтершоков // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 481. № 3. С. 320-323. DOI:10.31857/S086956520001387-8.
35. Кособоков В.Г., Мажкенов С.А. Интенсивность потока землетрясений в очаговой области // *Доклады Академии наук Республики Казахстан*. 1992. № 1. С. 53-57.
36. Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Общий закон подобия для землетрясений: глобальная карта параметров // *Анализ геодинамических и сейсмических процессов*. М.: ГЕОС.— 2004.— С.160—175 (Вычисл. сейсмология; Вып. 35).
37. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Временные вариации параметров Общего закона подобия для землетрясений на востоке острова Хонсю (Япония) // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 405. № 4. С. 529-532.

38. Dobrovolsky IP, Zubkov SI, Miachkin VI Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure Appl Geophys.* 1979. 117(5): 1025 -1044 DOI:10.1007/BF00876083.
39. Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski, The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200-201, 1-9, 2012. DOI:10.1016/j.pepi.2012.04.002.
40. Keilis-Borok, V., Knopoff, L. & Rotvain, I. Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes// *Nature.* 1980. 283: 259–263. DOI:10.1038/283259a0.
41. Boissonnade, A.C., Shah, H.C. Seismic vulnerability and insurance studies // *Geneva Pap. Risk Insur.* 1984. 9 (32), 223e254.
42. Zhang, P.Z., Deng, Q.D., Zhang, G.M., Ma, J., Gan, W.J., Min, W., Mao, F.Y., QiWang. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China // *Sci. China Ser. D Earth Sci.* 2003. 46: 13-24.
43. Deng, Q.D., Zhang, P.Z., Ran, Y.K., Yang, X.P., Min, W., Chen, L.C. Active tectonics and earthquake activities in China // *Earthquake Sci. Front.*, 10 (S1) (2003), pp. 66-73.
44. Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962-2011 гг. // *Вулканонология и сейсмология.* 2013. № 1. С. 41-64. DOI:10.7868/S0203030613010057.
45. Nekrasova, A., V.Kossobokov, I.A.Parvez, and X.Tao, Seismic hazard and risk assessment based on the unified scaling law for earthquakes. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2015, 50, 1: 21-37, DOI:10.1007/s40328-014-0082-4.
46. Nekrasova, A., and V.Kossobokov, Generalizing the Gutenberg-Richter scaling law. *EOS Trans.* 2002, AGU, 83 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract NG62B-0958.
47. Kossobokov, V.G., and A.Nekrasova, Earthquake hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Greater Caucasus and Crimea. *Journal of Seismology*, 2018. 22:1157–1169. DOI:10.1007/s10950-018-9759-4.
48. Kossobokov, V.G., and A.Nekrasova, Earthquake hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Altai-Sayan Region. *Natural Hazards*, 2018b, 93, 3: 1435-1449, DOI:10.1007/s11069-018-3359-z.
49. Vuidel G, Tannier C, Frankhauser P, 2021, Fractalyse 3.0 (Fracgis) source code (Version 3.0-0.9.1).
50. Bachmanov DM, Kozhurin AI, Trifonov VG, The Active Faults of Eurasia Database. *Geodynamics and Tectonophysics* 2017. 8 (4): 711–736. DOI 10.5800/GT-2017-8-4-0314
51. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // *ДАН СССР.* 1972. Т. 202. № 6. С. 1317-1320.

52. Gelfand, I.M., Sh.Guberman, M.L.Izvekova, V.I.Keilis-Borok, and E.Ja.Ranzman, Criteria of high seismicity determined by pattern recognition // *Tectonophysics*. 1972. 13. 1–4: 415-422. DOI:10.1016/0040-1951(72)90031-5.
53. Alekseevskaya, M., A.Gabrielov, I.Gelfand, A.Gvishiani, and E.Rantsman, Formal morphostructural zoning of mountain territories // *Journal of Geophysics*. 1977. 43. 1/2: 227-233.
54. Gelfand, I.M., Sh.A.Guberman, V.I.Keilis-Borok, L.Knopoff, F.Press, E.Ya.Ranzman, I.M.Rotwain, A.M.Sadovsky, Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1976. 11. 3: 227-283. DOI:10.1016/0031-9201(76)90067-4.
55. Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. – М.: Наука, 1979. 172 с.
56. Дзэбоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Агаян С.М., Татаринов В.Н., Барыкина Ю.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай-Саяны-Прибайкалье. $M \geq 6.0$ // *Физика Земли*. 2019. № 4. С. 33-47. DOI:10.31857/S0002-33372019433-47.
57. Соловьев Ал.А., Горшков А.И., Соловьев Ан.А. Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // *Физика Земли*. 2016. № 6. С. 21-27. DOI:10.7868/S0002333716050148.
58. Горшков А.И., Новикова О.В., Гаудемер И. Потенциальные места сильных ($M \geq 7.0$) землетрясений в Эллинидах (Греция) // *Физика Земли*. 2020. № 1. С. 53-61, DOI:10.1134/S0002333720010032.
59. Gusev, A. High-frequency radiation from an earthquake fault: a review and a hypothesis of fractal rupture front geometry. *Pure Appl. Geophys.*, 2013, 170, 1-2: 65-93.
60. Gusev, A. Doubly stochastic earthquake source model: ‘omega-square’ spectrum and low high-frequency directivity related by numerical experiments. *Pure Appl. Geophys.*, 2014, 171, 10: 2581-2599.
61. Gusev, A. Random kinematics of unbounded earthquake rupture propagation simulated using a selluar model. *Geophys.J. Int.*, 2018, 215: 924-941.
62. Гусев А., Скоркина А., Чебров Д. Очаговые спектральные параметры землетрясений восточной Камчатки диапазона $M=3-6$ по данным поперечных волн // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2017. № 3. Вып. 35. С.36-49.

