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 «\_\_\_\_» \_\_\_\_ 2022 г.

### ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (промежуточный, за 2022 год)

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

П.Н. Шебалин

Подпись, дата

Москва 2022

#### СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, П.Н. Шебалин директор, и.о. зав. лаб. (введение, разделы 1.2, 1.3, Подпись, дата д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН 1.5, заключение) Исполнители темы С.В. Баранов гл. науч. сотр. докт.физ.-мат. наук (раздел 1.2) Подпись, дата гл. науч. сотр. В.Г. Кособоков докт. физ.-мат. наук Подпись, дата гл. науч. сотр. Г.М. Молчан докт. физ.-мат. наук Подпись, дата (раздел 3.1) гл. науч. сотр. В.Ф. Писаренко докт. физ.-мат. наук (раздел 2.3, 2.4) Подпись, дата гл. науч. сотр. М.В. Родкин докт. физ.-мат. наук Подпись, дата И.А. Воробьева вед. науч. сотр. канд.физ.-мат. наук Подпись, дата (раздел 1.2) вед. науч. сотр. А.К. Некрасова канд. физ.-мат. наук Подпись, дата (раздел 2.1, 2.2, 4) вед. науч. сотр. М.Г. Шнирман канд. физ.-мат. наук Подпись, дата (раздел 3.2) ст. науч. сотр. А.А. Скоркина канд. физ.-мат. наук Подпись, дата (раздел 2.3, 2.4) Т.В. Прохорова науч. сотр. (раздел 4) Подпись, дата

> Т.А. Рукавишникова (раздел 2.4)

В.А. Тимофеева (раздел 4)

> А.С. Агаян (раздел 2.2)

А.О. Антипова (раздел 1.2)

Подпись, дата

Подпись, дата

Подпись, дата

Подпись, дата

науч. сотр.

науч. сотр.

мл. науч. сотр.

мл. науч. сотр.

(разделы 1.1, 1.4, 2.1, 2.2)

(разделы 2.3, 2,5, 3.3, 3.4)

мл.науч. сотр.	Подпись, дата	П.Д. Щепалина (раздел 2.2)
лаборант- иссл.	Подпись, дата	К.В. Крушельницкий (раздел 1.3)
лаборант- иссл.	Подпись, дата	П.А. Малютин (раздел 1.3)
лаборант- иссл.	Подпись, дата	С.Д. Маточкина (раздел 1.3)
лаборант- иссл.	Подпись, дата	А.П. Молокова (раздел 1.5)
Нормоконтролер	Подпись, дата	О.В. Селюцкая

#### РЕФЕРАТ

Отчет 50 с., 1 кн., 29 рис., 1 табл., 36 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, проводимые по теме в 2022 году, включали: продолжение экспериментов по применению разработанных ранее алгоритмов для оперативного прогноза землетрясений в режиме реального времени, включая прогноз сильнейших землетрясений мира (M7.5+ и M8+) и прогноз активности афтершоков после сильных (М6.5+) землетрясений мира; ретроспективное тестирование нового предвестника, основанного анализе продуктивности землетрясений; на поиск предвестников извержений; вулканических эксперимент по интеграции сейсмологических И геодезических данных для среднесрочного прогноза землетрясений; развитие и применение на примере юго-запада Китая неодетерминистского подхода к оценке сейсмической опасности (NDSHA); теоретический анализ взаимосвязи сейсмической опасности, риска и прогноза; подробное исследование проблемы оценки максимальной возможной магнитуды и развитие методики такой оценки для варианта усеченного закона Гутенберга-Рихтера; совершенствование методики оценки интенсивности сейсмического потока на примере Байкальской рифтовой зоны; исследование и развитие моделей сейсмичности, включая теоретический анализ закона продуктивности и исследование прогнозируемости сильных событий в модели Манны. Было продолжено развитие и наполнение новыми данными ГИС-ориентированной базы данных для задач прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	10
1 Разработка и применение методов прогноза землетрясений	10
1.1 Эксперимент по применению алгоритма М8	10
1.2 Прогноз активности афтершоков	12
1.3 Поиск новых предвестников землетрясений	17
1.4 Интеграция сейсмологических и геодезических данных для среднесрочного прогноза землетрясений	18
1.5 Поиск предвестников вулканических извержений	20
2 Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска	21
2.1 Развитие и применение неодетерминистского метода оценки сейсмической опасности (NDSHA)	21
2.2 Взаимосвязь сейсмической опасности, риска и прогноза	24
2.3 Проблема оценки максимальной возможной магнитуды	26
2.4 Структура сейсмического поля Байкальской рифтовой зоны	29
2.5 Оценка сейсмической опасности по данным о смещениях блоков коренных пород: Алайская долина, Киргизия	31
3 Изучение и моделирование сейсмичности	32
3.1 Моделирование сейсмичности с учетом закона продуктивности	32
3.2 Прогнозируемость сильнейших событий в модели Манны	33
3.3 Неравномерность интенсивности потока землетрясений	35
3.4 Кластеризация как один из сценариев развития нестабильности на примере	
землетрясения	37
4 Гис-проекты для задач прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности	37
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИЛОЖЕНИЯ:	43
Приложение А – Публикации по теме НИР, изданные в 2022 г	47
Приложение Б – Доклады на международных и российских конференциях по теме	
НИР в 2022 г	49

### ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применены следующие сокращения и обозначения:

ГИ	IC	-	геоинформационная система			
ИТ	ГПЗ РАН	_	Институт теории прогноза землетрясений и			
математической геофизики РАН						
AF	FCAST	-	Автоматизированная система прогноза активности			
афтершов	ков					
AN	NSS	_	Advanced National Seismic System			
CS	SES	_	China Seismic Experimental Site			
DC	GA	_	designed ground acceleration (расчетное ускороение			
грунта)						
GE	EPA	-	места возможного возникновения сильных			
землетрясений (англ. Great Earthquake-Prone Areas)						
GI	S	-	геоинформационная система (англ. Geographic			
Informatio	on System)					
NE	DSHA	_	neo-deterministic seismic hazard assessment (Heo-			
детерминистская оценка сейсмической опасности)						
PG	ΰV	-	пиковая скорость грунта (англ. Peak Ground Velocity)			
PG	δVM	-	метод оценки PGV (англ. PGV Estimation Method)			
PS	HA	_	probabilistic seismic hazard assessment (вероятностная			
оценка сейсмической опасности)						
QC	GIS	-	Quantum GIS — свободная кроссплатформенная			
геоинфор	мационная систе	ма				
UT	TC	-	Всемирное координированное время (англ. Coordinated			
Universal	Time)					

#### введение

Исследования по теме в 2022 г. выполнялись в рамках двух приоритетных направлений, определенных Планом фундаментальных и поисковых научных исследований на 2021 - 2030 годы (Приложение 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. No 3684-p): 1.5.1.6. «Изучение и прогнозирование катастрофических явлений (землетрясения, извержения вулканов, цунами); оценки сейсмической, вулканической и цунами опасности» и 1.5.2.5. «Математическое моделирование геодинамических процессов».

Проблема прогнозирования землетрясений по-прежнему остается одной из важных нерешенных проблем геофизики. В частности, надежных алгоритмов краткосрочного прогноза землетрясений в мире пока не существует, а точность и надежность методов долгосрочного и среднесрочного прогноза пока не достаточны для рутинного применения в целях оперативной заблаговременной защиты населения и инфраструктуры. Наметившийся в мировой практике в последние годы существенный прогресс в этом направлении требует от российских ученых адекватной реакции. Прогресс связан, главным образом, с быстрым увеличения объемов и разнообразия баз данных, содержащих измерения геофизических полей. Российские ученые имеют уникальный алгоритмов среднесрочного опыт создания прогноза землетрясений И ИХ экспериментального применения для оперативного прогноза в режиме реального времени. Привлечение новых данных, таких как данные спутниковой геодезии, с целью уточнения методов прогноза землетрясений является одним из необходимых условий прогресса в исследованиях по прогнозу землетрясений. Принципиальная возможность решения проблемы прогнозирования землетрясений уже не вызывает сомнений, что делает эту задачу весьма актуальной.

Отдельной задачей прогнозирования землетрясений является прогнозирование активности афтершоков сразу после сильных землетрясений. Актуальность этой задачи обусловлена тем, что во многих случаях ущерб от сильных афтершоков сравним или даже превосходит ущерб от основного толчка.

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 является – комбинирование вероятностного (PSHA) и детерминисткого 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. Детерминисткий метод позволяет смоделировать воздействие конкретных модельных землетрясений на конкретные здания и сооружения. Одним из вариантов комбинации двух подходов является метод нео-детерминистской оценки сейсмической опасности NDSHA.

Ошибки в оценке сейсмической опасности, часто обнаруживаемые после сильных (например, Суматранское землетрясение и цунами 2004 года, землетрясений Вэньчуаньское землетрясение 2008 года в Китае, землетрясение 2010 года на Гаити, землетрясение и цунами 2011 года в Тохоку), обычно вызваны недооценкой сейсмического потенциала территорий, а не неверной оценкой воздействия от Такие ошибки обычно вызваны тем, что оценки землетрясений на расстоянии. сейсмического потенциала в рамках PSHA опираются, главным образом, на данные о сильных землетрясениях прошлого, и 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, для оценки сейсмического потенциала территорий, разработка новых подходов для таких оценок, включая моделирование сейсмичности на основе ее детального изучения, являются, таким образом, весьма актуальными задачами.

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 2022 году включали: продолжение экспериментов по применению разработанных ранее алгоритмов для оперативного прогноза землетрясений в режиме реального времени, включая прогноз сильнейших землетрясений мира (М7.5+ и M8+) и прогноз активности афтершоков после сильных (M6.5+) землетрясений мира; ретроспективное тестирование нового предвестника, основанного на анализе продуктивности землетрясений; поиск предвестников вулканических извержений; эксперимент по интеграции сейсмологических И геодезических данных для среднесрочного прогноза землетрясений; развитие и применение на примере юго-запада Китая неодетерминистского подхода к оценке сейсмической опасности (NDSHA); теоретический анализ взаимосвязи сейсмической опасности, риска и прогноза; подробное исследование проблемы оценки максимальной возможной магнитуды и развитие метолики такой оценки лля варианта усеченного закона Гутеберга-Рихтера; совершенствование методики оценки интенсивности сейсмического потока на примере Байкальской рифтовой зоны; исследование и развитие моделей сейсмичности, включая теоретический анализ закона продуктивности и исследование прогнозируемости сильных событий в модели Манны. Было продолжено развитие и наполнение новыми данными ГИС-ориентированной базы данных для задач прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности.

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.

#### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

#### 1 Разработка и применение методов прогноза землетрясений

#### 1.1 Эксперимент по применению алгоритма М8

В 2022 году был продолжен глобальный эксперимент по применению алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений M8 [1, 2]. Полученные в результате прогноза области тревоги, где ожидаются прогнозируемые землетрясения, уточнялись с помощью алгоритма MSc [3-4]. Глобальный эксперимент ведется с 1992 года [2, 5-7] и направлен на прогноз землетрясений с магнитудой  $M \ge 8.0$  (M8.0+) и прогноз землетрясений с 7.5  $\le M < 8.0$  (M7.5+). Области тревоги, определенные с помощью этих алгоритмов, обновляются раз в полугодие (1 января и 1 июля) и соответствующие карты помещаются на страницу ИТПЗ РАН в интернете (http://www.mitp.ru/en/index.html). Прогнозные карты по состоянию на 01 января 2023 года приведены на Рис.1.



Рисунок 1. Территории повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира в первой половине 2023 года в результате диагностики по алгоритму M8 (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 сейсмостанций недостаточно для надежной диагностики, соответственно.

