

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 115080610010

Инв. № 2019-1



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

докт. физ.-мат. наук

А.И.Горшков

«30» января 2019 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ  
СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И  
ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗА  
(заключительный, 2016-2018 годы)

Заведующий лабораторией теории  
прогноза землетрясений  
чл.-корр. РАН

А.А. Соловьев

Заведующий лабораторией математических  
проблем нелинейной динамики  
канд. физ.-мат. наук

М.Г. Шнирман

Заведующий лабораторией  
геодинамики  
докт. физ.-мат. наук

В.А. Желиговский

Москва 2019



**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 115080610010  
Инв. № 2019-1

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИТПЗ РАН

докт. физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_ А.И.Горшков

« »

2019 г.

**ОТЧЕТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ**

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ**  
**СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И**  
**ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗА**  
**(заключительный, 2016-2018 годы)**

Заведующий лабораторией теории  
прогноза землетрясений  
чл.-корр. РАН

А.А. Соловьев

Заведующий лабораторией математических  
проблем нелинейной динамики  
канд. физ.-мат. наук

М.Г. Шнирман

Заведующий лабораторией  
геодинамики  
докт. физ.-мат. наук

В.А. Желиговский

Москва 2019

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,  
гл. науч. сотр., зав. лаб.  
чл.-корр. РАН

А.А. Соловьев

Ответственные исполнители:

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

И.А. Воробьева

директор ИТПЗ РАН  
докт. физ.-мат. наук

А.И. Горшков

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

А.Т. Исмаил-Заде

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

В.Г. Кособоков

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

Т.Л. Кронрод

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

Г.М. Молчан

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

А.К. Некрасова

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

О.В. Новикова

науч. сотр.

Т.В. Прохорова

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

М.В. Родкин

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

П.Н. Шебалин

## РЕФЕРАТ

Отчет 38 с., 16 рис., 2 табл., 102 источника

АЛГОРИТМЫ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, АФТЕРШОКИ, ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ, МЕСТА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ГЕОДИНАМИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ

Исследования по теме проводились в 2016-2018 гг. и включали: продолжение глобального эксперимента по применению алгоритма прогноза землетрясений M8 для прогноза сильнейших землетрясений мира с детализацией прогноза по пространству с помощью алгоритма MSc; продолжение прогнозного мониторинга сейсмичности по алгоритму RTP; подготовку к организации мониторинга сейсмической активности с помощью алгоритма M8 на территории Северного Кавказа, Алтай-Саянского региона, Прибайкалья и Иранского плато на основе опыта подобного мониторинга для Италии и прилегающих территорий; применение нового алгоритма вероятностной многоместной оценки сейсмической опасности и построение карт изменяющейся сейсмической опасности отдельных регионов территории России на базе многомасштабного оценивания параметров сейсмичности в рамках Общего закона подобия для землетрясений, обобщающего закон Гутенберга-Рихтера; сравнительный анализ вероятностного (GSHAP) и нео-детерминистских (NDSHA) подходов к оценке сейсмической опасности; распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Черноморско-Каспийском регионе; анализ использования результатов определения мест возможного возникновения сильных землетрясений для долгосрочной оценки сейсмической опасности рассматриваемого региона; изучение и выяснение закономерностей афтершоковых процессов, в частности, прогнозирование интенсивности афтершоков после сильных землетрясений в различных диапазонах магнитуд; изучение связи статистики сейсмичности с характером тектонических движений по разломам; изучение формы графика повторяемости землетрясений вдоль системы разломов Сан-Андреас и Камчатского слаба; изучение геодинамики восточной части Центральной Азии; выделение зон возникновения очагов землетрясений в пределах высокосейсмичных районов Памира и Тянь-Шаня.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Разработка и применение методов прогноза землетрясений	7
2.1.1. Глобальный эксперимент по прогнозу сильнейших землетрясений мира	7
2.1.2. Прогноз землетрясений в отдельных сейсмоактивных регионах	14
2.2. Оценка сейсмической опасности	16
2.2.1. Разработка новых подходов к оценке сейсмической опасности	16
2.2.2. Оценка сейсмической опасности в некоторых сейсмоактивных регионах	18
2.2.1. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений и использование его результатов для оценки сейсмической опасности	19
2.3. Изучение сейсмичности	21
2.3.1. Исследование афтершоковых последовательностей	21
2.3.2. Связь статистики сейсмичности со свойствами разломов и характером тектонических движений по ним	23
2.3.3. Современная геодинамика и сейсмичность	25
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	29

## 1. 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 разработать новое поколение алгоритмов прогноза землетрясений и создать базу для решения задачи краткосрочного прогноза землетрясений.

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. Российские ученые имеют уникальный опыт создания алгоритмов прогноза экстремальных событий в сложных системах, включая социоэкономические, что создает основу для разработки универсальных алгоритмов прогноза экстремальных событий в сложных системах (природных и социоэкономических).

Последние катастрофические землетрясения (Суматранское землетрясение и цунами 2004 года, Вэньчуаньское землетрясения 2008 года в Китае, землетрясение 2010 года на Гаити, и землетрясение и цунами 2011 года в Тохоку) показали недостатки в оценке сейсмической опасности на основе ее вероятностного анализа. Ситуация может быть улучшена путем применения неадетерминистского анализа сейсмической опасности и

результатов прогноза мест возможного возникновения сильных землетрясений.

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 включали: 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; разработку новых подходов к уменьшению опасности природных бедствий; применение неопределенностного подхода и результатов прогноза мест возможного возникновения сильных землетрясений для уточнения оценок сейсмической опасности; распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Черноморско-Каспийском регионе; изучение и выяснение закономерностей афтершоковых процессов; изучение формы графика повторяемости землетрясений вдоль системы разломов Сан-Андреас и Камчатского слаба; изучение геодинамики восточной части Центральной Азии; выделение зон возникновения очагов землетрясений в пределах высокосейсмичных районов Памира и Тянь-Шаня.

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

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Разработка и применение методов прогноза землетрясений

#### 2.1.1. Глобальный эксперимент по прогнозу сильнейших землетрясений мира

В 2016-2018 гг. продолжался Глобальный эксперимент по применению алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений  $M8$  и последующей детализацией с помощью алгоритма MSc, который ведется с 1992 года. Эксперимент направлен на прогноз землетрясений с магнитудой  $M \geq 8,0$  и прогноз землетрясений с  $M \geq 7,5$ . Области тревоги, определенные с помощью этих алгоритмов, обновляются раз в полугодие (1 января и 1 июля), и соответствующие карты помещаются на страницу ИТПЗ РАН в интернете (<http://www.mitp.ru/en/index.html>). В качестве примера на рис. 1 и 2 показаны такие карты, полученные на 01.01.2018, а на рис. 3 и 4 приведены такие карты, полученные на 01.07.2018.