63. Kurzon, I., F.I. Vernon, Y. Ben-Zion, and G. Atkinson, Ground motion prediction equations in the San Jacinto fault zone: Significant effects of rupture directivity and fault zone amplification. *Pure Appl. Geophys.*, 2014, 171: 3015-3081.
64. Wen, Y.-Y., H. Miyake, Y.-T. Yen, K. Irikura, and K. Ching, Rupture directivity effect and stress heterogeneity of the Nantou blind-thrust earthquakes, Taiwan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2014, 104, 6: 2933–2942.
65. Brune, J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 26: 4997-5009.
66. Aki, K., and P. Richards, *Quantitative seismology: Theory and Methods*. W.H. Freeman and Co, San Francisco, Calif. 1980.
67. Molchan, G. Stochastic earthquake source model: the omega-square hypothesis and the directivity effect. *Geophys. J. Int.*, 2015. 202: 497-513.
68. Kijko, A. Estimation of the maximum earthquake magnitude M_{max} // *Pure Appl. Geophys.*, 2004. 161(8):1655–1681.
69. Kijko, A. and Singh, M. Statistical tools for maximum possible earthquake estimation // *Acta Geophys.*, 2011. 59(4):674–700.
70. 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.
71. Родкин М.В., Никонов М.В., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // *Геодинамика и тектонофизика [Электронный ресурс]*. 2012. Т. 3, № 3. С. 293–237. http://gt.crust.irk.ru/article_80.
72. Kagan, Y.Y., and L. Knopoff, Stochastic synthesis of earthquake catalogs. *J. Geophys. Res.*, 1981, 86, B4: 2853–2862, DOI:10.1029/JB086iB04p02853.
73. Ogata, Y. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis. *Tectonophysics*, 1989. 169, 1-3: 159–174. DOI:10.1016/0040-1951(89)90191-1.
74. Helmstetter, A., and D. Sornette, Subcritical and supercritical regimes in epidemic models of earthquake aftershocks. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107, B10: 2237, DOI:10.1029/2001JB001580.
75. Ilya Zaliapin, Yehuda Ben-Zion Earthquake clusters in southern California II: Classification and relation to physical properties of the crust // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. Volume 118, Issue 6, p. 2865-2877. DOI:10.1002/jgrb.50178.

76. Shebalin, P.N., Narteau, C., Baranov, S.V. Earthquake productivity law. *Geophysical Journal International*, 1264–1269. 2020.
77. Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Станчиц С. А., Потанина М. Г., Патонин А. В., Dresen G., Narteau C., Bernard P., Строганова С. М. Лабораторное моделирование афтер-шоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и Гутенберга–Рихтера от напряжений // *Физика земли*. 2019. № 1. С. 149–165.
78. Смирнов В.Б., Пономарёв А.В. *Физика переходных режимов сейсмичности*. М.: РАН, 2020. – 412 с.
79. Lay, T., H. Kanamori, and L.J. Ruff, The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes // *Earthquake Predict. Res.* 1982. 1: 3-71.
80. Pacheco, J.F., L.R. Sykes, and C.H. Scholz, Nature of seismic coupling along simple plate boundaries of the subduction type // *J. Geophys. Res.* 1993. 98. B8: 14133-14159. DOI:10.1029/93JB00349.
81. Scholz, C.H., and J. Campos, The seismic coupling of subduction zones revisited // *J. Geophys. Res.* 2012. 117. B5: B05310. DOI:10.1029/2011JB009003.
82. Johnson, J.M., and K. Satake. Asperity distribution of the 1952 great Kamchatka earthquake and its relation to future earthquake potential in Kamchatka // *Pure Appl. Geophys.* 1999. 154. 3-4: 541-553. DOI:10.1007/s000240050243.
83. MacInnes, B.T., R. Weiss, J. Bourgeois, and T.K. Pinegina, Slip distribution of the 1952 Kamchatka great earthquake based on near-field tsunami deposits and historical records // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. 100. 4: 1695-1709. DOI:10.1785/0120090376.
84. Zobin, V.M., and V.I. Levina, The rupture process of the Mw 7.8 Cape Kronotsky, Kamchatka, earthquake of 5 December 1997 and its relationship to foreshocks and aftershocks // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2001. 91. 6: 1619-1628. DOI:10.1785/0119990116.
85. Bürgmann, R., M.G. Kogan, V.E. Levin, C.H. Scholz, R.W. King, and G.M. Steblov, Rapid aseismic moment release following the 5 December, 1997 Kronotsky, Kamchatka, earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 2001. 28. 7: 1331-1334. DOI:10.1029/2000GL012350.
86. Bürgmann, R., M.G. Kogan, G.M. Steblov, G. Hilley, V.E. Levin, and E. Apel, Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone // *J. Geophys. Res.* 2005. 110. B7: B07405. DOI:10.1029/2005JB003648.
87. Vorobieva, I., P. Shebalin, and C. Narteau, Break of slope in earthquake-size distribution reveals creep rate along the San Andreas fault system // *Geophys. Res. Lett.* 2016. 43. 13: 6869-6875. DOI:10.1002/2016GL069636.

88. Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962-2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41-64. DOI:10.7868/S0203030613010057.
89. Vorobieva, I., C. Narteau, P. Shebalin, F. Beauducel, F. Nercessian, V. Clouard, and M.-P. Bouin, Multiscale mapping of completeness magnitude of earthquake catalogs // Bulletin of the Seismological Society of America. 2013. 103. 4: 2188-2202. DOI:10.1785/0120120132.
90. Bender, B. Maximum likelihood estimation of b-values for magnitude grouped data // Bulletin of the Seismological Society of America. 1983. 73. 3: 831-851.
91. Федотов С.А., Чернышев С.Д., Матвиенко Ю.Д., Жаринов Н.А. Прогноз Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M = 7.8-7.9$, Камчатка, и его сильных афтершоков с $M \geq 6$ // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 3-16.
92. Bourgeois, J., and T. K. Pinegina, The 1997 Kronotsky earthquake and tsunami and their predecessors, Kamchatka, Russia // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2018. 18. 1: 335-350. DOI:10.5194/nhess-18-335-2018.
93. Marone C. J., Scholtz C. H., Bilham R. On the Mechanics of Earthquake Afterslip // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. Is. B5. P. 8441-52. DOI:10.1029/91JB00275.
94. DeMets C. Afterslip No Longer an Afterthought // Nature. 1997. No 386. Is. 6625. P. 549-549. DOI: 10.1038/386549a0.
95. Barbot S., Fialko Yu. A unified continuum representation of post-seismic relaxation mechanisms: semi-analytic models of afterslip, poroelastic rebound and viscoelastic flow // Geophys. J. Int. 2010. V. 182. No. 3. P. 1124-1140. DOI: DOI:10.1111/j.1365-246X.2010.04678.x.
96. Sun T. Wang K. Viscoelastic relaxation following subduction earthquakes and its effects on afterslip determination // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2015. V. 120. P. 1329-1344. DOI:10.1002/2014JB011707.
97. Muto J., Moore J. D. P., Barbot S., Iinuma T., Ohta Y., Iwamori H. Coupled afterslip and transient mantle flow after the 2011 Tohoku earthquake // Sci. Adv. 2019. V. 5. No 9: eaaw1164. DOI:10.1126/sciadv.aaw1164
98. Wells, D., and K. Coppersmith. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Am. 1994. 84: 974-1002.
99. Riguzzi, F., G. Panza, P. Varga, and C. Doglioni, Can Earth's rotation and tidal despinning drive plate tectonics? // Tectonophysics. 2010. 484. 1-4: 60-73 DOI:10.1016/j.tecto.2009.06.012.