На сегодняшний день статистика результатов, полученных в глобальном эксперименте, 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. Тем самым нулевая гипотеза случайного возникновения в сейсмоактивных районах отвергнута с сейсмологической определенностью, по крайней мере, для сильнейших землетрясений мира из магнитудных диапазонов 8.0+ и 7.5+. Высокая статистическая значимость методов среднесрочного прогнозирования землетрясений, достигнутая в ходе текущих

экспериментальных испытаний во всем мире, подтверждает следующие важные предположения: (i) предвестники сильнейших землетрясений существуют; (ii) размер области, в которой ранние предвестники проявляются намного (примерно в десять раз) больше, чем размер зоны очага готовящегося сильного землетрясения; (iii) многие предвестниковые признаки сейсмичности схожи в регионах с разной сейсмической и тектонической обстановкой

В 2022 году в мире не произошло ни одного землетрясения магнитудой М≥8 и лишь два землетрясения 7.5≤М<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 ожидались в первом полугодии 2022 года, а эпицентр второго 19.09.2022 г. в 35 км от г. Аквилилла, Мексика – там, где сейсмологических данных недостаточно для надежной диагностики по алгоритму М8 (Рис.2).



Рисунок 2. Территории повышенной вероятности возникновения землетрясений магнитудой М7.5+ 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 М8.

Один пропуск-цели в 2022 г. не изменил положительную статистику глобального тестирования алгоритмов M8 и MSc (Таблица 1):

Период тестирования	Землетрясения-цели			Пространственно- временной объем превог, µ		Достоверность	
	Total	<b>M8</b>	M8-MSc	M8	M8-MSc	M8	M8-MSc
Магнитудный диапазон М8.0+							
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 М7.5+							
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%

Таблица 1. Эффективность прогнозов M8 и M8-М	<b>ИSc (по состоянию на 31 декабр</b>	я 2022 г.)
--	---------------------------------------	------------

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 [11 Приложения Б].

В целом, результаты экспериментальной проверки алгоритма M8 и его модификации M8S, включая региональное тестирование [8-10], являются косвенным подтверждением предсказуемости сильных землетрясений. Вместе с тем, тех данных, которые используются в алгоритме (каталоги землетрясений), недостаточно для более надежных и эффективных прогнозов.

#### 1.2 Прогноз активности афтершоков

В течение 2022 г. выполнялся прогноз афтершоковой активности в режиме близком к реальному. Прогнозирование выполнялось времени, с помошью автоматизированной информационной системы оценки опасности афтершоков AFCAST (URL: https://itpz-ran.ru/afcast/), созданной в 2017-2019 гг. в ИТПЗ РАН. Система получает оперативные глобального каталога ANSS ComCat (URL: данные 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. В 2022 г. произошло 42 таких события (Рисунок 3).



Рисунок 3. Землетрясения с М≥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.

Как только информация о землетрясении с М≥6.5 поступает в систему, AFCAST по данным об этом землетрясении выполняет следующе оценки:

• области, где ожидается афтершоковая активность [11] - черная окружность на Рисунке 4);

магнитуды сильнейшего афтершока (см. Рисунок 5), ожидаемого за время
 (*t*,365) суток после основного толчка (*t* = 0.01,2<sup>*j*</sup>, *j* = -2,...,7) с вероятностью 10, 50 и 90%
 используется динамический закон Бота ([12-14];

оценка длительности опасного периода для землетрясений с M<sub>m</sub> – 2 или
 выше (M<sub>m</sub> – магнитуда основного толчка) с вероятностями 10, 50 и 90% [15-17], пример показан на Рисунке 6 (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 <sup>2</sup>	
	3	Ellipse - Soft strategy	Ellipse by quantile: center at the Rupture center	0.87	1268.61	
	3	Ellipse - Neutral strategy	Ellipse by quantile: center at the Rupture center	0.95	1562.18	
	3	Ellipse - Hard strategy	Ellipse by quantile: center at the Rupture center	0.99	1562.18	
	4	Statdium - Soft strategy	Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value	0.87	2043.19	
	4	Statdium - Neutral strategy	Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value	0.95	3213.09	
	4	Statdium - Hard strategy	Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value	0.99	3213.09	



Рисунок 4. Пример областей, где ожидаются афтершоки с М≥5.3, инициированные землетрясением М 7.3, произошедшим 2022-03-16 14:36:30 UTC к востоку от Японии на глубине 57 км (легенда показана сверху и слева).



Рисунок 5. Пример оценки по динамическому закону Бота магнитуды ожидаемого сильнейшего афтершока, инициированного землетрясением М 7.3, произошедшим 2022-03-16 14:36:30 UTC к востоку от Японии на глубине 57 км (легенда показана справа). Оценки хорошо соответствуют наблюдениям: наблюденные значения находятся вблизи оценок, соответствующих «нейтральной» стратегии [11] (синяя линия).



Рисунок 6. Пример оценки длительности опасного периода, в течении которого ожидаются афтершока с М≥5.7, инициированные землетрясением М 7.3, произошедшим 2022-03-16 14:36:30 UTC к востоку от Японии на глубине 57 км (легенда показана справа). Оценки (как первоначальные, так и уточненные по данным за 12 часов) хорошо соответствуют наблюдениям: в обоих случаях наблюденное значение 140.42 сут. находится в относительной близости от медианы распределений.

Оценки магнитуды сильнейшего афтершока и длительности опасного периода основаны на установленном ранее законе продуктивности [17, 18], согласно которому число инициированных толчков с магнитудой М≥Мт- $\Delta$ M≥Mc (Mm – магнитуда основного толчка,  $\Delta$ M>0, Mc – 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 толчка, с использованием данных о первых афтершоках. Уточнение выполняется при достаточном количестве данных. Так если за 12 ч произошло не менее 10 афтершоков с М≥Мс, то в системе AFCAST уточняется форма области, где ожидаются афтершоки с М≥5.5 по методике работы [11]. 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 Рис. 6 (зеленые области).

