

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

№ госрегистрации АААА-А19-119011490127-6

Инв. № 2020-1

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИТПЗ РАН

чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_ П.Н. Шебалин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, РАЗРАБОТКА И  
АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ»  
(промежуточный, за 2019 год)

Руководитель НИР

гл. науч. сотр., зав. лаб.,

докт. физ.-мат.наук,

чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_ А.А. Соловьев  
Подпись, дата

Москва, 2019 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, гл. науч. сотр., зав. лаб., докт. физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН	_____ Подпись, дата	А.А. Соловьев (введение, разделы 2.2 и 3.1, заключение)
Исполнители темы		
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	И.А. Воробьева (раздел 3.1)
гл. науч. сотр., докт. геол.-мин. наук	_____ Подпись, дата	Ю.Г. Гатинский (раздел 3.4)
гл. науч. сотр., зав. лаб., докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	А.И. Горшков (раздел 2.2)
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	В.Г. Кособоков (разделы 1.1, 2.1 и 3.3)
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	Т.Л. Кронрод (раздел 2.1)
ст. науч. сотр., канд. тех. наук	_____ Подпись, дата	И.В. Кузнецов (раздел 3.1)
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	А.К. Некрасова (разделы 2.1 и 3.3)
ст. науч. сотр., канд. хим. наук	_____ Подпись, дата	С.С. Новиков (раздел 2.2)
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	О.В. Новикова (раздел 2.2)
науч. сотр.	_____ Подпись, дата	Т.В. Прохорова (разделы 1.1 и 3.4)
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	Л.Л. Ромашкова (раздел 1.1)
врио директора, гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН	_____ Подпись, дата	П.Н. Шебалин (разделы 1.2, 3.1 и 3.2, заключение)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	П.Д. Щепалина (раздел 3.3)
Нормоконтролер	_____ Подпись, дата	В.А. Тимофеева

## РЕФЕРАТ

Отчет 44 с., 1 кн., 11 рис., 3 табл., 80 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 2019 году, включали: продолжение глобального эксперимента по применению алгоритма прогноза землетрясений M8 для прогноза сильнейших землетрясений мира с детализацией прогноза по пространству с помощью алгоритма MSc; анализ результатов многолетнего прогнозного мониторинга сейсмичности по алгоритму RTP; изучение возможности мониторинга сейсмичности с помощью алгоритма M8 в регионе Вранча (Румыния); анализ связи формы графика повторяемости землетрясений вдоль Камчатского слаба с сейсмическим сцеплением; поиск и изучение закономерностей афтершоковых последовательностей; изучение влияния лунно-солнечных приливов на сейсмичность; актуализацию карт сейсмической опасности и рисков на базе локальных оценок параметров Общего закона подобия для землетрясений; геолого-геофизический анализ результата распознавания возможных мест землетрясений с интенсивностью в эпицентре  $I_0 \geq VI$  во французском Центральном массиве; изучение геодинамики и сейсмичности геораздела 102-103° и смежных транзитных зон Центральной Азии.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	8
1 Разработка и применение методов прогноза землетрясений.....	8
1.1 Применение алгоритма M8.....	8
1.2 Применение алгоритма RTP.....	12
2 Оценка сейсмической опасности .....	14
2.1 Оценка сейсмической опасности и ассоциированных рисков на основе значений коэффициентов ОЗПЗ.....	14
2.2 Определение мест возможного возникновения сильных землетрясений.....	16
3 Изучение сейсмичности .....	20
3.1 Исследование связи формы графика повторяемости землетрясений вдоль Камчатского слаба с сейсмическим сцеплением.....	20
3.2 Изучение афтершоковой активности .....	24
3.3 Лунно-солнечные приливы и сейсмичность.....	28
3.4 Сейсмичность и геодинамика.....	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	33
ПРИЛОЖЕНИЯ:	
Приложение А – Публикации по теме НИР, изданные в 2019 г. ....	41

## 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
ФИЦ ЕГС РАН	–	Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН»
NDSHA	–	neodeterministic seismic hazard assessment
PSHA	–	probabilistic seismic hazard assessment
RTP	–	reverse tracing of precursors

## 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 магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика (инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии" Раздела IX "Науки о 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.

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 существуют два основных направления в мировых исследованиях по оценке сейсмической опасности – вероятностная оценка сейсмического риска PSHA 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 масштабах, 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 коэффициентов ОЗПЗ.

Большое значение для сокращения ущерба от землетрясений имеют также результаты изучения афтершоковых процессов.

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 включают: совершенствование существующих и разработку новых алгоритмов прогноза землетрясений; продолжение экспериментов по применению разработанных ранее алгоритмов для оперативного прогноза землетрясений в режиме реального времени; анализ существующих и разработка новых методов оценки надежности и достоверности результатов прогноза; распознавание мест возможного возникновения землетрясений с интенсивностью в эпицентре  $I_0 \geq VI$  во французском Центральном массиве; сравнительный анализ применения различных алгоритмов распознавания для выделения мест возможного возникновения сильных (с магнитудой  $M \geq 6.0$ ) землетрясений на Кавказе; анализ связи формы графика повторяемости землетрясений вдоль Камчатского слаба с сейсмическим сцеплением; поиск и изучение закономерностей афтершоковых последовательностей; изучение влияния лунно-солнечных приливов на сейсмичность; изучение геодинамики и сейсмичности восточной части Центральной Азии.

Полученные результаты должны привести к разработке технологий прогноза чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и, соответственно, подходов к минимизации ущерба от них.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1 Разработка и применение методов прогноза землетрясений

#### 1.1 Применение алгоритма M8

В 2019 году был продолжен Глобальный эксперимент по применению алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений M8 [1, 2] и последующей детализацией с помощью алгоритма MSc [2-4], который ведется с 1992 года [2, 5-7]. Эксперимент направлен на прогноз землетрясений с магнитудой  $M \geq 8.0$  (M8.0+) и прогноз землетрясений с  $7.5 \leq M < 8.0$  (M7.5+). 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 рисунках 1 и 2 показаны такие карты, полученные на 01.01.2019, а на рисунках 3 и 4 приведены такие карты, полученные на 01.07.2019.

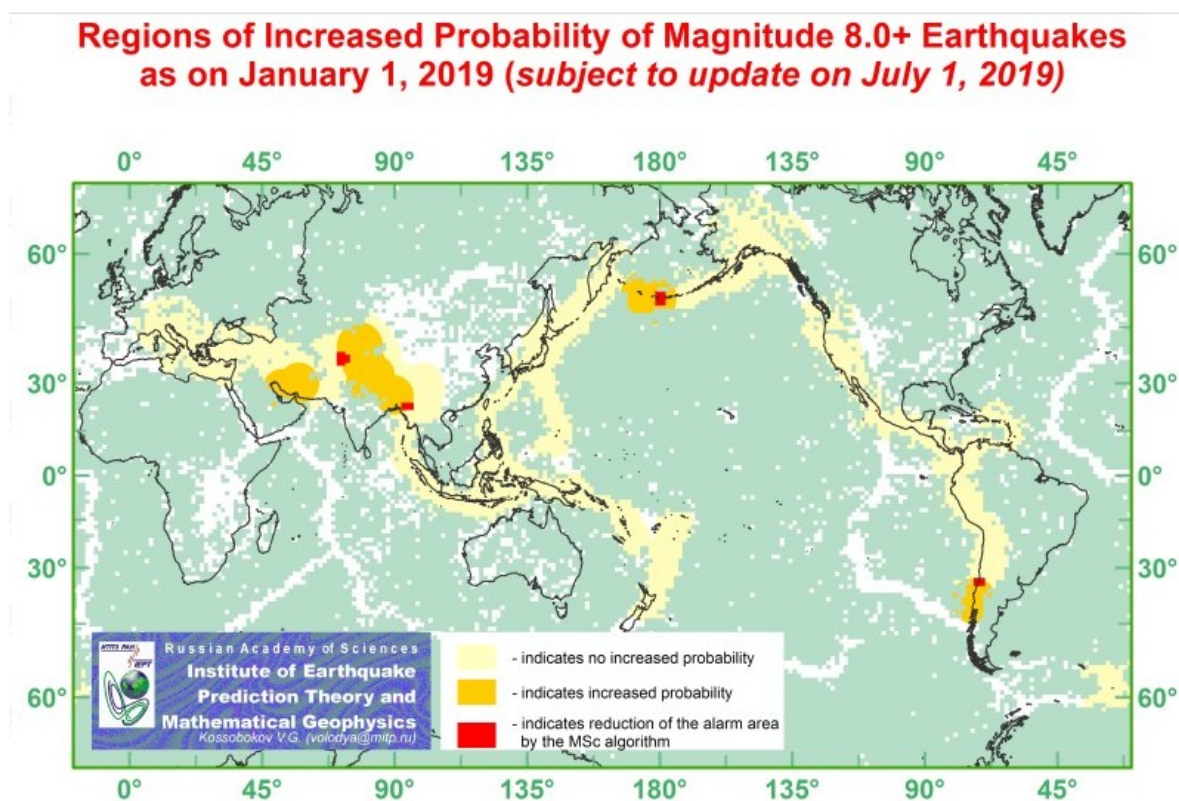


Рисунок 1 – Прогноз землетрясений с  $M \geq 8.0$ , полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2019 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом)



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

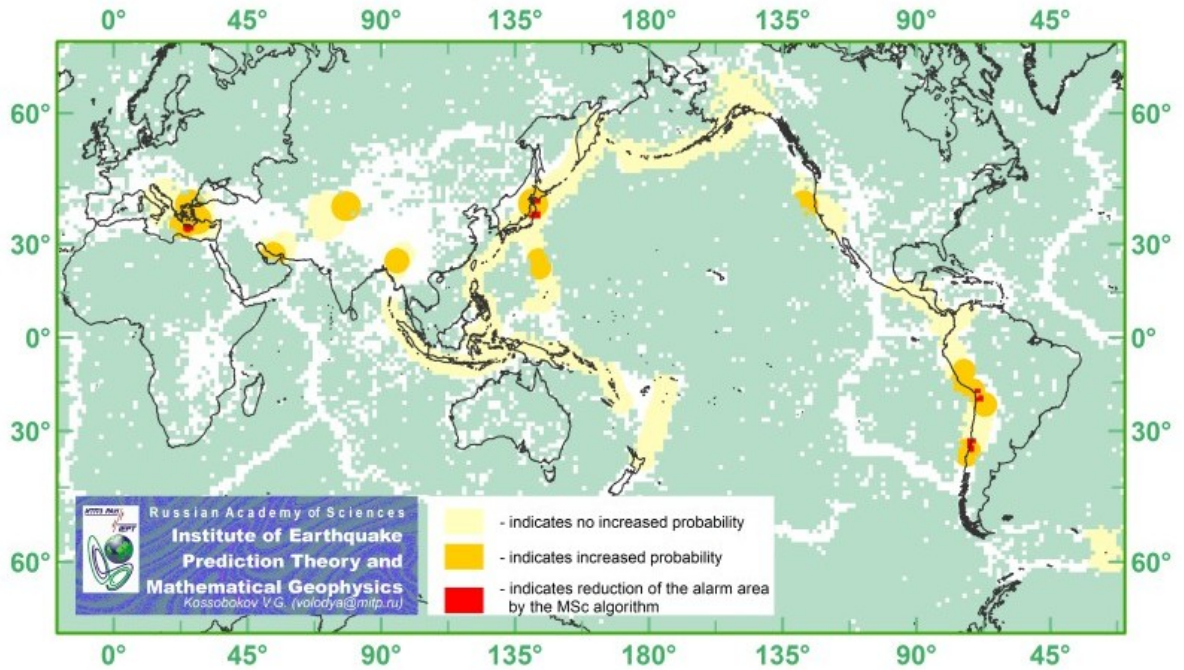


Рисунок 2 – Прогноз землетрясений с  $M \geq 7.5$ , полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2019 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом)