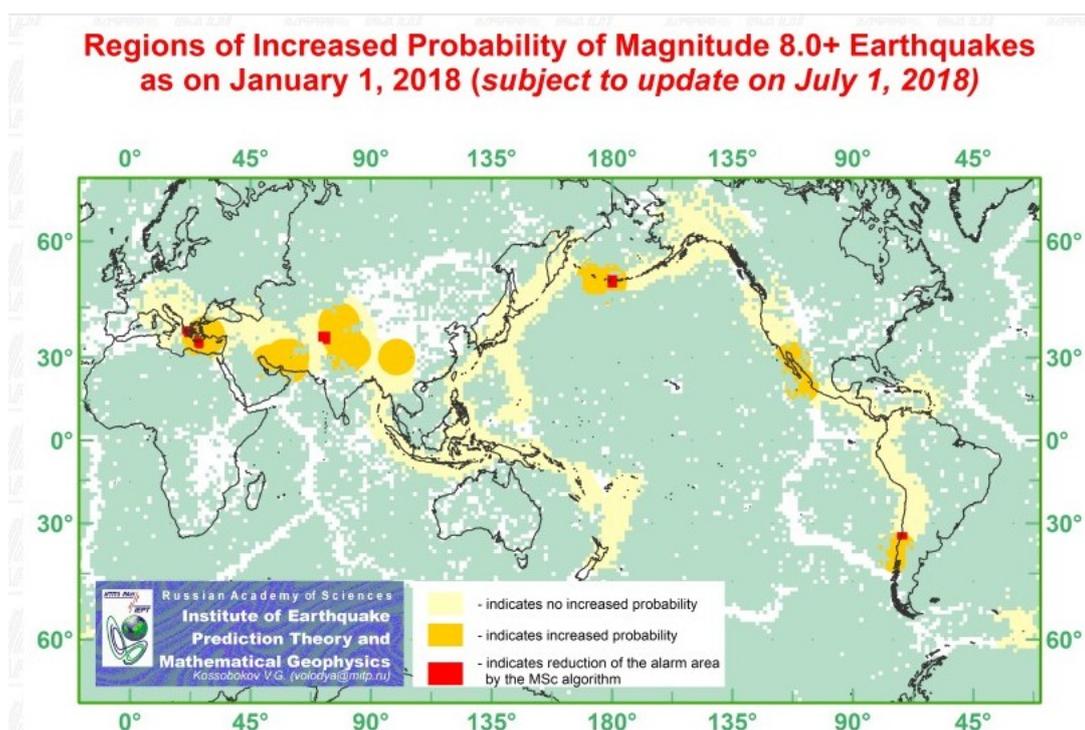


Рисунок 1. Прогноз землетрясений с  $M \geq 8,0$ , полученный с помощью алгоритма  $M8$  на 01.01.2018 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

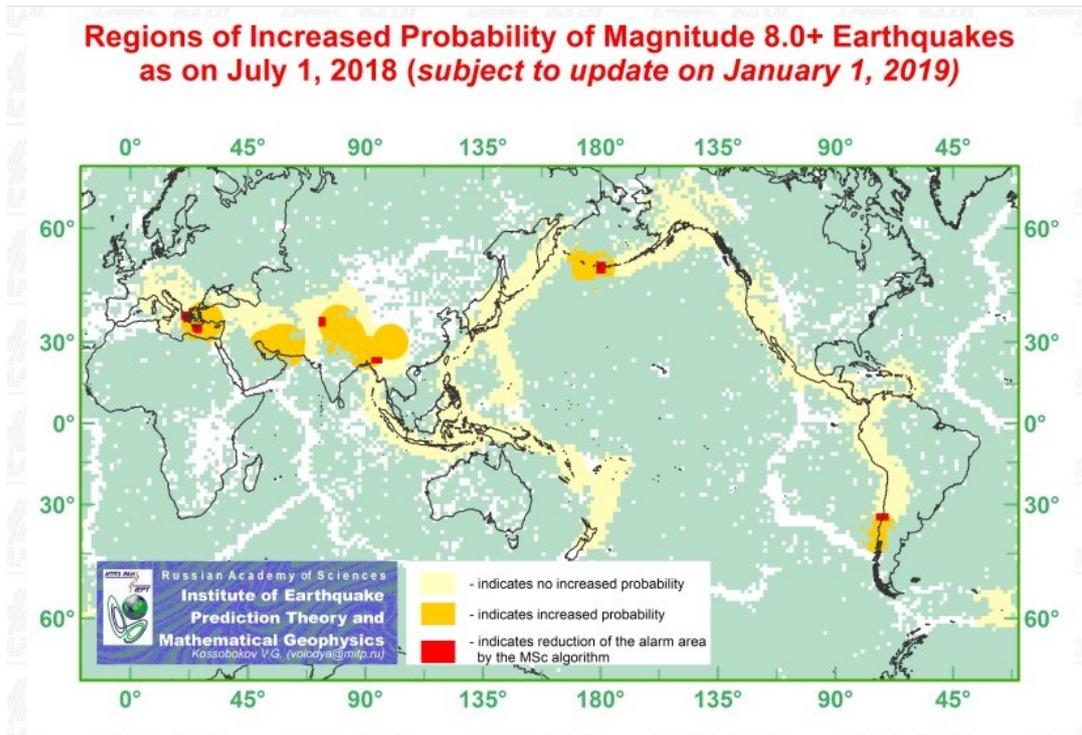


Рисунок 2. Прогноз землетрясений с  $M \geq 7,5$ , полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2018 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