Уточнение оценки магнитуды сильнейшего афтершока ожидаемого в течении (2<sup>*j*</sup>, 365) суток после основного толчка выполняется по данным за  $2^{j}$ , j = -2,...,7 суток [12]. 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 [12-14]. Пример оценки показан на Рисунке 7.



Рисунок 7. Пример оценки ожидаемого числа афтершоков, инициированных землетрясением М 7.3, произошедшим 2022-03-16 14:36:30 UTC к востоку от Японии на глубине 57 км (легенда показана слева). Оценка проведена по 128 дням.

Уточнение оценки длительности опасного периода проводится по данным за 12 часов после основного толчка [15]. Расчёты выполняются при условии достаточности данных (не менее 5 представительных афтершоков из области ожидаемой афтершоковой активности), иначе используется усредненная оценка. Пример оценки показан на Рисунке 4 (красная кривая).

Как было отмечено выше, в 2022 г. зарегистрировано 42 землетрясения с М $\geq$ 6.5 (Рисунок 1). 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 М $\geq$ 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%. Это примерно соответствует пропорции, наблюдавшейся в ретроспективных оценках [12].

Все 42 прогноза длительности опасного периода, укладываются в прогнозный 90процентный доверительный интервал.

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: <u>https://itpz-ran.ru/afcast/</u>

#### 1.3 Поиск новых предвестников землетрясений

Продолжено исследование эффекта возрастания продуктивности землетрясений перед сильными землетрясениями на Камчатке, Курилах и в Японии. Исследования были сосредоточены на проверке полученных в 2022 г. 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 г 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  $\overline{\Lambda}_i$ . Также будем считать среднюю продуктивность, усредняя ее за более короткий интервал времени в таком же круге. Обозначаем эту величину  $\Lambda_i(t)$ . Далее сравниваем  $\Lambda_i(t)$  и  $\overline{\Lambda}_i$ . Критерий объявления тревоги: если  $\Lambda_i(t) > n^*\overline{\Lambda}_i$ , 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 времени п.

В алгоритме есть несколько свободных параметров: 1) радиус круга, в котором объявляется тревога R; 2) период тревоги Т; 3) минимальная магнитуда землетрясенийцелей прогноза; 4) порог продуктивности п. Путем варьирования свободных параметров по ретроспективным данным были построены диаграммы ошибок в двух регионах: Камчатка (М≥7) и Япония (М≥7.5) (Рис. 8). Каждая точка на диаграмме ошибок соответствует определенному набору свободных параметров. Точки вблизи диагонали на диаграмме ошибок соответствуют случайному прогнозу.



Рисунок 8. 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.

### 1.4 Интеграция сейсмологических и геодезических данных для среднесрочного прогноза землетрясений

Идея комплексного подхода к прогнозированию землетрясений, основанного на интеграции геодезических наблюдений высокой плотности (GNSS и SAR) и сейсмологической информации была реализована на примере ретроспективного анализа сейсмического кризиса 2016–2017 гг. в Центральной Италии и последовательности Эмилия в Италии в 2012 году. Этот комплексный подход определяет новый подход для сценариев оценки опасностей, зависящих от времени, и демонстрирует, что надлежащая 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 (Рис. 9, 10). Приведенные результаты подробно описаны в пятой главе монографии «Earthquakes and Sustainable Infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) Approach Guarantees Prevention Rather Than Cure» [13, Приложение А].



Рисунок 9. Комплексный анализ сейсмологической и геодезической информации: (а) зона тревоги по алгоритму КН (желтый многоугольник) и эпицентры землетрясений Аматриче 24.08.2016 г., М=6.2 и Норсия 30.10.2016, М=6.6 (синие звездочки); (b) пересечение трансекты Аматриче, 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 10. 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.

#### 1.5 Поиск предвестников вулканических извержений

Была проведена идентификация типов вулканических землетрясений под вулканами Ключевской группы на Камчатке (КГВ) по данным эксперимента KISS. 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 было установлено 83 временных автономных сейсмостанций и было 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. Ранее было определено, что 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 источников 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 (Рис. 11, А) и для длиннопериодного землетрясения (Рис. 11, Б). Соотношение между сигналом и шумом у записей, в которых четко выражено событие, принималось больше 2.



Рисунок 11. 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

#### 2 Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска

## 2.1 Развитие и применение неодетерминистского метода оценки сейсмической опасности (NDSHA).

В неодетерминистской оценке сейсмической опасности (Neo-Deterministic Seismic Hazard Assessment, NDSHA) области, подверженные сильнейшим землетрясениям (Great Earthquake-Prone Areas, GEPA), играют важную роль в определении «контролирующих / сценарных землетрясений». При рассмотрении сильных землетрясений необходимо учитывать их конечные характеристики разрушения, которые способствуют определению сильных движений грунта и их макросейсмической интенсивности. Для континентальных землетрясений сильные землетрясения локализуются в основном в пограничных зонах «тектонических блоков». Модель «тектонического блока» определяет очаговые механизмы и некоторые конечные атрибуты разрыва сильных землетрясений в пограничных зонах. Соответственно, в NDSHA необходимо и осуществимо в зонах GEPA учитывать конечные атрибуты разрыва сильнейших землетрясений. Граница Сычуань-Юньнань на юго-западе Китая была взята в качестве примера для естественного развития первоначально использовавшейся круговой формы GEPA в форму с большим количеством степеней свободы, лучше отражающую возможные процессы разрыва рассматриваемых землетрясений (Modified Great Earthquake-Prone Areas, M-GEPA). Использование уточнения M-GEPA очевидно заслуживает включения в схему NDSHA, в том числе, на всей территории Китайской Народной Республики.

