# 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 № гос.регистрации AAAA-A19-119011490127-6 Инв. № 2021-1

УТВЕРЖДАЮ	
Директор ИТПЗ	PAH
члкорр. РАН	
	П.Н. Шебалин
«»	2020 г.

# ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ «ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ» (промежуточный, за 2020 год)

Руководитель НИР,		
главный научный сотрудник,		
заведующий лабораторией теор	рии	
прогноза землетрясений,		
д.фм.н., члкорр. РАН		А.А. Соловьев
	Полпись, лата	

# СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, гл. науч. сотр., зав. лаб.		А.А. Соловьев (введение, раздел 2.2, заключение)		
д.фм.н., члкорр. РАН	Подпись, дата			
Исполнители темы				
ст. науч. сотр.		И.А. Воробьева		
канд.физмат. наук	Подпись, дата	(раздел 3.2)		
вед.науч. сотр.		_ Ю.Г. Гатинский		
докт. геолмин. наук	Подпись, дата	(раздел 3.3)		
гл. науч. сотр., зав. лаб.		_ А.И. Горшков		
докт. физмат. наук	Подпись, дата	(раздел 2.2)		
гл. науч. сотр.		_ А.Т. Исмаил-Заде		
докт. физмат. наук	Подпись, дата	(раздел 2.3)		
гл. науч. сотр.		_ В.Г. Кособоков		
докт. физмат. наук	Подпись, дата	(разделы 1.1 и 2.1)		
гл. науч. сотр.		_ Г.М. Молчан		
докт. физмат. наук	Подпись, дата	(раздел 2.4)		
ст. науч. сотр., зам. дир. по		_ А.К. Некрасова		
научной работе — канд. физмат. наук	Подпись, дата	(раздел 2.1)		
ст. науч. сотр.		О.В. Новикова		
канд. физмат. наук	Подпись, дата	(раздел 2.2)		
VOLUM 0.0779		_ Т.В. Прохорова		
науч. сотр.	Подпись, дата	(разделы 1.1 и 3.3)		
директор ИТПЗ РАН,		П.Н. Шебалин		
гл. науч. сотр.		_ (разделы 1.2, 3.1 и 3.2,		
д.фм.н., члкорр. РАН	Подпись, дата	заключение)		
мл.науч. сотр.		_ П.Д. Щепалина		
	Подпись, дата	(раздел 1.1)		
науч. сотр.		_ В.А. Тимофеева		
науч. согр.	Подпись, дата	(раздел 2.1)		
ст.науч. сотр.		_ Л.Л. Ромашкова		
канд. физмат. наук	Подпись, дата	(раздел 2.4)		
Нормоконтролер _		О.В. Селюцкая		
-r <del>rr</del> —	Подпись, дата			

# РЕФЕРАТ

Отчет 38 с., 1 кн., 12 рис., 3 табл., 63 источн., 1 прил.

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

Исследования, проводимые по теме в 2020 году, включали: продолжение глобального эксперимента по прогнозу сильнейших землетрясений мира и анализ многолетнего опыта этого эксперимента и применения других алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений; изучение опыта определения значений коэффициентов общего закона подобия для землетрясений и их применения для оценки сейсмической опасности; распознавание мест возможного возникновения сильнейших (с магнитудой  $M \ge 7/0$ )для территории Эллинид (Греция); получение вероятностной оценки сейсмической опасности плато Шиллонг (штат Мегхалая, Индия);изучение некоторых теоретических аспектов оценки сейсмического риска; изучение статистики афтершоковых последовательностей, на основе которого сделан вывод, что неверным является один из постулатов практически всех моделей сейсмического режима и афтершоковых последовательностей, состоящий в том, что землетрясения одинаковой силы инициируют примерно одинаковое число зависимых событий (афтершоков); исследование связи техногенной сейсмичности в регионах нефтеразработок с операциями гидроразрыва пласта и последующей закачки отработанной жидкости на глубину;изучение различий Центрально-азиатской и Восточноазиатской транзитных зон, разделяемых георазделом 102-104°.

# СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	5
введение	6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	9
1 Разработка и применение методов прогноза землетрясений	9
1.1 Применение алгоритма М8	9
1.2 Анализ применения алгоритма RTP	13
2 Оценка сейсмической опасности	14
2.1 Оценка сейсмической опасности и ассоциированных рисков на основе значе	ений
коэффициентов ОЗПЗ	14
2.2 Определение мест возможного возникновения сильных землетрясений	19
2.3 Оценка сейсмической опасности плато Шиллонг	21
2.4 Теоретические аспекты оценки сейсмического риска	22
3 Изучение сейсмичности	24
3.1 Закон продуктивности землетрясений	24
3.2 Условия возникновения сильных техногенных землетрясений в зоне нефтед	цобычи
	25
3.3 Сейсмичность и геодинамика	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	30
ПРИЛОЖЕНИЯ:	
Приложение А – Публикации по теме НИР изданные в 2020 г	36

# 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

ОЗПЗ – общий закон подобия для землетрясений

ANSS – Advanced National Seismic System

ETAS – epidemic type aftershock sequence

NDSHA – neodeterministic seismic hazard assessment

PGA – peakgroundacceleration

PSHA – probabilistic seismic hazard assessment

RTP – reverse tracing of precursors

SCE – scalingcoefficientsestimation

# **ВВЕДЕНИЕ**

Исследования по теме выполнялись в рамках направлений фундаментальных исследований 136 "Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий" и 138 "Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу и Земли, гидросферы и криосферы; численное магнитосферу моделирование геоинформатика (инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии" Раздела IX "Науки Земле" Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

Проблема прогноза землетрясений в настоящее время не может считаться полностью решенной, в частности, в мире не существует надежных алгоритмов краткосрочного прогноза землетрясений. Российские ученые имеют уникальный опыт создания алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений и их применения для оперативного прогноза в режиме реального времени. Дальнейшее развитие этого опыта на основе применения современных методов изучения сложных систем и анализа накапливаемых баз данных, содержащих измерения 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.

Землетрясения являются экстремальными событиями, происходящими в литосфере Земли, которая является сложной нелинейной системой, поэтому прогноз землетрясений рассматривается в рамках прогноза резких скачкообразных изменений в сложных нелинейных системах и основан на применении к изучению динамики литосферы современных методов анализа сложных систем и экстремальных событий в них. Такие системы функционируют в природе и обществе, а скачкообразные изменения, затрагивающие систему в целом, являются их неотъемлемым свойством. Для обозначения этих резких скачков используют разные термины: экстремальные события, критические переходы, кризисы и т.д. Такие скачки происходят достаточно редко, но после них система начинает функционировать существенно иным образом. К настоящему времени накоплен определенный опыт создания алгоритмов прогноза экстремальных событий в сложных системах различной природы, что создает основу для разработки универсальных алгоритмов прогноза экстремальных событий в сложных системах и их применения к прогнозу землетрясений.

Другой проблемой, связанной с сокращением возможного ущерба землетрясений, является адекватная оценка сейсмической опасности конкретных сейсмоопасных регионов, а также создание новых и совершенствование существующих методов оценки сейсмической опасности. В настоящее время существуют два основных направления в мировых исследованиях по оценке сейсмической опасности вероятностная оценка сейсмического риска РЅНА и недетерминистская оценка сейсмического риска NDSHA. В рамках классического подхода PSHA определяется вероятность того, что в течение определенного периода времени будут превышены различные уровни сотрясаемости, вызванной землетрясениями. Хотя сейсмическое районирование, принятое во многих странах, как в национальном, так и в региональном масшабах, получено в соответствии с классическим вероятностным подходом PSHA, он вызывает сомнение и является объектом длительных споров, которые указывают на ошибки в математических и физических предположениях, лежащих в его основе. Последние катастрофические землетрясения (Суматранское землетрясение и цунами 2004 года, Вэньчуаньское землетрясение 2008 года в Китае, землетрясение 2010 года на Гаити, землетрясение и цунами 2011 года в Тохоку) и все 12 землетрясений с человеческими жертвами, случившиеся в 2000-2011 гг. показали недостатки в оценке сейсмической опасности на основе ее вероятностного анализа. Альтернативой PSHA является подход NDSHA, который обращается к некоторым аспектам, в большой степени игнорируемым в традиционном анализе риска, а именно, как свойства земной коры воздействуют на затухание. Одним из ключевых условий успешного применения NDSHA является наличие адекватной информации о возможных местах сильных землетрясений в исследуемом регионе. Гибкость NDSHA позволяет инкорпорировать эту информацию, получаемую с помощью различных методов, что значительно сокращает существующие пробелы в получаемом из каталогов знании о сейсмичности. Для получения этой информации применяются методы распознавания образов и оценка коэффициентовОЗПЗ.

