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 АААА-А19-119011490127-6; 121122300165-2 Рег. N ИКРБС

> УТВЕРЖДАЮ Директор ИТПЗ РАН чл.-корр. РАН

_____П.Н. Шебалин «____» _____2021 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (промежуточный, за 2021 год)

Руководитель НИР, главный научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией теории прогноза землетрясений, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

_____ П.Н. Шебалин

Подпись, дата

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Подпись, дата

Руководитель темы, директор, и.о. зав. лаб.

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Исполнители темы

лаборант-иссл.

Подпись, дата

мл. науч. сотр.

гл. науч. сотр. докт.физ.-мат. наук

вед. науч. сотр. канд.физ.-мат. наук

гл.науч. сотр. докт. геол.-мин. наук

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

> гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук

> гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук

> > лаборант-иссл.

лаборант-иссл.

гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук

ст. науч. сотр., зам. дир. по научной работе канд. физ.-мат. наук

> ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук

> гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

П.Н. Шебалин (введение, раздел 1.2, 1.4, 3.2, заключение)

> А.С. Агаян (раздел 1.3)

А.О. Антипова (раздел 1.2)

С.В. Баранов (разделы 1.2 и 3.2)

И.А. Воробьева (разделы 3.2 и 3.3)

Ю.Г. Гатинский (раздел 2.2)

А.И. Горшков (раздел 2.2)

А.Т. Исмаил-Заде (раздел 2.4)

В.Г. Кособоков (разделы 1.1, 1.3 и 2.1)

К.В. Крушельницкий (раздел 1.4)

С.Д. Маточкина (разделы 1.4)

Г.М. Молчан (раздел 1.4)

А.К. Некрасова (раздел 1.3)

О.В. Новикова (раздел 2.2)

В.Ф. Писаренко (раздел 2.3) науч. сотр.

Подпись, дата

Подпись, дата

Подпись, дата

Подпись, дата

гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук

ст.науч. сотр. канд. физ.-мат. наук

науч. сотр.

гл. науч. сотр. д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

науч. сотр.

Подпись, дата

Подпись, дата

Подпись, дата

мл.науч. сотр.

Нормоконтролер

Подпись, дата

Т.В. Прохорова (разделы 2.2)

М.В. Родкин (раздел 1.3)

Л.Л. Ромашкова (раздел 1.1)

Т.А. Рукавишникова (раздел 1.3)

А.А. Соловьев (разделы 1.1 и 3.1)

В.А. Тимофеева (раздел 3.2)

П.Д. Щепалина (раздел 1.3)

О.В. Селюцкая

РЕФЕРАТ

Отчет 43 с., 1 кн., 14 рис., 1 табл., 54 источн., 2 прил.

АЛГОРИТМЫ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗА, ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, МЕСТА ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, АФТЕРШОКИ, ЗАКОН ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ГРАФИК ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Исследования, проводимые по теме в 2021 году, включали: продолжение экспериментов по применению разработанных ранее алгоритмов для оперативного прогноза землетрясений в режиме реального времени, включая прогноз активности афтершоков после сильных землетрясений мира; анализ опыта проведения таких экспериментов с целью совершенствования разработанных ранее алгоритмов прогноза и оценки надежности и достоверности результатов прогноза; многопараметрическое исследование динамики сейсмичности до и после сильных землетрясений с целью выявления общих закономерностей; поиск новых предвестников землетрясений на основе использования недавно установленного закона продуктивности землетрясений; оценку сейсмической опасности для территории Китайского сейсмического экспериментального полигона (CSES) методом NDSHA; определение мест возможного возникновения сильных землетрясений на территории Болгарии; совершенствование методики оценки интенсивности сейсмического потока; обобщение опыта моделирования сейсмичности с помощью модели блоковой динамики; исследование особенностей распределения магнитуд землетрясений в очагах землетрясений зон субдукции; применение мультимасштабного метода анализа распределения магнитуд в новом каталоге Малой Антильской дуги.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ6
ВВЕДЕНИЕ7
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ
1 Разработка и применение методов прогноза землетрясений10
1.1 Эксперимент по применению алгоритма М8 10
1.2 Прогноз активности афтершоков11
1.3 Динамика сейсмичности до и после сильных землетрясений 16
1.4 Поиск новых предвестников землетрясений18
2 Оценка сейсмической опасности
2.1 Оценка сейсмической опасности для территории CSES методом NDSHA20
2.2 Определение мест возможного возникновения сильных землетрясений
2.3 Оценка интенсивности сейсмического потока модифицированным методом k-
ближайших соседей
3 Изучение и моделирование сейсмичности
3.1 Моделирование сейсмичности с помощью модели блоковой динамики
3.2 Дефицит сильных афтершоков как индикатор афтерслипа в очагах землетрясений
зон субдукции
3.3 Мультимасштабный анализ нового каталога землетрясений Малой Антильской дуги
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ
ПРИЛОЖЕНИЯ:
Приложение А – Публикации по теме НИР, изданные в 2021 г
Приложение Б – Доклады на международных и российских конференциях по теме НИР в
2021 г