100. Doglioni, C., and G. Panza, Chapter One – Polarized Plate Tectonics // *Advances in Geophysics*. – 2015. – 56: 1-167. DOI:10.1016/bs.agph.2014.12.001.
101. Kuiper, N.H. Tests concerning random points on a circle // *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*. 1960. Series A63. P. 38-47.
102. Stephens, M.A. The goodness-of-fit statistic V_N : distribution and significance points // *Biometrika*. – 1965. – 52. – 3-4: 309-321. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.309.
103. P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise // *Phys. Rev. Lett.* 1987. 59, 381–383.
104. S. Manna Two-state model of self-organized criticality // *J. Phys. A*, 1991. 24, L363–L369.
105. Gardner, J.K. and Knopoff, L., Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1974, vol. 64, no. 5, pp. 1363–1367.
106. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Декластеризация потока сейсмических событий, статистический анализ // *Физика Земли*. 2019. № 5. С. 38-52. DOI:10.31857/S0002-33372019538-52.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений», изданные в 2019-2023 гг.

1. Писаренко В.Ф., Скоркина А.А., Рукавишникова Т.А. Применение новых статистических методов к оценке параметров поля сейсмичности на примере региона Японии // Физика Земли. 2023. № 6. С. 163-174. DOI:10.31857/S0002333723060169 [Pisarenko V.F., Skorkina A.A., Rukavishnikova T.A. Application of New Statistical Methods to Estimation of the Seismicity Field Parameters by an Example of the Japan Region // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2023., V. 59. № 6. P. 967-978. DOI:10.1134/S1069351323060162] (Scopus Q2, УБС2)

2. Писаренко В.Ф., Скоркина А.А., Рукавишникова Т.А. Как выбирать интервал магнитуд для оценки наклона графика повторяемости // Вулканология и сейсмология. 2023. № 2. С. 3-11. DOI:10.31857/S0203030623700128 [Pisarenko V.F., Skorkina A.A., Rukavishnikova T.A. Choosing the Magnitude Range for Estimating the b-Value // Journal of Volcanology and Seismology. 2023. V. 17. № 2. P. 75-82. DOI:10.1134/S0742046323700124]

3. Nekrasova A., Kossobokov V. Seismic risk assessment for the infrastructure in the regions adjacent to the Russian Federation Baikal–Amur Mainline based on the Unified Scaling Law for Earthquakes // Natural Hazards. 2023. V. 116. P. 1995-2010. DOI:10.1007/s11069-022-05750-9 (WOS Q2, Scopus Q1, УБС1)

4. Nekrasova A., Kossobokov V., Podolskaia E. Regional seismic risk assessment based on the unified scaling law for earthquakes: the Lake Baikal railway system // Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2024. Volume 177.108402. DOI:10.1016/j.soildyn.2023.108402 (SJR Q1, УБС1).

5. Bela J., Kossobokov V., Panza G. Seismic Rigoletto: Hazards, risks and seismic roulette applications // Frontiers in Earth Science. 2023. V. 11. Article 1136472. DOI:10.3389/feart.2023.1136472 (WOS Q2, Scopus Q1, УБС1)

6. Le Mouél J-L, Gibert D, Courtillot V, Dumont S, De Bremond d’Ars J, Petrosino S, Zuddas P, Lopes F, Boulé J-B, Neves MC, Custódio S, Silveira G, Kossobokov V, Coen L and Gèze M On the external forcing of global eruptive activity in the past 300 years // Frontiers in Earth Science. 2023. V. 11. Article 1254855. DOI:10.3389/feart.2023.1254855 (WOS Q2, Scopus Q1, УБС1)

7. Родкин М.В., Липеровская Е.В. О различии физических механизмов разноглубинных землетрясений и характера их ионосферного отклика // Физика Земли. 2023. № 3. С. 48-62. DOI:10.31857/S0002333723030110.[Rodkin M.V., Liperovskaya E.V. On the Difference in Physical Mechanisms of Earthquakes at Different Depths and Their

Ionospheric Response // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023. V. 59. № 3. P. 377-390. DOI:10.1134/S1069351323030114] (Scopus Q2, УБС2)

8. Л.А. Корженкова, А.М. Корженков, В.М. Макеева, Й.В. Мажейкас, М.В. Родкин, А.А. Стрельников, А.Б. Фортуна. Режим сильных голоценовых землетрясений зоны Культорского разлома в Северном Приисыккулье (Тянь-Шань) по данным радиоизотопного датирования. *Вулканология и Сейсмология*, 2023, 6, 78-100.

9. Rodkin M.V. The mystery of the deep earthquakes is resolved // *Novel Research in Sciences*. 2023. V. 13. № 3. Article 000811. DOI:10.31031/NRS.2023.13.000811

10. Liperovskaya E.V., Rodkin M.V., The distant response of the earthquake precursory process in foF2 as inferred from data of vertical sounding stations Tokyo, Wakkanai and Yamagawa, 1957-2020 // *Problems of Geocosmos-2022*, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2023.

11. Molchan G., Varini E. The strongest aftershock in seismic models of epidemic type // *Geophysical Journal International*. 2024. V. 236. № 3. P. 1440-1454. DOI:10.1093/gji/ggae001.

12. Motorin A. Yu., Baranov S. V., Shebalin P. N. Spatial Distribution of Blast-triggered Seismic Events: a Case-study of the Khibiny Massif // *EURASIAN MINING*. 2023. No. 2. pp. 31–35. DOI: 10.17580/em.2023.02.07

13. Molchan G., Varini E., Peresan A. Productivity within the epidemic-type seismicity model // *Geophysical Journal International*. 2022. V. 231. № 3. P. 1545-1557. DOI:10.1093/gji/ggac269.

14. Pisarenko V.F. Estimating the Parameters of Truncated Gutenberg–Richter Distribution // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. V. 58. P. 80-88. DOI:10.1134/S1069351322010074.

15. Ismail-Zadeh A., Kijko A., Nekrasova A., Shebalin P. Special Issue on “Lithosphere Dynamics and Earthquake Hazard Forecasting” // *Surveys in Geophysics*. 2022. V. 43. № 2. P. 347-351. DOI:10.1007/s10712-022-09711-6.

16. Rodkin M.V., Orunbaev S.Z. Assessment of Earthquake Hazard from Data on Displacements of Bedrock Blocks: The Alai Valley, Kirgizia // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2022. V. 16. P. 67–80. DOI:10.1134/S0742046322010067.