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

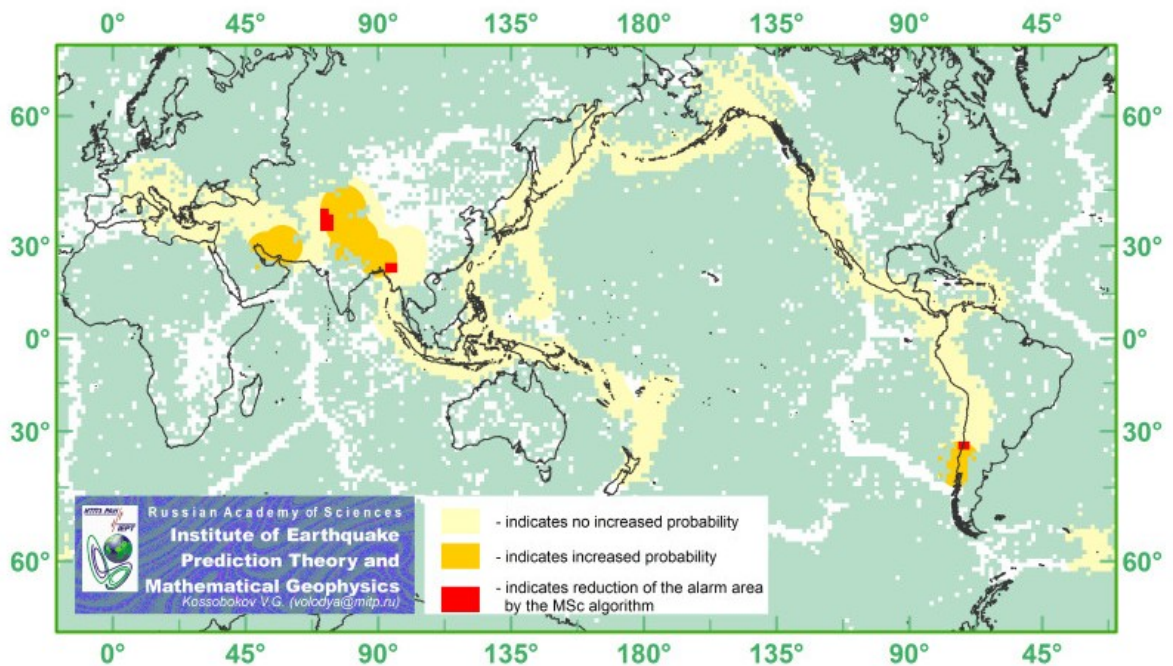


Рисунок 3 – Прогноз землетрясений с  $M \geq 8.0$ , полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2019 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом)

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

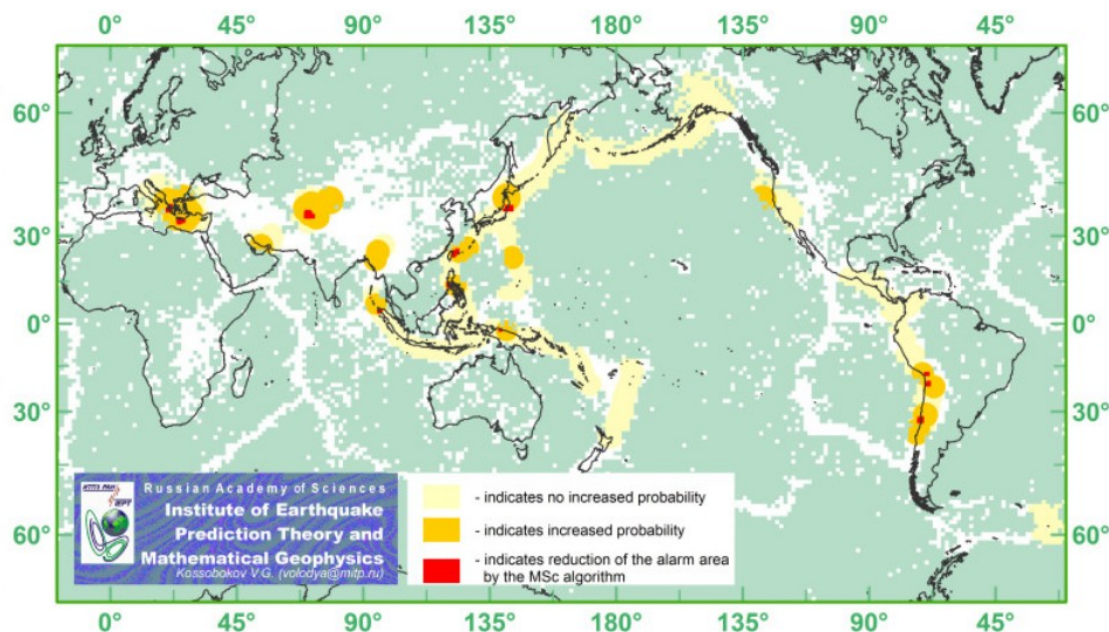


Рисунок 4 – Прогноз землетрясений с  $M \geq 7.5$ , полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2019 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом)

По данным Геологической службы США в 2019 году произошло два землетрясения с магнитудой  $7.5 \leq M < 8.0$  и одно землетрясение с  $M \geq 8.0$ . Их параметры приведены в Таблице 1, а положения эпицентров показаны на рисунке 5. Все эти три эпицентра лежат вне областей тревоги как для диапазона M7.5+, так и для диапазона M8.0+, и отсюда следует вывод, что в 2019 году произошли два пропуска цели в прогнозе событий M7.5+ и один пропуск цели в прогнозе событий M8.0+. В тоже время следует отметить, что по данным Службы срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd.htm>) приведенные в Таблице 1 землетрясения 22.02.2019, 14.05.2019 и 26.05.2019 имеют магнитуды 7.1, 7.4 и 7.4 соответственно. Если использовать эти значения магнитуд, то все три события не попадают ни в диапазон M7.5+, ни в диапазон M8.0+, и, соответственно, в 2019 году в Глобальном эксперименте нет пропусков цели.

В 2019 году уточнен анализ результатов этого многолетнего эксперимента за период до конца 2019 года. Полученные в соответствии с [8] оценки эффективности применения алгоритмов M8 и M8-MSc при прогнозе землетрясений M7.5+ и M8.0+ приведены в Таблице 2. При этом для землетрясений из Таблицы 1 использованы их

магнитуды, приведенные в этой таблице, т.е. эти землетрясения отнесены к пропускам цели.

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

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

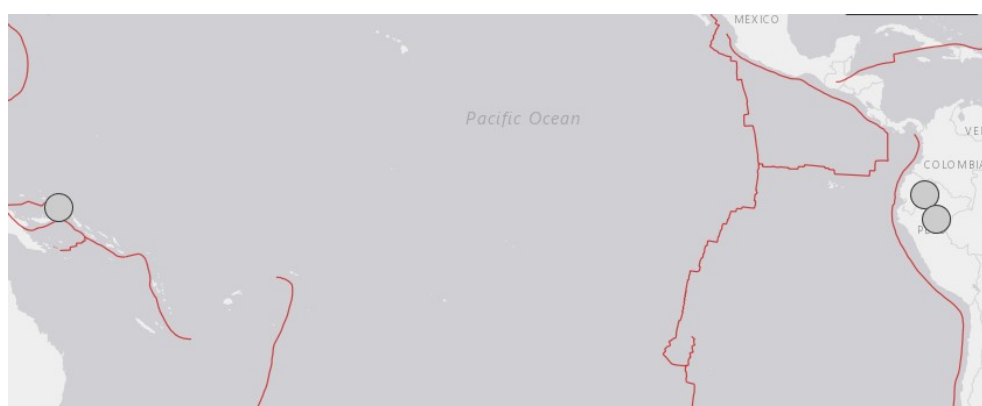


Рисунок 5 – Эпицентры землетрясений (показаны кругами) с магнитудой  $M \geq 7.5$ , которые произошли в 2019 году

Таблица 2 – Оценка эффективности прогнозов по алгоритмам M8 и M8-MSc в Глобальном тесте

Период теста	Сильные события			Доля объема тревоги $\tau$ , % <sup>1</sup>		Вероятность $p$ , % <sup>2</sup>	
	Всего, $N$	Предсказано, $N_s$		M8	M8-MSc	M8	M8-MSc
		M8	M8-MSc				
<i>Диапазон M8.0+</i>							
1985-2019	28	17	11	30.92	14.59	0.06	0.09
1992-2019	26	15	9	28.13	12.66	0.09	0.25
<i>Диапазон M7.5+</i>							
1985-2019	87	43	17	29.22	9.12	0.006	0.20
1992-2019	75	33	11	25.33	8.34	0.034	4.62

<sup>1</sup> Оценка пространства при вычислении процента объема тревоги выполнена с использованием наиболее консервативной меры, учитывающей эмпирическое распределение эпицентров.

<sup>2</sup> Вероятность получения случайным образом результата прогноза, не уступающего полученному при тестировании.



По результатам выполнения Глобального эксперимента пополнен архив прогнозных карт в среде ArcGis и сделаны доклады [9-10]. В докладе [11] рассмотрена возможность использования данных GPS-наблюдений для повышения точности и надежности результатов прогноза.

Инициировано изучение возможности возобновления мониторинга сейсмичности с помощью алгоритма M8 в районе Вранча (Румыния) по оперативным данным сети сейсмических наблюдений Румынии (каталог ROMPLUS) с целью прогноза сильных землетрясений, сотрясения от которых ощутимы в Европейской части России, в частности, в Москве. В рамках возобновления мониторинга установлено, что тревога на землетрясения с  $M \geq 6.0$  ( $M6.0+$ ), приведенная в работе [12], завершилась лишь в конце 2018 года. Причем вместо ожидаемого землетрясения с  $M \geq 6.0$  в области тревоги произошло четыре события несколько меньшей магнитуды, а именно, с  $M = 5.7$  (22.11.2014) и с  $M = 5.8$  (23.09.2016, 27.12.2016 и 28.10.2018). Результаты работы были представлены на специально организованном семинаре в Национальном институте исследований и разработок по физике Земли (Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Fizica Pamantului, Magurele, Romania) [13]. Мониторинг в районе Вранча планируется продолжить совместно с румынскими коллегами.

## **1.2 Применение алгоритма RTP**

В 2019 г. продолжен прогнозный мониторинг сейсмичности по алгоритму RTP, в основе которого лежит явление увеличения радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями [14-17]. Мониторинг выполняется в пяти регионах: Курилы-Камчатка ( $M \geq 7,2$ ); Хонсю-Хоккайдо-Южные Курилы ( $M \geq 7,2$ ); Калифорния-Орегон-Невада ( $M \geq 6,4$ ); Центральные Апеннины, Альпы, Северные Динариды и долина По ( $M \geq 5,5$ ); восточном Средиземноморье ( $M \geq 6,0$ ). Целью мониторинга является оценка достоверности прогнозов по алгоритму RTP и поиск способов его уточнения и повышения надежности. В 2019 г. не было диагностировано ни одной тревоги в тестируемых регионах. Землетрясений указанных магнитуд в рассматриваемых областях в 2019 г. также не произошло.

Обобщен опыт эксперимента по заблаговременному прогнозу землетрясений по алгоритму RTP. За период теста 2003-2019 гг. в пяти регионах мира произошло 28 сильных землетрясений, из них 23 в области и в период тревог, диагностированных по алгоритму. При этом вероятность случайного успеха в 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 подготовлена к печати статья.