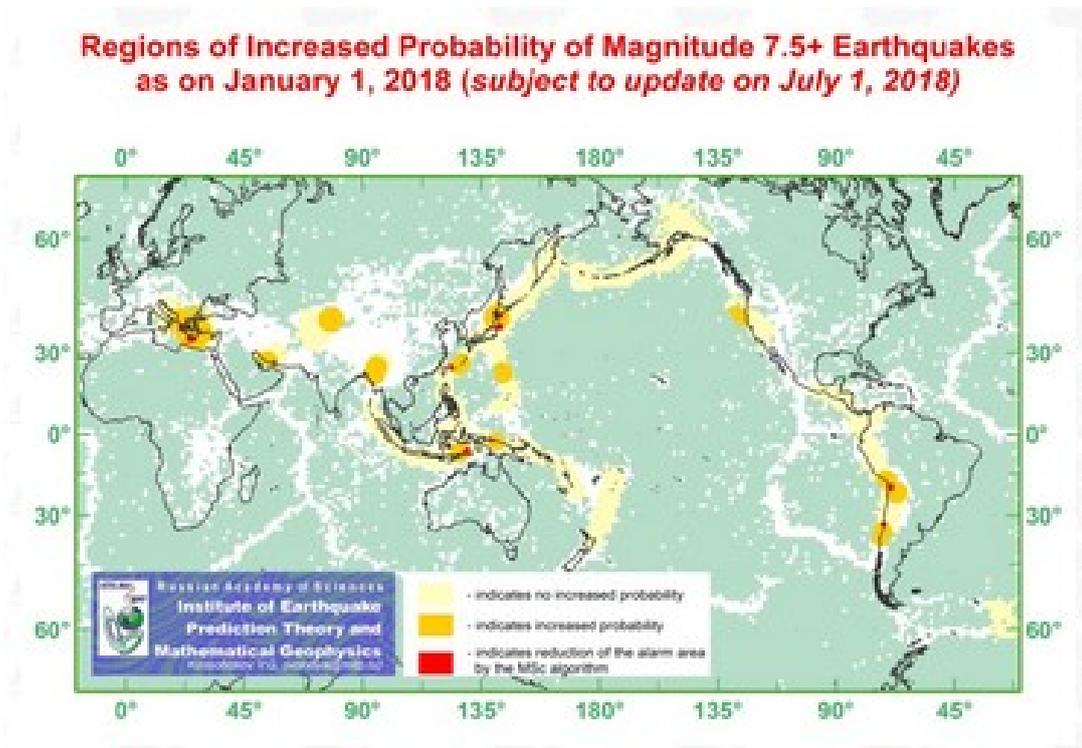


Рисунок 3. Прогноз землетрясений с  $M \geq 8,0$ , полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2018 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

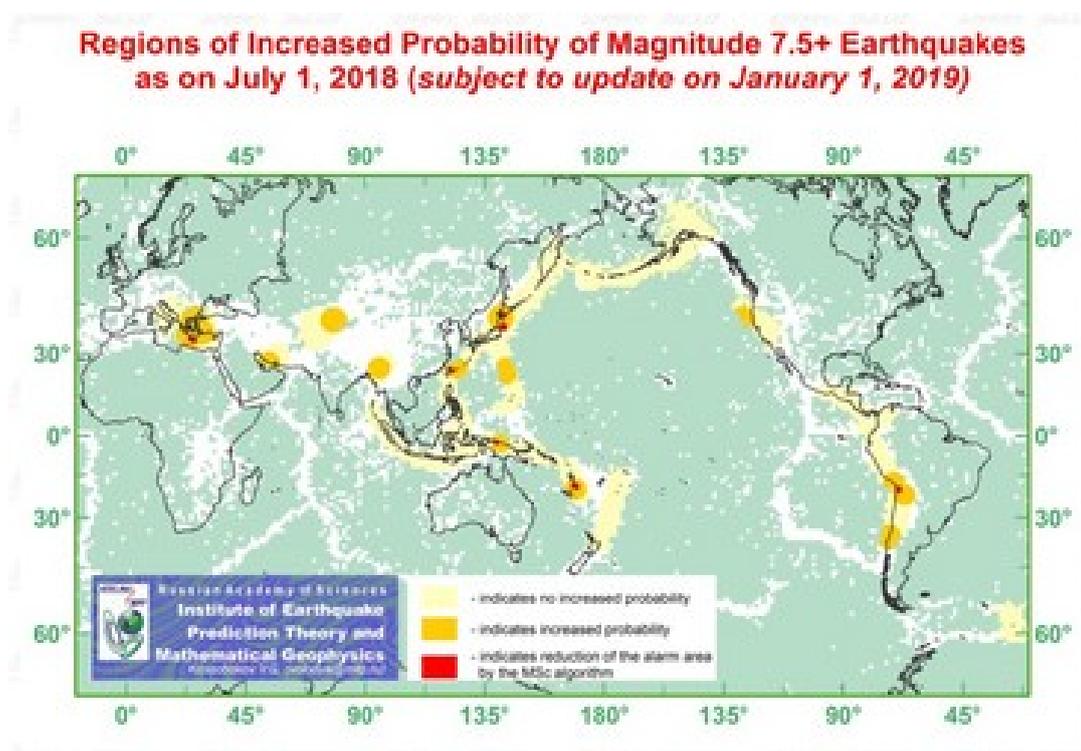


Рисунок 4. Прогноз землетрясений с  $M \geq 7,5$ , полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2018 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

По данным Геологической службы США в 2016-2018 гг. произошло 13 землетрясений с магнитудой  $7,5 \leq M < 8,0$  и два землетрясения с  $M \geq 8,0$ . Их параметры приведены в Таблице 1.

Событие 02.03.2016 произошло в Индийском океане и находится вдали от основного пояса сейсмичности, вне зоны тестирования, однако, непосредственно напротив областей тревоги как для диапазона M8.0+, так и для диапазона M7.5+ с ближайшим центром круга исследования в 770 км от эпицентра (рис. 5).

Событие 16.04.2016 произошло у берегов Эквадора и является пропуском цели, хотя диагностика по алгоритму M8 является маргинальной (образно говоря, "красный" сигнал тревоги в соответствующем круге исследования на 01.07.2012 и 01.01.2013 преобразовался в текущий "оранжевый" из семи цветов диагностической гаммы).

Глубокое событие 29.07.2016 произошло на север от Марианских островов, и его эпицентр находится менее чем в 140 км от области тревоги для диапазона M7.5+ и внутри области тревоги для диапазона M8.0+.

Событие 13.11.2016 произошло в Новой Зеландии и, как и событие 02.03.2016, находится вне зоны тестирования, принятой в 1992 году для диапазона M7.5+. Но проведенный анализ показывает, что уровень регистрации землетрясений в этом районе с тех пор значительно вырос и в настоящее время достаточен для диагностики по алгоритму M8 на всю территорию Новой Зеландии, результат которой, полученный ретроспективно по данным на 01.07.2016 года, представлен на рис. 6 и мог бы быть успешным прогнозом события 13.11.2016. Из этого следует вывод о

*возможности и необходимости ревизии территории Глобального тестирования алгоритмами M8 и MSc.*