17. Rodkin M.V., Andreeva M.Y., Liperovskaya E.V. Clustering as One of Scenario of Development of Instability: An Earthquake Case // *Problems of Geocosmos–2020*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2022. pp. 263-273. DOI:10.1007/978-3-030-91467-7_18.

18. Rodkin M.V., Liperovskaya E.V. Irregularities in the Intensity of the Flow of Main Events: An Example of the Shallow Seismicity in the Kamchatka Region // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. V. 58. № 4. P. 520-533. DOI:10.1134/S1069351322040073.
19. Pisarenko V.F., Ruzhich V.V., Skorkina A.A., Levina E.A. The structure of seismicity field in the baikal rift zone // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. V. 58. № 3. P. 329-345. DOI:10.1134/S1069351322030053.
20. Shapoval A., Savostianova D., Shnirman M. Universal predictability of large avalanches in the Manna sandpile model // *Chaos*. 2022. V. 32. Article 083130. DOI:10.1063/5.0102019.
21. Zhang Yan, Wu Zhongliang, Romanelli Fabio, Vaccari Franco, Peresan Antonella, Kossobokov Vladimir G.; Panza Giuliano F. Finite Rupture Attributes Associated with the Great-Earthquake-Prone Areas (GEPAs) of Continental Earthquakes // *Journal of the Geological Society of India*. 2021. V.98, №12, p.1647 – 1652. DOI: 10.1007/s12594-022-2232-6.
22. Soloviev A.A., Kossobokov V.G. Eichelberger J.C. Geophysical Studies of Geodynamics and Natural Hazards in the Northwestern Pacific Region: Introduction. // *Pure Appl. Geophys.* 2022. DOI:10.1007/s00024-022-03192-9.
23. Kossobokov V. Hazard, risks, and prediction. In «Earthquakes and Sustainable Infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) Approach Guarantees Prevention Rather Than Cure» / Eds: G. Panza, V.G. Kossobokov, E. Laor, B. DeVivo. Elsevier, 2022. P. 1-25. DOI:10.1016/B978-0-12-823503-4.00031-2.
24. Crespi M., Kossobokov V., Peresan A., Panza G.F. The integration between seismology and geodesy for intermediate-term narrow-range earthquake prediction according to NDSHA // *Earthquakes and Sustainable Infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) Approach Guarantees Prevention Rather Than Cure* / G. Panza, V.G. Kossobokov, E. Laor, B. DeVivo (Eds.). (1st ed., pp. 637). Elsevier, 2022. Chapter 5. P. 97-112. DOI:B978-0-12-823503-4.00003-8.
25. Емельянов И.В., Некрасова А.К. DDLAFS — плагин QGIS для оценки доминирующих направлений системы локальных активных разломов // *Геоинформатика*. 2022. № 4. С. 54-62. DOI:10.47148/1609-364X-2022-4-54-62.
26. Pisarenko V.F., Rodkin M.V. Approaches to Solving the Maximum Possible Earthquake Magnitude (M-max) Problem // *Surveys in geophysics*. 2022. DOI:10.1007/s10712-021-09673-1.
27. Zhang Y., Romanelli F., Vaccari F., Peresan A., Jiang C., Wu Zh., Gao Sh., Kossobokov V.G., Panza G.F. Seismic hazard maps based on Neo-deterministic Seismic Hazard

Assessment for China Seismic Experimental Site and adjacent areas // *Engineering Geology*. 2021. V. 291. Article 106208. DOI:10.1016/j.enggeo.2021.106208 (WOS – Q1, Scopus – Q1).

28. Ismail-Zadeh, A., Soloviev, A. Numerical Modelling of Lithospheric Block-and-Fault Dynamics: What Did We Learn About Large Earthquake Occurrences and Their Frequency? // *Surveys in Geophysics*. 2022. DOI: 10.1007/s10712-021-09686-w (WOS – Q1, Scopus – Q1).

29. Liu T., Kossobokov V.G. Displacements Before and After Great Earthquakes: Geodetic and Seismic Viewpoints // *Pure and Applied Geophysics*. 2021. V. 178. № 4. P. 1135-1155. DOI:10.1007/s00024-021-02694-2 (WOS – Q3, Scopus – Q2).

30. Pisarenko V.F., Pisarenko D.V. A Modified k-Nearest-Neighbors Method and Its Application to Estimation of Seismic Intensity // *Pure and Applied Geophysics*. 2021. DOI:10.1007/s00024-021-02717-y (WOS – Q3, Scopus – Q2).

31. Shebalin P.N., Vorobieva I.A., Baranov S.V., Mikhailov V.O. Deficit of Large Aftershocks as an Indicator of Afterslip at the Sources of Earthquakes in Subduction Zones // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 498. № 1. P. 423-426. DOI:10.1134/S1028334X21050172 (Scopus – Q3).

32. Kossobokov V.G., Soloviev A.A. Testing Earthquake Prediction Algorithms // *Journal of the Geological Society of India*. 2021. V. 97. № 12. P. 1514-1519. DOI:10.1007/s12594-021-1907-8 (WOS – Q4, Scopus – Q2).

33. Massin F., Clouard V., Vorobieva I., Beauducel F., Saurel J.-M., Satriano C., Bouin M.-P., Bertil D. Automatic picking and probabilistic location for earthquake assessment in the Lesser Antilles subduction zone (1972-2012) // *Comptes Rendus – Geoscience*. 2021. V. 353. № S1. DOI:10.5802/crgeos.81 (Scopus – Q2).

34. Nikolaeva S.B., Rodkin M.V., Shvarev S.V. Late glacial and postglacial seismicity in the northeastern fennoscandian shield: Tectonic position and age of paleo-earthquakes near Murmansk // *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 2021. V. 93. № 1. P. 53-72. DOI:10.17741/BGSF/93.1.004 (WOS – Q3, Scopus – Q3).

35. Rodkin M.V. Earthquake Prediction: Old Expectations and New Results // *Seismic Instruments*. 2021. V. 57. № 4. P. 438-445. DOI:10.3103/S0747923921040095.

36. Shebalin P., Baranov S. Statistical Laws of Post-seismic Activity // In: *Statistical Methods and Modeling of Seismogenesis* / N.Limnios, E.Papadimitriou, G. Tsaklidis. Wiley & Sons Ltd, 2021. P. 63-104. ISBN: 9781119825043. DOI:[10.1002/9781119825050.ch3](https://doi.org/10.1002/9781119825050.ch3) (глава в книге).

37. Peresan, A., Romashkova L. Chapter 8 - Earthquake forecasting and time-dependent neo-deterministic seismic hazard assessment in Italy and surroundings. In: *Earthquakes and*

Sustainable Infrastructure. Panza, G.F., Kossobokov V., Laor, E., De Vivo, B. (Eds). Elsevier. 2022: 151-173. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823503-4.00007-5> (глава в книге).