Сильнейшие континентальные землетрясения в Китае связаны с тектоническими блоками. В начале 21 века на основе междисциплинарных исследований, проводившихся почти полвека, была предложена модель континентальных землетрясений в Китае [19]. Основная идея модели состоит в том, что земная кора материкового Китая и его окрестностей делится на 6 тектонических блоков первого порядка, а далее на 22 тектонических блока второго порядка (Рис. 12). Блоки, а также зоны границ блоков определяются геологическими, геофизическими и геодезическими наблюдениями.



Рисунок 12. Модель континентальных землетрясений в Китае. Черными точками отмечены опасные участки Трансазиатского сейсмического пояса [20], [21] вместе с распространением тектонических блоков [19]. Каждая из точек установлена в центре участка протяженностью около 300 км, идентифицированного как подверженный землетрясениям с М≥8.2. Сплошные желтые линии с треугольниками обозначают границы плит. Географическое положение области показано в виде пунктирного синего многоугольника на правом верхнем графике.

В XXI веке сильнейшие землетрясения на территории Китая происходили в его юго-западной части (Рис. 13). Для модификации зон GEPA была выбрана часть этой области (Рис 14). Зоны GEPA обычно приурочены к пограничной зоне тектонических блоков и имеют форму круга (Рис. 12, слева). Изотропная форма стандартных зон GEPA не отражает протяженную форму и направленность сейсмогенных зон. Поэтому для рассматриваемой территории было предложено использование модифицированной формы GEPA (М-GEPA) как объединение сейсмогенных зон в пределах 300-километрового отрезка, а не формы круга диаметром 200 км (Рис. 14, справа).



Рисунок 13. Три сильнейших землетрясения на юго-западе Китая в XXI веке. Указаны год, магнитуда и механизм очага каждого события. Стрелки качественно указывают на сейсмическую подвижку (синий: сдвиг, фиолетовый: надвиг), а оранжевые линии показывают приблизительную очаговую зону землетрясения. Местоположение Китайского сейсмического экспериментального полигона [22] выделено красным прямоугольником.



Рисунок 14. Зоны GEPA (красные круги) и M-GEPA (неправильные многоугольники синего цвета справа) и граничные зоны тектонических блоков [23] в рассматриваемом регионе. Сейсмогенные зоны показаны серым цветом. Зоны M-GEPA выделены в соответствии с сейсмогенными зонами, направленностью основных зон разломов Трансазиатского сейсмического пояса и границами блоков в регионе.

Сравнение расчетов по методике NDSHA расчетного ускорения грунта (DGA) с использованием круговых зон GEPA и зон M-GEPA в виде неправильных многоугольников демонстрирует значительное сокращение области высоких ожидаемых ускорений грунта (Puc. 15).



Рисунок 15. Расчеты максимального горизонтального ускорения грунта (DGA) по методике NDSHA с учетом (A) исходных круговых зон GEPA, (B) зон M-GEPA в виде неправильных многоугольников. Черные точки обозначают вычисленные ускорения, превышающие 1,20 g (максимальное значение в легенде).

Исследование опубликовано в журнале Journal of the Geological Society of India [10, Приложение А].

#### 2.2 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. Рис. 16 иллюстрирует существенные связи риска, определяемого как вероятность травмы, ущерба или потери. Рисунок дополняет пятым основным компонентом времени четыре компонента, представленные [24], 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 16. Узел, связывающий воедино Опасность (Hazard), Местонахождение (Location), Время (Time), Воздействие (Exposure) и Уязвимость (Vulerability) 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» [12, 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 (Рис. 17).



Рисунок 17. Глобальная карта зарегистрированной в 1963–2020 гг. максимальной магнитуды

#### 2.3 Проблема оценки максимальной возможной магнитуды

Задача оценки максимально возможной магнитуды региональных землетрясений является одной из ключевых задач для расчетов сейсмической опасности при использовании как вероятностного, так и детерминистского подходов. Обзору статистического и палео-сейсмологического подходов к этой проблеме посвящена одна из статей [1, Приложение A] в рамках специального выпуска "Lithosphere Dynamics and Earthquake Hazard Forecasting" («Динамика литосферы и прогноз сейсмической опасности») журнала "Surveys in geophysics" [4, Приложение A].

В рамках статистического подхода сравниваются метод статистических моментов, метод Байеса, метода, основанного на теории экстремальных значений (EVT). Проведено сравнение оценок Mmax в рамках усеченного закона Гутенберга-Рихера и по методу EVT. В качестве стабильной альтернативы потенциально неробастному значению Mmax рассмотрены квантили Q<sub>q</sub>(T) максимального землетрясения в будущем временном горизонте T (см. Рис. 18). 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 Mmax, получаемое для усеченного закона Гутенберга-Рихтера.



Рисунок 18. Иллюстрация типичного распределения величин Ммах (жирная линия) и квантиля Q<sub>50</sub>(0.95) (тонкая линия). Видна лучшая робастность значений квантиля.

Модель усеченного распределения Гутенберга-Рихтера (УГР) для оценки максимально возможной региональной магнитуды имеет важное значение в практических задачах в рамках вероятностного подхода к оценке сейсмической опасности. В этой связи модели УГР было посвящено специальное исследование [3, Приложение А]. Предложена новая оценка параметра Мтах, обозначаемая  $\overline{M}$ , основанная на оценке максимального правдоподобия с поправкой на смещение, для которого выведена точная формула в виде конечной суммы некоторых функций от максимального значения выборки  $\mu_n$  и минимальной рассматриваемой магнитуды  $m_0$ :

$$\overline{M} = \mu_n - \frac{\overline{s}}{u^n} [\log(1 - \overline{U}) + \overline{W_n}],$$
  
rge  $\overline{U} = 1 - \exp[-(\mu_n - m_0)/\overline{s}]; \overline{W_n} = \overline{U} + \frac{\overline{U}^2}{2} + \dots + \frac{\overline{U}^n}{n}.$ 