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применены следующие сокращения и обозначения.

	ГЦ РАН	_	Геофизический центр РАН						
	ИТПЗ РАН	_	Институт теории прогноза землетрясений и						
математической геофизики РАН									
	MCP	_	морфоструктурное районирование						
	ОЗПЗ	_	общий закон подобия для землетрясений Advanced National Seismic System						
	ANSS	_							
	BAFD	_	Block-and-fault dynamics (динамика блоков и разломов)						
	DGA	_	designed ground acceleration (расчетное ускороение						
грунта)									
	NDSHA	_	neo-deterministic seismic hazard assessment (Heo-						
детерминисткая оценка сейсмической опасности)									
	PGA	_	peak ground acceleration (пиковое ускороение грунта)						
	PSHA	_	probabilistic seismic hazard assessment (вероятностная						
оценка сейсмической опасности)									
	CSES	_	China Seismic Experimental Site						
	GCMT	_	Global centroid moment tensor project						

введение

Исследования по теме в 2021 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 В настоящее время остается нерешенной. 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. Тем не менее, в мировой практике в последние годы наметился существенный прогресс в этом направлении, главным образом, за счет быстрого увеличения объемов и разнообразия баз данных, содержащих измерения геофизических полей. Российские ученые имеют уникальный опыт создания алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений и их экспериментального применения для оперативного прогноза в режиме реального времени. Дальнейшее развитие этого опыта с использованием новых подходов и быстро расширяющихся баз данных по измерениям различных геофизических полей с помощью существующих и вновь развертываемых систем наблюдения, позволит создать условия для разработки нового поколения алгоритмов прогноза и наметить подходы к решению задачи краткосрочного прогноза. Принципиальная возможность решения проблемы прогнозирования землетрясений уже не вызывает сомнений, что делает эту задачу весьма актуальной.

Одной из актуальных задач прогнозирования землетрясений является прогнозирование активности афтершоков сразу после сильных землетрясений, поскольку во многих случаях ущерб от сильных афтершоков превосходит ущерб от основного толчка.

Другой проблемой, связанной с сокращением возможного ущерба от землетрясений, является адекватная оценка сейсмической опасности конкретных сейсмоопасных регионов, а также создание новых и совершенствование существующих

методов оценки сейсмической опасности. В настоящее время в мировой практике доминирует вероятностный подход к оценке сейсмической опасности (PSHA), составляющий основу сейсмического районирования, принятого во многих странах, как в национальном, так и в региональном масштабах. В рамках этого подхода 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. Вместе с тем, использовавшийся ранее детерминистский подход обладает некоторыми преимуществами. В частности, этот метод позволяет смоделировать воздействие конкретных модельных землетрясений на конкретные здания и сооружения. Поэтому современная тенденция развития методов оценки сейсмической опасности состоит в комбинации вероятностного (моделирование определенной повторяемости землетрясений магнитуды В зависимости от местоположения) и детерминистского (моделирование воздействия от землетрясений) подходов. Одним из вариантов такой комбинации является метод нео-детерминистской оценки сейсмической опасности NDSHA.