38. Родкин М.В. О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил» // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. No 2. С. 128-137. DOI:10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137.

39. A. Gorshkov, O. Novikova, S. Dimitrova, A. Soloviev, M. Semka, D. Dragomirov, M. Tsekov, L. Dimova, R. Raykova. Evaluation of the seismogenic (M6+) nodes for the territory of Bulgaria and adjacent areas // REVIEW OF THE BULGARIAN GEOLOGICAL SOCIETY, vol. 82, part 3, 2021, p. 174–176. DOI:10.52215/rev.bgs.2021.82.3.174.

40. Kossobokov V.G., Nekrasova A.K., Schepalina P.D. Seismic Dynamics in Advance of and After the Largest Earthquakes, 1985–2020 // Surveys in Geophysics. 2021. DOI:10.1007/s10712-021-09674-0 (WOS – Q1, Scopus – Q1).

41. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Геодинамические режимы Центральной Азии к западу и востоку от геораздела 102-104° // Geodynamics & Tectonophysics. 2020. Т. 11. № 2. С. 334-351. DOI:10.5800/GT-2020-11-2-0478.

42. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзобоев Б.А. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: Актуальный обзор// Физика Земли. 2020. № 1. С. 5-29. DOI:10.1134/S0002333720010044. [Gvishiani, A.D., A.A. Soloviev, and B.A. Dzeboev, Problem of recognition of strong-earthquake-prone areas: a state-of-the-art review // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. 56. 1: 1-23. DOI:10.1134/S1069351320010048]

43. Кособоков В.Г., Щепалина П.Д. Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика Земли. 2020. № 1. С. 43-52. DOI:10.1134/S0002333720010068. [V.G. Kossobokov, P.D. Shchepalina Times of increased probabilities for occurrence of the world's largest earthquakes: 30 years hypothesis testing in real time // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. 56. 1: 36-44. DOI:10.1134/S1069351320010061]

44. Молчан Г.М. Стохастическая модель А.Гусева для сейсмического источника: высокочастотное поведение в дальней зоне// Физика Земли. 2020. № 1. С. 86-95., DOI:10.1134/S0002333720010081.[Molchan G.M. Gusev's stochastic model for the seismic source: high-frequency behavior in the far zone // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. 56. 1: 74-82. DOI:10.1134/S1069351320010085]

45. Молчан Г.М. Фрактальная сейсмичность и сейсмический риск // Физика Земли. 2020. № 1. С. 77-85. DOI:10.1134/S000233372001007X. [Molchan, G.M. Fractal seismicity

and seismic risk // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. 56. 1: 66-73. DOI:10.1134/S1069351320010073]

46. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. 2020. № 6. С. 3-25. DOI:10.31857/S0203030620060152.

47. Некрасова А.К., Кособоков В.Г., Парвез И.А., Тао Х. Общий закон подобия для землетрясений в приложении к оценке сейсмической опасности и ассоциированных рисков// *Физика Земли*. 2020. № 1. С. 96-108. DOI:10.1134/S0002333720010093. [А.К. Nekrasova, V.G. Kossobokov, I.A. Parvez, and X.Tao Unified Scaling Law for Earthquakes as applied to assessment of seismic hazard and associate risks // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. 56. 1: 83-94. DOI:10.1134/S1069351320010097]

48. Шебалин П.Н. Увеличение радиуса корреляции цепочки землетрясений перед сильнейшими сейсмическими событиями // *Физика Земли*. 2020. № 1. С.30-42. DOI:10.1134/S0002333720010135. [Shebalin P.N. The rise of the earthquake correlation range and the chains of earthquakes before large seismic events // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. 56. 1: 24-35. DOI:10.1134/S1069351320010139]

49. O. Baro, A. Kumar, and A. Ismail-Zadeh Seismic hazard assessment of the Shillong Plateau using a probabilistic approach // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2020. 11. 1: 2210-2238. DOI:10.1080/19475705.2020.1833989.

50. Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake productivity law // *Geophys. J. Int*. 2020. 222. 2: 1264-1269. DOI:10.1093/gji/ggaa252.

51. Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C. Condition of occurrence of large man-made earthquakes in the zone of oil production, Oklahoma // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. 56. 6: 911-919. DOI:10.1134/S1069351320060130.

52. Ismail-Zadeh A., Kossobokov V. Earthquake prediction, M8 algorithm // In Gupta, H. (ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer (First Online: 30 May 2020). DOI:10.1007/978-3-030-10475-7_157-1.

53. Kossobokov V. Unified Scaling Law for Earthquakes that generalizes the fundamental Gutenberg-Richter relationship // In Gupta, H. (ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer (FirstOnline: 30 May 2020), DOI:10.1007/978-3-030-10475-7_257-1.

54. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В. К проблеме различия современной геодинамики Центральной и Восточной Азии // *Физика Земли*. 2020. № 1. С. 142-149. DOI:10.1134/S0002333720010020. [Yu.G. Gatinsky, T.V. Prokhorova On the problem of distinction between recent geodynamics of Central and East Asia // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. 56. 1: 125-132. DOI:10.1134/S1069351320010024]