Большое значение для сокращения ущерба от землетрясений имеют также результаты изучения афтершоковых процессов, поскольку во многих случаях ущерб от сильных афтершоков превосходит ущерб от основного толчка.

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 2020 году включали: продолжение экспериментов по применению разработанных ранее алгоритмов для оперативного прогноза землетрясений в режиме реального времени; анализ накопленного многолетнего опыта проведения таких

экспериментов с целью совершенствования разработанных ранее алгоритмов прогноза и оценки надежности и достоверности результатов прогноза; изучение опыта определения значений коэффициентов ОЗПЗ в различных регионах мира и их применения для оценки сейсмической опасности; анализ почти полувековой истории развития применения алгоритмов распознавания образов с целью решения проблемы определения мест возможного возникновения сильных землетрясений и распознавание мест возможного возникновения сильнейших (с магнитудой  $M \ge 7/0$ )для территории Эллинид (Греция), расположенных в южной части Балканского полуострова;получение вероятностной оценки сейсмической опасности плато Шиллонг (штат Мегхалая, Индия) с целью предоставления научной информации инженерным сообществам и сообществам по управлению рисками стихийных бедствий;изучение некоторых теоретических аспектов оценки сейсмического риска, включая локальные особенности функции очага, порождающие одновременно квадратичное затухание спектра и потерю направленности излучения в дальней зоне на высоких частотах, а также анализ применения подхода фрактальности в задачах сейсмического риска; изучение статистики афтершоковых последовательностей, на основе которого сделан вывод, что неверным является один из постулатов практически всех моделей сейсмического режима и афтершоковых последовательностей, состоящий в том, что землетрясения одинаковой силы инициируют примерно одинаковое число зависимых событий (афтершоков);исследование связи техногенной сейсмичности в регионах нефтеразработок с операциями гидроразрыва пласта и последующей закачки отработанной жидкости на глубину; изучение различий Центрально-азиатской и Восточноазиатской транзитных зон, разделяемых георазделом 102-104°, на основе данных о сейсмичности, тепловом потоке, мобильности блоков и глубинных аномалий под ними.

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

# ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

# 1 Разработка и применение методов прогноза землетрясений

# 1.1 Применение алгоритма М8

В 2020 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 МSc [2-4].Глобальный эксперимент ведется с 1992 года [2, 5-7] и направлен на прогноз землетрясений с магнитудой  $M \geq 8.0$  (М8.0+) и прогноз землетрясений с  $7.5 \leq M < 8.0$  (М7.5+). 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). На рис. 1 и 2 показаны такие карты, полученные на 01.01.2020, а на рис. 3 и 4 приведены карты, полученные на 01.07.2020.

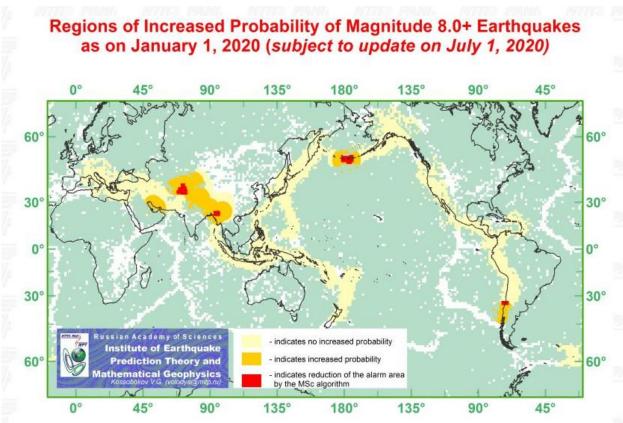


Рисунок 1. Прогноз землетрясений с  $M \ge 8.0$ , полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2020 (области тревоги показаны желтым цветом), и уточнение областей тревоги с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

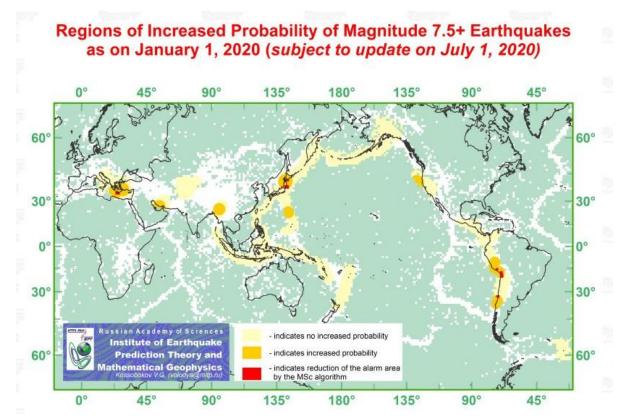


Рисунок 2. Прогноз землетрясений с  $M \ge 7.5$ , полученный с помощью алгоритма М8 на 01.01.2020 (области тревоги показаны желтым цветом), и уточнение областей тревогис помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

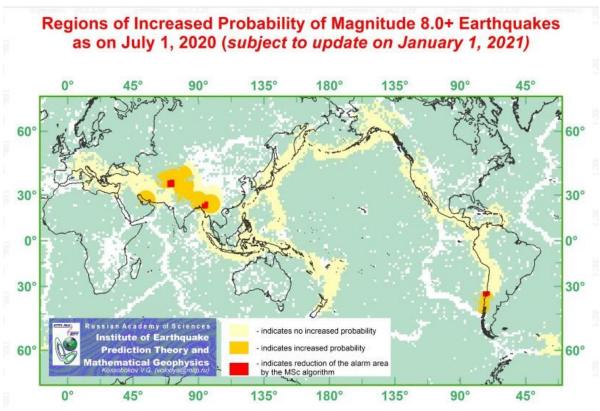


Рисунок 3. Прогноз землетрясений с  $M \ge 8.0$ , полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2020 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

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

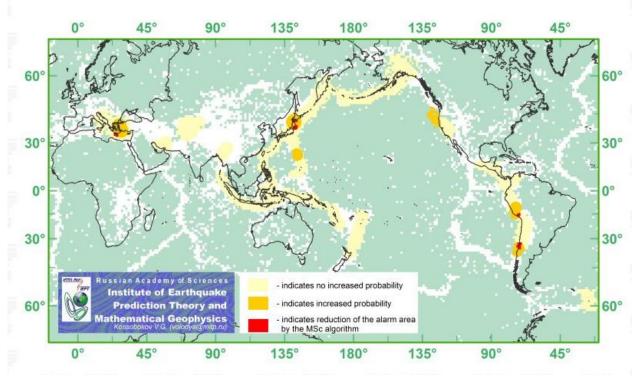


Рисунок 4. Прогноз землетрясений с  $M \ge 7.5$ , полученный с помощью алгоритма М8 на 01.07.2020 (области тревоги показаны желтым цветом), и уточнение областей тревогис помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

Выполнен анализ 30-летнего применения в режиме реального времени алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений М8 в рамках Глобального эксперимента. Статистика результатов, полученных в этом эксперименте, с достоверностью выше 99% свидетельствует о достаточно высокой эффективности прогнозов по алгоритму М8, а также в его комбинации с алгоритмом МSc, 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 М8.0+ и М7.5+. Результаты экспериментального тестирования этого являются косвенным подтверждением предсказуемости сильных землетрясений, а также существования общих динамических характеристик и разнообразного поведения при фазовых переходах в сложной иерархической нелинейной системе разломов и блоков литосферы Земли. Полученные оценки эффективности применения алгоритмов M8 и M8-MSc при прогнозе землетрясений М7.5+ и М8.0+ приведены в Таблице 1.

**Таблица 1.** Оценка эффективности алгоритмов М8 и М8-МSc.

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

Примечания:

По данным Геологической службы США в 2020 году не было землетрясений с  $M \ge 8.0$ , и произошлитри землетрясения с магнитудой  $7.5 \le M < 8.0$ . Их параметры приведены в Таблице 2, а положения эпицентров показаны на рис. 5. Эпицентры всех этих трех землетрясений лежат вне областей тревоги для диапазона M7.5+, и отсюда следует вывод, что в 2020 году произошли три пропуска цели в прогнозе событий M7.5+.