## 2 Оценка сейсмической опасности

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

Продолжена актуализация карт сейсмической опасности и рисков на базе локальных оценок коэффициентов ОЗПЗ [2], который уточняет эмпирическое соотношение Гутенберга-Рихтера, учитывая естественное фрактальное распределение сейсмичности. Результаты глобального и регионального анализа [18-21] 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:  $\lg N(M, L) = A + B \times (5 - M) + C \times \lg L$ , где  $A, B, C$  – константы, локально характеризующие соответственно логарифм среднегодовой частоты землетрясений магнитуды 5.0 и выше в области линейного размера в 1 градус Земного меридиана, баланс числа землетрясений разных магнитуд и фрактальную размерность носителя эпицентров землетрясений. Оценки коэффициентов  $A, B$  и  $C$  могут быть использованы для расчетов характеристик сейсмической опасности в терминах достоверно определенной максимальной магнитуды землетрясения, которое возможно в данном месте системы разломов, а также ассоциированных с ним сотрясений на территории и рисков для населения и инфраструктуры.

В 2019 году оценки коэффициентов  $A, B$  и  $C$  получены для территории Камчатского региона. Изучены пространственно-временные вариации их значений. А именно, по данным региональной сейсмической сети Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН с 1996 г. по н.в. выполнены оценки коэффициентов ОЗПЗ для пяти (из десяти, выделенных в [22]) различных зон сейсмичности: сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки; северной части Камчатской сейсмофокальной зоны; командорского сегмента Алеутской дуги; континентальной области Камчатки; Корякского сейсмического пояса. Эмпирические функции вероятности распределения коэффициентов ОЗПЗ для указанных областей приведены на рисунке 6. Отметим, что значения коэффициентов ОЗПЗ для разных областей Камчатского региона существенно отличаются.

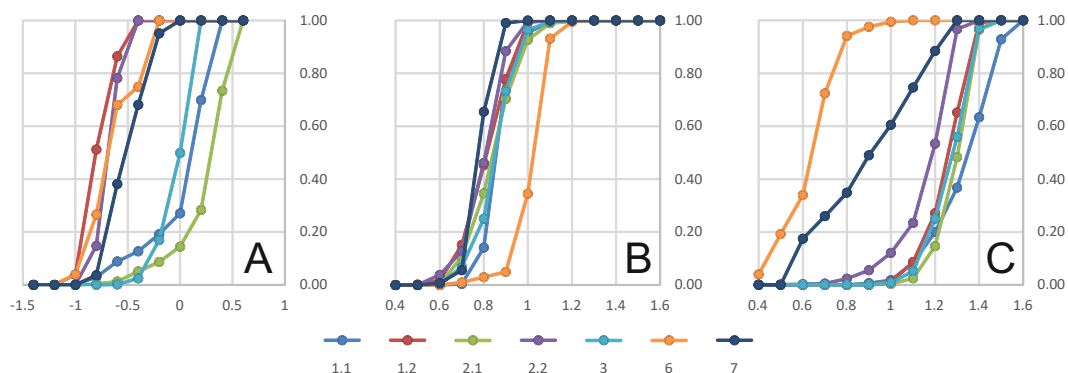


Рисунок 6 – Эмпирические функции вероятности распределения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  ОЗПЗ для сейсмически активных зон Камчатского региона: сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки (1.1 – глубины до 70 км включительно, 1.2 – глубины от 70 км и более); северной части Камчатской сейсмофокальной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

На рисунке 7 представлены временные вариации контрольного параметра ОЗПЗ  $\eta = N^{-1} \times 10^{B \times (5-M)} \times L^C$  для наиболее активных сейсмических зон Камчатского региона – сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки и северной части Камчатской сейсмофокальной зоны; и сейсмически менее активных регионов – командорского сегмента Алеутской дуги и Корякского сейсмического пояса. Во всех четырех сейсмических зонах, отличающихся по своим геодинамическим и тектоническим характеристикам, за рассматриваемый период инструментальных наблюдений произошли значительные сейсмические события с магнитудой  $M_w > 7.0$ . А изменения уровня значений контрольного параметра  $\eta$  до и после сильнейших событий в рассматриваемых зонах различно даже внутри одной выделенной зоны.

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

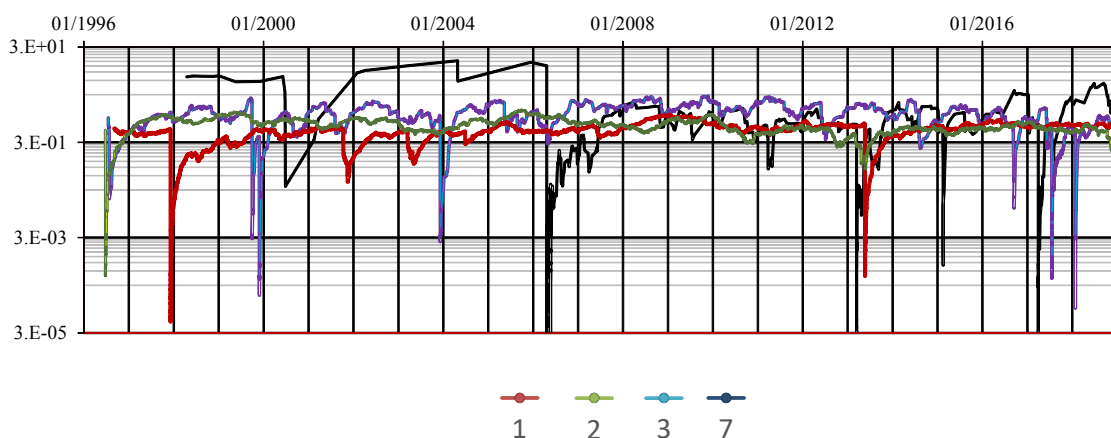


Рисунок 7 – Временные вариации контрольного параметра ОЗПЗ  $\eta$  для сейсмических зон Камчатского региона: 1 – сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки (скользящее среднее по 150 событиям); 2 – северной части Камчатской сейсмофокальной зоны (скользящее среднее по 200 событиям); 3 – командорского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

По полученным результатам опубликована статья [23] и сделаны доклады [24-28]. Зарегистрирована также база данных [29], содержащая значения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$ , вычисленные на основе каталога USGS GHDB неглубоких землетрясений с  $M \geq 4$ , произошедших в 1964-2002 гг.

## 2.2 Определение мест возможного возникновения сильных землетрясений

Для оценки сейсмической опасности важно знать, где в рассматриваемом регионе могут произойти сильные (с магнитудой  $M \geq M_0$ , где  $M_0$  – некоторый порог) землетрясения. Поскольку период инструментальных сейсмологических наблюдений составляет немногим более 100 лет, то естественно предположить, что за это время не все такие места «проявили» себя сильными землетрясениями и, соответственно, возникает задача их определения. Подходы к решению этой задачи, основанные на построении схемы морфоструктурного районирования исследуемого региона с целью выделения объектов, среди которых могут быть места возможного возникновения сильных землетрясений, и последующем применении методологии распознавания образов для определения таких мест, были сформулированы в начале 70-х годов прошлого века в результате сотрудничества математиков во главе с И.М.Гельфандом, геофизиков во главе с В.И.Кейлис-Бороком и геоморфологов во главе с Е.Я.Ранцман [30-34]. Ранее такая задача была сформулирована и решена для ряда сейсмоактивных регионов. В 2019 году эти исследования были продолжены.



Рассмотрен французский Центральный массив – внутриплитовая область Средиземноморья с сейсмичностью от низкой до умеренной. Целью исследования было выявление сейсмогенных узлов, способных генерировать землетрясения с интенсивностью в эпицентре  $I_0 \geq VI$ . Применен феноменологический подход, основанный на распознавании образов. Объекты распознавания – морфоструктурные узлы – определены методом морфоструктурного районирования, позволяющим получить иерархическую блочную структуру региона, сеть ограничивающих блоков морфоструктурных линеаментов и положения узлов, которые сформированы на пересечениях линеаментов. В некоторых из узлов известны землетрясения с  $I_0 \geq VI$ . С помощью алгоритма распознавания «Кора-3» [33] определены другие узлы, где такие землетрясения возможны, но еще не были зарегистрированы. Результат представлен на рисунке 8.

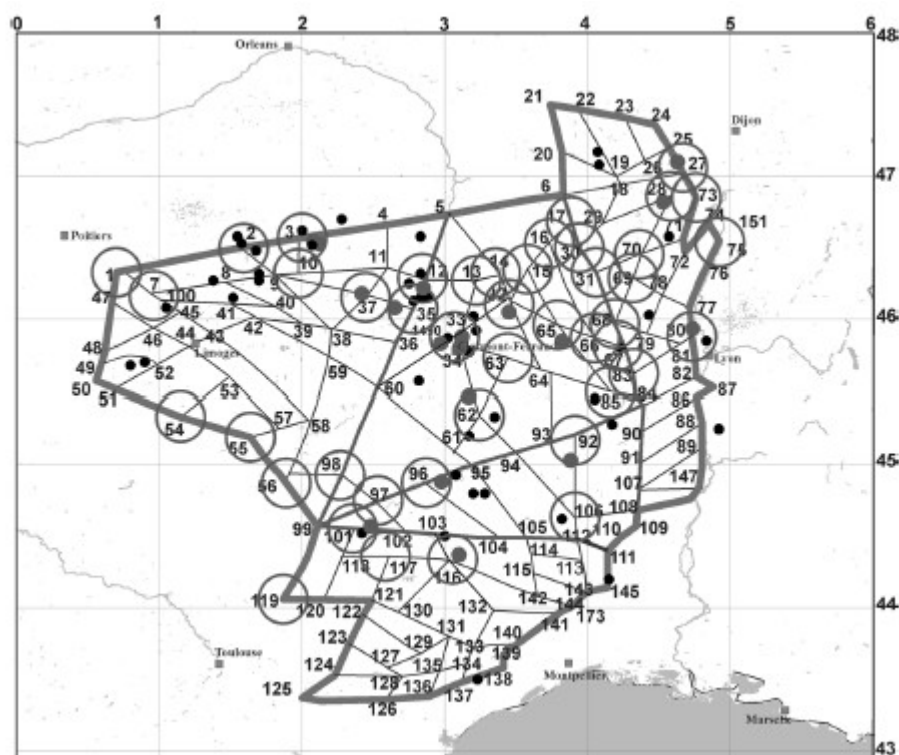


Рисунок 8 – Результат распознавания мест возможного возникновения землетрясений с интенсивностью в эпицентре  $I_0 \geq VI$  во французском Центральном массиве. Толстыми линиями показаны линеаменты первого ранга, средними линиями – линеаменты второго ранга, тонкими линиями – линеаменты третьего ранга. Черные точки обозначают эпицентры известных землетрясений с  $V \leq I_0 < VI$ , а серые – эпицентры землетрясения с  $I_0 \geq VI$ . Узлы, в которых в соответствии с результатами распознавания возможны землетрясения с  $I_0 \geq VI$ , обозначены кругами

Распознанные сейсмогенные узлы расположены в основном в восточной части массива и связаны с линеаментами высокого ранга, разделяющими более крупные блоки Центрального массива. Также была определена совокупность геоморфологических

признаков, типичных для сейсмогенных узлов. По результатам исследования, дающим информацию о потенциальных местах возникновения землетрясения, которая важна для адекватной долгосрочной оценки сейсмической опасности, опубликована статья [35] и сделан доклад [36].

В рамках сотрудничества с ГЦ РАН выполнено распознавание мест возможного возникновения сильных ( $M \geq 6.0$ ) землетрясений на Кавказе с помощью нового алгоритма распознавания образов «Барьер-3» [37], разработанного в ГЦ РАН. Осуществлено сравнение этого результата с полученным ранее результатом решения аналогичной задачи с помощью алгоритма распознавания образов «Кора-3» [38]. Предложено определить интерпретацию интегрального результата распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» как нечеткое множество объектов распознавания, в окрестностях которых могут произойти сильные землетрясения на Кавказе. Соответствующая функция принадлежности для такого множества имеет следующий вид:

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

где  $w \in W$  – объекты распознавания,

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

На рисунке 9 показан пример такой интерпретации двух результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.0$  на Кавказе в виде нечеткого множества. По результатам исследования опубликована статья [39].