55. Kossobokov V.G., Panza G.F. A Myth of Preferred Days of Strong Earthquakes? // *Seismological Research Letters*. 2020. V. 91. № 2A. P. 948-955. DOI:10.1785/0220190157
56. Воробьева И.А., Соловьев А.А., Шебалин П.Н. Картирование межплитового сцепления в Камчатской зоне субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 484. № 4. С. 478-481. DOI:10.31857/S0869-56524844478-481.[Vorobieva,I.A., A.A.Soloviev, and P.N.Shebalin, Mapping of Interplate Coupling in the Kamchatka Subduction Zone from Variations in the Earthquake Size Distribution // *Doklady Earth Sciences*. 2019. 484. 2: 173-176. DOI:10.1134/S1028334X19020077] (WoS Q4)
57. Усенко С.В., Прохорова Т.В. Строение и развитие Восточно-Гренландской континентальной окраины до начала спрединга на Хребте Колбейнсей // *Вулканология и сейсмология*. 2019. № 6. С. 66-78. DOI:10.31857/S0203-03062019666-78 (WoS Q4)
58. Шебалин П.Н., Баранов С.В. О прогнозировании афтершоковой активности. 5. Оценка длительности опасного периода // *Физика Земли*. 2019. № 5. С. 22-37. DOI:10.31857/S0002-33372019522-37. [Shebalin,P.N., and S.V.Baranov, Forecasting Aftershock Activity: 5. Estimating the Duration of a Hazardous Period // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. 55. 5: 719-732. DOI:10.1134/S1069351319050112] (WoS Q4)
59. Dzeboev B.A., Soloviev A.A., Dzeranov B.V., Karapetyan J.K., Sergeeva N.A. Strong earthquake-prone areas recognition based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus, $M \geq 6.0$. Variable EPA method // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. 19. 6: ES6005. DOI:10.2205/2019ES000691. (WoS Q4)
60. Gorshkov A., Gaudemer Y. Seismogenic nodes defined with pattern recognition in the French Massif Central // *Journal of Iberian Geology*. 2019. 45. 1: 63-72. DOI:10.1007/s41513-018-0087-x. (WoS Q3)
61. Gorshkov A., Hassan H., Novikova O. Seismogenic nodes ($M \geq 5.0$) in north-east of Egypt and implication for seismic hazard assessment // *Pure Appl. Geophys*. 2019. 176(2): 593-610. DOI:10.1007/s00024-018-2012-9 (WoS Q3)
62. Kossobokov V.G. Seismic Hazard Assessment Problem in a Big Data World // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2019. 93: 269. DOI:10.1111/1755-6724.14080. (WoS Q2)
63. Kossobokov V., Mouël J.-L., Le, Courtillot V. On the Diversity of Long-Term Temperature Responses to Varying Levels of Solar Activity at Ten European Observatories // *Atmospheric and Climate Sciences*. – 2019. – 9. – 3: 498-526. DOI:10.4236/acs.2019.93033. (Scopus)

64. Vorobieva I., Ismail-Zadeh A., and Gorshkov A. Nonlinear dynamics of crustal blocks and faults and earthquake occurrences in the Transcaucasian region // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2019. - 297. 106320. (WoS Q2)

65. Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V. The main geodivider of Central Asia into geophysical fields and anomalies // *Materials of the International Conference “Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration”*. Beijing, PRC, April 29, 2019. Participant’s reports in English. 2019. Part 2: 92-102.

66. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН, 2019. 218 с.

67. Баранов С.В., Шебалин П.Н., Габсатарова И.П. Связь вероятности возникновения сильного афтершока с сейсмичностью, предшествующей основному толчку // *Геофизические исследования*. 2019. Т. 20. № 3. С. 5-22. DOI:10.21455/gr2019.3-1.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Доклады по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений» на международных и российских научных конференциях с 2019 по 2023 годы

1. Varini E., Molchan G., Peresan A. Theoretical analysis of the productivity of seismic events // EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023. EGU23-1897. DOI:10.5194/egusphere-egu23-1897.
2. Моторин А.Ю., Баранов С.В., Шебалин П.Н. Пространственное распределение сейсмических событий, инициированных взрывами, на примере Хибинской ПТС волн // XVII Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». 11-15 сентября 2023 г., Узбекистан, Ташкент, ФИЦ ЕГС РАН.
3. Писаренко В.Ф., Скоркина А.А., Рукавишникова Т.А., Ружич В.В., Левина Е.А. Оценка максимальной возможной магнитуды для Байкальской рифтовой зоны // III Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», посвященная памяти Соловьева А.А. 25-26 октября 2023 г., Москва: ИТПЗ РАН.
4. Kossobokov V., Nekrasova A. The Deadly 06 February 2023 earthquakes: an Unexpected Surprise? // Proceedings of the XI Kazakh-Chinese International Symposium «Earthquake forecast, seismic hazard assessment and seismic risk in Central Asia». September 26–28, 2023, Almaty, Kazakhstan. Almaty - 2023, p.102-107.
5. Kossobokov V., Nekrasova A., Filippova A., Fomochkina A. Analyzing the recent major earthquakes in Southern Alaska // AGU Fall Meeting, 2023, 11 – 15 December, San Francisco, USA, S33I-0491. <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1324803>.
6. Kossobokov V., Nekrasova A. The Deadly 06 February 2023 earthquakes: an Unexpected Surprise? AGU Fall Meeting, 11 – 15 December, San Francisco, USA, U41C-0879. <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1310667>.
7. Kossobokov V. Predictability of great earthquakes: the 06 February 2023 M7.8 and M7.5 couple in Turkey // XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin, July, 11-20, 2023). DOI:10.57757/IUGG23-1767.
8. Nekrasova A., Kossobokov V., Tsvetkov I. Active fault systems and earthquake epicenters // Proceedings of the XI Kazakh-Chinese International Symposium «Earthquake forecast, seismic hazard assessment and seismic risk in Central Asia». September 26–28, 2023, Almaty, Kazakhstan. Almaty - 2023, p. 296-300.

9. Nekrasova A., Kossobokov V. The observed variability of seismic dynamics in the Pacific Northwest // XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin, July, 11-20, 2023). DOI:10.57757/IUGG23-0382.

10. Nekrasova A., Kossobokov V., Filippova A., Fomochkina A. Characterizing the foreshock, main shock, and aftershock sequences of the recent major earthquakes in Southern Alaska, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin, July, 11-20, 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-1885>.

11. Nekrasova A, Kossobokov V, Podolskaia E Seismic risk assessment of the Lake Baikal railway infrastructure based on Unified Scaling Law for Earthquakes and anisotropic seismic impact // EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-1710, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1710>.

12. Nekrasova A, Tsvetkov I, Kossobokov V (2023) Self-similarity of active fault systems and distribution of earthquake epicenters, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin, July, 11-20, 2023). DOI:10.57757/IUGG23-0383.

13. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: оценка сейсмической опасности и ассоциированных рисков //VII Международная конференция «Сейсмология и инженерная сейсмология», 6-9 июня 2023 г. Баку, Азербайджан.

14. Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Трубенков А.В., Селюцкая О.В., Горшков А.И., Новикова О.В., Кособоков В.Г. Развитие веб-ГИС-проектов ИТПЗ РАН в 2021-2023 гг. // III Всероссийская научная конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», посвященная памяти Соловьева А.А. 25-26 октября 2023 г. Москва: ИТПЗ РАН.

15. Цветков И.А., Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Эпицентры землетрясений и системы активных разломов // III Всероссийская научная конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», посвященная памяти Соловьева А.А. 25-26 октября 2023 г. Москва: ИТПЗ РАН.

16. Родкин М.В., Прохорова Т.В., Рукавишников Т.А. Тенденция уменьшения вызванной сейсмичности при продолжительном сильном техногенном воздействии? // III Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», посвященная памяти Соловьева А.А. 25-26 октября 2023 г., Москва: ИТПЗ РАН.