**Таблица 2.** Землетрясения с магнитудой  $M \ge 7.5$ , которые произошли в 2020 году (по данным Геологической службы США)

Дата и время (UTC)	Широта	Долгота	Глубина, км	Магнитуда и место землетрясения
28.01.202019:10	19.419°N	78.756°W	14.9	M = 7.7;123  km NNW of Lucea, Jamaica
22.07.202006:13	55.072°N	158.596°W	28.0	M = 7.8;99 km SSE of Perryville, Alaska
19.10.202020:55	54.602°N	159.626°W	28.4	M = 7.6; 99 km SE of Sand Point, Alaska

<sup>\*</sup>Оценка пространства при вычислении процента объема тревоги выполнена с использованием наиболее консервативной меры, учитывающей эмпирическое распределение эпицентров.

<sup>\*\*</sup>Вероятность получения случайным образом результата прогноза, не уступающего полученному при тестировании.



Рисунок 5. Эпицентры землетрясений (показаны кругами) с магнитудой  $M \ge 7.5$ , которые произошли в 2020 году. Отметим, что положения эпицентров землетрясений, которые произошли 22.07.2020 и 19.10.2020 у побережья Аляски практически совпадают.

По результатам выполнения Глобального эксперимента пополнен архив прогнозных карт в среде ArcGis и опубликованы две статьи [8, 9].

# 1.2 Анализ применения алгоритма RTP

Обобщен опыт эксперимента по заблаговременному прогнозу землетрясений в период 2003-2019 гг. в пяти регионах мира по алгоритму ReverseTracingofPrecursors (RTP), в основе которого лежит явление увеличения радиуса корреляции сейсмичности перед землетрясениями[10-13]. Мониторинг выполнялся в пяти регионах, где прогнозировались землетрясения с  $M \ge M_0$ : Курилы-Камчатка ( $M_0 = 7.2$ ); Хонсю-Хоккайдо-Южные Курилы ( $M_0 = 7.2$ ); Калифорния-Орегон-Невада ( $M_0 = 6.4$ ); Долина По, Альпы, Северные Динариды ( $M_0 = 5.5$ ); Восточное Средиземноморье ( $M_0 = 6.0$ ). Целью мониторинга является оценка достоверности прогнозов по алгоритму RTP и поиск способов его уточнения и повышения надежности.

Качество прогноза можно оценить с помощью двух характеристик  $\tau$  и  $\eta$ (Таблица 3). Величина  $\tau$  характеризует долю пространства-времени, занятого тревогами, но учитывает, что пространственное распределение эпицентров землетрясений неравномерно [14]. Эту величину можно считать также вероятностью случайного успеха прогноза [15] при данной модели распределения вероятности землетрясений. В качестве такой модели используется обычно сглаженное фактическое распределение эпицентров магнитудой выше заданного порога [14]. В данной задаче в сглаживании нет необходимости из-за достаточно больших размеров областей тревоги. Величина  $\eta$  – это доля пропусков цели, то есть доля землетрясений с магнитудой  $M \geq M_0$ , не попавших в пространственновременную область тревоги относительно общего числа таких землетрясений в регионе за период теста. Для случайных прогнозов сумма  $\tau$  +  $\eta$  близка к 1. Чем меньше эта сумма, тем

ближе результаты прогнозов к идеальному. Отметим, что в соответствии с Таблицей 3 ни в одном из регионов эта сумма не превосходит 0.4.

**Таблица 3.** Результаты теста алгоритма RTP в пяти регионах в 2003-2019 гг.

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

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

По полученным результатам опубликована статья [16].

# 2 Оценка сейсмической опасности

# 2.1 Оценка сейсмической опасности и ассоциированных рисков на основе значений коэффициентов ОЗПЗ

Распределение числа сейсмических событий по магнитуде — закон Гутенберга— Рихтера играет наиважнейшую роль в оценке сейсмической опасности территории. Предложенное в 1988 г. обобщение этого основного закона сейсмологии — Общий закон подобия для землетрясений (ОЗПЗ)[2] — позволяет учитывать специфику распределения эпицентров сейсмических событий при изменении масштаба рассмотрения, что крайне важно для адекватного пересчета повторяемости в область меньшего размера на территории рассмотрения (например, в мегаполисе).

Результаты глобального и регионального анализа [17-20] показали, что среднегодовое число землетрясений, N(M, L), с магнитудой M в сейсмоактивной области линейного размера L, для широкого диапазона магнитуд M из интервала  $(M_-, M_+)$  и размеров L из интервала  $(L_-, L_+)$ , довольно хорошо согласуется со следующей формулой ОЗПЗ:

$$\lg N(M, L) = A + B \times (5 - M) + C \times \lg L, \tag{1}$$

где *А*, *В*, *С* – константы, локально характеризующие соответственно логарифм среднегодовой частоты землетрясений магнитуды 5.0 и выше в области линейного размера в 1 градус Земного меридиана, баланс числа землетрясений разных магнитуд и фрактальную размерность носителя эпицентров землетрясений. Оценки коэффициентов *А*, *В* и *С* могут быть использованы для расчетов характеристик сейсмической опасности в терминах достоверно определенной максимальной магнитуды землетрясения, которое возможно в данном месте системы разломов, а также ассоциированых с ним сотрясений на территории и рисков для населения и инфраструктуры.

В 2020 году выполнен анализ многолетнего использования ОЗПЗ в приложении к проблеме оценки сейсмической опасности и ассоциированных рисков и другим практическим задачам, связанным с пространственно-временными параметрами сейсмичности.

При применении ОЗПЗ для изучения сейсмического режима в пространственном и временном масштабах используется алгоритм робастной оценки коэффициентов ОЗПЗ Scaling Coefficients Estimation (SCE) [21].Свободные параметры алгоритма, накладывают определенные ограничения на возможность его применения и используемые исходные данные. В частности, для корректного применения алгоритма SCE необходимкаталог сейсмических событий за продолжительный период (от десятка лет и более) при наличии однородной, по техническим параметрам сети, регистрации. Очевидно, что результаты расчетов зависят от исходных данных, а именно, от полноты регистрации сейсмических событий, от изменений порога регистрации в процессе технических изменений и совершенствования параметров сети сейсмографов, от точности определения координат эпицентра и, в меньшей степени, глубинысейсмических событий. Используемый каталог во многом определяет предварительный выбор оптимального набора свободных параметров алгоритма. Анализ данных каталога является обязательным предварительным этапом применения алгоритма SCE. Так например, при глобальном картировании коэффициентов ОЗПЗ были использованы данныео всех сейсмических событиях с магнитудой 4.0 и выше из каталога Геологической службы США за 1964-2002 годы [22].Коэффициенты ОЗПЗ оценивались в масштабе элементов глобальной плитовой тектоники размера от 50 до 1000 км с использованием 5 ступеней пространственной иерархии ячеек линейного размера от ½ до 8 градусов земного меридиана. Согласно [18, 23], логарифмическая оценка сейсмической активности (коэффициент А) изменяется в основном в пределах от -2.5 до -1.2 (рис. 6а), что соответствует повторяемости землетрясений с магнитудой 5.0 от менее одного в 300 лет до трех в пятьдесят лет. Значения наклона графика повторяемости (коэффициент В) сосредоточены в основном

между 0.6 и 1.1 (рис. 66), а фрактальная размерность множества сосредоточения эпицентров (коэффициент C) изменяется от менее 1.0 до 1.4 и выше (рис. 68). Полученные оценки ошибок коэффициентов ОЗПЗ демонстрируют (рис. 6г) практически по всему миру высокую степень согласия с данными мировых наблюдений в широком диапазоне магнитуд и размеров области исследования.

Оценки коэффициентов ОЗПЗ на базе продолжительного интервала времени могут быть использованы при построении карт сейсмической опасности рассматриваемой территории. Изменение значений коэффициентов ОЗПЗ в среднесрочном масштабе времени характеризует динамику сейсмичности изучаемого региона. В частности, обнаружено [24-26], что контрольный параметр ОЗПЗ, а именно, величина  $\eta = N^{-1} \times 10^{B \times (5-1)}$  м  $\times$   $L^{C}$ , находится, в долгосрочной перспективе, на одном из довольно устойчивых уровней своего значения и время от времени, в среднесрочной перспективе, переключается с одного на другой уровень в результате критического перехода, связанного, в том числе, с возникновением сильного землетрясения.