Для целей оценки сейсмической опасности совместно с ГЦ РАН было создано программное обеспечение [40] и база данных [41].

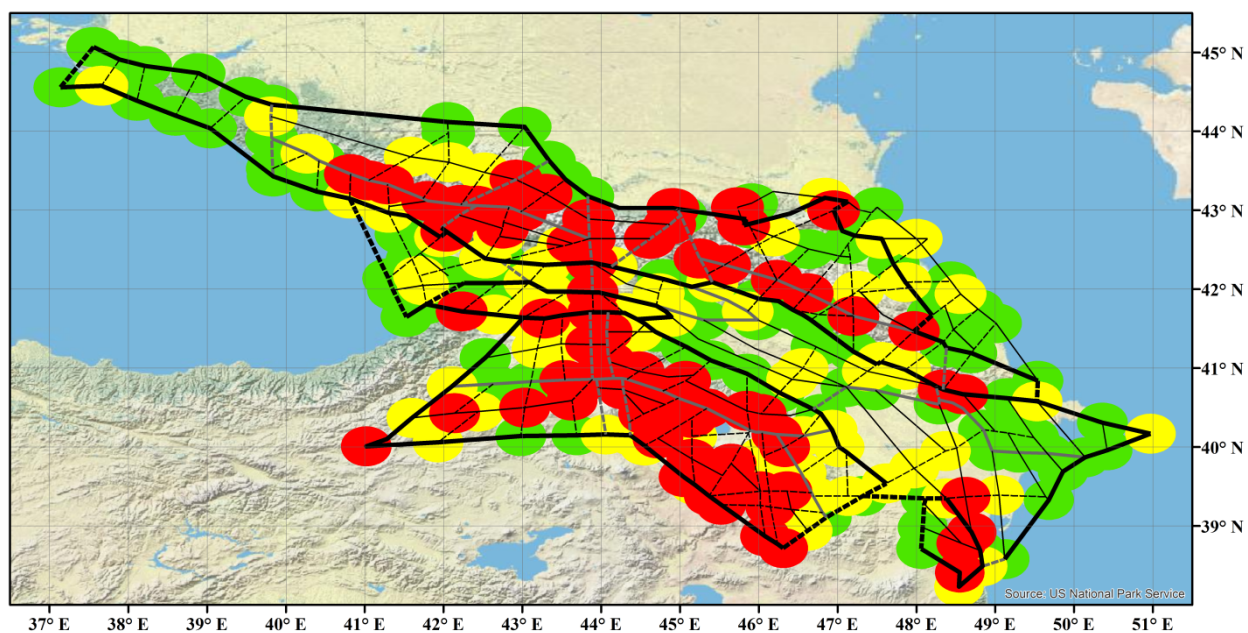


Рисунок 9 – Представление совместной интерпретации двух результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.0$  на Кавказе, полученных с помощью алгоритмов «Барьер-3» и «Кора-3», в виде нечеткого множества окрестностей пересечений морфоструктурных линеаментов. Красным, желтым и зеленым цветами показаны окрестности пересечений, у которых функция принадлежности (1) равна 1, 0.5 и 0 соответственно

### 3 Изучение сейсмичности

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

Сейсмический потенциал в зонах субдукции зависит от величины и характера каплинга (сцепления) взаимодействующих тектонических плит. Было установлено [42], что на различных участках зон субдукции характер сброса напряжений во время больших землетрясений может быть различным в зависимости от размеров «зацепов» (асперити, *asperity* в англоязычной литературе). Во время землетрясений на «зацепах» происходят максимальные по амплитуде подвижки. Для объяснения этого явления была предложена геотектоническая концепция, в соответствии с которой именно на «зацепах» происходит накопление напряжений [43]. В дальнейшем, быстро развивающиеся исследования по деформациям земной поверхности с помощью спутниковых технологий подтвердили эту концепцию, сформировалось представление о «зацепах» как зонах дефицита проскальзывания («slip deficit») [44].

Исследование зон каплинга имеет большой практический смысл для оценки сейсмо- и цунамиопасности вблизи зон субдукции. С одной стороны, именно на краю или внутри таких зон обычно находятся гипоцентры сильных землетрясений. С другой стороны, именно такие зоны, с максимальной подвижкой при землетрясении дают основной вклад в образование волн цунами [45]. Это, в свою очередь, дает возможность выявления зон каплинга по инверсии мареограмм, фиксирующих амплитуды цунами в разных точках береговой линии [45], а также по палеоданным об осадочных отложениях, вызванных цунами [46]. Результаты многочисленных исследований говорят в пользу того, что положение «зацепов» стабильно в течение длительного времени [44].

В Камчатской зоне субдукции выявление зон каплинга ведется с конца 90-х годов сейсмическими методами [47], по GPS-наблюдениям [48, 49], на основе анализа мареограмм [45] и осадочных отложений цунами [46]. Однако, получаемые решения не являются однозначными из-за недостаточного покрытия территории станциями GPS и из-за отсутствия прямых измерений скоростей деформации на дне океана.

В пионерской работе [42], давшей объяснение различий в сейсмичности разных зон субдукции разным характером сцепления взаимодействующих тектонических плит, южная часть Камчатки, в которой был расположен очаг катастрофического Камчатского землетрясения 4 ноября 1952 г.,  $M=9.0$ , отнесен к типу обширной связной зоны сцепления, тогда как северная Камчатка характеризуется более локализованными зонами сцепления и, соответственно, меньшим сейсмическим потенциалом. В более поздних исследованиях

было обнаружено, что величина подвижки в очаге землетрясения 1952 г. неоднородна и составляла от 0 до 15 м; при этом в южной части очага, скорее всего, подвижка в среднем больше, чем в северной [45, 46]. Исследования интер-сейсмических деформаций по данным GPS [49] подтверждают, что зоны полного сцепления взаимодействующих блоков совпадают с областями максимальной подвижки при сильных землетрясениях, и что эти зоны составляют лишь небольшую часть очагов землетрясений, трассируемых облаками афтершоков.

В исследованиях, проводимых по теме, предложен новый подход для выявления «зацепов» в зонах субдукции. Он основан на недавно обнаруженном явлении загиба графика повторяемости, связанного с дефицитом относительно сильных событий, в областях больших скоростей асейсмического проскальзывания [50]. Сделано предположение, что в зонах субдукции участки меньшего сцепления также характеризуются дефицитом сильных событий, тогда как в зонах «зацепов» нелинейность графика повторяемости не наблюдается, или возможен некоторый относительный избыток сильных событий.

Рассмотрены землетрясения Камчатской зоны субдукции, выделенные по работе [22]. Для анализа использован каталог землетрясений Единой информационной системы сейсмологических данных Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/sdis>). Рассмотрены два варианта каталога – полный и каталог основных толчков, в котором удалены афтершоки по методу работы [51].

Для определения формы графика повторяемости его наклоны  $b_{M3.5}$  и  $b_{M4.8}$  оценивались в двух диапазонах магнитуды одинаковой ширины [3.5, 4.7] и [4.8, 6.0], соответственно, по данным с 1962 по 2017 г. Использован метод максимального правдоподобия, основанный на анализе дифференциального магнитудно-частотного распределения, который дает несмещенную оценку наклона в ограниченном диапазоне магнитуды [52, 53]. Погрешности  $\delta b_{M3.5}$  и  $\delta b_{M4.8}$  (одно стандартное отклонение) определяются методом Монте-Карло. Для рассматриваемого региона, периода времени и используемого каталога магнитуда 3.5 является представительной. Значения  $b_{M4.8}$  и  $\delta b_{M4.8}$  определяются на регулярной сетке с шагом 5 км. В каждом узле использованы 50 ближайших событий; максимальный радиус составляет 50 км. Затем, в тех же кругах вычислены  $b_{M3.5}$  и  $\delta b_{M3.5}$ . Постоянный размер выборки обеспечивает постоянство значения  $\delta b_{4.8} \approx 0.2$ . Отклонение графика повторяемости от прямолинейной формы мы характеризуем величиной загиба:

$$D_{\text{Sigma}} = (b_{M4.8} - b_{M3.5}) / \delta b_{M4.8} \quad (2)$$

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

Результаты анализа представлены на рисунке 10 по каталогу основных толчков и рисунке 11 по полному каталогу. Положение и форма областей обратного загиба графика повторяемости - предполагаемых областей сцепления - в двух вариантах различаются незначительно, что в дальнейшем избавляет от необходимости предварительной очистки каталогов от афтершоков.

Предполагаемые зоны сцепления покрывают почти всю территорию в южной части Камчатки (A1, A2, A3 на рисунках 10 и 11), что соответствует выводам работы по анализу мареограмм землетрясения 1952 г. [45], уточнений этого исследования по палео-данным об осадочных отложениях, вызванных цунами [46], а также по результатам обработки данных GPS и их сопоставления с гравитационными аномалиями [49]. Следующая зона, A4, выделяемая предложенным методом, расположена в северной части Авачинского залива. Ее положение согласуется с областью значительной подвижки в северной части очага землетрясения 1952 г., выделяемой в работе [45]. В работе [46], в качестве наиболее вероятных, указываются варианты с расположением этой зоны несколько восточнее и дальше в море. Соответствующая зона почти полного сцепления, выделяемая в работе [49], также расположена несколько восточнее. Еще одна аномалия, A5, расположена в Кроноцком заливе. Из-за недостатка данных эта область не выделяется в известных работах в качестве асперити, однако, именно здесь расположен очаг землетрясения 3 февраля 1923 г.,  $M=8.5$ , вызвавшего цунами 6-8 м [54, 55], что несомненно говорит о значительной подвижке в очаге. Следующая аномалия, A6, практически совпадает с областью максимальной подвижки при Кроноцком землетрясении 5 декабря 1997 г.,  $M=7.8$  [47]. Интересно отметить, что афтершоки этого землетрясения расположены, главным образом, в зонах загиба графика повторяемости вниз (рисунок 11). С учетом значительного асейсмического проскальзывания, сопровождавшего афтершоковый процесс Кроноцкого землетрясения [48], это дополнительно подтверждает исходную гипотезу о связи формы графика повторяемости с характером деформаций. В северной части очага Кроноцкого землетрясения 1997 г.; расположена еще одна аномалия, A7, которую можно ассоциировать с очагом цунамигенного землетрясения 13 апреля 1923 г. [54], тем более, что анализ данных о цунами позволяет предположить, что магнитуда этого землетрясения превышала значение 8 [55].