**Таблица 1.** Землетрясения с магнитудой  $M \geq 7,5$ , которые произошли в 2017 году

Дата и время (UTC)	Широта	Долгота	Глубина, км	Магнитуда и место землетрясения
02.03.2016 12:49	4,908°S	94,275°E	24	$M = 7,8$ ; Southwest of Sumatra, Indonesia
16.04.2016 23:58	0,372°N	79,940°W	19,2	$M = 7,8$ ; 27 km SSE of Muisne, Ecuador
29.07.2016 21:18	18,515°N	145,529°E	212,4	$M = 7,7$ ; 31 km SSW of Agrihan, Northern Mariana Islands
13.11.2016 11:02	42,757°S	173,077°E	23	$M = 7,8$ ; 53 km NNE of Amberley, New Zealand
08.12.2016 17:38	10,665°S	161,335°E	41	$M = 7,8$ ; 68 km WSW of Kirakira, Solomon Islands
22.01.2017 04:30	6,246°S	155,172°E	135	$M = 7,9$ ; 35 km WNW of Panguna, Papua New Guinea
17.07.2017 23:34	54,443°N	168,857°E	10	$M = 7,7$ ; 202 km ESE of Nikol'skoye, Russia
08.09.2017 04:49	15,022°N	93,899°W	47	$M = 8,2$ ; 101 km SSW of Tres Picos, Mexico
10.01.2018 02:52	17,483°N	83,520°W	19	$M = 7,5$ ; 44 km E of Great Swan Island, Honduras
23.01.2018 09:32	56,004°N	149,166°W	14	$M = 7,9$ ; 280 km SE of Kodiak, Alaska
25.02.2018 17:45	6,070°S	142,754°E	25	$M = 7,5$ ; 83 km SW of Porgera, Papua New Guinea
19.08.2018 00:20	18,113°S	178,153°W	600	$M = 8,2$ ; 286 km NNE of Ndoi Island, Fiji
06.09.2018 15:49	18,474°S	179,350°E	671	$M = 7,9$ ; 102 km ESE of Suva, Fiji
28.09.2018 10:03	0,256°S	119,846°E	20	$M = 7,5$ ; 70 km N of Palu, Indonesia
05.12.2018 04:18	21,969°S	169,446°E	10	$M = 7,5$ ; 168 km ESE of Tadine, New Caledonia

Событие 08.12.2016, которое произошло на Соломоновых островах, формально является пропуском цели, поскольку тревога в соответствующем круге на период с 2014 по 2018 годы не была объявлена в силу того, что в процессе активизации фоновой сейсмичности, на основе чего могла бы быть объявлена тревога, 6 февраля 2013 г. произошло сильное ( $M = 8,0$ ) землетрясение в 76 км к западу от города Лата (Соломоновы острова). В таком случае в соответствии с формальными правилами алгоритм не объявляет тревогу. Возможно, это правило следует отменить, в частности, учитывая тот факт, в случае объявления эта тревога была бы также подтверждена землетрясением с  $M = 7,6$ , произошедшим 12 апреля 2014 года.

Событие 22.01.2017 произошло на глубине 135 км в 35 км от Пангуна, Папуа Новая Гвинея и формально является пропуском цели для диапазона  $M7.5+$ . Событие 17.07.2017 произошло к востоку от Командорских островов и также формально является пропуском цели для диапазона  $M7.5+$ , однако, находится внутри области тревоги для диапазона  $M8.0+$  (рис. 7). Событие

08.09.2017 произошло у побережья Мексики вдали от области тревоги для диапазона M8.0+.

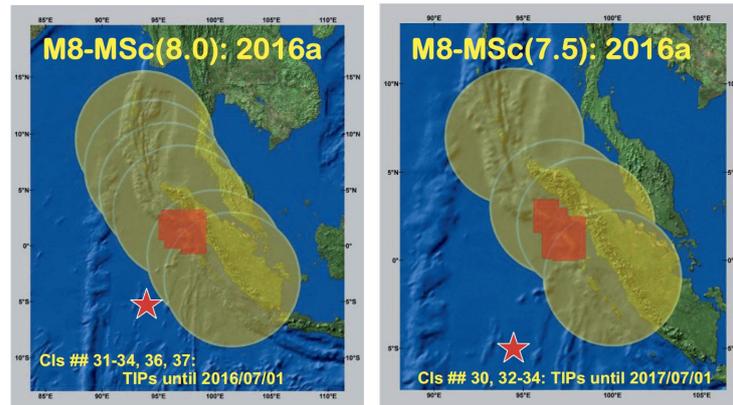


Рисунок 5. Эпицентр землетрясения 02.03.2016 (звездочка) и области тревоги (показаны желтым цветом), полученные с помощью алгоритма M8 (круги желтого цвета) для землетрясений с магнитудой  $M \geq 8,0$  (слева) и  $M \geq 7,5$  (справа). Уточнение области тревоги с помощью алгоритма MSc показано красным цветом.

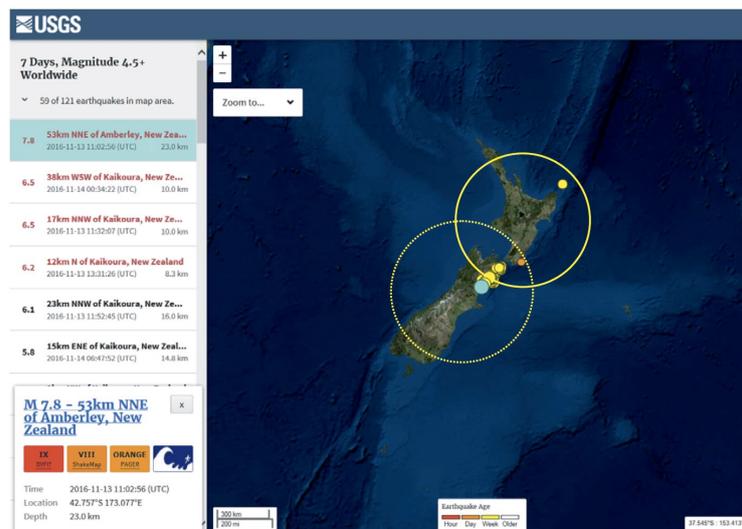


Рисунок 6. Эпицентры землетрясения 13.11.2016 (голубой круг) и его афтершоков (желтые круги) и границы зон тревоги (желтые окружности), которые могли бы быть получены с помощью алгоритма M8 для диапазона M7.5+ по данным на 01.07.2016.

Событие 10.01.2018 произошло в 44 км от о. Большой Лебедь (Гондурас) вне зоны мониторинга Глобального эксперимента для диапазона M7.5+. Событие 23.01.2018 произошло в 280 км от о. Кадьяк (Аляска) и формально является «пропуском цели» для диапазона M7.5+. Эпицентр землетрясения 25.02.2018 расположен в 83 км к юго-западу от города Поргера (Папуа Новая Гвинея) в 24 км от области тревоги, однако, его очаг, судя по первым афтершокам, распространяется на 40 км внутрь этой области (рис. 8). Землетрясения 19.08.2018 и 06.09.2018 произошли на глубинах 600 и 671 км с магнитудами 8,2 и 7,9 в районе о-ов Фиджийского архипелага у

побережья Мексики, и их эпицентры находятся вдали от областей тревоги для диапазона  $M8.0+$  и  $M7.5+$ , причем, эпицентр последнего находится вне зоны мониторинга Глобального эксперимента для диапазона  $M7.5+$ . Событие 28.09.2018 произошло в 70 км к северу от города Палу (Индонезия), и его эпицентр не попал в область тревоги. Но, возможно, это землетрясение не входит в диапазон  $M7.5+$ , поскольку имеет альтернативное определение магнитуды ( $M_w = 7,3$ ), тем не менее, оно формально учитывается в Глобальном эксперименте в качестве «пропуска цели». Недавнее землетрясение 05.12.2018 в Новой Каледонии подтвердило ожидание события в области тревоги из диапазона  $M7.5+$  (рис. 9).