17. Родкин М.В., Д.Г.Яраханова. О режимах вызванной сейсмичности: неоднозначный ответ и противоречивые тенденции // Международная научно-практическая конференция «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПАНИЙ РОССИИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ». Казань, 2023, 354-356. ISBN 978-5-6049689-6-7
18. Родкин М.В., Е.В.Липеровская Е.В. Проблемы и новый подход к прогнозу сильных землетрясений // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов» 24 – 30 сентября 2023 г. Петропавловск-Камчатский. 2023 г.
19. Агаян А.С., Некрасова А.К. Анализ пространственной кластеризации сейсмических событий алгоритмом топологической фильтрации DPS: Камчатка // III Всероссийская научная конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», посвященная памяти Соловьева А.А. 25-26 октября 2023 г. Москва: ИТПЗ РАН.
20. Aгаian, A. Nekrasova, A. Spatial clustering of seismic events analysis using the Discrete Perfect Sets (DPS) algorithm: Pribaikalye, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-17573.
21. Маточкина С.Д. Закономерности пространственно-ременного группирования событий акустической эмиссии в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород // Двадцать четвертая уральская молодежная научная школа по геофизике: - Пермь: ГИ УрО РАН, 2023.
22. Молокова А.П. Изучение вулканических землетрясений Ключевской группы вулканов методом спектральных отношений // Двадцать четвертая уральская молодежная научная школа по геофизике. - Пермь: ГИ УрО РАН, 2023.
23. Крушельницкий К.В. Вариации параметров группирования сейсмичности перед сильными землетрясениями // Двадцать четвертая уральская молодежная научная школа по геофизике. - Пермь: ГИ УрО РАН, 2023.
24. A.Peresan, G.Molchan, E.Varini Earthquake productivity within general ETAS models // Statistical Seismology International Conference (StatSei 12), Cargese (France), 7-21 Oct 2022.
25. V.F.Pisarenko, A.A.Skorkina, T.A.Rukavishnikova Estimating the Parameters of Truncated Gutenberg-Richter Distribution: New Approaches // 33rd Conference on Mathematical Geophysics, International Union of Geodesy and Geophysics, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea, 20-24 June 2022.

26. В.Ф. Писаренко, В.В. Ружич, А.А. Скоркина, Е.А. Левина Оценка квантилей максимальной магнитуды в будущем интервале времени на примере Байкальской рифтовой зоны // Шестая Международная Конференция «Триггерные эффекты в геосистемах», Москва, Институт Динамики Геосфер РАН, 21-24 июня 2022 г.
27. Агаян А, Косевич Н, Некрасова А. Комплексный анализ рельефа Балтийского щита // VI Всероссийская конференция с международным участием, Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности, ITES-2022 г., Владивосток (Россия), 3-7 октября 2022 г.
28. Tsvetkov I., Nekrasova A. Fractal dimension of active faults system and parameters of unified scale law for earthquakes: seismic hazard regions of the Russian federation // VI Всероссийская конференция с международным участием, Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности, ITES-2022 г., Владивосток (Россия), 3-7 октября 2022 г.
29. Emelyanov I., Nekrasova A. DDLAFS - QGIS plugin for dominant directions of the local active fault system estimation // VI Всероссийская конференция с международным участием, Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности, ITES-2022 г., Владивосток (Россия), 3-7 октября 2022 г.
30. Nekrasova A., Kossobokov V. The Lake Baikal Region anisotropic seismic impact modelling for realistic assessment of associated risks and disaster scenarios // 3ECEES: The Third European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Bucharest, Romania, September 4-9, 2022.
31. Kossobokov Vladimir G., Anastasia K. Nekrasova, Imtiyaz A. Parvez Neodeterministic methods for the current seismic hazard assessment based on discrete mathematics and Unified Scaling Law for Earthquakes // India – Russia Scientific Webinar on “Seismology. Monitoring and Forecasting”, 30 June 2022.
32. Peresan Antonella, Anastasia Nekrasova Quantifying the space-time dependent features of seismicity in Northeastern Italy: the Unified Scaling Law for Earthquakes // «Understanding and combating earthquake and landslide hazard» Symposium, AES-ISES, January 24-27, 2022.
33. Nekrasova, A. and Kossobokov, V. Seismic intensity outside the earthquake focal zone // EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-114, DOI:10.5194/egusphere-egu22-114.

34. Kossobokov, V. Seismic Roulette (Invited Lecture in Seismology) // 3ECEES: September 5-9, 2022, Bucharest, Romania.
35. K. Krushelnitskiy, S. Matochkina, P. Shebalin, S. Baranov. Spatial and temporal variations of the earthquake clustering factor in Kamchatka region // 37 General Assembly of the European Seismological Commission (ESC). Greece (virtual), 19-24 September 2021.
36. Крушельницкий К.В., Маточкина С.Д., Шебалин П.Н., Баранов С.В. Пространственные и временные вариации фактора кластеризации землетрясений в Камчатском крае // Восьмая научно-техническая конференция "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов". Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г.
37. К.В. Крушельницкий, С.Д. Маточкина. Карта продуктивности землетрясений Камчатского региона // II Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», Москва, 29-30 сентября 2021 г.
38. Писаренко В.Ф. Оценка параметров усеченного распределения Гутенберга-Рихтера // II Всероссийская научная конференция с международным участием. «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 29-30 сентября 2021 года, ИТПЗ РАН, Москва.
39. Родкин М.В., Андреева М.Ю., Липеровская Е.В. Режимы предвестниковой и афтершоковой активности по данным мировых и региональных каталогов землетрясений. В сборнике: Проблемы геокосмоса. Материалы 13-ой международной школы-конференции. Отв. редакторы Н.Ю. Бобров [и др.]. Санкт-Петербург, 2021. С. 279-288.
40. Родкин М.В. Новое о природе глубокофокусных землетрясений. Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Материалы совещания. Восьмая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Петропавловск-Камчатский 26 сент. – 2 окт. 2021. 2021. 206-210.
41. Rodkin Mikhail. New evidence of interconnection of the intermediate and deep seismicity with the metamorphic transformations in the Earth's interior. 37th General Assembly of the European Seismological Commission, 19-24 September 2021. Session 19: Physics of earthquakes and seismic sources. #4986.
42. Mikhail Rodkin, Andrey Patonin, Natalia Shikhova, Alexander Ponomarev, Vladimir Smirnov. Comparison of fore- and aftershock activity in the generalized vicinity of large earthquakes, rock bursts and acoustic emission events. 37th General Assembly of the European Seismological Commission, 19-24 September 2021. Session 21: Physics of earthquake preparation process: from laboratory experiments to earthquake forecast. #493.