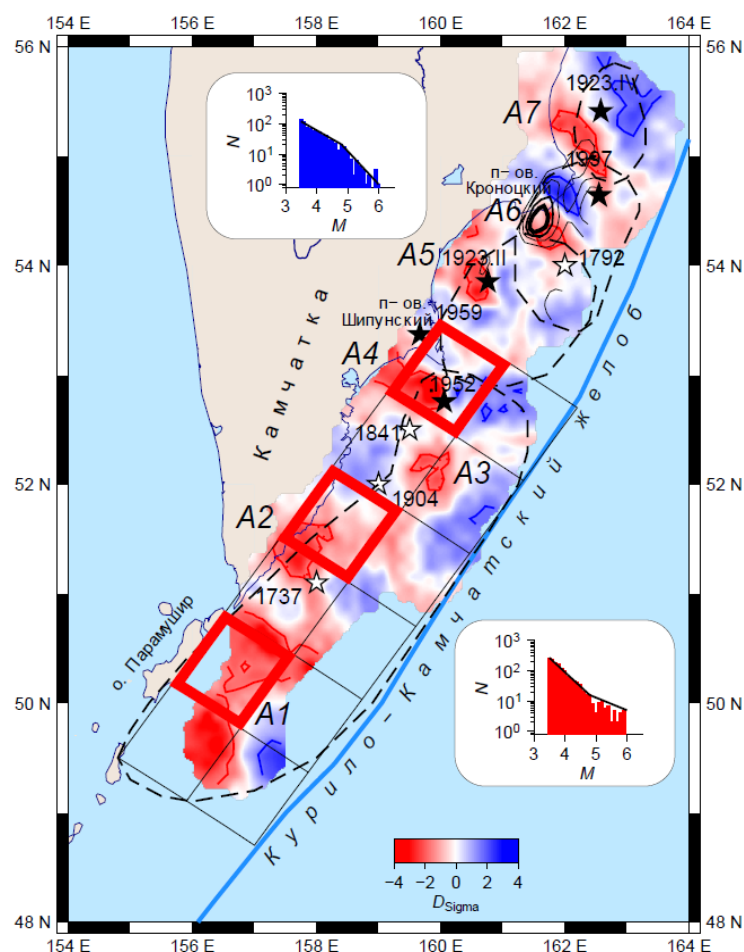


Рисунок 10 – Вариации формы графика повторяемости для каталога основных толчков. Красная и синяя линии очерчивают зоны статистически значимого излома графика повторяемости  $|D_{\text{Sigma}}| \geq 1.64$ . Красные зоны A1-A7 и синие зоны соответствуют избытку и дефициту сильных землетрясений соответственно; графики повторяемости из этих зон показаны на врезках. Черные звездочки – хорошо определенные эпицентры сильных землетрясений, белые звездочки – плохо определенные эпицентры исторических сильных землетрясений. Штриховые линии показывают очаги Камчатского землетрясения 1952г., землетрясений 1923г. и Кроноцкого землетрясения 1997 г. Распределение смещений в очаге Кроноцкого землетрясения [47] показано черными линиями. Зоны предполагаемых максимальных смещений в очаге Камчатского землетрясения показаны красными квадратами [45]. Вариации формы графика повторяемости для каталога основных толчков. Красная и синяя линии очерчивают зоны статистически значимого излома графика повторяемости  $|D_{\text{Sigma}}| \geq 1.64$ . Красные зоны A1-A7 и синие зоны соответствуют избытку и дефициту сильных землетрясений соответственно; графики повторяемости из этих зон показаны на врезках. Черные звездочки – хорошо определенные эпицентры сильных землетрясений, белые звездочки – плохо определенные эпицентры исторических сильных землетрясений. Штриховые линии показывают очаги Камчатского землетрясения 1952г., землетрясений 1923г. и Кроноцкого землетрясения 1997г. Распределение смещений в очаге Кроноцкого землетрясения [47] показано черными линиями. Зоны предполагаемых максимальных смещений в очаге Камчатского землетрясения показаны красными квадратами [45]

Лишь две из предполагаемых областей повышенного сцепления, A5 и A7, не выделяются в известных работах по данным о цунами или GPS- наблюдений, по-

видимому, из-за недостатка данных. Однако, эти области могут быть ассоциированы с очагами цунамигенных землетрясений, характеризующихся значительными подвижками. Значительные подвижки при землетрясениях, в свою очередь, характерны областям повышенного сцепления, которые сохраняют свое положение в течение длительного времени. Таким образом, разработанная методика может использоваться для выявления участков сцепления блоков океанической и континентальной коры в зонах субдукции в отсутствие или при неполноте прямых измерений деформаций по данным спутниковой геодезии и палео- исследований цунами, либо в дополнение к ним. В конечном итоге, это будет способствовать более точным расчетам сейсмической и цунами- опасности. По результатам исследований опубликована статья [56] и сделаны доклады [57, 58].

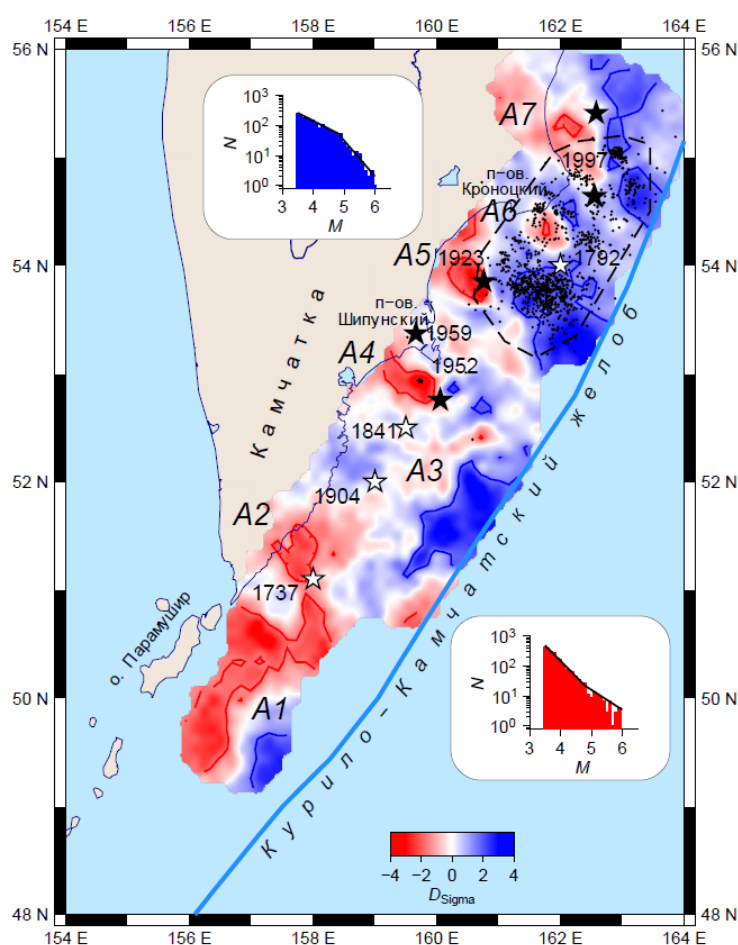


Рисунок 11 – Вариации формы графика повторяемости для полного каталога. Штриховая линия очерчивает афтершоковую зону Кроноцкого землетрясения 1997г. Черные точки – афтершоки за первую неделю ( $M \geq 3.5$ ). Остальные обозначения как на рисунке 10

### 3.2 Изучение афтершоковой активности

В продолжение серии работ по оценке опасности афтершоков рассмотрена задача оценки времени, в течение которого после сильного землетрясения следует ожидать



афтершоки, которые могут представлять самостоятельную опасность (афтершоки с магнитудой  $M \geq M_m - 2$ , где  $M_m$  – магнитуда основного толчка). Построена модель распределения этой величины, зависящая от трех параметров закона Омори–Утсу [59], который описывает убывание с течением времени  $t$  числа афтершоков в единицу времени  $\lambda(t)$ :

$$\lambda(t) = K/(t+c)^p, \quad (3)$$

где  $K$ ,  $c$  и  $p$  – параметры закона.

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

В результате исследования разработана методика оценки длительности опасного периода  $\tau_2$  возможного возникновения афтершоков с магнитудой  $M \geq M_m - 2$ , где  $M_m$  – магнитуда основного толчка. При необходимости оценка может быть пересчитана для произвольного порога магнитуды. Оценка проводится в два этапа. На первом этапе, сразу после сильного землетрясения, используется усредненная модель распределения величины  $\tau_2$ . Входной информацией для этой модели может являться только глубина очага. Параметры модели заранее определены. На втором этапе прогноз величины  $\tau_2$  может быть уточнен за счет информации о первых афтершоках, например, в течение первых 12 часов после землетрясения. Параметры модели для серий с большим числом афтершоков в принципе могут быть оценены, но оказалось, что результаты лучше совпадают с реальными значениями времени последнего афтершока, если использовать заранее заданные значения параметров, по возможности зависящие от глубины очага. Поэтому фактически для оценок на втором этапе используется только число афтершоков представительной магнитуды.

Для практического применения методики оценены параметры модели по глобальному каталогу землетрясений и отдельно для Курило-Камчатского, Байкальского и Кавказского регионов. Для глобального каталога, Курил и Камчатки параметры зависят от глубины очага. Ретроспективная проверка первого этапа методики показала хорошее совпадение теоретической модели с эмпирическими распределениями величины  $t_2$ . Уточнение прогноза на втором этапе, как показал второй ретроспективный тест, действительно целесообразно, поскольку позволяет получить информационный выигрыш в среднем около 50%. Главной целью работы являлось создание методики для получения чисто практических результатов, которые, в том числе, будут использованы в разрабатываемой автоматизированной системе прогнозирования опасности афтершоков AFCAST ([www.afcast.org](http://www.afcast.org)). Вместе с тем, в работе получены новые результаты, которые могут послужить уточнению физических представлений о сейсмогенезе. В частности, установлена сильная зависимость от глубины очага среднего количества афтершоков с относительным порогом магнитуды. Эта величина экспоненциально уменьшается с глубиной, изменяясь более чем на порядок. Важным отрицательным результатом работы является вывод о неправомерности использования широко распространенной, особенно в западной научной литературе, модели ETAS (epidemic-type aftershock sequence – последовательность афтершоков эпидемического типа) [60-63] для прогноза длительности опасного периода афтершоков. Главная причина в том, что количество афтершоков у каждого события определенной магнитуды считается параметром модели, однако в природе эта величина варьирует в очень широких пределах, подчиняясь экспоненциальному распределению, имеющему максимум в нуле.

Значительное внимание в работе уделено проблеме идентификации афтершоков. Была проведена модификация метода Заляпина–Бен-Зиона [51, 64], в которой неявным образом учитываются размеры и направление простирания очага сильного землетрясения. Этот алгоритм позволяет выделять последовательности афтершоков, близко совпадающие при большом числе афтершоков с последовательностями, выделенными с методом Молчана–Дмитриевой [65], при этом алгоритм лишен его недостатков при малом числе афтершоков. Оказалось, однако, что пороговое значение функции близости примерно на два порядка меньше порога в стандартном методе. Это фактически означает, что «иерархическая» схема выделения афтершоков в методе Заляпина–Бен-Зиона в виде ветвящейся цепочки «родитель-потомки» фактически имеет лишь чисто технический смысл, без фактических причинно-следственных связей. Таким образом, методика Заляпина–Бен-Зиона и иерархические модели афтершокового процесса вообще требуют переосмысления.

По полученным результатам опубликована статья [66] и сделан доклад [67].

Исследована связь вероятности возникновения сильных афтершоков с сейсмичностью, предшествующей основному толчку. Под сильным понимается афтершок в смысле закона Бота [68] с магнитудой не ниже средней разности магнитуд сильнейших афтершоков и их основных толчков. Предложена и проверена гипотеза о том, что сильные афтершоки с большей вероятностью происходят после основных толчков, приуроченных к местам с высокой фоновой сейсмичностью. На глобальном уровне проверка гипотезы осуществлялась по данным каталога землетрясений ANSS ComCat Геологической службы США; на региональном - по данным каталогов землетрясений ФИЦ ЕГС РАН для ряда сейсмоопасных регионов России (Камчатка и Курильские острова, Байкал и Забайкалье, Северный Кавказ). Было протестировано несколько функций, характеризующих фоновую сейсмическую активность, предшествующую основному толчку, значения которых рассматривались как возможный предвестник или антипредвестник сильного афтершока. Эффективность предвестника (антипредвестника) оценивалась по специально разработанному критерию, представляющему собой отношение суммы всех удачных прогнозов к числу всех неудачных. Значение, на котором достигается максимум эффективности, принималось в качестве порогового. Значение предшествующей активности выше порогового считалось предвестником сильного афтершока, ниже – антипредвестником. По результатам выполненного исследования гипотеза была подтверждена на глобальном и региональном уровнях независимо от способа измерения предшествующей сейсмической активности. Наиболее информативной характеристикой активности является отношение накопленного сейсмического момента фоновых землетрясений, предшествующих основному толчку, к моменту основного толчка, нормированное на площадь круга, ограничивающего область фоновой сейсмичности. Вероятность ожидаемых повторных толчков в зависимости от времени и магнитуды оценивалась по модели Ризенберга-Джонс [69]. Параметры модели для Земли в целом и для ряда сейсмоопасных регионов России оценивались как с учетом, так и без учета предшествующей активности. Сопоставление фактических и расчетных значений вероятности возникновения хотя бы одного сильного афтершока на разных интервалах времени показало хорошее соответствие модели фактическим данным. С помощью выигрыша по вероятности показано, что предпочтительнее использование модели Ризенберга-Джонс с учетом предшествующей фоновой сейсмичности. По полученным результатам опубликована статья [70].