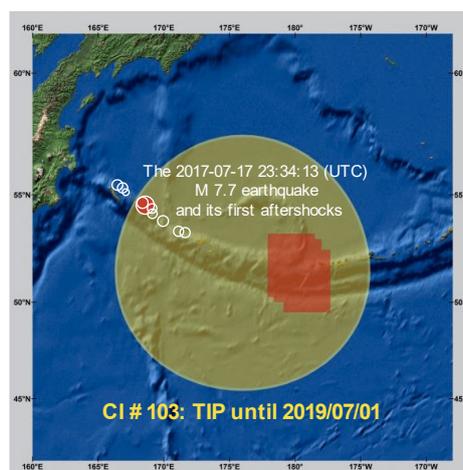


Рисунок 7. Эпицентры землетрясения 17.07.2017 (красный круг) и его первых афтершоков (белые окружности) и область тревоги, полученная с помощью алгоритма  $M8$  (круг желтого цвета) для землетрясений с магнитудой  $M \geq 8,0$ . Уточнение области тревоги с помощью алгоритма  $MSc$  показано красным цветом.

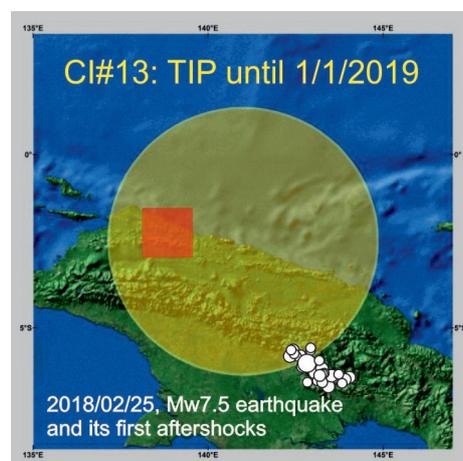


Рисунок 8. Эпицентры землетрясения 25.02.2018 и его первых афтершоков (белые круги) и область тревоги, полученная с помощью алгоритма  $M8$  (круг желтого цвета) для землетрясений с магнитудой  $M \geq 7,5$ . Уточнение области тревоги с помощью алгоритма  $MSc$  показано красным цветом.

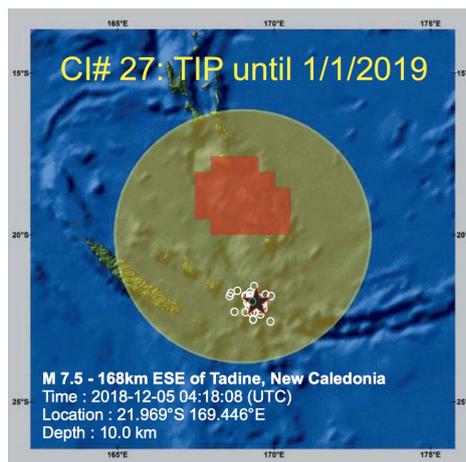


Рисунок 9. Эпицентры землетрясения 05.12.2018 (звездочка) и его первых афтершоков (белые окружности) и область тревоги, полученная с помощью алгоритма M8 (круг желтого цвета) для землетрясений с магнитудой  $M \geq 7,5$ . Уточнение области тревоги с помощью алгоритма MSc показано красным цветом.

В Таблице 2 приведены оценки качества прогнозов с помощью алгоритмов M8 и MSc в рамках Глобального эксперимента. Оценки приведены, как для периода Глобального эксперимента с 1992 года по конец 2018 года, так и с учетом периода ретроспекции 1985-1991 гг. Статистическая достоверность результатов прогноза оценивается приведенными в Таблице 2 значениями вероятности  $p$  получения достигнутого результата случайным образом, когда не менее  $N_s$  землетрясений из  $N$ , попадут в долю  $\tau$  пространства-времени при условии их независимого равномерного распределения. Уровень доверия результатам прогноза равен  $1 - p$ . На Рис. 3 приведены границы 95% и 99% уровней доверия для числа прогнозируемых землетрясений из диапазонов M8,0+ (а) и M7,5+ (б), произошедших в период тестирования. В соответствии с Таблицей 2 уровень доверия прогнозирования сильнейших землетрясений мира в Глобальном тесте алгоритмов M8 и M8-MSc значительно превосходит 99% во всех случаях кроме одного (96% при прогнозе M7,5+ по M8-MSc в 1992-2018 гг.). Заметное возрастание числа пропусков цели  $N - N_s$  при сокращении вдвое доли пространства-времени тревог  $\tau$  может быть связано с тем, что алгоритм MSc эффективен лишь при выполнении ряда дополнительных условий в кругах диагностики. Следовательно, уточнение прогноза по пространству осуществлялось в эксперименте не для всех областей тревоги. Если в областях тревоги, где было невозможно применить алгоритм MSc, происходило ожидаемое землетрясение, то оно считалось предсказанным с помощью алгоритма M8, но пропуском цели при совместном применении алгоритмов M8 и MSc.

По результатам выполнения Глобального эксперимента пополнен архив прогнозных карт в среде ArcGis, опубликована статья [15] и сделаны доклады [57, 59, 80, 94, 95].

**Таблица 2.** Оценка качества прогнозов по алгоритмам M8 и M8-MSc в Глобальном тесте.

Период теста	Сильные события		Доля объема тревоги $\tau$ , % *		Вероятность $p$ , % **		
	Всего, $N$	Предсказано, $N_s$		M8	M8-MSc	M8	M8-MSc
		M8	M8-MSc				
<i>Диапазон M8,0+</i>							
1985-2018	27	17	11	32,84	16,62	0,06	0,09
1992-2018	25	15	9	29,80	14,78	0,09	0,25
<i>Диапазон M7,5+</i>							
1985-2018	85	43	17	28,54	9,30	0,003	0,16
1992-2018	73	33	11	23,16	8,33	0,018	3,90

*Примечания:*

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

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

### 2.1.2. Прогноз землетрясений в отдельных сейсмоактивных регионах

В 2016-2018 гг. продолжен регулярный мониторинг сейсмической активности Италии и прилегающих территорий посредством алгоритма M8S с целью прогноза землетрясений в трех последовательных диапазонах магнитуд: M5,5+, M6,0+ и M6,5+. Результаты мониторинга представлены на странице ИТПЗ РАН в интернете [http://www.mitp.ru/en/m8s/M8s\\_italy.html](http://www.mitp.ru/en/m8s/M8s_italy.html) и опубликованы в статье [9], по ним также сделаны доклады [66, 67].