Необходимо отметить, что вторая часть любой методики оценки сейсмической опасности – оценка воздействий от землетрясений на некотором расстоянии от очага – относительно более проработана. Ошибки в оценке сейсмической опасности, часто обнаруживаемые после сильных землетрясений (например, Суматранское землетрясение и цунами 2004 года, 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 землетрясений на расстоянии. Такие ошибки обычно вызваны тем, что оценки 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. В областях редкого проявления сейсмической активности для оценки интенсивности приходится использовать информацию о числе землетрясений в больших пространственных объемах. При использовании простых методов сглаживания это неизбежно приводит к эффекту «размазывания» - завышению интенсивности сейсмического потока на больших площадях и, наоборот, ее занижению в реально высокосейсмичных Использование современных зонах. подходов 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 2021 году включали: продолжение экспериментов по применению разработанных ранее алгоритмов для оперативного прогноза землетрясений в режиме реального времени, включая прогноз активности афтершоков после сильных землетрясений мира; анализ накопленного многолетнего опыта проведения таких экспериментов с целью совершенствования разработанных ранее алгоритмов прогноза и оценки надежности и достоверности результатов прогноза; многопараметрическое исследование динамики сейсмичности до и после сильных землетрясений с целью выявления общих закономерностей; поиск новых предвестников землетрясений на основе использования недавно установленного закона продуктивности землетрясений; оценку в рамках меморандума о сотрудничестве с китайскими учеными сейсмической опасности для территории Китайского сейсмического экспериментального полигона (CSES) методом NDSHA; определение мест возможного возникновения сильных землетрясений на территории Болгарии; совершенствование методики оценки интенсивности сейсмического потока с помощью модификации метода k-ближайших соседей; обобщение опыта моделирования сейсмичности с помощью модели блоковой динамики; исследование особенностей распределения магнитуд землетрясений в очагах землетрясений зон субдукции, позволившее обнаружить характерный дефицит сильных афтершоков в первые после землетрясения, указывающий на частично асейсмичное дни проскальзывание в зоне очага; применение в рамках многолетнего сотрудничества с Парижским Институтом физики Земли мультимасштабного метода анализа распределения магнитуд в новом каталоге Малой Антильской дуги, позволившего построить детальные карты представительной магнитуды для региона.

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 2021 году был продолжен Глобальный эксперимент по применению алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений М8 [1, 2]. Полученные в результате прогноза области тревоги, где ожидаются прогнозируемые землетрясения, уточнялись с помощью алгоритма MSc [2-4]. 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). В 2021 г. осуществлена архивация и визуализация прогнозов Глобального эксперимента в системе ГИС-проектов ИТПЗ PAH, реализуемых на новом сайте Института (https://www.itpzran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/global-test).

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 в 2020 году произошло два землетрясения с $M \ge 8.0$, и четыре землетрясения с магнитудой $7.5 \le M < 8.0$. 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 M8+ и четыре пропуска цели в прогнозе событий М8+ и четыре пропуска цели в прогнозе событий М7.5+. Вместе с тем, на сегодняшний день статистика результатов, полученных в Глобальном тесте, свидетельствует с достоверностью выше 99% о достаточно высокой эффективности прогнозов с использованием алгоритма M8, а также в его комбинации с алгоритмом MSc, который задает локализацию очаговой зоны ожидаемого землетрясения [8]. Таким образом, нулевая гипотеза о случайном возникновении в сейсмически активных регионах отвергается с сейсмологической достоверностью, по крайней мере, для крупнейших землетрясений в мире.

По результатам выполнения Глобального эксперимента пополнен архив прогнозных карт в среде ArcGis и опубликована статья в сборнике статей, посвященном Серебряному Юбилею Азиатской Сейсмологической Комиссии [8].

В 2021 году продолжен эксперимент по применению стабилизированной версии алгоритма M8, получившей название M8S [9], в Италии. Результаты нашли свое применение для решения задач в рамках Меморандума о сотрудничестве ИТПЗ РАН с Национальным институтом океанографии и прикладной геофизики Италии. Итоги эксперимента по применению алгоритма в Италии в период 1972-2020 гг. (Таблица 1). Рассматривается три варианта целей прогноза: землетрясения с магнитудой $M \ge 6.5$ (M6.5+), $M \ge 6.0$ (M6+) и $M \ge 5.5$ (M5.5+).

Таблица 1. 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
Проспективные прогнозы, 2002- 2020 гг.	14	0/1	27	0/3	24	5/10
Все прогнозы, 1972-2020 гг.	27	2/3	35	1/5	33	14/24

Представленные результаты были опубликованы в 2021 г. в главе книги, посвященной 100-летнему юбилею со дня рождения основателя ИТПЗ РАН академика В.И. Кейлис-Борока [10].