В 2019 г. опубликована монография [71], в которой рассмотрены три важнейших задачи прогноза опасности сильных афтершоков: оценки опасной области пространства,

наибольшей ожидаемой магнитуды и продолжительности опасного периода, в течение которого следует ожидать сильные афтершоки. Приведен ряд фундаментальных результатов, которые были получены в процессе решения этих задач.

### 3.3 Лунно-солнечные приливы и сейсмичность

В геодинамике роль земных приливов может иметь большое значение для понимания пространственно-временных характеристик сейсмического потока. С ростом сейсмической истории инструментальных наблюдений и расширением территории регистрации землетрясений появилась возможность статистической проверки гипотез о связи сейсмической активности с земными приливами. Наличие дополнительного касательного напряжения в астеносфере, вызванного лунными или солнечными приливами, может способствовать возникновению землетрясений. Вероятно, при учете влияния приливных сил можно рассматривать ослабление эффективного трения между литосферой и мантией [72, 73]. Горизонтальная составляющая твердого прилива поляризована из-за смещения внутренней структуры Земли, которая может обеспечить достаточный сдвиг литосферы. Вертикальная составляющая генерирует колебания статической нагрузки литосферы, которые могут вызвать землетрясения при разломах в критическом состоянии. Отметим, что влияние лунно-солнечных приливов на процессы в иерархической системе разломов и блоков литосферы зависит от конкретной тектонической обстановки в регионе. Изучение вариаций параметров земных приливов в масштабах региона представляется актуальной задачей современной сейсмологии.

В работе [74] при глобальном рассмотрении всех сильнейших землетрясений с  $M \geq 8.0$  и  $M \geq 7.5$  за 1900–2018 годы сделан вывод о том, что статистика этих событий не позволяет отвергнуть нулевые гипотезы о их случайном возникновении в любой день Солнечного (Юлианский День, JD) или Лунного (фаза Луны, MP) циклов. Однако для сильных событий с магнитудой  $M \geq 6.0$ , произошедших в Северном полушарии за последние 40 лет, непараметрический тест Кёйпера позволяет отвергнуть эти нулевые гипотезы с вероятностями 98% и 99% соответственно.

Статистика критерия Кёйпера [75, 76],  $\kappa$ , не предполагает специальный класс распределений, чувствительна к различиям в форме функций распределения и инвариантна относительно циклических преобразований, что делает этот критерий особенно ценным, если наблюдения являются точками на окружности. Рассмотрим эмпирическую кумулятивную функцию распределения  $F_n(x)$  для  $n$  независимых одинаково распределенных наблюдений  $X_i$ , определенных как  $F_n(x) = \{\text{число } X_i \leq x\}/n$ . Двухвыборочный тест Кёйпера оценивает несоответствие двух распределений, учитывая

разницу  $V = D^+ - D^-$  между обеими статистиками расхождений  $D^+ = \max(F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x))$  и  $D^- = \min(F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x))$  в определении  $\kappa(D, n, m) = [nm/(n+m)]^{1/2}V$ . Асимптотически, когда  $n$  и  $m \rightarrow \infty$ , совокупное распределение вероятностей сходится к вероятности  $P_{\text{rob}}(\kappa \leq x) = 1 - 2 \sum_{k=1}^{\infty} (4k^2 x^2 - 1) \exp(-2k^2 x^2)$ .

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

Непараметрическая статистика критерия Кёйпера для циклических вариаций применена к сейсмическим данным Прибайкалья, которые ежегодно пополняются и доступны на сайте Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<http://seis-bykl.ru>). А именно, эмпирические распределения времен возникновения землетрясения в диапазонах магнитуд  $M \geq 4.5$ ,  $M \geq 4$ ,  $M \geq 3.5$ ,  $M \geq 2.8$ , зарегистрированных региональной сетью Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН в периоды (1) 01.01.1982 – 31.12.1997 и (2) 01.01.1994 – 31.12.2018 в наиболее сейсмически активной части региона  $51-57^\circ$  с.ш.  $99-122^\circ$  в.д. рассмотрены относительно Лунного и Солнечного циклов. Оба временных интервала полны для землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 9$ , что соответствует магнитуде  $M \geq 2.8$ .

В Таблице 3 представлены результаты теста Кёйпера, полученные для четырех магнитудных интервалов двух каталогов на рассматриваемой территории. Для временного интервала 1982–1997 гг. и всех магнитудных диапазонов значения теста не позволяют отвергнуть нулевую гипотезу как для МР так и для JD. Для временного интервала 1994–2018 гг. распределения событий с  $M \geq 2.8$  для МР и JD позволяют с уверенностью отвергнуть гипотезу случайного возникновения сейсмических событий в периоды Лунного и Солнечного циклов. Это утверждение сохраняется на сокращенной выборке для  $M \geq 3.5$  для МР и JD, а в случае JD и для  $M \geq 4.0$ , тогда как для МР отрицание нулевой гипотезы становится достоверным лишь на уровне 92%.

Таблица 3 – Значения теста Кёйпера для сейсмичности Прибайкалья в области  $51-57^\circ$  с.ш.  $99-122^\circ$  в.д.

Данные			МР			JD		
Интервал времени	$M$	$N$	$V_N$	$\kappa(\alpha) = V_N \times N^{1/2}$	$\alpha$	$V_N$	$\kappa(\alpha) = V_N \times N^{1/2}$	$\alpha$
1982–1997	$\geq 2.8$	1394	0.05	1.69	0.07	0.04	1.32	0.35
	$\geq 3.5$	292	0.07	1.12	0.64	0.07	1.13	0.63
	$\geq 4.0$	99	0.11	1.11	0.78	0.09	0.93	0.90
	$\geq 4.5$	35	0.16	0.91	0.91	0.22	1.27	0.49
1994–2018	$\geq 2.8$	3634	0.07	3.93	<b>&lt;0.01</b>	0.08	4.90	<b>&lt;0.01</b>

	$\geq 3.5$	830	0.07	2.04	<b>0.01</b>	0.12	3.49	<b>&lt;0.01</b>
	$\geq 4.0$	296	0.10	1.64	0.08	0.14	2.47	<b>&lt;0.01</b>
	$\geq 4.5$	101	0.10	1.04	0.86	0.19	1.85	0.04

Число среднегодовых зарегистрированных сейсмических событий для двух рассмотренных временных интервалов в 15 лет и 24 года имеет соотношение примерно в 1.5 раза. Улучшение регистрации за последние годы, а также изменения в параметрах сейсмической сети Прибайкалья в начале 90-х годов XX века может служить возможным объяснением отсутствия выраженных признаков влияния лунных или солнечных приливов для временного интервала 1982–1997. Отметим, что величина расхождения функций распределения (статистика  $V_N$ ) сопоставима для соответственных магнитудных диапазонов из двух временных интервалов, однако, для более короткого интервала времени (каталог 1) размер выборки землетрясений по-видимому оказался недостаточным для утверждения о статистической значимости отличия от случайных, равномерных распределений по лунным и солнечным циклам.

По полученным результатам сделан доклад [77].

### 3.4 Сейсмичность и геодинамика

Выполнено детальное исследование блокового строения региона, расположенного к востоку от геораздела 102-104° в.д. и проведен анализ сейсмичности блоков и межблоковых зон, а также самого геораздела. Осуществлен сбор детальных данных по распределению значений теплового потока и установление направленности их изменения. Для понимания закономерностей распределения сейсмических событий по площади и глубине построены графики диссипации сейсмической энергии по данным каталога землетрясений NEIC2018 и глубинных сейсмических разрезов по данным каталога СМТ2018 вдоль серии трансектов, пересекающих геораздел, блоки и межблоковые зоны к востоку от него.

В результате уточнены блоковое строения и данные по сейсмоактивным разломам восточной части рассматриваемого региона (блоки Ордос, Тайханг-Шан и западные части Амурского блока, Северного Китая и Юго-Восточного Китая). Собраны данные по строению и роли в структуре региона восточного крыла геораздела 102-104° в. д., в том числе на границе между тибетскими блоками и блоком Юго-Восточного Китая. На основе анализа сейсмичности блоков и межблоковых зон, а также геораздела 102-104° в.д. определены объемы высвобождающейся сейсмической энергии. Построены сейсмические разрезы и графики диссипации сейсмической энергии вдоль пяти трансектов, пересекающих геораздел, блоки и межблоковые зоны к востоку от него, отличающиеся

высоким уровнем высвобождения сейсмической энергии, и установлены участки повышенной сейсмичности. Собраны детальные данные по распределению значений теплового потока к востоку от геораздела и установлены направления их изменения. Получены предварительные оценки связи современной геодинамики и сейсмичности восточного крыла геораздела с мобильностью блоков, геофизическими полями и глубинным строением литосферы, в том числе к западу от тихоокеанских зон субдукции, а также погруженным под азиатский континент слэбом. Выделены и рассмотрены 5 зон возможного образования землетрясений в частях региона на восточном крыле геораздела, характеризующихся наиболее высоким уровнем сейсмичности. По полученным результатам опубликована статья в сборнике [78] и сделан доклад [79].

## 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 (Таблица 2). Выявлены дополнительные возможности эксперимента по применению алгоритма М8 для прогноза сильных землетрясений в регионе Вранча (Румыния), где происходят сильнейшие землетрясения Европы, сотрясения от которых ощутимы в Европейской части России, в частности, в Москве.

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

Для совершенствования существующих и разработки новых методов прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности большое значение имеет изучение сейсмичности, включая поиск общих закономерностей и анализ специфики конкретных регионов.

Математические методы, используемые для изучения сейсмичности, применимы также при изучении других природных явлений. Например, сделан вывод о том, что климат в разных регионах по-разному реагирует на изменения солнечной активности: распределения нижнего, среднего и высшего квартилей индексов температуры и давления в солнечных циклах с высокой и низкой активностью статистически значимо различаются в разных регионах [80].