В 2016-2018 гг. выполнялся прогнозный мониторинг сейсмичности по алгоритму RTP в Курило-Камчатском регионе ( $M \geq 7,2$ ), Японии ( $M \geq 7,2$ ), Калифорнии ( $M \geq 6,4$ ), Италии ( $M \geq 5,5$ ), восточном Средиземноморье ( $M \geq 6,0$ ) и на севере Тихоокеанского сейсмического пояса ( $M \geq 7,2$ ) с целью оценки достоверности прогнозов по этому алгоритму и поиска способов его уточнения и повышения надежности. В течение этого периода не было диагностировано ни одной тревоги. Землетрясение 30.01.2016 на Камчатке ( $M = 7,2$ ) имело глубину 177 км, поэтому формально не является «пропуском цели», так как целями прогноза в регионе являются события с  $M \geq 7,2$  и глубиной до 150 км. Серия землетрясений в Италии с 24 августа по 30 октября 2016 г. диагностирована не была. Это является следствием искусственно введенной в 2009 г. неполноты используемого каталога ANSS для Европы. Пропусками цели оказались также землетрясение 23.01.2018 в районе севера Тихоокеанского сейсмического пояса в 280 км от побережья Аляски ( $M = 7,9$ ) и землетрясение 20.12.2018 у восточного побережья Камчатки ( $M = 7,3$ ).

В июне-июле 2018 г. в районе Мертвого моря в Израиле произошла серия сейсмических событий, и по запросу коллеги из Института наук о

Земле (Иерусалим) по методике RTP был произведен детальный анализ сейсмичности в тестируемом районе восточного Средиземноморья, включающего территорию Израиля, с вариацией параметров алгоритма. Тесты показали, что сильное землетрясение в регионе маловероятно, несмотря на видимую активизацию сейсмичности.

Для улучшения алгоритма RTP была, на примере региона Калифорния, исследована новая схема анализа и комплексирования среднесрочных предвестников. Совместный анализ 8 типов предвестников, используемых в алгоритме RTP, был ретроспективно проведен с помощью разработанного ранее метода "Differential probability gain" (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). Эффективность такого подхода оказалась существенно выше, чем ранее используемая схема. По полученным результатам опубликована статья [38] сделаны доклады [68, 74].

Исследована возможность эксперимента по применению алгоритма M8 на территории Северного Кавказа, Алтай-Саянского региона, Прибайкалья и Иранского плато. Для этих регионов имеющиеся каталоги землетрясений достаточно полны для среднесрочного прогноза событий диапазона M6,5+. К сожалению, доступные версии каталогов имеют значительную задержку и недостаточно однородны. На рис. 10, на примере Алтай-Саянского региона показаны дефицит и изменчивость представительности событий малых магнитуд. В принципе, экспериментальный мониторинг в режиме тестирования в реальном времени возможен лишь на базе комбинирования региональных данных о событиях малых магнитуд с значительной задержкой и оперативных глобальных каталогов землетрясений с магнитудой от 4,5 и выше. В частности, оперативная доступность данных о землетрясениях с магнитудой от 4,5 и выше из каталога ComCat Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>) позволяет реализовать оперативный прогноз землетрясений из диапазонов M7.5+ и M8.0+ для территории Камчатки и Курильских островов. Результаты исследования вошли в статьи [15, 17] и доклад [80].

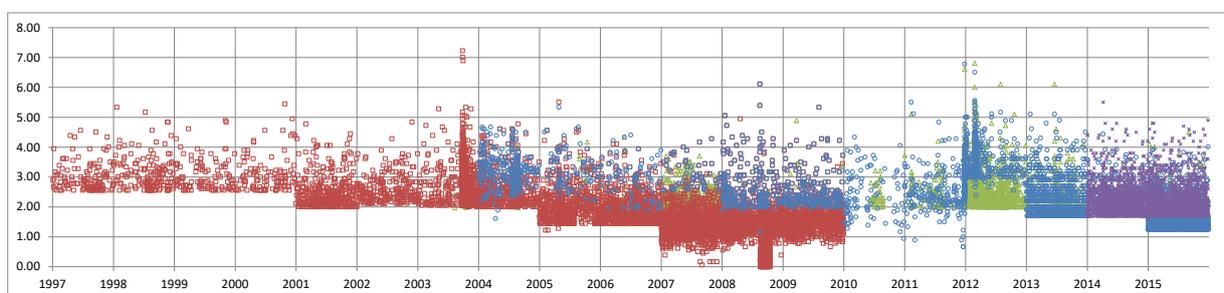


Рисунок 10. Магнитуда землетрясения как функция времени для региона Алтай-Саяны за 1997-2015 гг. *Примечание:* разным цветом показаны данные, представленные в разных региональных каталогах РФ.

С 1998 г. совместно с итальянскими учеными проводится долговременный эксперимент по прогнозу сильных землетрясений с  $M \geq 5,4$

на территории Италии. При этом используется алгоритм прогноза CN (Keilis-Borok, V.I., and I.M. Rotwain, Diagnosis of Time of Increased Probability of strong earthquakes in different regions of the world: algorithm CN. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1990, **61**, 1-2: 57-72), который был разработан в ИТПЗ РАН и адаптирован к региону Италии. Группой ученых была предложена оценка результатов эксперимента (Taroni, M., W. Marzocchi, and P. Roselli, Assessing 'alarm-based CN' earthquake predictions in Italy. *Annals of Geophysics*, 2016, **59**, 6, S0648) на основе использования игрового подхода (PG-метод), который недавно предложен для анализа прогнозов вероятностного типа, тогда как прогнозы с помощью алгоритма CN, использующего методологию распознавания образов, по сути детерминированы, т.е. решения о тревоге имеют вид: да/нет. Выполненный в рамках исследований по теме теоретический анализ применения PG-метода при оценке результатов прогнозов вероятностного типа и полученных методами распознавания образов показал, что во втором случае PG-метод может полностью исказить результаты прогноза, что и произошло при его применении для интерпретации результатов эксперимента в Италии. Результаты исследования опубликованы в статьях [18, 35].