В целом, результаты экспериментальной проверки алгоритма M8 и его модификации M8S 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 2021 г. выполнялся прогноз афтершоковой активности в режиме реальному. Прогнозирование выполнялось времени, близком К с помощью автоматизированной информационной системы оценки опасности афтершоков AFCAST (URL: https://itpz-ran.ru/afcast/), созданной в 2017-2019 гг. в ИТПЗ РАН. Система получает глобального ANSS оперативные данные каталога 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. В 2021 г. произошло 46 таких событий (Рисунок 1).



Рисунок 1. Землетрясения с М≥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 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 2);
- магнитуды сильнейшего афтершока (см. Рисунок 3), ожидаемого за время (*t*,365) суток после основного толчка (*t* = 0.01,2^{*j*}, *j* = -2,...,7) с вероятностью 10, 50 и 90% используется динамический закон Бота ([12-14];
- оценка длительности опасного периода для землетрясений с M_m 2 или выше (M_m магнитуда основного толчка) с вероятностями 10, 50 и 90% [15-17], пример показан на Рисунке 4 (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			
	3	Ellipse - Soft strategy	Ellipse by quantile: center at the Rupture center	0.87	8552.11			
	3	Ellipse - Neutral strategy	Ellipse by quantile: center at the Rupture center	0.95	17577.20			
	3	Ellipse - Hard strategy	Ellipse by quantile: center at the Rupture center	0.99	18141.30			
	4	Statdium - Soft strategy	Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value	0.87	12754.20			
	4	Statdium - Neutral strategy	Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value	0.95	24209.00			
	4	Statdium - Hard strategy	Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value	0.99	28212.30			



Рисунок 2. Пример областей, где ожидаются афтершоки с М≥5.5, инициированные землетрясением М 7.7, произошедшим 2021-02-10 13:20:00 UTC к юго-востоку от островов Луайоте (легенда показана сверху и слева).



Рисунок 3. Пример оценки по динамическому закону Бота магнитуды ожидаемого сильнейшего афтершока, инициированного землетрясением М 7.7, произошедшим 2021-02-10 13:20:00 UTC к юго-востоку от островов Луайоте (легенда показана справа).



Рисунок 4. Пример оценки длительности опасного периода, в течении которого ожидаются афтершока с М≥5.7, инициированные землетрясением М 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 ранее законе продуктивности [17, 18], согласно которому число инициированных толчков с магнитудой М≥Мт- Δ М≥Мс (Мт – магнитуда основного толчка, Δ М>0, Мс – 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. 2. (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,...,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 5.



Рисунок 5. 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).

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 2021 г. зарегистрировано 46 землетрясений с М≥6.5 (Рисунок 1). Для каждого такого землетрясения были 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 М≥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 [12].

Все 46 прогнозов 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> В 2021 г. все элементы методики расчетов, используемых в системе AFCAST, опубликованы в виде главы в книге издательства Wiley [19].

1.3 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 ≥ 7.5, глубина <300 км) в 1985-2020 гг. [20]. Используется многопараметрическое описание сейсмической активности: (i) количество событий N; (ii) высвобождение деформации Бениоффа, Σ ; (iii) времена между событиями т; (iv) параметр закона Гутенберга-Рихтера, b; и (v) управляющий параметра η Общего закона подобия для землетрясений (USLE) [21-23], обобщающего соотношение Гутенберга-Рихтера и учитывающего естественное фрактальное распределение очагов землетрясений. Эти параметры определяются в кругах радиуса R=0.5 (е^{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 [24]. 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 6 показана эмпирическая функция распределения времен от последнего и от предпоследнего t* - tm-1, а также время задержки t* - tm-2 от предпоследнего землетрясения с магнитудой ≥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 6. Эмпирическое распределение времени от последнего (жирная линия) и предпоследнего (тонкая линия) землетрясений с М≥4.5, предшествующих основному толчку с М≥7.5.

В работе [25] по данным каталога GCMT [26] получен схожий результат, более того, отмечается экспоненциальный рост числа форшоков по мере приближения по времени к основному толчку. В работе [27], 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 фонешума.