По результатам выполненных исследований опубликованы монография, 7 статей в рецензируемых журналах и статья в сборнике статей, зарегистрированы две базы данных и программа для ЭВМ, а также сделано 15 докладов на международных и российских научных конференциях.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Keilis-Borok, V.I., and V.G. Kossobokov, Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 1990. – 61. – 1-2: 73-83. DOI:10.1016/0031-9201(90)90096-G.
2. Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Часть I. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы // *Вычислительная сейсмология.* – М.: ГЕОС, 2005.— 179 с. (; Вып. 36).
3. Kossobokov, V.G., V.I. Keilis-Borok, and S.W. Smith, Reduction of territorial uncertainty of earthquake forecasting // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 1990. – 61. – 1-2: R1-R4. DOI:10.1016/0031-9201(90)90101-3.
4. Kossobokov, V.G., V.I. Keilis-Borok, and S.W. Smith, Localization of intermediate-term earthquake prediction // *J. Geophys. Res.* – 1990. – 95. – B12: 19763-19772. DOI:10.1029/JB095iB12p19763.
5. Kossobokov, V.G., J.H. Healy, and J.W. Dewey, Testing an earthquake prediction algorithm // *Pure and Appl. Geophys.* – 1997. – 149. – 1: 219-232. DOI:10.1007/BF00945168.
6. Kossobokov, V.G., L.L. Romashkova, V.I. Keilis-Borok, and J.H. Healy, Testing earthquake prediction algorithms: Statistically significant real-time prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992-1997 // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 1999. – 111. – 3-4: 187-196. DOI:10.1016/S0031-9201(98)00159-9.
7. Kossobokov, V.G. Earthquake prediction: 20 years of global experiment // *Natural Hazards.* – 2013. – 69: 1155-1177. DOI:10.1007/s11069-012-0198-1.
8. Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Об оценке результатов тестирования алгоритмов прогноза землетрясений // *Доклады Академии наук.* – 2015. – Т. 460. – № 6. – С. 710-712. DOI:10.7868/S0869565215060213.
9. Kossobokov, V. Times of increased probability of the World's great earthquakes: 30 years of hypothesis testing in real time // *27th IUGG General Assembly (Montreal, Canada, 8–18 July, 2019) / Abstract: S14p-123.*
10. Kossobokov V.G. Testing earthquake predictions and associated hypotheses / Abstract NH31D-0870 presented at 2019 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 8-13 Dec., 2019 (<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/537687>).
11. Liu, T., V.G. Kossobokov, The pre-and post-deformations of the great earthquakes from GPS and seismic data // *Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г.* – Москва: ИТПЗ РАН, 2019. – С. 66-67.

12. Ghil, M., P. Yiou, S. Hallegatte, B. D. Malamud, P. Naveau, A. Soloviev, P. Friederichs, V. Keilis-Borok, D. Kondrashov, V. Kossobokov, O. Mestre, C. Nicolis, H. W. Rust, P. Shebalin, M. Vrac, A. Will, and I. Zaliapin, Extreme events: dynamics, statistics and prediction // *Nonlin. Processes Geophys.* – 2011. – 18: 295-350. DOI:10.5194/npg-18-295-2011.
13. Kossobokov, V. G. Seismic hazard assessment and prediction problem in a Big Data World / Доклад на семинаре в Национальном институте исследований и разработок по физике Земли (Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Fizica Pamantului), 21 мая 2019 г., Magurele, Ilfov County, Romania.
14. Keilis-Borok, V., P. Shebalin, A. Gabrielov, D. Turcotte, Reverse tracing of short-term earthquake precursors // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 2004. – 145. – 1-4: 75-85. DOI:10.1016/j.pepi.2004.02.010.
15. 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.
16. Шебалин П.Н. Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // *Вулканонология и сейсмология.* – 2005. – № 1. – С. 3-15.
17. Шебалин П.Н. Методология прогноза землетрясений с периодом ожидания менее года. Алгоритмы прогноза землетрясений // *Вычисл. Сейсмология.* – Вып. 37. – М.: ГЕОС. – 2006. – С. 6-180.
18. Кособоков В.Г., Мажкенов С.А. Интенсивность потока землетрясений в очаговой области // *Доклады Академии наук Республики Казахстан.* – 1992. – № 1. – С. 53-57.
19. Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Общий закон подобия для землетрясений: глобальная карта параметров. Анализ геодинамических и сейсмических процессов // *Вычисл. Сейсмология.* – Вып. 35. – М.: ГЕОС. – 2004. – С. 160-175.
20. 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.
21. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: Прибайкалье // *Доклады Академии наук.* – 2006. – Т. 407. – № 5. – С. 679-681.
22. Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962-2011 гг. // *Вулканонология и сейсмология.* – 2013. – № 1. – С. 41-64. DOI:10.7868/S0203030613010057.

23. Kossobokov, V.G., Seismic Hazard Assessment Problem in a Big Data World // Acta Geologica Sinica (English Edition). – 2019. – 93: 269. DOI:10.1111/1755-6724.14080.
24. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: Камчатка // Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием / Отв. ред. Л.М. Богомолов. Южно-Сахалинск. – ИМГиГ ДВО РАН, 2019. – С. 37.
25. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: оценка сейсмической опасности и ассоциированных рисков // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. – Москва, ИТПЗ РАН, 2019. – С. 66-67.
26. Nekrasova, A., and V.G.Kossobokov, Unified Scaling Law for Earthquakes: Implications for seismic hazard and risk assessment / Abstract NH31D-0871 presented at 2019 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 8-13 Dec., 2019 (<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/538743>).
27. Nekrasova, A.K., V.G.Kossobokov, I.A.Parvez, X.Tao, Unified Scaling Law for Earthquakes as applied to assessment of seismic hazard and associated risks // 27th IUGG General Assembly (Montreal, Canada, 8–18 July, 2019) / Abstract: IUGG19-2405.
28. Peresan, A., V.G.Kossobokov, A.K.Nekrasova, and G.F.Panza, Forecasting earthquakes and related ground shaking: testing and validation issues // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. – Москва, ИТПЗ РАН, 2019. – С. 107-108.
29. Anastasia K. Nekrasova, Vladimir G. Kossobokov, Unified Scaling Law for Earthquakes: Global Map of Parameters // ISC's Seismological Dataset Repository. – 2019. DOI:10.31905/XT753V44, [http://www.isc.ac.uk/dataset\\_repository/recent\\_submissions.php](http://www.isc.ac.uk/dataset_repository/recent_submissions.php).
30. 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.
31. 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.
32. 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.

33. 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.
34. Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. – М.: Наука, 1979. – 172 с.
35. Gorshkov, A., and Y.Gaudemer, Seismogenic nodes defined with pattern recognition in the French Massif Central // *Journal of Iberian Geology*. – 2019. – 45. – 1: 63-72. DOI:10.1007/s41513-018-0087-x.
36. Gorshkov, A., O.Novikova, Y.Gaudemer, P.Mandal, and H.Hassan, Identifying potential earthquake sources in the continental environments // *Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г.* – Москва, ИТПЗ РАН, 2019. – С. 97.
37. Дзедобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Агаян С.М., Татаринев В.Н., Барыкина Ю.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай-Саяны-Прибайкалье.  $M \geq 6.0$  // *Физика Земли*. – 2019. – № 4. – С. 33-47. DOI:10.31857/S0002-33372019433-47.
38. Соловьев Ал.А., Горшков А.И., Соловьев Ан.А. Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // *Физика Земли*. – 2016. – № 6. – С. 21-27. DOI:10.7868/S0002333716050148.
39. Dzeboev, B.A., A.A.Soloviev, B.V.Dzeranov, J.K.Karapetyan, and N.A.Sergeeva, Strong earthquake-prone areas recognition based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus,  $M \geq 6.0$ . Variable EPA method // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2019. – 19. – 6: ES6005. DOI:10.2205/2019ES000691.
40. Свидетельство № 2019619517 от 18.07.2019 о государственной регистрации программы для ЭВМ Toolbox «Многокритериальная оценка сейсмической опасности» для работы в среде ArcGIS / Правообладатель: ГЦ РАН / Авторы: Соловьев Ан.А. (ГЦ РАН), Соловьев Ал.А. (ИТПЗ РАН), Гвишиани А.Д. (ГЦ РАН), Кособоков В.Г. (ИТПЗ РАН), Некрасова А.К. (ИТПЗ РАН), Горшков А.И. (ИТПЗ РАН), Николова Ю.И. (ГЦ РАН), Дзедобоев Б.А. (ГЦ РАН), Николов Б.П. (ГЦ РАН).
41. Свидетельство № 2019621466 от 16.08.2019 о государственной регистрации базы данных ГИС-ориентированная база данных для многокритериальной оценки

сейсмической опасности / Правообладатель: ГЦ РАН / Авторы: Соловьев Ан.А. (ГЦ РАН), Соловьев Ал.А. (ИТПЗ РАН), Гвишиани А.Д. (ГЦ РАН), Кособоков В.Г. (ИТПЗ РАН), Некрасова А.К. (ИТПЗ РАН), Горшков А.И. (ИТПЗ РАН), Николова Ю.И. (ГЦ РАН), Дзэбоев Б.А. (ГЦ РАН), Николов Б.П. (ГЦ РАН).

42. Lay, T., H. Kanamori, and L.J. Ruff, The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes // *Earthquake Predict. Res.* – 1982. – 1: 3-71.

43. Pacheco, J.F., L.R. Sykes, and C.H. Scholz, Nature of seismic coupling along simple plate boundaries of the subduction type // *J. Geophys. Res.* – 1993. – 98. – B8: 14133-14159. DOI:10.1029/93JB00349.

44. Scholz, C.H., and J. Campos, The seismic coupling of subduction zones revisited // *J. Geophys. Res.* – 2012. – 117. – B5: B05310. DOI:10.1029/2011JB009003.

45. Johnson, J.M., and K. Satake. Asperity distribution of the 1952 great Kamchatka earthquake and its relation to future earthquake potential in Kamchatka // *Pure Appl. Geophys.* – 1999. – 154. – 3-4: 541-553. DOI:10.1007/s000240050243.

46. MacInnes, B.T., R. Weiss, J. Bourgeois, and T.K. Pinegina, Slip distribution of the 1952 Kamchatka great earthquake based on near-field tsunami deposits and historical records // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 2010. – 100. – 4: 1695-1709. DOI:10.1785/0120090376.

47. Zobin, V.M., and V.I. Levina, The rupture process of the Mw 7.8 Cape Kronotsky, Kamchatka, earthquake of 5 December 1997 and its relationship to foreshocks and aftershocks // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 2001. – 91. – 6: 1619-1628. DOI:10.1785/0119990116.

48. Bürgmann, R., M.G. Kogan, V.E. Levin, C.H. Scholz, R.W. King, and G.M. Steblov, Rapid aseismic moment release following the 5 December, 1997 Kronotsky, Kamchatka, earthquake // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – 28. – 7: 1331-1334. DOI:10.1029/2000GL012350.

49. Bürgmann, R., M.G. Kogan, G.M. Steblov, G. Hilley, V.E. Levin, and E. Apel, Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone // *J. Geophys. Res.* – 2005. – 110. – B7: B07405. DOI:10.1029/2005JB003648.

50. Vorobieva, I., P. Shebalin, and C. Narteau, Break of slope in earthquake-size distribution reveals creep rate along the San Andreas fault system // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – 43. – 13: 6869-6875. DOI:10.1002/2016GL069636.

51. Zaliapin, I., and Y. Ben-Zion, A global classification and characterization of earthquake clusters // *Geophys. J. Int.* – 2016. – 207. – 1: 608-634. DOI:10.1093/gji/ggw300.

52. Vorobieva, I., C. Narteau, P. Shebalin, F. Beauducel, F. Necessian, V. Clouard, and M.-P. Bouin, Multiscale mapping of completeness magnitude of earthquake catalogs // *Bulletin*

of the Seismological Society of America. – 2013. – 103. – 4: 2188-2202. DOI:10.1785/0120120132.

53. Bender, B. Maximum likelihood estimation of b-values for magnitude grouped data // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1983. – 73. – 3: 831-851.

54. Федотов С.А., Чернышев С.Д., Матвиенко Ю.Д., Жаринов Н.А. Прогноз Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г.,  $M = 7.8-7.9$ , Камчатка, и его сильных афтершоков с  $M \geq 6$  // Вулканология и сейсмология. – 1998. – № 6. – С. 3-16.

55. Bourgeois, J., and T.K. Pinegina, The 1997 Kronotsky earthquake and tsunami and their predecessors, Kamchatka, Russia // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2018. – 18. – 1: 335-350. DOI:10.5194/nhess-18-335-2018.