43. Родкин М.В., Андреева М.Ю., Липеровская Е.В. Типы предвестниковой сейсмической активизации по данным мировых и региональных каталогов землетрясений. IV Всероссийская конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» 6-10 сент 2021 г., Южно-Сахалинск, Россия. Материалы. с. 49.

44. Орунбаев С.Ж., Родкин М.В. Новые подходы к оценке максимальных сейсмических воздействий и к учету грунтовых условий (опыт полевых работ на Памиро-Алае, Кыргызская Республика). IV Всероссийская конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» 6-10 сент 2021 г., Южно-Сахалинск, Россия. Материалы, с.39.

45. Родкин М.В., А.М.Корженков, С.Б. Николаева, С.Ж.Орунбаев. PGVEM – метод независимой оценки долгосрочной сейсмической опасности по полевым данным? Тезисы конференции. Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений, 29-30 сентября 2021 года ИТПЗ РАН, Москва.

46. Родкин М.В. Метод анализа ООСЗ – приложения к проблемам физики и прогноза землетрясений. Тезисы конференции. Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений, 29-30 сентября 2021 года ИТПЗ РАН, Москва.

47. Андреева М.Ю., Родкин М.В. Особенности обобщенной окрестности сильного землетрясения, курило-камчатский регион // Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: XI Косыгинские чтения: материалы Всероссийской конференции с международным участием, 15–18 сентября 2021, г. Хабаровск, / Отв. ред. А.Н. Диденко, Ю.Ф. Манилов. – Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2021 с. 140 -142.

48. Горшков А. И., Новикова О. В., Соловьев А. А. (2021). Прогноз мест возникновения сильных землетрясений на основе иерархической линеаментно-блоковой структуры земной коры. В кн.: Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. (отв. ред. К. Ж. Семинский), Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. – С.184.

49. Gorshkov A., Novikova O., Dimitrova S., Dimova L. and Raykova R. (2021) Identifying the Possible Locations of Earthquakes M6+ in the Bulgarian Region. Conference Proceedings, 11th Congress of the Balkan Geophysical Society, Oct 2021, Volume 2021, p.1 - 5 Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers DOI:10.3997/2214-4609.202149BGS65.

50. Агаян А.С., А.К. Некрасова, Применение алгоритма топологической фильтрации DPS для анализа сейсмичности: Прибайкалье, (стендовый доклад). II Всероссийская научная конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 29-30 сентября 2021 г. Москва: ИТПЗ РАН.

51. Подольская Е.С., А.К. Некрасова, Т.В. Прохорова, А.В. Трубенков, О.В. Селюцкая WEB-ГИС-обеспечение проектов ИТПЗ РАН, (стендовый доклад). II Всероссийская научная конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 29-30 сентября 2021 г. Москва: ИТПЗ РАН.

52. Мякишев К. А., Королев Н. Д. (научный руководитель: Некрасова А.К.) Методы машинного обучения для прогноза временных рядов сейсмических наблюдений до и после землетрясений $M \geq 6.0$ на Юге Аляски (Machine learning methods for seismic observations time series forecast before and after South Alaska earthquakes, $M \geq 6.0$) 6. Автоматизация, моделирование и искусственный интеллект в нефтегазовой отрасли, 75-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2021», 26-30 апреля 2021, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва.

53. Peresan Antonella, Nekrasova Anastasia Quantifying the time-dependent features of seismicity in Northeastern Italy by the Unified Scaling Law for Earthquakes", webinar "Stochastic models in earthquake studies", Greece, 2021.

54. Peresan, A. and Nekrasova, A.: Space-Time Dependent features of the Unified Scaling Law for Earthquakes in Northeastern Italy, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-3196, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3196>, 2021.

55. Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V. Two types of the lithosphere destruction in Central Asia // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ. Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С.И.Шермана. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2021. С. 57-58.

56. Antonella Peresan, Leontina Romashkova, Hany M. Hassan, Earthquake forecasting and time- dependent hazard scenarios for the Adriatic region, ESC2021, September 2021.

57. Nekrasova, A., and V. Kossobokov, Unified Scaling Law for Earthquakes: space-time dependent assessment in Kamchatka region. EGU2020-708, NP4.1, EGU General Assembly, Online, 4–8 May 2020.

58. Воробьева И.А., Narteau С., Шебалин П.Н., Соловьев А.А. Картирование межплитового сцепления в зонах субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019.

59. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В. Связь интенсивности сейсмичности Центральной Азии с современной геодинамикой региона // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019.

60. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: Камчатка // Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. Отв. ред. Л.М. Богомолов. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 2019.

61. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: оценка сейсмической опасности и ассоциированных рисков // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019. С. 66-67.

62. Шебалин П.Н. Новые закономерности в сейсмическом режиме // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019.

63. Щепалина П.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Лунно-солнечные приливы и сейсмичность Прибайкалья // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019.

64. Gorshkov, A., O. Novikova, Y. Gaudemer, P. Mandal, and H. Hassan, Identifying potential earthquake sources in the continental environments // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019.

65. Kossobokov V.G. Testing earthquake predictions and associated hypotheses. Abstract NH31D-0870 presented at 2019 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 8-13 Dec., 2019 (<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/537687>).

66. Kossobokov, V. Times of increased probability of the World's great earthquakes: 30 years of hypothesis testing in real time. 27th IUGG General Assembly (Montreal, Canada, 8–18 July, 2019). Abstract: S14p-123.
67. Kossobokov, V.G. Seismic hazard assessment and prediction problem in a Big Data World. Доклад на семинаре в Национальном институте исследований и разработок по физике Земли (Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Fizica Pământului), 21 мая 2019 г., Magurele, Ilfov County, Romania.
68. Liu, T., and V.G.Kossobokov, The pre-and post-deformations of the great earthquakes from GPS and seismic data // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019.
69. Narteau, C., I.Vorobieva, and P.Shebalin, Band-limited power-laws in earthquake statistics. 27th IUGG General Assembly (Montreal, Canada, 8–18 July, 2019). Abstract: S14p-126.
70. Nekrasova, A., and V.G.Kossobokov, Unified Scaling Law for Earthquakes: Implications for seismic hazard and risk assessment. Abstract NH31D-0871 presented at 2019 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 8-13 Dec., 2019 (<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/538743>).
71. Nekrasova, A.K., V.G.Kossobokov, I.A.Parvez, X.Tao, Unified Scaling Law for Earthquakes as applied to assessment of seismic hazard and associated risks. 27th IUGG General Assembly (Montreal, Canada, 8–18 July, 2019). Abstract: IUGG19-2405.
72. Peresan, A., V.G.Kossobokov, A.K.Nekrasova, and G.F.Panza, Forecasting earthquakes and related ground shaking: testing and validation issues // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019.