В пилотном исследовании [28] сравнивается до- и постсейсмические смещения, связанные с сильнейшими землетрясениями и полученные из наблюдений GPS и сейсмических каталогов. Использованы данные GPS со станций GNSS (Глобальной навигационной спутниковой системы) 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 существование прерывистых подтверждают длительных периодов регионально стабильных уровней сейсмического режима, отраженных в управляющем параметре Общего закона подобия для землетрясений (USLE) [21-23], которые могут переключиться в результате среднесрочных или даже краткосрочных всплесков активности, связанных с катастрофическими событиями.

По результатам исследований динамики сейсмичности до и после землетрясений в 2021 г. опубликованы четыре статьи [20, 25, 27, 28].

1.4 Поиск новых предвестников землетрясений

В областях подготовки недавних сильных землетрясений Камчатки, Курил и Японии было исследовано пространственно-временное распределение параметра «коэффициент кластеризации» $\Lambda_{\Delta M}$ (среднее по пространственно-временному объему продуктивности землетрясений – параметра недавно значение установленного экспоненциального закона продуктивности землетрясений [29]). С этой целью были построены карты параметра $\Lambda_{\Delta M}$ 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, М=6.8 и Ближне-Алеутского, 17.07.2017, М=7.6 (Рисунок 7). Затем были выделены области повышенных значений коэффициента кластеризации вблизи недавних сильных землетрясений Камчатки, Курил, Японии в 10летние интервалы, предшествующие этим землетрясениям и в скользящем временном окне размером 5 лет были построены графики изменения параметра Λ_{M} во времени (Рисунок 8). Были рассмотрены Южно-Озерновское, и Ближне-Алеутское землетрясения 2017 г. вблизи Камчатки, Симуширское землетрясение на Курильских островах,

15.11.2006 г, М=8.3, землетрясения Токачи-Оки, 26.09.2003, М=8.1 и Тохоку, 11.03.2011, М=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 (см. п. 1.3).



Рисунок 7. Карта коэффициента кластеризации в районе Камчатки: период усреднения 1996-2016, радиус круга осреднения 50 км. Звездочками обозначены эпицентры сильных землетрясений в 2017 г. (дата и магнитуда указаны рядом).



Рисунок 8. Временные вариации коэффициента кластеризации вблизи эпицентров землетрясений (слева направо): Южно-Озерновского, 29.03.2017, М=6.8, Ближне-Алеутского, 17.07.2017, М=7.6, Токачи-Оки, 26.09.2003, М=8.3, Тохоку, 11.03.2011, М=9.1, Симуширского, 15.11.2006 г, М=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» [30], но использование закона продуктивности землетрясений сокращает число свободных параметров, необходимых для построения прогнозного алгоритма.

Результаты исследований по поиску новых предвестников землетрясений были доложены на трех конференциях ([1-3] в Приложении В, [1-3]).

2 Оценка сейсмической опасности

2.1 Оценка сейсмической опасности для территории CSES методом NDSHA

В работе [31] выполнено сейсмическое районирование первого порядка на основе нео-детерминистской оценки сейсмической опасности (NDSHA) в исследуемой области (Рисунок 8), ограниченной 94 ° \sim 108 ° в.д. и 19 ° \sim 35 ° с.ш., включая юго-восточную окраину Тибетского нагорья и регион Сычуань-Юньнань. Результаты нашли свое применение для решения задач в рамках Меморандума о сотрудничестве ИТПЗ РАН и IEF СЕА (Китайская Народная Республика) для Китайской сейсмической экспериментальной площадки (CSES) Сейсмическая опасность отображается картами пикового смещения грунта (PGD), пиковой скорости грунта (PGV) и расчетного ускорения грунта (DGA, Рисунок 9), 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-геологотектоническую 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., Ms = 8.0) и Лушаньского (20 апреля 2013 г., Ms = 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 8. Район исследования (94° ~ 108° в.д., 18° ~ 35° с.ш.). Основные активные системы разломов отмечены Fx (при x = 1,..,8): F1 — зона разлома Сяньшуйхэ; F2 — зона разлома Аннинхэ; F3 — зона разлома Земухе; F4, зона разлома Даляньшань; F5 — зона разлома Сяоцзян; F6 — зона разлома Хунхэ; F7, зона разлома Лицзян-Сяоцзиньхэ; F8, зона разлома Лунмэньшань. Различные цветные кружки показывают пространственное распределение сильных землетрясений с M ≥ 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), Е: Блок Баян-Хар, F: блок Qiangtang, G: блок Qaidam, H: блок Alax и I: блок Ordos. Красная звезда указывает на расположение Пекина. Тектонические данные взяты из [32]. 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 [33]. Данные о высоте взяты из источника https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/ (последний доступ 2 марта 2021 г.).