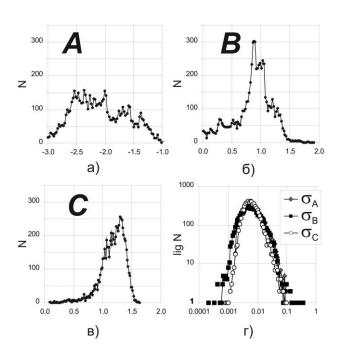


Рисунок 6. Гистограммы глобального распределения параметров ОЗПЗ a) A; б) B; в) C; г)  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_C$  (график в би-логарифмическом масштабе).

В качестве примера могут быть приведены локальные оценки коэффициентов ОЗПЗ для итальянской автономной области Фриули-Венеция-Джулия [27], полученные поданным регионального каталога землетрясений Национального института океанологии и экспериментальной геофизики за период с 1996 по март 2018 года с использованием

событий с магнитудой 2.0 и выше для пространственных ячеек линейного размера 1/16 градуса земного меридиана (порядка 6.9 км) и 5-ти ступеней пространственной иерархии. Детальность и точность регистрации локального каталога позволила оценить значения коэффициентов ОЗПЗ для последовательных шестилетнихвременных интервалов со сдвигом в 1 год. На рис. 7 представлены значениякоэффициентов А, ВиСдля двух шестилетних интервалах времени (первого 1996-2001 гг., для которого надежные оценки получены в 214 ячейках, и последнего 2012-2017 гг., для которого надежные оценки получены в 311 ячейках), а также их проекции на координатные плоскости. Следует отметить, что для первого интервала землетрясение, произошедшее 12 апреля 1998 г. (сильнейшее в регионе за исследуемый период), и его многочисленные афтершоки безусловно повысили значения коэффициентов А и В и одновременно понизили значение коэффициента C в ячейках из области высокой концентрации эпицентров. При отсутствии сильных событий в течение последнего интервала значения коэффициентов ОЗПЗ более концентрированы: A около 0, B от 0.6 до 1.0, и C выше 1. Сложное взаимное расположение в 3D значений коэффициентов ОЗПЗ указывает на нетривиальность корреляционных связей между параметрами и значительное разнообразие характеристик сейсмического потока в пределах рассматриваемого региона, а также очевидно свидетельствует в пользу существенной изменчивости в динамике последовательности землетрясений во времени. Согласно [27], критический переход, ассоциированный с землетрясением 12 апреля 1998 г., характеризуется изменением контрольного параметра ОЗПЗ  $\eta$  в полтора раза от уровня среднего значения  $\eta$ менее 0.2 в 1997 г. до более 0.3 в 2002-2004 гг.

Региональные оценки коэффициентов A, B и C могут быть использованы для определения и картирования на основе ОЗПЗ максимальной магнитуды ожидаемой в заданный временной интервал. Действительно, согласно (1), число событий заданной магнитуды  $M_j$ , ожидаемых в течение T лет  $N_T(M_j) = T \times N(M_j, L_0)$ , где  $L_0$ — линейный размер ячейки, для которой определены картированные коэффициенты ОЗПЗ. При этом максимальные значения  $M_j$ , для которых  $N_T(M_j) \ge p($ для  $0 \le p \le 1)$ , могут рассматриваться в качестве магнитуд наиболее сильных землетрясений, ожидаемых в каждой из ячеек карты с вероятностью p3а время T[28].

Надежность карт сейсмической опасности (в частности, построенных на основе ОЗПЗ) повышается при привлечении результатов распознавания мест возможного возникновения сильных событий [29], а также, надежные свидетельства об исторических и палео-землетрясениях. Построение карт сейсмической опасности на территории Российской Федерации, основанное на результатах применения методов ОЗПЗ и

распознавания образов в сочетании с данными исторического каталога сейсмических событий, использовалось для Крыма и Большого Кавказа, Прибайкалья, Алтая и Саян [21, 30, 31].

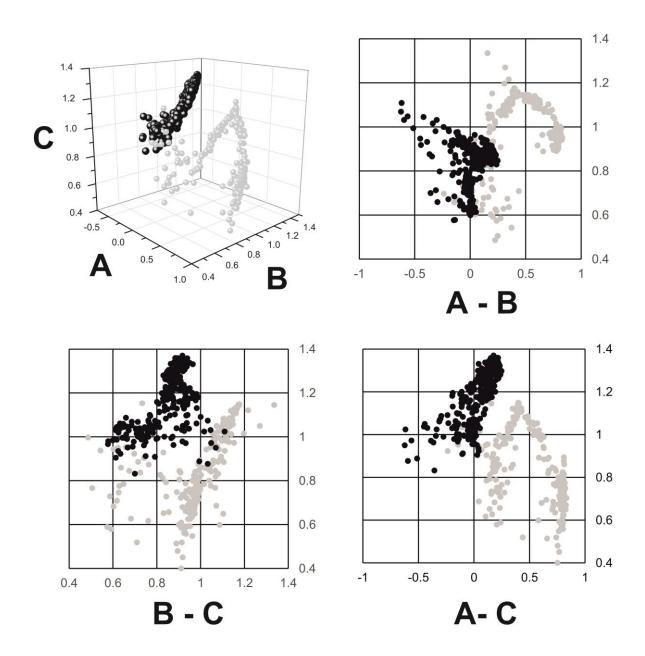


Рисунок 7. Значения коэффициентов ОЗПЗ в автономной области Фриули-Венеция-Джулия для первого (1996-2001 гг., серые символы) и последнего (2012-2017 гг., черные символы) интерваловвремени.

Для построения основанных на ОЗПЗ карт сейсмической опасности территории в терминах сотрясаемости необходимо преобразовать карту значений  $M_{\rm max}$ , что возможно с использованием неодетерминистского моделирования многообразия сценариев возможных наиболее сильных землетрясений [32].Для упрощения расчетов можно

воспользоваться одной из эмпирических формул затухания параметров сотрясения. Так, например, для пикового ускорения на скальном основании (PGA, peak ground acceleration) для каждой ячейки-источника с ожидаемым землетрясением магнитуды  $M_{\text{max}}$  рассчитаем ускорение, вызванное им в точке-приемнике по формуле, мотивированной неодетерминистским моделированием землетрясений [33]

$$Acc(Mmax, D) = const \times g \times D^{-1.5} \times exp(Mmax - 5),$$
 (2)

где D— расстояние между источником и приемником на сетке  ${}^{1}\!\!/\!\!/^{\circ}\times {}^{1}\!\!/\!\!/^{\circ}$ , const = 6.0, g=9.81 м/с $^{2}$  — постоянная силы тяжести. Значение PGAв точкеопределяется как максимум значений ускорения, рассчитанных в этой точке по всем ячейкам-источникам рассматриваемой территории.

Применение метода ОЗПЗ может быть использовано и при оценке сейсмического риска. Напомним, что математически любой вид риска является результатом свертки опасности с объектом риска, подверженным опасности, и с уязвимостью этого объекта

$$R(s) = H(s) \otimes O(s) \otimes V(O(s)), \tag{3}$$

где s определяет положение в пространстве и может быть точкой, линией, или некоторой областью на или под поверхностью Земли, H(s) — опасность явления, O(s) описывает объекты, подверженные риску в месте s, и V(O(s)) описывает уязвимости этих объектов риска. При этом H(s), O(s) и V(O(s)) могут зависеть от времени.

Анализ применения подхода, основанного на ОЗПЗ, указывает на возможность более высоких рисков, чем на существующих широко распространенных картах вероятностной оценки сейсмической опасности. В подходе учитывается естественное фрактальное распределение мест землетрясений вместе с тектоническими данными и аргументами распознавания образов. Исследования в этом направлении могут внести определенный вклад в пересмотр карт вероятностных оценок сейсмической опасности путем улучшения базовых методологий. Ноэти работы пока не учитывают реальные экономические и социальные факторы оценки рисков, как и роль влияния топографии и грунтов, а также размера и параметров очага для крупных и/или сложных сейсмических событий. Эти моменты должны быть рассмотрены в будущих исследованиях и практических применениях для оценки и картирования сейсмической опасности и рисков.

По итогам выполненных исследований опубликованы три статьи [34-36] и сделан доклад [37].