В работах большого числа авторов введены оценки параметра Mmax, 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 выборки  $\mu_n$  (величина Mmax 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  $\mu_n$ ,  $\bar{s}$ , обосновывая это тем, что при n  $\rightarrow \infty$  обе величины сходятся к своему математическому ожиданию, и получают уравнение для неизвестного параметра M:

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

Решая это уравнение относительно М различными приближенными способами, можно получить статистическую оценку неизвестного параметра М. Рассматривается вариант решения уравнения, предложенный в работах [25, 26]. Соответствующая оценка М обозначена МК. Также широко распространены Байесовские оценки Mmax. В работе [27], введена несмещенная оценка максимальной магнитуды М, обладающая наименьшей дисперсией среди всех несмещенных оценок:

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

Далее используется усеченный вариант этой оценки MP, а также оценки MK (усечение на значении  $\mu_n+1$ ). Было проведено сравнение новой оценки  $\overline{M}$  с перечисленными оценками параметра Mmax и показана её достаточно высокая эффективность (Рис. 19).



Рисунок 19. Смещения (Bias; слева) и средне-квадратичное отклонение (STD; справа) для 4-х оценок максимальной магнитуды М по искусственным каталогам (N = 10000); m0

=6.0, M = 8.0, s = 0.4. Кружки -  $\overline{M}$ ; квадраты – MK; звездочки - Байесовские оценки; точки – MP. Наиболее эффективной является оценка  $\overline{M}$ , близка к ней Байесовская оценка, наименее эффективной оказывается оценка MK.

С помощью аналогичной методики на примере региона Курильских островов и Камчатки (42.81  $\leq$  широта  $\leq$  53.56; 146.38  $\leq$  долгота  $\leq$  161.06) получена оценка квантиля Q<sub>T</sub>(q) максимальной магнитуды землетрясения в заданном будущем интервале времени Т (Рис. 20). Показано существенное искажение плотности распределения магнитуд на концах диапазона при использовании модели возмущения магнитуд с помощью случайных ошибок (Рис. 21).



Рисунок 20. График оценки квантиля  $Q_T(0.95) \pm STD$ 



Рисунок 21. Плотности вероятности УГР (жирная линия) и УГР, с магнитудой, искаженной случайной ошибкой  $\Delta = 0.5$ . Параметры УГР: m0 =6.0; M=8.0; s = 0.5.

#### 2.4 Структура сейсмического поля Байкальской рифтовой зоны

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 новых, статистических методов исследована структура сейсмического поля БРЗ. Пространственная разрешающая способность составила в областях высокой сейсмичности 100-120 км. Были выявлены (Рис. 22) 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 сейсмотектонической эволюции. Проведено сравнение оценок максимальной региональной магнитуды M<sub>max</sub>, полученных по инструментальным данным 1963-2021 гг. и по палео-данным. Показано, что оценки квантилей Q<sub>a</sub>(T) максимальных землетрясений в будущем интервале времени Т являются более предпочтительными чем оценки М<sub>тах</sub> для проблем сейсмического риска. Методика и результаты исследования опубликованы в журнале Физика Земли [8, Приложение А].



Рисунок 22. Контуры оценок поля десятичного логарифма интенсивности потока сейсмических событий  $\log(\lambda(x, y)^{-10^{-4}} \text{годы}^{-1} \text{ км}^{-2})$  на сетке 20 × 20 км, полученных модифицированным методом k-ближайших соседей (k=30).

На рис. 22 представлены контуры оценок поля десятичного логарифма интенсивности  $log(\lambda(x, y))$  на сетке 20 × 20 км, полученных описанным выше методом для нижнего порога регистрации h = 3,1, n = 4360, 1963 г. –2021. Количество ближайших соседей было выбрано равным 30.

## 2.5 Оценка сейсмической опасности по данным о смещениях блоков коренных пород: Алайская долина, Киргизия

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 [28].

Результаты исследования и полученные оценки опубликованы в работе [5, Приложение А]. В дополнение к преобладающим поперечным (относительно простирания 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 Q0,8 и Q0,95 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.

#### 3 Изучение и моделирование сейсмичности

#### 3.1 Моделирование сейсмичности с учетом закона продуктивности

Установленный недавно эмпирический закон продуктивности землетрясений [17] важнейших предположений, используемых опровергает одно ИЗ В широко распространенной стохастической модели сейсмичности ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence). Предположение состоит в том, что количество непосредственных афтершоков, вызванных землетрясениями с одинаковой магнитудой, примерно одинаково. В стандартной модели ETAS это приводит к Пуассоновскому распределению числа непосредственных афтершоков, а не геометрическому распределению. Теоретическому анализу продуктивности сейсмических событий в рамках различных модификаций модели ETAS посвящено исследование [2, Приложение А], [1, Приложение Б]. Продуктивность события магнитуды *m* определяют числом спровоцированных им событий с магнитудой не ниже  $m - \Delta$ : это могут быть как прямые 'потомки' числом  $v_{\Lambda}$ , так и все потомки числом V<sub>л</sub>. Эмпирический анализ в серии недавних исследований свидетельствует в пользу дискретного экспоненциального распределения для статистики  $v_{\Delta}$  и статистики  $V_{\Delta}$ , 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  $v_{\Lambda}$ . Первый основной результат исследования показывает, что ветвящаяся структура афтершоковой динамики не допускает совпадения типов распределения статистик  $v_{\Delta}$  и  $V_{\Delta}$  (скажем, наблюдаемый экспоненциальный или пуассоновский тип). Второй результат относится к поведению хвостов распределения V<sub>A</sub>. 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  $\Delta$ -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  $v_{\Delta}$  можно рассматривать как полезную альтернативу в рамках обобщенной модели ETAS(F). Другая характеристика  $\Delta$ -продуктивности, а именно  $V_{\Delta}$  для основных толчков, является более объективной и стабильной.