Рисунок 9. Расчетная карта расчетного ускорения грунта (DGA) с учетом CSESeventV2020 и сейсмогенных узлов, связанных с Mdesign (γEM ≠ 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, Ms = 8,5, Хайюань и 1927 г., 23 мая, Ms = 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.

Исследование опубликовано в журнале Engineering Geology [31].

2.2 Определение мест возможного возникновения сильных землетрясений

Для оценки сейсмической опасности важно знать, где в рассматриваемом регионе могут произойти сильные землетрясения. В некоторых местах сильные землетрясения уже происходили, это достоверно известно по инструментальным и историческим данным. Но землетрясения могут происходить и вне таких мест. В рамках подхода, разработанного начиная с 70-х годов прошлого века при сотрудничестве математиков, геофизиков и геоморфологов [34-38] выделяются объекты схемы морфоструктурного районирования исследуемого региона (в частности, окрестности пересечений морфоструктурных линеаментов), часть из которых затем идентифицируется с помощью методов разпознавания образов как потенциально опасные.

Такой подход был применен для определения мест возможного возникновения землетрясений с магнитудой М≥6 на территории Болгарии. Задача решена 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 М≥6. Эпицентры этих землетрясений приурочены к 16 узлам, которые составили материал обучения высокосейсмичного класса для алгоритма распознавания Кора-3 [37]. Классификация узлов на высоко- и низкосейсмичные относительно порога М=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 М≥6 отнесено 59 узлов, включая 15, входивших в материал обучения (Рисунок 10). Большинство распознанных сейсмоопасных узлов расположено на линаментах 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 М6+ указывает на высокую контрастность неотектонических движений земной коры и наличие в ней глубинных неоднородностей в окрестностях таких узлов.

Результаты исследования опубликованы в работе [39] и сделан доклад на Конгрессе балканского геофизического общества ([15] в Приложении Б).

В рамках данной темы гл.науч.сотр. чл.-корр. РАН А.А. Соловьевым была решена задача распознавания на основе морфоструктурного районирования, выполненного д.ф.м.н. А.И. Горшковым и к.ф.-м.н. О.В. Новиковой в рамках темы НИР «Некоторые задачи геодинамики, разработка и использование математических методов изучения природных систем».



Рисунок 10. Сейсмогенные узлы Болгарского региона для M6+. Кругами показаны узлы, в которых возможны землетрясения M6+. Красные кружки - эпицентры землетрясений M6+. Линиями показаны морфоструктурные линеаменты.

2.3 Оценка интенсивности сейсмического потока модифицированным методом к-ближайших соседей

В задачах вероятностной оценки сейсмической опасности (PSHA) остро стоит задача адекватной оценки интенсивности сейсмического потока. В областях редкого сейсмической проявления 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 11) 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.

Рисунок 11. Карты изолиний логарифмической интенсивности потока землетрясений с магнитудой М≥6 [1/100 лет·100 км2] для Курильской области: а) 1904– 2014 гг., b) 1904–1958 гг., c) 1959–2014 гг. К1, К2, К3 — пятна с высокой сейсмической интенсивностью; белая диагональ - это профиль К.

Методика и результаты исследования опубликованы в журнале Pure and Applied Geophysics [40].

3 Изучение и моделирование сейсмичности

3.1 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 2021 г. было 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 [41]. 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 12 показан пример модели BAFD для Закавказья.



Рисунок 12. Модель BAFD Закавказского региона. (а) Карта представляет блочную модель (коричневые линии). Инструментально зарегистрированные землетрясения отмечены красными точками (магнитудой M4,5+), малыми красными звездами (M6+) и большими красными звездами (M7+) (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

[42] с 1800 г., М≥6,0; жирная черная кривая соответствует синтетическим событиям. На нижних панелях представлены синтетические времена и магнитуды землетрясений для трех сегментов разломов, где (с) произошло Рачинское землетрясение 1991 г., (d) Шамахинское землетрясение 1902 г. и (е) Спитакское землетрясение 1988 г., а также (f) Нахичеванский разлом.