# 2.2 Определение мест возможного возникновения сильных землетрясений

Для оценки сейсмической опасности важно знать, где в рассматриваемом регионе могут произойти сильные (с магнитудой  $M \ge M_0$ , где  $M_0$  – некоторый порог)

землетрясения. Поскольку период инструментальных сейсмологических наблюдений составляет немногим более 100 лет, то естественно предположить, что за это время не все такие места «проявили» себя сильными землетрясениями и, соответственно, возникает задача их определения. Подходы к решению этой задачи, основанные на построении схемы морфоструктурного районирования исследуемого региона с целью выделения объектов, среди которых могут быть места возможного возникновения сильных землетрясений, и последующем применении методологии распознавания образов для определения таких мест, были сформулированы в начале 70-х годов прошлого века в результате сотрудничества математиков во главе с И.М.Гельфандом, геофизиков во главе с В.И.Кейлис-Бороком и геоморфологов во главе с Е.Я.Ранцман [38-42]. Ранее такая задача была сформулирована и решена для ряда сейсмоактивных регионов. В рамках сотрудничества с ГЦ РАН выполненанализу почти полувековой истории развития применения алгоритмов распознавания образов с целью решения проблемы определения мест возможного возникновения сильных землетрясений, результаты которого опубликованы в статье [43].В 2020 году эти исследования были продолжены.

В рамках продолжения работ по распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений для территории Эллинид, расположенных в южной части Балканского полуострова, определены геолого-геоморфологические критерии мест, в которых возможно возникновение землетрясений с  $M \ge 7.0$  (рис. 8).

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

пор не зафиксировано. Характерные признаки **В**- и **Н**-пересечений (критерии сейсмичности) сформированы морфометрическими параметрами. Интервалы значений этих параметров, присущие **В**-пересечениям, косвенно свидетельствуют о процессах опускания и растяжения, доминирующих в областях расположения таких пересечений.

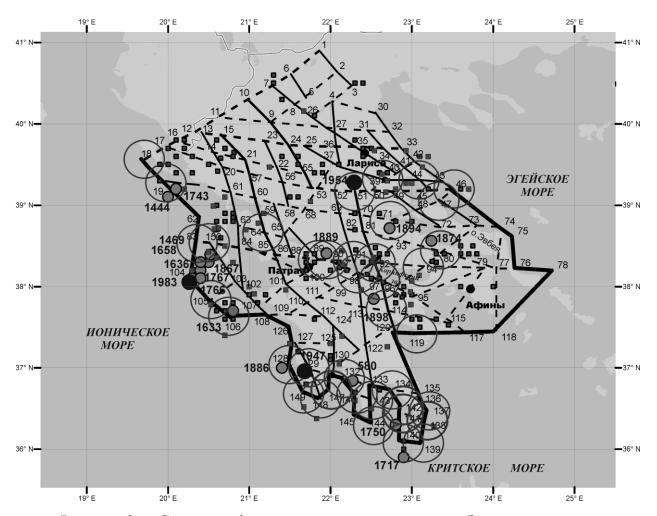


Рисунок 8. . Схема морфоструктурного районирования Эллинид и пересечения линеаментов, отнесенные к классу**B** для  $M \geq 7.0$ . Линиями показаны линеаменты. Толщина линий соответствует рангу линеаментов: самые толстые — первый ранг; средней толщины — второй ранг; тонкие — третий ранг. Сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными — поперечные. Кругами отмечены распознанные высокосейсмичные пересечения для  $M \geq 7.0$ . Черными кружками показаны эпицентры землетрясений с  $M \geq 7.0$  после 1900 г., светлыми - эпицентры землетрясений с  $M \geq 7.0$  до 1900 г. Темные и светлые квадратики обозначают эпицентры землетрясений с  $6.0 \leq M < 6.99$ , которые произошли после и до 1900г., соответственно. 1-150 номера пересечений линеаментов.

По результатам исследования опубликована статья [44].

# 2.3Оценка сейсмической опасности плато Шиллонг

Получена вероятностная оценка сейсмической опасности плато Шиллонг (штат Мегхалая, Индия)с целью предоставления научной информации инженерным

сообществам и сообществам по управлению рисками стихийных бедствий. Сейсмотектонические процессы в регионе находились под влиянием гималайской орогении, индо-бирманской субдукции и эволюции Бенгальского бассейна, что привело к высокой сейсмической активности. Результаты анализа сейсмической опасности используются для определения колебаний грунта в густонаселенных районах плато Шиллонг и, в частности, в городах Шиллонг, Нонгпох и Тура. Этот анализ основан на использовании исторических и инструментально зарегистрированных региональных землетрясений начиная с 1411 года и имеет дело с неопределенностями, связанными с магнитудами землетрясений, местами разрыва и частотой превышения скорости движения грунта.

Построенные кривые сейсмической опасности показывают, что разлом Барапани обладает самой высокой частотой превышения скорости движения грунта для городов Шиллонг и Нонгпоха, а Эоценовая шарнирная зона и разлом Дауки ответственны за самую высокую частоту сейсмической опасности в г. Туре. Результаты оценки опасности вместе с результатами, полученными ранее с использованием детерминированного (основанного на сценариях) подхода, показывают, что хотя Олдхэмский разлом, расположенный вблизи г. Тура, может вызвать сильное, но редкое землетрясение, лишь немногие другие близлежащие разломы способны вызвать события меньшей магнитуды но с более высокой вероятностью их проявления.

По результатам выполненных исследований опубликована статья [45].

# 2.4Теоретические аспекты оценки сейсмического риска

Исследованы локальные особенности функции очага, порождающие одновременно (а) квадратичное затухание спектра и (б) потерю направленности излучения в дальней зоне на высоких частотах. Вопрос моделирования сейсмического источника, для которого упругое смещение в дальней зоне обладает этими двумя свойствами, был поставлен А.Гусевым [46-48]. Первое свойство традиционно называют омега-квадрат поведением, поскольку высокочастотный спектр спадает, как  $\omega^{-2}$ , где  $\omega$  – частота, а второе потерей направленности излучения. Квадратичное затухание спектра общепринято в инженерной практике, хотя не исключается конечность частотного диапазона такого поведения [49]. Аналогично обстоит дело и с универсальностью второго свойства. В работах [50,51] приведены контр-примеры, относящиеся к частотному диапазону  $\omega > \omega_0$ , где  $\omega_0$  есть угловая частота Брюна [52]. А.Гусев предложил две кинематические модели очага с элементами стохастического поведения [47, 48]. Они позволили воспроизвести ключевые свойства высокочастотного излучения: существование двух угловых частот, плоский

участок спектра ускорения после второй угловой частоты (что эквивалентно свойству (а)), и слабый (в модели [47]) эффект направленности излучения. В этих моделях важную роль играет фрактальная природа фронта разрыва. Чтобы воспроизвести указанные особенности, фронт по терминологии А.Гусева должен быть «кружевным», т.е. очень изрезанным и многосвязным. Поскольку анализ и настройка моделей осуществлялись численно, ответ на вопрос о природе свойств (а) и (б) остался открытым. В частности, неясно, насколько сложной должна быть кружевная структура фронта разрыва.

Исследование, выполненное по теме, позволило показать, что для реализации свойства (а) достаточно иметь слегка негладкий фронт разрыва, а для реализации свойства (б) достаточна гладкость распределений шумовой компоненты фронта. Из чего следует заключение, что, фрактальные модели удачно дополняют классические гладкие модели очага [53]. Причина в том, что в классических моделях свойство (а) неустойчиво, а свойство (б), как правило, отсутствует. Однако добавление слегка негладкой шумовой компоненты фронта позволяет устранить эту неустойчивость и дополнительно реализовать свойство (б). Это наблюдение содержится в работе [54]. Выполненный в рамках рассматриваемого исследования анализ обладает большей общностью и простотой.

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

компоненты этой поверхности. Эти заключения вполне конструктивны для целей моделирования функции очага.

Результаты исследования опубликованы в статье [55].

Исследованы некоторые теоретические аспекты фрактальности и дается критический анализ её приложений к задачам сейсмического риска на основе учета фрактальных свойств сейсмичности при картировании долговременной интенсивности землетрясений. Результаты исследования опубликованы в статье [56].

# 3 Изучение сейсмичности

# 3.1 Закон продуктивности землетрясений

Одним из постулатов практически всех моделей сейсмического режима и афтершоковых последовательностей, включая широко известную модель ETAS[57-59], до сих пор было предположение, что землетрясения одинаковой силы инициируют примерно одинаковое число зависимых событий (афтершоков). Показано, что это предположение неверно. По-видимому, именно это приводит к завышенным оценкам сейсмической опасности на основе таких моделей. Разброс числа инициируемых событий очень велик. Но, как оказалось, он закономерен и это число устойчиво подчиняется, аналогично магнитуде землетрясения, экспоненциальному распределению (рис. 9), если подсчет вести в интервале магнитуд определенной ширины относительно магнитуды инициирующего землетрясения. Эта закономерность получила название «Закон продуктивности землетрясений». Модель ETAS модифицирована путем включения в нее закона продуктивности. Новая модель ETAS-е позволила получить синтетический каталог, который, воспроизводит реалистичное распределение числа инициируемых землетрясений, в отличие от исходной модели ETAS, в которой для этого числа заложено распределение Пуассона.