Для большого класса моделей ETAS(F) в исследовании дан ответ на вопрос, когда распределение общей  $\Delta$ -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  $v_{\Delta}$  и  $V_{\Delta}$ . Они связаны как с декластеризацией сейсмичности, так и с эффектом усреднения распределений  $v_{\Delta}$  и  $V_{\Delta}$  при группировании данных.

О первой трудности можно судить по экспериментам работы [29] с методом ближайших соседей. Этот метод, адаптированный к структуре ETAS, имеет 40процентную 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  $V_{\Delta}$ -распределения для основных толчков.

Наконец, теоретический результат для модели ETAS(F) показывает, что типы распределений  $v_{\Delta}$  и  $V_{\Delta}$  не могут быть одинаковыми из-за ветвящейся структуры кластеров.

#### 3.2 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 [30] 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 [31]) 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 і 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). Рамером лавины называется количество перераспределённых песчинок. Распределение событий по размерам является степенным, что похоже на график повторяемости землетрясений (Рисунок 23). 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 23. 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 (Рис. 24). 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 [30] вместо модели Манны, даёт существенно худшие значения суммарной ошибки прогноза и порождает трудности в нормализации размеров событий для решёток с разными L.



Рисунок 24. Суммарная ошибка прогноза є в модели Манны в зависимости от нормализованного размера целевых событий.

#### 3.3 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 основных землетрясений значительное отклонение режима от стационарного Пуассоновского процесса [7, Приложение А]. Установлено, что характер отклонения одинаков для трех различных способов выделения афтершоков (Рис. 25). 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 (Рис. 26). 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 25. Средняя плотность числа основных событий (M ≥ 4.0) для последовательных во времени групп из 500 землетрясений; черные точки обозначают идентификацию афтершоков оконным методом [32], красные — алгоритмом работы [33], синие — методом работы [34].



Рисунок 26. Изменчивость среднего расстояния D между основными событиями во временных интервалах 15 дней.

## 3.4 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 [6, Приложение А].

# 4 Гис-проекты для задач прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности.

В 2022 г. продолжена работа по архивации и визуализации прогнозов Глобального эксперимента в системе ГИС-проектов ИТПЗ РАН, реализуемых на новом сайте Института (<u>https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/global-test</u>), а также по пополнению интерактивных карт и баз данных, используемых в задачах прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности. Основное внимание было уделено двум

текущим проектам ИТПЗ РАН на основе QGIS: «Глобальный тест для прогнозирования в реальном времени сильнейших землетрясений в мире» и «Морфоструктурное районирование и сейсмоопасные районы».

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 к данным ИТПЗ РАН организован по группам пользователей и разделен в Проекты QGIS-Desktop, содержащие зависимости от актуальности данных. общегеографические слои (графические графики и береговая линия из наборов данных Natural Earth на https://www.naturalearthdata.com/, и сейсмическая маска в виде растра, подготовленного Институтом) и тематические данные ИТПЗ РАН (тематические базы геоданных), публикуются в форма веб-ГИС. Веб-приложение ГИС открывается в браузере пользователя по ссылке (https://www.itpz-ran.ru/ru/results/maps-and-databases/). Данные глобального теста для прогнозирования в реальном времени сильнейших землетрясений в мире с М 7.5 и М 8.0, 2000-2014 гг., доступны по ссылке (https://www.itpzran.ru/en/results/maps-and- databases/global-test-for-real-time-prediction-of-the-worlds-strongearthquakes/earthquakes-data-m-8\_0-7\_5-2000-2014/), интерфейс для М 7.5 показан на рис. 27.



Рисунок 27. Скриншот интерфейса Глобального эксперимента по среднесрочному прогнозу землетрясений М7.5+ в мире по алгоримам М8-МSc на 2000-2014 гг.

Гис-проект «Морфоструктурное районирование и сейсмоопасные районы» обобщает результаты по распознаванию мест возможного возникновения сильных

землетрясений в пределах итальянского региона [35] и территории Каспийского и Черного морей [36]. Алгоритмы распознавания образов выполняют классификацию узлов по степени сейсмической опасности. Морфоструктурные узлы и линеаменты сгруппированы по рангам в проекте QGIS Desktop и опубликованы в веб-ГИС для Италии (https://www.itpz-ran.ru/en/results/maps-and-databases/lineaments\_italyregion/) и для Черноморско-Каспийского региона (https://www.itpz-ran.ru/en/results/maps-and-databases/lineaments-black-sea-caspian-region/). Интерфейсы проектов представлены на Рис. 28-29.



Рис. 28. Скриншот интерфейса итальянского региона: морфоструктурное районирование и сейсмоопасные районы.



Рис. 29. Скриншот интерфейса Черного и Каспийского морей: морфоструктурная зональность и сейсмоопасные районы.

Технологически эти два проекта связаны с базами геоданных, проекты QGIS Desktop имеют метаданные и список ключевых слов. Подготовлено руководство

пользователя веб-приложения ГИС. Документ написан на русском языке, названия Прикладных слоев даны на английском языке. Рабочими языками веб-гида являются русский и английский.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные по теме исследования являются вкладом в решение задачи прогноза землетрясений. В целом, результаты экспериментальной проверки алгоритмов среднесрочного прогноза являются косвенным подтверждением предсказуемости сильных землетрясений. Вместе с тем, для более надежных и эффективных прогнозов помимо используемых в настоящее время данных каталогов землетрясений необходимо привлекать новые типы данных.

Обнаруженное ранее новое явление перед землетрясениями в зонах субдукции, основанные на применении недавно установленного закона продуктивности землетрясений, было сформулировано в виде прогнозного алгоритма. Проведено успешное ретроспективное тестирование этого алгоритма в региогнах Камчатки и Японии.

Получен первый опыт по интеграции сейсмологических и геодезических данных для среднесрочного прогноза землетрясений на примере двух сейсмических кризисов 2017-2018 гг. в Италии. 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.