Результаты моделирования показали, что синтетические сильные землетрясения хорошо имитируют региональную сейсмичность (Рисунок 12а); 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 12b); а механизмы очагов синтетической сейсмичности подтвердили региональную картину напряженного состояния. Модель BAFD предсказывает землетрясения с магнитудой М7+ на участке 4, связанном с Нахичеванским разломом (Рисунок 12f), где среднее время повторения сильных синтетических сейсмических событий оценивается примерно в 700 лет. Возникновение сильных землетрясений достаточно периодично 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 BAFD, а также оценок сейсмической опасности.

3.2 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 [43-44], при этом рядом исследователей было показано, что афтершоки ответственны за очень малую часть постсейсмических деформаций, не более нескольких процентов [45]. Движущими механизмами пост-сейсмической деформации являются вязкоупругая релаксации в коре и верхней мантии Земли, и пост-сейсмическое проскальзывание (афтерслип), отражающее фрикционные свойства контакта тектонических плит в очаговой зоне сильного землетрясения [46-48]. 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 [49], используется статистический анализ распределения магнитуд афтершоков. Ранее в ряде работ [50, 51] 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 данном исследовании на примере трех сильных землетрясений в зонах субдукции было показано (Рисунок 13), 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, повидимому, 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 13. Афтершоки трех сильных землетрясений (ANSS, M≥4.7). А) Кроноцкое, Камчатка 1997, Мw=7.8; В) Симуширское, Курильские острова 2006, Мw=8.3; С) Тохоку, Япония 2011, Мw=9.0. Карты афтершоков в слэбе, временная последовательность магнитуды афтершоков и графики повторяемости ранних (черная линия, точки) и поздних (серая линия, +) афтершоков. Ранние и поздние афтершоки отделены штриховыми линиями.

3.3 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 [52]. Мультимасштабный метод картирования пространственных вариаций магнитуды полной регистрации Мс основан на адаптации размера исследуемой зоны к диапазону магнитуд рассматриваемых событий [53]. С увеличением магнитуды производится увеличение области выборки данных на основе эмпирических отношений, принятых в сейсмотектонике [54]. 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 14) показывает заметное улучшение по сравнению с рутинными каталогами сейсмических обсерваторий Мартиники и Гваделупы.



Рисунок 14. Магнитуда полной регистрации *MC*, (A–D) и ее погрешности (E–H) за два периода времени для коровых землетрясений Карибской плиты и субдукционных землетрясений в зоне субдукции.

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.

Обнаружены новые явления перед землетрясениями в зонах субдукции, основанные на применении недавно установленного закона продуктивности землетрясений: долговременное повышенное значение средней продуктивности в области подготовки землетрясения и быстрый рост параметра в этой области перед землетрясением.

Разрабатываемые новые подходы к оценке сейсмической опасности, включая использование результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений, оценок коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений, моделирование сейсмичности, а также совершенствование методик расчета интенсивности сейсмического потока имеют важное значение для сокращения ущерба от землетрясений и, соответственно, повышения защищенности общества от сейсмической опасности.

Для оперативной оценки сейсмической опасности также актуален прогноз афтершоковой активности после землетрясений, поскольку во многих случаях сильные афтершоки вызывают ущерб, сравнимый с ущербом от основного толчка, а иногда и превосходящий его. 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 также подтверждает заложенные в систему AFCAST модели.

Обнаружено явление дефицита сильных афтершоков в первые дни после сильных землетрясений в зонах субдукции, что может свидетельствовать о значительном асейсмическом проскальзывании на ранней стадии пост-сейсмических движений. Полученный результат имеет существенное значение, в частности, для более точного прогнозирования активности афтершоков после сильных землетрясений и для моделирования сейсмичности в целом.

По результатам выполненных исследований опубликованы 12 статей в рецензируемых журналах и главы в двух книгах, изданных издательствами Wiley и

Elsevier, а также сделано 22 доклада 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. (2021) Statistical Laws of Post-seismic Activity. In: Limnios N, Papadimitriou E, Tsaklidis WG (ed) Statistical Methods and Modeling of Seismogenesis, Wiley, Hoboken, pp 64-103 https://doi.org/10.1002/9781119825050.ch3

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

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

19. 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 (глава в книге).