Полученные результаты опубликованы в статье [60].

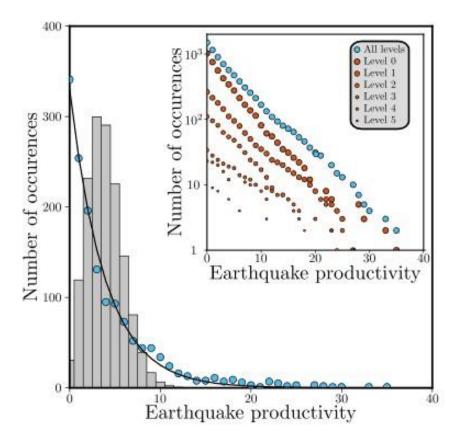


Рисунок 9. Продуктивность землетрясений во всемирном каталоге. Точками показано распределение числа инициированных событий для землетрясений с  $M \geq 6.5$  с использованием магнитудного интервала  $\Delta M = 2$ . Сплошная линия — это экспоненциальный закон с параметром  $\Lambda_2$ , средним числом инициированных событий, полученным на основе данных. На гистограмме показано распределение Пуассона с параметром  $\Lambda_2$ . На вставке показаны распределения совокупной продуктивности для первичных и вторичных запускающих событий.

# 3.2 Условия возникновения сильных техногенных землетрясений в зоне нефтедобычи

Техногенная сейсмичность в регионах нефтеразработок является ответом земной коры на операции гидроразрыва пласта и последующей закачки отработанной жидкости на глубину. Землетрясения возникают вследствие повышения порового давления, а также перераспределения напряжений в земной коре. Показано, что в Оклахоме, где резкое возрастание сейсмичности коррелирует с объемом операций нефтедобычи, график повторяемости существенно зависит от объема закачки (рис. 10).

Наклон графика повторяемости слабой сейсмичности M< 3.5 почти постоянен, тогда как более сильные землетрясения показывают значительные вариации наклона (от  $b\approx 1$  до b>2), и эти вариации сильно коррелированы с объемом закачиваемой жидкости (рис. 11). Кроме того, сильнейшие наведенные события происходят на границе сейсмически активной территории, на расстоянии 15-20 км от областей интенсивной

закачки. Эти наблюдения показывают, что дефицит сильных землетрясений в пространственно-временных областях максимальных объемов закачки может сопровождаться повышением уровня сейсмичности на окружающих разломах земной коры, где возникновение сильных триггерных землетрясений более вероятно.

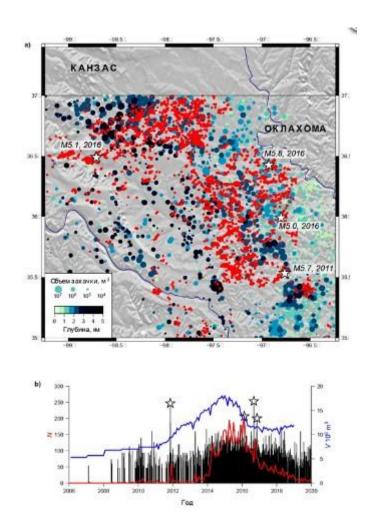


Рисунок 10. Сейсмичность и закачка жидкости в Оклахоме. (а) — Карта землетрясений и скважин закачки: землетрясения с магнитудой  $M \ge 2.7$  каталог ANSS, 2006-2019 (красные точки); объемы закачки и глубина скважин 2006-2018 (см. легенду на рисунке). (b) — Последовательность землетрясений во времени (черные линии), месячное число землетрясений с магнитудой  $M \ge 2.7$  (красная линия) и месячный объем закачки (синяя линия). Землетрясения с магнитудой  $M \ge 5.0$  отмечены звездочками на карте и графике.

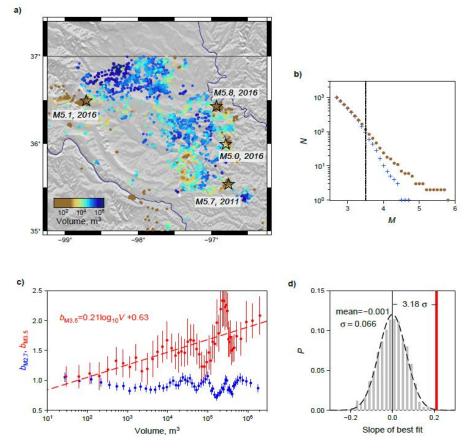


Рисунок 11. Изменения распределения землетрясений по магнитуде в зависимости от интенсивности закачки: (а) — карта землетрясений с магнитудой  $M \ge 2.7$ , классифицированных по объему влияния; (b) — графики повторяемости для 1000 событий с минимальным (точки) и максимальным (+) объемом влияния; (c) — изменение наклонов графика повторяемости  $b_{\rm M3.5}$ ,  $b_{\rm M2.7}$  в двух магнитудных интервалах [2.7;3.4] (синий) и [3.5; $M_{\rm max}$ ] (красный) с ростом объема закачивания  $V_{\rm E}$ . Погрешность — одно стандартное отклонение, оцененное методом Монте-Карло. Красная штриховая линия — наилучшее линейное приближение зависимости  $b_{\rm M3.5}$  от  $\log_{10}V_{\rm E}$ ; (d) — распределение случайного тренда для 1000 полу-синтетических каталогов, наблюденный тренд показан красной линией.

Полученные результаты опубликованы в статье [61].

# 3.3 Сейсмичность и геодинамика

различие Центральноазиатской и Восточно-Установлено принципиальное Азиатской транзитных 30H, которое состоит в интенсивности сейсмичности, увеличивающейся к западу от геораздела 102-104° и уменьшающейся к востоку от него; в изменении в противоположном направлении интенсивности теплового потока (ТП); в неравномерном изменении замедления S-волн в литосферной и подлитосферной мантии в Восточно-Азиатской и на севере Центральноазиатской зон (рис. 12). Это различие связано с влиянием давления Индостанского индентора на западе и с прослеживающимся по данным томографии неравномерном продолжении Тихоокеанского слэба R

подлитосферной мантии на востоке, а также на севере Центральноазиатской зоны. Косвенными доказательствами продолжения, стагнации и постепенного распада слэба на глубине на значительном расстоянии от активной окраины являются сходство мантийной и нижнелитосферной деламинации с хорошо изученными данными вблизи этой окраины, проявления позднекайнозойского вулканизма, процессов растяжения с формированием рифтовых бассейнов и молодых депрессий, а также развитие повышенного ТП в пределах Восточно-Азиатской транзитной зоны.

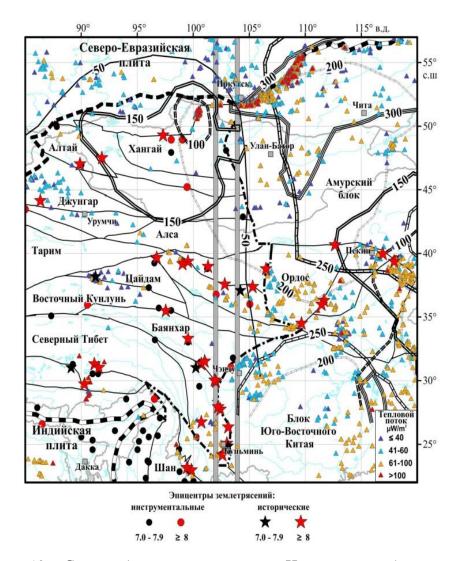


Рисунок 12. Схема блоковой структуры Центральной Азии с границами литосферных плит, транзитных зон, блоков и геораздела. Показаны эпицентры землетрясений и данные ТП, а также проекции на поверхность Земли контуров замедления скоростей *S*-волн от 4.5 до 4.2 км /сек. на глубинах от 100 до 300 км.

По полученным результатам опубликованыдве статьи[62, 63].