Рассмотрена возможность построения непрерывных отображений и подсчет степени отображения применительно к прогнозу землетрясений. С этой целью сформулировано определение степени отображения и предложены два подхода к построению возможных векторных полей в предположении, что неподвижной точкой рассматриваемых векторных полей будет сильное землетрясение. В первом подходе векторные поля описывают динамику земной коры, а именно движение и плоскости разрыва в эпицентрах землетрясений. Во втором подходе векторные поля связаны с форшоками, то есть с событиями, предшествующими сильному землетрясению. На основе данных о землетрясениях, взятых из каталога NEIC (National Earthquake Information Center), получены примеры удачного и неудачного применения предложенных подходов. Результаты исследования опубликованы в статье [24].

## 2.2. Оценка сейсмической опасности

### 2.2.1. Разработка новых подходов к оценке сейсмической опасности

Выполнены исследования по созданию сейсмо-геодинамических моделей динамики коровых блоков для моделирования сейсмичности. Основная работа по моделированию динамики коровых блоков была сконцентрирована на анализе влияния природной и смоделированной сейсмичности на оценку сейсмической опасности. Этот анализ был основан на применении нового алгоритма вероятностной многоместной оценки сейсмической опасности (ВМОСО) населенного района, т.е. на определении вероятности превышения определенного уровня сотрясаемости хотя бы в одном из многих выделенных мест, расположенных в изучаемом районе. Цифровые записи сильных движений, полученные в эпицентральных зонах,

могут рассматриваться как примеры движения грунта выше уровня проектирования строений, рассчитанного с помощью обычных точечных алгоритмов расчета сейсмической опасности. Было показано, что для стандартного периода повторяемости землетрясений (475 лет), ВМОСО дает разумные оценки уровня интенсивности, которые могут возникнуть во время землетрясений и параметры которых близки к параметрам события с максимально возможной величиной. Эффективность ВМОСО рассматривалась по отношению к вероятностным точечным оценкам сейсмической опасности и к применению многообъектной оценки опасности в качестве основы для расчетных нагрузок. Основываясь на результатах этой работы, был предложен двухуровневый подход к вероятностным оценкам сейсмической опасности для фиксированного уровня превышения пиковых значений сотрясаемости: применение стандартного алгоритма вероятностной точечной оценки сейсмической опасности (первый уровень) и последующего применения ВМОСО для городских и промышленных зон или зон особого экономического и социального значения (второй уровень). Результаты опубликованы в статьях [4, 10, 30-33], и по ним сделаны доклады [50-54, 72, 88, 89].

Выполнены исследования, направленные на привлечение естественных, технических и социальных наук к выработке политики, способствующей снижению рисков от бедствий, вызванных природными опасностями, и изменение на этой основе научных подходов к уменьшению опасности бедствий путем переключения акцента с индивидуальной оценки опасности и риска, доминирующей в геофизическом сообществе, на трансдисциплинарный системный анализ, ориентированный на конкретные действия по уменьшению этой опасности. Такое изменение парадигмы позволит получить необходимые для политики знания и их непосредственное применение при разработке решений по уменьшению опасности бедствий на основе фактических данных. Необходимость изменения парадигмы как никогда актуальна в настоящее время из-за растущей уязвимости и подверженности общества риску бедствий, а также необходимости принятия межсекторальных мер в политике и практике, связанных с изменением климата и устойчивым развитием. По результатам соответствующих исследований опубликована статья [14] и сделаны доклады [76-78, 87, 90, 93].

Одним из направлений этой деятельности является научная дипломатия, которая может внести значительный вклад в дело уменьшения ущерба от стихийных бедствий. Выполнена исследовательская работа, посвященная проблемам интегрирования научной информации, например, об оценках сейсмической опасности, с возможностью наведения мостов между странами по привлечению внимания к тематике и соответствующим действиям до и после возможного стихийного события. Впервые были подробно разобраны аспекты научной дипломатии, относящейся к стихийным бедствиям. Изучена способность общества противостоять стихийным бедствиям в моменты различных межгосударственных конфликтов. Эффективная дипломатия плодотворна в деле сокращения ущерба от стихийных бедствий и должна комбинировать усилия

государственной дипломатии с обменом научной информацией между учеными и совместной работой с неакадемическими экспертами по устранению последствий стихийных бедствий. По результатам работы опубликована статья [34] и сделаны доклады [91, 92].

### 2.2.2. Оценка сейсмической опасности в некоторых сейсмоактивных регионах

Проведена оценка сейсмической опасности плато Шиллонг, расположенного на северо-востоке Индии, восток штата Мегхалая, с помощью анализа сейсмичности на 72 крупных активных разломах, окружающих плато. Полученные результаты анализа и составленные детальные карты сейсмической опасности для трех крупных городов этой местности, могут служить основой для расчёта сейсмического риска и оказать содействие в мероприятиях по сокращению стихийных бедствий. Полученные результаты опубликованы в статье [25].

На базе многомасштабного оценивания параметров сейсмичности в рамках Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ), обобщающего соотношение Гутенберга-Рихтера, построены карты изменяющейся сейсмической опасности отдельных регионов территории России, включая Большой Кавказ и Крым, В рамках российско-индийского сотрудничества на основе ОЗПЗ построены карты сейсмической опасности и сейсмического риска для населения Индийского штата Гуджарат, на территории которого произошло одно из наиболее разрушительных землетрясений последнего столетия – землетрясение 26 января 2001 года в Бхудж (Гуджарат, Индия), повлекшее более 20 тыс. жертв. Для этого и других регионов выполнена сравнительная оценка эффективности карт сейсмического районирования, полученных на основе вероятностного (GSHAP) и нео-детерминистского (NDSHA) подходов к оценке сейсмической опасности, а также на базе многомасштабного оценивания параметров сейсмичности в рамках ОЗПЗ. Полученные результаты опубликованы в статьях [7, 8, 16, 19, 37] и вошли в доклады [55, 56, 58, 60-65, 79, 81, 82, 97-99].

Актуализированы карты изменяющейся сейсмической опасности отдельных регионов территории РФ на базе многомасштабного оценивания параметров сейсмичности в рамках ОЗПЗ. В частности, на рис. 11а приведена карта расчетных значений десятичного логарифма пикового ускорения на скальном основании, PGA [g], с вероятностью превышения 10% за период 50 лет для Прибайкалья по данным за 1962-2017 гг. в сравнении с картой ОСР-97А (частью карты GSHAP, опубликованной в 1999 г.). Очевидна, недооценка сейсмической опасности на картах ОСР-97А, в частности, существенная в районе Байкало-Амурской магистрали. На рис. 12 приведена карта расчетного значения максимально возможной магнитуды землетрясения  $M_{\max}$  с вероятностью превышения 10% за период 50 лет, которая хорошо согласуется с историческими данными для этой территории: землетрясения 1917 г. ( $M = 6,5$ ) и 1957 г. ( $M = 7,4$ ), по-видимому, являются сильнейшими и определяют максимально возможные события в этом районе.