56. Воробьева И.А., Соловьев А.А., Шебалин П.Н. Картирование межплитового сцепления в Камчатской зоне субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 484. – № 4. – С. 478-481. DOI:10.31857/S0869-56524844478-481.

57. Narteau, C., I. Vorobieva, and P. Shebalin, Band-limited power-laws in earthquake statistics // 27th IUGG General Assembly (Montreal, Canada, 8–18 July, 2019) / Abstract: S14p-126.

58. Воробьева И.А., Narteau C., Шебалин П.Н., Соловьев А.А. Картирование межплитового сцепления в зонах субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. – Москва, ИТПЗ РАН, 2019. – С. 18-19.

59. Utsu, T. A. Statistical study on the occurrence of aftershocks // Geoph. Magazine. – 1961. – 30: 521–605.

60. Ogata, Y. Statistical models for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis // Tectonophysics. – 1989. – 169. – 1-3: 159-174. DOI:10.1016/0040-1951(89)90191-1.

61. Ogata, Y. Seismicity analysis through point-process modeling; a review // Pure Appl. Geophys. – 1999. – 155. – 2-4: 471-507. DOI:10.1007/s000240050275.

62. Sornette, D., and A. Helmstetter, Occurrence of finite-time-singularity in epidemic models of rupture, earthquakes and starquakes // Physical Review Letters. – 2002. – 89. – 15: 158501. DOI:10.1103/PhysRevLett.89.158501.

63. Zhuang, J., Y. Ogata, and D. Vere-Jones, Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction // *J. Geophys. Res.* – 2004. – 109. – B5: B05301. DOI:10.1029/2003JB002879.
64. Zaliapin, I., and Y. Ben-Zion, Earthquake clusters in Southern California I: Identification and stability // *J. Geophys. Res.* – 2013. – 118. – 6: 2847-2864. DOI:10.1002/jgrb.50178.
65. Molchan, G.M., and O.E. Dmitrieva, Aftershock identification: methods and new approaches // *Geophys. J. Int.* – 1992. – 109. – 3: 501-516. DOI:10.1111/j.1365-246X.1992.tb00113.x.
66. Шебалин П.Н., Баранов С.В. О прогнозировании афтершоковой активности. 5. Оценка длительности опасного периода // *Физика Земли.* – 2019. – № 5. – С. 22-37. DOI:10.31857/S0002-33372019522-37.
67. Шебалин П.Н. Новые закономерности в сейсмическом режиме // *Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. – Москва, ИТПЗ РАН, 2019. – С. 91.*
68. Båth, M. Lateral inhomogeneities in the upper mantle // *Tectonophysics.* – 1965. – 2. – 6: 483-514. DOI:10.1016/0040-1951(65)90003-X.
69. Reasenberg, P.A., and L.M. Jones, Earthquake hazard after a mainshock in California // *Science.* – 1989. – 242. – 4895: 1173-1176. DOI:10.1126/science.243.4895.1173.
70. Баранов С.В., Шебалин П.Н., Габсатарова И.П. Связь вероятности возникновения сильного афтершока с сейсмичностью, предшествующей основному толчку // *Геофизические исследования.* – 2019. – Т. 20. – № 3. – С. 5-22. DOI:10.21455/gr2019.3-1.
71. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. – М.: РАН, 2019. – 218 с.
72. Riguzzi, F., G. Panza, P. Varga, and C. Doglioni, Can Earth's rotation and tidal despinning drive plate tectonics? // *Tectonophysics.* – 2010. – 484. – 1-4: 60-73 DOI:10.1016/j.tecto.2009.06.012.
73. Doglioni, C., and G. Panza, Chapter One – Polarized Plate Tectonics // *Advances in Geophysics.* – 2015. – 56: 1-167. DOI:10.1016/bs.agph.2014.12.001.
74. Kossobokov, V.G., and G.F. Panza, A myth of preferred days of Strong earthquakes? // *Seismological Research Letters.* – 2019 (In press).
75. Kuiper, N.H. Tests concerning random points on a circle // *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen.* – 1960. – Series A63. – P. 38-47.

76. Stephens, M.A. The goodness-of-fit statistic  $V_N$ : distribution and significance points // *Biometrika*. – 1965. – 52. – 3-4: 309-321. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.309.

77. Щепалина П.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Лунно-солнечные приливы и сейсмичность Прибайкалья // *Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г.* – Москва, ИТПЗ РАН, 2019. – С. 92-94.

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

79. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В. Связь интенсивности сейсмичности Центральной Азии с современной геодинамикой региона // *Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г.* – Москва, ИТПЗ РАН, 2019. – С. 20-21.

80. Kossobokov, V., J.-L. Le Mouél, and V. Courtillot, On the Diversity of Long-Term Temperature Responses to Varying Levels of Solar Activity at Ten European Observatories // *Atmospheric and Climate Sciences*. – 2019. – 9. – 3: 498-526. DOI:10.4236/acs.2019.93033.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

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

### *Монография*

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

### *Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах*

1. Баранов С.В., Шебалин П.Н., Габсатарова И.П. Связь вероятности возникновения сильного афтершока с сейсмичностью, предшествующей основному толчку // Геофизические исследования. – 2019. – Т. 20. – № 3. – С. 5-22. DOI:10.21455/gr2019.3-1. (WoS Q4)

2. Воробьева И.А., Соловьев А.А., Шебалин П.Н. Картирование межплитового сцепления в Камчатской зоне субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 484. – № 4. – С. 478-481. DOI:10.31857/S0869-56524844478-481. (Перевод на английский язык – Vorobieva, I.A., A.A.Soloviev, and P.N.Shebalin, Mapping of Interplate Coupling in the Kamchatka Subduction Zone from Variations in the Earthquake Size Distribution // *Doklady Earth Sciences*. – 2019. – 484. – 2: 173-176. DOI:10.1134/S1028334X19020077) (WoS Q4)

3. Усенко С.В., Прохорова Т.В. Строение и развитие Восточно-Гренландской континентальной окраины до начала спрединга на Хребте Колбейнсей // Вулканология и сейсмология. – 2019. – № 6. – С. 66-78. DOI: 10.31857/S0203-03062019666-78 (WoS Q4)

4. Шебалин П.Н., Баранов С.В. О прогнозировании афтершоковой активности. 5. Оценка длительности опасного периода // Физика Земли. – 2019. – № 5. – С. 22-37. DOI:10.31857/S0002-33372019522-37. (Перевод на английский язык – Shebalin, P.N., and S.V.Baranov, Forecasting Aftershock Activity: 5. Estimating the Duration of a Hazardous Period // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* – 2019. – 55. – 5: 719-732. DOI:10.1134/S1069351319050112) (WoS Q4)

5. Dzeboev, B.A., A.A.Soloviev, B.V.Dzeranov, J.K.Karapetyan, and N.A.Sergeeva, Strong earthquake-prone areas recognition based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus,  $M \geq 6.0$ . Variable EPA method // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2019. – 19. – 6: ES6005. DOI:10.2205/2019ES000691. (WoS Q4)

6. Gorshkov, A., and Y. Gaudemer, Seismogenic nodes defined with pattern recognition in the French Massif Central // *Journal of Iberian Geology*. – 2019. – 45. – 1: 63-72. DOI:10.1007/s41513-018-0087-x. (WoS Q3)

7. Gorshkov A., Hassan H., Novikova O. Seismogenic nodes ( $M \geq 5.0$ ) in north-east of Egypt and implication for seismic hazard assessment // *Pure Appl. Geophys.* – 2019. – 176(2): 593–610. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2012-9> (WoS Q3)

8. Kossobokov, V.G., Seismic Hazard Assessment Problem in a Big Data World // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. – 2019. – 93: 269. DOI:10.1111/1755-6724.14080. (WoS Q2)

9. Kossobokov, V., J.-L. Le Mouél, and V. Courtillot, On the Diversity of Long-Term Temperature Responses to Varying Levels of Solar Activity at Ten European Observatories // *Atmospheric and Climate Sciences*. – 2019. – 9. – 3: 498-526. DOI:10.4236/acs.2019.93033. (Scopus)

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

*Статьи, опубликованные в сборниках статей*

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

*Зарегистрированные базы данных и программы для ЭВМ*

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

Anastasia K. Nekrasova, Vladimir G. Kossobokov, Unified Scaling Law for Earthquakes: Global Map of Parameters, ISC’s Seismological Dataset Repository, 2019, doi:10.31905/XT753V44, [http://www.isc.ac.uk/dataset\\_repository/recent\\_submissions.php](http://www.isc.ac.uk/dataset_repository/recent_submissions.php).

Свидетельство № 2019619517 от 18.07.2019 о государственной регистрации программы для ЭВМ: Toolbox «Многокритериальная оценка сейсмической опасности» для работы в среде ArcGIS / Правообладатель: ГЦ РАН / Авторы: Соловьев Ан.А. (ГЦ РАН), Соловьев Ал.А. (ИТПЗ РАН), Гвишиани А.Д. (ГЦ РАН), Кособоков В.Г. (ИТПЗ

РАН), Некрасова А.К. (ИТПЗ РАН), Горшков А.И. (ИТПЗ РАН), Николова Ю.И. (ГЦ РАН), Дзэбоев Б.А. (ГЦ РАН), Николов Б.П. (ГЦ РАН).

*Доклады на международных и российских научных конференциях*

1. Воробьева И.А., Narteau С., Шебалин П.Н., Соловьев А.А. Картирование межплитового сцепления в зонах субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019. С. 18-19.

2. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В. Связь интенсивности сейсмичности Центральной Азии с современной геодинамикой региона // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019. С. 20-21.

3. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: Камчатка // Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. Отв. ред. Л.М. Богомолов. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 37.

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

5. Шебалин П.Н. Новые закономерности в сейсмическом режиме // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019. С. 91.

6. Щепалина П.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Лунно-солнечные приливы и сейсмичность Прибайкалья // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019. С. 92-94.

7. Gorshkov, A., O. Novikova, Y. Gaudemer, P. Mandal, and H. Hassan, Identifying potential earthquake sources in the continental environments // Современные методы оценки

сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019. С. 97.

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

9. Kossobokov, V. Times of increased probability of the World's great earthquakes: 30 years of hypothesis testing in real time. *27th IUGG General Assembly (Montreal, Canada, 8–18 July, 2019)*. Abstract: S14p-123.

10. Kossobokov, V.G. Seismic hazard assessment and prediction problem in a Big Data World. Доклад на семинаре в Национальном институте исследований и разработок по физике Земли (Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Fizica Pământului), 21 мая 2019 г., Magurele, Ilfov County, Romania.

11. Liu, T., and V.G. Kossobokov, The pre-and post-deformations of the great earthquakes from GPS and seismic data // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019. С. 66-67.

12. Narteau, C., I. Vorobieva, and P. Shebalin, Band-limited power-laws in earthquake statistics. *27th IUGG General Assembly (Montreal, Canada, 8–18 July, 2019)*. Abstract: S14p-126.

13. Nekrasova, A., and V.G. Kossobokov, Unified Scaling Law for Earthquakes: Implications for seismic hazard and risk assessment. Abstract NH31D-0871 presented at 2019 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 8-13 Dec., 2019 (<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/538743>).

14. Nekrasova, A.K., V.G. Kossobokov, I.A. Parvez, X. Tao, Unified Scaling Law for Earthquakes as applied to assessment of seismic hazard and associated risks. *27th IUGG General Assembly (Montreal, Canada, 8–18 July, 2019)*. Abstract: IUGG19-2405.

15. Peresan, A., V.G. Kossobokov, A.K. Nekrasova, and G.F. Panza, Forecasting earthquakes and related ground shaking: testing and validation issues // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва, ИТПЗ РАН, 2019. С. 107-108.