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные по теме исследования являются вкладом в решение задачи прогноза землетрясений. Результаты многолетнего применения алгоритмов прогноза позволяют утверждать, что методы среднесрочного прогноза землетрясений дают возможность существенно снизить неопределенность во времени и месте будущих сильных землетрясений, а результаты их применения статистически значимы (Таблицы1 и 3).

Разрабатываемые новые подходы к оценке сейсмической опасности (например, использование оценок коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений, а также нео-детерминистских подходов и результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений) имеютважное значение для сокращения ущерба от землетрясений и, соответственно, повышения защищенности общества от сейсмической опасности.

С точки зрения совершенствования моделей очага землетрясения важное значение имеет введение в модель отражающей шумовую компоненту фронта волны фрактальности, что удачно дополняет классические гладкие модели очага и позволяет повысить адекватность моделирования сейсмического источника.

Для оперативной оценки сейсмической опасности также актуально изучение афтершоковых процессов, поскольку во многих случаях сильные афтершоки вызывают ущерб, сравнимый с ущербом от основного толчка, а иногда и превосходящий его. Важным с точки зрения изучения афтершоковых последовательностей является результат выполненных исследований, состоящий в том, если вести подсчет числа афтершоков, инициируемых главным толчком с магнитудой из интервала определенной ширины, то это число устойчиво подчиняется, аналогично магнитуде землетрясения, экспоненциальному распределению.

В связи с расширением работ по добыче сланцевой нефти представляет интерес изучение зависимости техногенной сейсмичности в регионах нефтеразработок от операций гидроразрыва пласта и последующей закачки отработанной жидкости на глубину.

По результатам выполненных исследований опубликованы 12 статей в рецензируемых журналах и две статьи в Энциклопедии геофизики твердой Земли, а также сделан доклад на Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле.

# 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.
- 2. Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Часть І. 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. *NaturalHazards*, 2013, **69**: 1155-1177, doi:10.1007/s11069-012-0198-1.
- 8. Кособоков В.Г., Щепалина П.Д. Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 43—52, doi:10.1134/S0002333720010068.
- 9. Ismail-Zadeh, A., and V. Kossobokov, Earthquake prediction, M8 algorithm. In Gupta, H. (ed.), Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer (First Online: 30 May 2020), doi:10.1007/978-3-030-10475-7 157-1.
- 10. Keilis-Borok, V., P.Shebalin, A.Gabrielov, and D.Turcotte, Reverse tracing of short-term earthquake precursors. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2004, **145**, 1-4: 75-85, doi:10.1016/j.pepi.2004.02.010.
- 11. Shebalin, P., V.Keilis-Borok, I.Zaliapin, S.Uyeda, T.Nagao, and N.Tsybin, Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, M = 8.1. A case history. *Earth, Planets and Space*, 2004, **56**, 8: 715-724, doi:10.1186/BF03353080.

- 12. Шебалин П.Н. Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология.—2005.— № 1.— С. 3—15.
- 13. Шебалин П.Н. Методология прогноза землетрясений с периодом ожидания менее года // Алгоритмы прогноза землетрясений. М.: ГЕОС.— 2006.— С. 6—180 (Вычисл. сейсмология; Вып. 37).
- 14. Kossobokov, V., and P.Shebalin, Earthquake Prediction. In V.I.Keilis-Borok and A.A.Soloviev (eds), *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2003: 141-207.
- 15. Shebalin, P.N., C.Narteau, J.D.Zechar, and M.Holschneider, Combining earthquake forecasts using differential probability gains. *Earth, Planets and Space*, 2014, **66,** Article Number 37, doi:10.1186/1880-5981-66-37.
- 16. Шебалин П.Н. Увеличение радиуса корреляции и цепочки землетрясений перед сильнейшими сейсмическими событиями // Физика Земли.—2020.— № 1.— С.30—42, doi:10.1134/S0002333720010135.
- 17. Кособоков В.Г., Мажкенов С.А. Интенсивность потока землетрясений в очаговой области // Доклады Академии наук Республики Казахстан.— 1992.— № 1.— С. 53—57.
- 18. 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).
- 19. 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.—  $\cancel{N}$   $\cancel{2}$  4.— С. 529—532.
- 20. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: Прибайкалье // Доклады Академии наук.— 2006.— Т. 407.— № 5.— С. 679—681.
- 21. Nekrasova, A., V. Kossobokov, I.A. Parvez, and X. Tao, Seismic hazard and risk assessment based on the unified scaling law for earthquakes. *ActaGeodaetica et Geophysica*, 2015, **50**, 1: 21-37, doi:10.1007/s40328-014-0082-4.
- 22. GHDB Global Hypocenters Data Base CD-ROM. // NEIC/USGS, Denver, CO, 1989 and its updates through December 2015.
- 23. Nekrasova, A., and V. Kossobokov, Generalizing the Gutenberg-Richter scaling law. EOS Trans. 2002, AGU, 83 (47), FallMeet. Suppl., Abstract NG62B-0958.
- 24. Bak,P., K.Christensen, L.Danon, and T.Scanlon, Unified scaling law for earthquakes. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**:178501–178504.

- 25. Kossobokov, V.G., and A.Nekrasova, Characterizing aftershock sequences of the recent strong earthquakes in Central Italy. *Pure Appl. Geophys.*, 2017, **174**: 3713–3723, doi:10.1007/s00024-017-1624-9.
- 26. Kossobokov, V.G., and A.Nekrasova, Aftershock sequences of the recent major earthquakes in New Zealand. *Pure Appl. Geophys.*, 2019, **176**: 1-23, doi:10.1007/s00024-018-2071-y.
- 27. Nekrasova, A.K., V.G. Kossobokov, and A. Peresan, Seismic dynamics in Northeastern Italy, 1995-2018. Abstract S12B-02, AGU, 2018, Washington DC, 10-14 Dec., https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/433069.
- 28. Parvez,I.A., A.Nekrasova, and V.Kossobokov, Estimation of seismic hazard and risks for the Himalayas and surrounding regions based on Unified Scaling Law for Earthquakes. *NaturalHazards*, 2014, **71**, 1: 549-562.
- 29. Кособоков В.Г., Соловьёв А.А.. Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник.— 2018.— Т. 19.— Вып. 4.— С. 53—88.
- 30. Kossobokov, V.G., and A.Nekrasova, Earthquake hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Greater Caucasus and Crimea. *Journal of Seismology*, 2018, 22:1157–1169, doi:10.1007/s10950-018-9759-4.
- 31. Kossobokov, V.G., and A.Nekrasova, Earthquake hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Altai-Sayan Region. Natural Hazards, 2018b, 93, 3: 1435-1449, doi:10.1007/s11069-018-3359-z.
- 32. Panza,G.F., F.Romanelli, and F.Vaccari, Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: theory and applications to seismic zonation. *Adv. Geophys.*, 2001,**43**: 1–95.
- 33. Parvez,I.A., A.Gusev, G.F.Panza, and A.Petukhin, Preliminary determination of the interdependence among strong motion amplitude, earthquake magnitude and hypocentral distance for the Himalayan region. *Geophys.J. Int.*, 2001, **144**: 577–596.
- 34. Некрасова А.К., Кособоков В.Г., Парвез И.А., Тао X. Общий закон подобия для землетрясений в приложении к оценке сейсмической опасности и ассоциированных рисков // Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 96—108, doi:10.1134/S0002333720010093.
- 35. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений // Вулканология и сейсмология.— 2020.— № 6.— С. 3—25, doi:10.31857/S0203030620060152.
- 36. Kossobokov, V. Unified Scaling Law for Earthquakes that generalizes the fundamental Gutenberg-Richter relationship. In Gupta, H. (ed.), Encyclopedia of Solid Earth

- Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer (First Online: 30 May 2020), doi:10.1007/978-3-030-10475-7 257-1.
- 37. Nekrasova,A., and V.Kossobokov, Unified Scaling Law for Earthquakes: spacetime dependent assessment in Kamchatka region. EGU2020-708, NP4.1, EGU General Assembly, Online, 4–8 May 2020.
- 38. ГельфандИ.М., ГуберманШ.А., ИзвековаМ.Л., Кейлис-БорокВ.И., РанцманЕ.Я. Окритерияхвысокойсейсмичности // ДАНСССР.— 1972.— Т. 202.— № 6.— С. 1317—1320.
- 39. 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.
- 40. 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.
- 41. 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.
- 42. Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран.—М.: Наука, 1979.— 172 с.
- 43. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзебоев Б.А. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: Актуальный обзор// Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 5—29, doi:10.1134/S0002333720010044.
- 44. Горшков А.И., Новикова О.В., Гаудемер И. Потенциальные места сильных  $(M \ge 7.0)$  землетрясений в Эллинидах (Греция)// Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 53—61, doi:10.1134/S0002333720010032.
- 45. Baro,O., A.Kumar, and A.Ismail-Zadeh, Seismic hazard assessment of the Shillong Plateau using a probabilistic approach, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 2020, **11**, 1: 2210-2238, doi:10.1080/19475705.2020.1833989.
- 46. Gusev,A. High-frequency radiation from an earthquake fault: a review and a hypothesis of fractal rupture front geometry. *Pure Appl. Geophys.*, 2013, **170**, 1-2: 65-93.
- 47. Gusev,A. Doubly stochastic earthquake source model: 'omega-square' spectrum and low high-frequency directivity related by numerical experiments. *Pure Appl. Geophys.*, 2014, **171**, 10: 2581-2599.
- 48. Gusev,A. Random kinematics of unbounded earthquake rupture propagation simulated using a selluar model. *Geophys.J. Int.*, 2018, **215**: 924-941.