20. 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/s10712-021-09674-020.

21. Кособоков В.Г., Мажкенов С.А. Интенсивность потока землетрясений в очаговой области // Доклады Академии наук Республики Казахстан.— 1992.— № 1.— С. 53—57.

22. 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).

23. 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.

24. Dobrovolsky IP, Zubkov SI, Miachkin VI (1979) Estimation of the size of earthquake preparation zones. Pure Appl Geophys 117(5):1025–1044. https://doi.org/10.1007/BF00876083.

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

26. 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.

27. 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. C. 128-137. DOI:10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137.

28. 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).

09674-0 (WOS – Q1, Scopus – Q1).

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

30.Keilis-Borok, V., Knopoff, L. & Rotvain, I. Bursts of aftershocks, long-termprecursorsofstrongearthquakes//Nature.1980. 283: 259–263.https://doi.org/10.1038/283259a0.

31. 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).

32. 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

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран.—М.: Наука, 1979.— 172 с.

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. 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.

41. 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.

42. Ulomov VI, Medvedeva NS (2014) Dedicated catalog of earthquake of the Norther Eurasia. O.Y. Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow.

43. 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.

44. DeMets C. Afterslip No Longer an Afterthought // Nature. 1997. No 386. Is. 6625. P. 549-549. DOI: https://doi.org/10.1038/386549a0.

45. Bürgmann R., Kogan M.G., Levin V.E., Scholz C.H., King R.W., Steblov G.M. Rapid aseismic moment release following the 5 December 1997 Kronotsky Kamchatka earthquake // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 1331- 1334. DOI:10.1029/2000GL012350.

46. 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

47. 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.

48. 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

49. 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

50. Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C. Break of slope in earthquake size distribution and creep rate along the San Andreas fault system // Geophys. Res. Let. 2016. V 43. No. 3. P. 6869-6875. DOI:10.1002/2016GL069636.

51. Vorobieva I. A., Soloviev A. A., Shebalin P. N. Mapping of Interplate Coupling in the Kamchatka Subduction Zone from Variations in the Earthquake Size Distribution // Doklady Earth Sciences. 2019. V. No 484, Part 2. P. 173–176. DOI:10.1134/S1028334X19020077.

52. 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

53. Vorobieva, I., Narteau, C., Shebalin, P., Beauducel, F., Nercessian, A., Clouard, V., and Bouin, M.-P. Multiscale Mapping of Completeness Magnitude of Earthquake Catalogs // Bulletin of the Seismological Society of America. 2013. 103: 2188-2202.

54. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений», изданные в 2021 г.

1. 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).

2. 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).

3. 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).

4. 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).

5. 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).

6. 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).

 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).

 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).

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

10. 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)

11. 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 (глава в книге).

12. 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).

13. 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. C. 128-137. DOI:10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137. (BAK)

14. 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. (WOS Q)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

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

1. 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. 21 (oral online #372, 22 sept. 2021, http://www.escgreece2021.eu)

2. 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. (устный онлайн 28.09.2021 г., https://www.emsd.ru/conf2021).

3. 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. (стендовый доклад, 29.09.2021 г.)

4. 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 (устный доклад онлайн).

5. 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.

6. 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.

7. 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 (oral online)

8. 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 (oral online).

9. 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 (https://www.geopronh.com).

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

11. 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 (устный доклад).

12. 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 (устный доклад).

13. 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 (устный доклад онлайн, http://itig.as.khb.ru/conf/2021/Kos 11 2021.pdf).

14. 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. https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1919-0.2021.1-233.

15. 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 (стендовый доклад).

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

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

18. 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, (устный доклад)

19. 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 (устный доклад онлайн).

20. 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.

21. Antonella Peresan, Leontina Romashkova, Hany M. Hassan, Earthquake forecasting and time- dependent hazard scenarios for the Adriatic region, 37th General Assembly of the European Seismological Commission, 19-24 September 2021, online

22. Gorshkov A., Novikova O., Dimitrova S., Dimova L., Raykova R. Identifying the Possible Locations of Earthquakes M6+ in the Bulgarian Region // Conference Proceedings, 11th

Congress of the Balkan Geophysical Society. Oct 2021. V. 2021. P. 1 – 5. Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers DOI:10.3997/2214-4609.202149BGS65.