Разрабатываемые новые подходы к оценке сейсмической опасности, включая комбинирование вероятностного и детерминистского подходов, усовершенствование моделей сейсмичности и методов оценки параметров, включая максимальную возможную магнитуду, имеют важное значение для сокращения ущерба от землетрясений и, соответственно, повышения защищенности общества от сейсмической опасности.

Усовершенствование методики неодетерминистского подхода К оценке сейсмической опасности (NDSHA) на примере юго-запада Китая показало возможность значительного уменьшения области высокой ожидаемой интенсивности сотрясений. Разработана усовершенствованная методика оценки максимальной возможной магнитуды в широко используемой модели усеченного закона Гутенберга-Рихтера. Исследованы свойства широко используемой стохастической модели сейсмичности ETAS с включением в нее экспоненциального закона продуктивности. Установлена неравномерность интенсивности потока землетрясений во времени для землетрясений Камчатки.

Продолжено наполнение и расширение общедоступной ГИС-ориентированной базы данных ИТПЗ РАН, предназначенной для задач прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности.

По результатам выполненных исследований опубликованы 11 статей в рецензируемых журналах и две главы в книге, изданной издательством Elsevier, а также сделано 11 докладов на международных и внутрироссийских научных конференциях.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Keilis-Borok, V.I., and V.G.Kossobokov, Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8. Phys. EarthPlanet.Inter., 1990, 61, 1-2: 73-83, doi:10.1016/0031-9201(90)90096-G.

Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Часть
 I. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы.— М.: ГЕОС, 2005.— 179 с.
 (Вычисл. сейсмология; 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.

 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).

9. 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.

10. Peresan, A., Romashkova L. Chapter 8 - Earthquake forecasting and timedependent 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).

Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности.
 Оценка области распространения сильных афтершоков // Физика Земли. 2017. № 3. С.
 43–61. DOI: 10.7868/S0002333717020028

Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности.
 Динамический закон Бота. // Физика Земли. 2018. № 6. С. 129–136. DOI: 10.1134/S0002333718060029

 Баранов С.В., Павленко В.А., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности.
 Оценка максимальной магнитуды последующих афтершоков // Физика Земли. 2019. № 4. С. 15-32. DOI: 10.31857/S0002-33372019415-32

14. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности пост-сейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН, 2019. 218 с.

Шебалин П.Н., Баранов С.В. О прогнозировании афтершоковой активности.
 Оценка длительности опасного периода. // Физика Земли. 2019. № 5. С. 22-37. DOI: 10.31857/S0002-33372019522-37

16. 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:<u>10.1002/9781119825050.ch3</u> (глава в книге).

17. Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake Productivity Law // Geophysical Journal International. 2020. V. 222. P. 1264–1269. DOI: <a href="https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252">https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252</a>.

 Шебалин П.Н, Баранов С.В., Дзебоев Б.А. Закон повторяемости количества афтершоков // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481. № 3. С. 320-323. DOI:<u>10.31857/S086956520001387-8</u>

19. 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

20. Kossobokov, V. General features of the strongest (with  $M \ge 8.2$ ) earthquake-prone areas in the non-Alpine zone of the Transasian seismic belt. // Keilis-Borok, V. I., Levshin, A. L. (Eds.), Logical and Computational Methods in Seismology. 1984. Moscow: Nauka, pp.69-72 (in Russian).

21. Gorshkov, A., Kossobokov, V., Soloviev, A. Recognition of earthquake- prone areas // Keilis-Borok, V. I., Soloviev, A. A. (Eds.), Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction. 2003. Berlin: Springer, pp.239-310. 22. Li, Y.-G., Zhang, Y. X., Wu, Z. L. (Eds.) China Seismic Experimental Site -Theoretical Framework and Ongoing Practice. 2022. Beijing/Basel: Higher Education Press with Springer Nature Publishing. DOI:10.1007/978-981-16-8607-8.

23. 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.

24. Boissonnade, A.C., Shah, H.C. Seismic vulnerability and insurance studies // Geneva Pap. Risk Insur. 1984. 9 (32), 223e254.

25. Kijko, A. Estimation of the maximum earthquake magnitude Mmax // Pure Appl. Geophys., 2004. 161(8):1655–1681.

26. Kijko, A. and Singh, M. Statistical tools for maximum possible earthquake estimation // Acta Geophys., 2011. 59(4):674–700.

27. 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.

28. 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.

29. 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. Volume118, Issue 6, p. 2865-2877. https://doi.org/10.1002/jgrb.50178

30. P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise // Phys. Rev. Lett. 1987. 59, 381–383.

31. S. Manna Two-state model of self-organized criticality // J. Phys. A, 1991. 24, L363–L369.

32. Gardner, J.K. and Knopoff, L., Is the sequence of earth- quakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // Bull. Seismol. Soc. Am., 1974, vol. 64, no. 5, pp. 1363–1367.

33. Molchan, G. and Dmitrieva, O., Aftershock identification: methods and new approaches // Geophys. J. Int., 1992, vol. 109, no. 3, pp. 501–516.

34. 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. 35. Gorshkov,A.I., G.F.Panza, A.A.Soloviev, and A.Aoudia, Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicily. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 2002, 4, 1: 1-24.

36. Gorshkov A., Novikova O. Estimating the validity of the recognition results of earthquake-prone areas using the ArcMap // Acta Geophysica. 2018. V. 66. № 5. P. 843–853. DOI:10.1007/s11600-018-0177-3.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений», изданные в 2022 г.

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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. V.98, №12, p.1647 – 1652. DOI: 10.1007/s12594-022-2232-6.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ Б

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

1. A.Peresan, G.Molchan, E.Varini Earthquake productivity within general ETAS models // Statistical Seismology International Conference (StatSei 12), Cargese (France), 7-21 Oct 2022.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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 (oral, online).

9. 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.

10. 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.

11. Kossobokov, V. Seismic Roulette (Invited Lecture in Seismology) // 3ECEES: September 5-9, 2022, Bucharest, Romania.