- 49. Гусев А., Скоркина А., Чебров Д. Очаговые спектральные параметры землетрясений восточной Камчатки диапазона М=3-6 по данным поперечных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.— 2017.— № 3.— Вып. 35.— С.36-49.
- 50. Kurzon, I., F.I. Vernon, Y.Ben-Zion, and G.Atkinson, Ground motion prediction equations in the San Jacinto fault zone: Significant effects of rupture directivity and fault zone amplification. *Pure Appl. Geophys.*, 2014, **171**: 3015-3081.
- 51. Wen,Y.-Y., H.Miyake, Y.-T.Yen, K.Irikura, and K.Ching, Rupture directivity effect and stress heterogeneity of the Nantou blind-thrust earthquakes, Taiwan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2014, **104**, 6: 2933–2942.
- 52. Brune, J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1970, **75**, 26: 4997-5009.
- 53. Aki,K., and P.Richards, *Quantitative seismology: Theory and Methods*. W.H.Freeman and Co, San Francisco, Calif. 1980.
- 54. Molchan, G. Stochastic earthquake source model: the omega-square hypothesis and the directivity effect. *Geophys. J. Int.*, 2015. **202**: 497-513.
- 55. Молчан Г.М. Стохастическая модель А.Гусева для сейсмического источника: высокочастотное поведение в дальней зоне// Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 86—95, doi:10.1134/S0002333720010081.
- 56. Молчан Г.М. Фрактальная сейсмичность и сейсмический риск// Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 77—85, doi:10.1134/S000233372001007X.
- 57. Kagan, Y.Y., and L., Knopoff, Stochastic synthesis of earthquake catalogs. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**, B4: 2853–2862, doi:10.1029/JB086iB04p02853.
- 58. Ogata, Y. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis. *Tectonophysics*, 1989, **169**, 1-3: 159–174, doi:10.1016/0040-1951(89)90191-1.
- 59. Helmstetter, A., and D.Sornette, Subcritical and supercritical regimes in epidemic models of earthquake aftershocks. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**, B10: 2237, doi:10.1029/2001JB001580.
- 60. 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.
- 61. Vorobieva,I., P.Shebalin, and C.Narteau, Condition of occurrence of large manmade earthquakes in the zone of oil production, Oklahoma. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, **56**, 6: 911-919, doi:10.1134/S1069351320060130.
- 62. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В.К проблеме различия современной геодинамики Центральной и Восточной Азии// Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 142—149,doi:10.1134/S0002333720010020.

63. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Геодинамические режимы Центральной Азии к западу и востоку от геораздела  $102-104^{\circ}$  // Geodynamics&Tectonophysics.— 2020.— Т. 11.— № 2.— С. 334—351, doi:10.5800/GT-2020-11-2-0478.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации по теме НИР «Оценка сейсмической опасности, разработка и апробация методов прогноза землетрясений», изданные в 2020 г.

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах

- 1. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В.К проблеме различия современной геодинамики Центральной и Восточной Азии// Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 142— 149, doi:10.1134/S0002333720010020. (Перевод на английский язык – Gatinsky, Yu.G., and T.V.Prokhorova, On the problem of distinction between recent geodynamics of Central and East Earth, 1: Asia. Izvestiya, **Physics** of the Solid 2020, **56**, 125-132, doi:10.1134/S1069351320010024)
- 2. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Геодинамические режимы Центральной Азии к западу и востоку от геораздела 102-104° // Geodynamics & Tectonophysics.—2020.— Т. 11.— № 2.— С. 334—351, doi:10.5800/GT-2020-11-2-0478.
- 3. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзебоев Б.А. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: Актуальный обзор// Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 5—29, doi:10.1134/S0002333720010044. (Перевод на английский язык Gvishiani, A.D., A.A. Soloviev, and B.A. Dzeboev, Problem of recognition of strong-earthquake-prone areas: a state-of-the-art review. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, **56**, 1: 1-23, doi:10.1134/S1069351320010048)
- 4. Кособоков В.Г., Щепалина П.Д. Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 43—52, doi:10.1134/S0002333720010068. (Перевод на английский язык – Kossobokov, V.G., and P.D. Shchepalina, Times of increased probabilities for occurrence of the world's largest earthquakes: 30 years hypothesis testing in real time. Izvestiya, **Physics** of the Solid Earth, 2020, **56**. 1: 36-44, doi:10.1134/S1069351320010061)
- 5. Молчан Г.М. Стохастическая модель А.Гусева для сейсмического источника: высокочастотное поведение в дальней зоне// Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 86—95, doi:10.1134/S0002333720010081.(Перевод на английский язык Molchan, G.M. Gusev's stochastic model for the seismic source: high-frequency behavior in the far zone. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, **56**, 1: 74-82, doi:10.1134/S1069351320010085)
- 6. Молчан Г.М. Фрактальная сейсмичность и сейсмический риск // Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 77—85, doi:10.1134/S000233372001007X. (Перевод на

- английский язык Molchan, G.M. Fractal seismicity and seismic risk. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, **56**, 1: 66-73, doi:10.1134/S1069351320010073)
- 7. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общийзаконподобиядля землетря сений // Вулканология исейсмология.— 2020.— № 6.— С. 3—25, doi:10.31857/S0203030620060152.
- 8. Некрасова А.К., Кособоков В.Г., Парвез И.А., Тао Х. Общий закон подобия для землетрясений в приложении к оценке сейсмической опасности и ассоциированных рисков// Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 96—108, doi:10.1134/S0002333720010093. (Переводнаанглийскийязык – Nekrasova, A.K., V.G.Kossobokov, I.A.Parvez, and X.Tao, Unified Scaling Law for Earthquakes as applied to assessment of seismic hazard and associate risks. Izvestiya, **Physics** ofthe Solid Earth, 2020, **56.** 1: 83-94, doi:10.1134/S1069351320010097)
- 9. Шебалин П.Н. Увеличение радиуса корреляциии цепочки землетрясений перед сильнейшими сейсмическими событиями // Физика Земли.—2020.— № 1.— С.30—42, doi:10.1134/S0002333720010135. (Перевод на английский язык Shebalin, P.N. The rise of the earthquake correlation range and the chains of earthquakes before large seismic events. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, **56**, 1: 24-35, doi:10.1134/S1069351320010139)
- 10. Baro,O., A.Kumar, and A.Ismail-Zadeh, Seismic hazard assessment of the Shillong Plateau using a probabilistic approach, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 2020, **11**, 1: 2210-2238, doi:10.1080/19475705.2020.1833989.
- 11. 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.
- 12. Vorobieva,I., P.Shebalin, and C.Narteau, Condition of occurrence of large manmade earthquakes in the zone of oil production, Oklahoma. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, **56**, 6: 911-919, doi:10.1134/S1069351320060130.

Статьи, опубликованные в сборниках статей

- 1. Ismail-Zadeh, A., and V. Kossobokov, Earthquake prediction, M8 algorithm. In Gupta, H. (ed.), Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer (First Online: 30 May 2020), doi:10.1007/978-3-030-10475-7\_157-1.
- 2. Kossobokov,V. Unified Scaling Law for Earthquakes that generalizes the fundamental Gutenberg-Richter relationship. In Gupta,H. (ed.), Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer (FirstOnline: 30 May 2020), doi:10.1007/978-3-030-10475-7 257-1.

Доклады на международных и российских научных конференциях

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