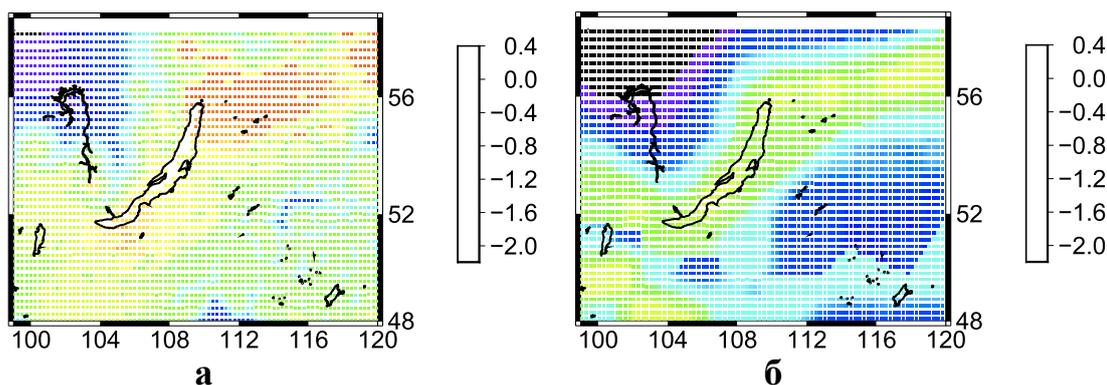


Рисунок 11. Карты сейсмической опасности для Прибайкалья в терминах десятичного логарифма пикового ускорения на скальном основании, PGA [g], с вероятностью превышения 10% за период 50 лет: расчеты по ОЗПЗ и данным за 1962-2017 гг. (а) и по GSHAP-99 (ОСР-97А) (б).

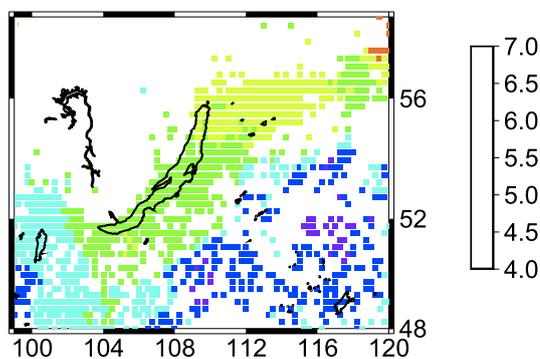


Рисунок 12. Карты  $M_{max}$  для Прибайкалья с вероятностью превышения 10% за период 50 лет: расчеты по ОЗПЗ (данные за 1962-2017 гг.).

### 2.2.3. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений и использование его результатов для оценки сейсмической опасности

Проведено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с интенсивностью в очаге  $I \geq VII$  в пределах Французского центрального массива – внутриплитовом регионе, характеризующемся слабой и умеренной сейсмичностью. Установлено, что как и в активных орогенных поясах с высокой сейсмичностью, пространственное распределение землетрясений во внутриплитовом регионе контролируется морфоструктурными узлами, формирующимися в местах пересечения морфоструктурных линеаментов. Найдены характерные геоморфологические признаки сейсмоопасных узлов, указывающие на повышенную интенсивность и контрастность новейших тектонических движений в окрестности таких узлов. Полученные результаты опубликованы в статье [27].

В Черноморско-Каспийский регионе, характеризующемся высоким уровнем сейсмической активности и гетерогенным тектоническим строением распознаны потенциальные места для наиболее сильных землетрясений с  $M \geq 7.0$ . В качестве сейсмогенерирующих структур рассматривались пересечения морфоструктурных линеаментов, определенные в результате морфоструктурного районирования. Все пересечения, распознанные как высокосейсмичные, расположены в пределах горных систем Кавказа, Копетдага и Эльбурса. В межгорных впадинах Кавказа и в пределах Южно-Каспийской глубоководной котловины, характеризующейся более тонкой океанической корой, пересечений, способных генерировать землетрясения  $M \geq 7.0$  не установлено. По полученным результатам опубликована статья [36] и сделаны доклады [73, 75, 100].

Проблема оценки сейсмической опасности внутриплитовых территорий – одна из актуальных задач современной сейсмологии. Предложен подход к решению этой проблемы, основанный на морфоструктурном районировании и распознавании образцов. Сейсмоопасные морфоструктурные узлы, в которых возможны землетрясения с  $M \geq 5.0$ , определены в пределах северо-восточного Египта – внутриплитового региона, который включает Синайский полуостров и северную часть Восточной пустыни между рекой Нил и Красным морем. Определены характерные геолого-геофизические признаки, по которым сейсмоопасные узлы отличаются от остальных узлов. Впервые оценка сейсмической опасности выполнена с использованием информации о распознанных сейсмоопасных узлах (рис. 13). По методике нео-детерминистической оценки сейсмической опасности (NDSHA) были составлены карты пиковых смещений, скоростей и максимальных горизонтальных смещений грунта. Это позволило существенно уточнить оценку сейсмической опасности северо-восточного Египта, в частности, для ответственных инженерных сооружений (туннель Исмаилия) и объектов культурного наследия, расположенных в долине Нила. По полученным результатам опубликована статья [28].

Выполнен анализ использования результатов определения мест возможного возникновения сильных землетрясений для долгосрочной оценки сейсмической опасности рассматриваемого региона. Показана связь Эквадорского землетрясения (16.04.2016,  $M = 7,8$ ) с пересечением линеаментов, которое ранее было определено как потенциально сейсмоопасное для землетрясений с магнитудой  $M \geq 6,5$  (рис. 14), что подтвердило эффективность методологии распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. По полученным результатам сделаны доклады [43, 48, 49].

Для созданной в Геофизическом центре РАН специализированной базы данных для оценки сейсмической опасности и минимизации ущерба от возможных землетрясений подготовлены материалы по результатам определения мест возможного возникновения сильных (с магнитудой  $M \geq 6,0$ ) землетрясений в регионах Кавказ и Крым, а также по результатам моделирования динамики системы блоков и разломов Кавказа и

возникающей при этом сейсмичности. Соответствующие данные включены в базу, а выполненная работа отражена в статье [39].

Выполнена проверка результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений, которые были получены для 26-ти сейсмоактивных регионов мира за период 1972-2018 гг. После публикации соответствующих результатов сильные землетрясения произошли в 11-ти регионах из числа рассмотренных 26-ти. Установлено, что 86% таких событий произошли в местах, которые были распознаны как сейсмоопасные. По результатам исследования опубликована статья [29].

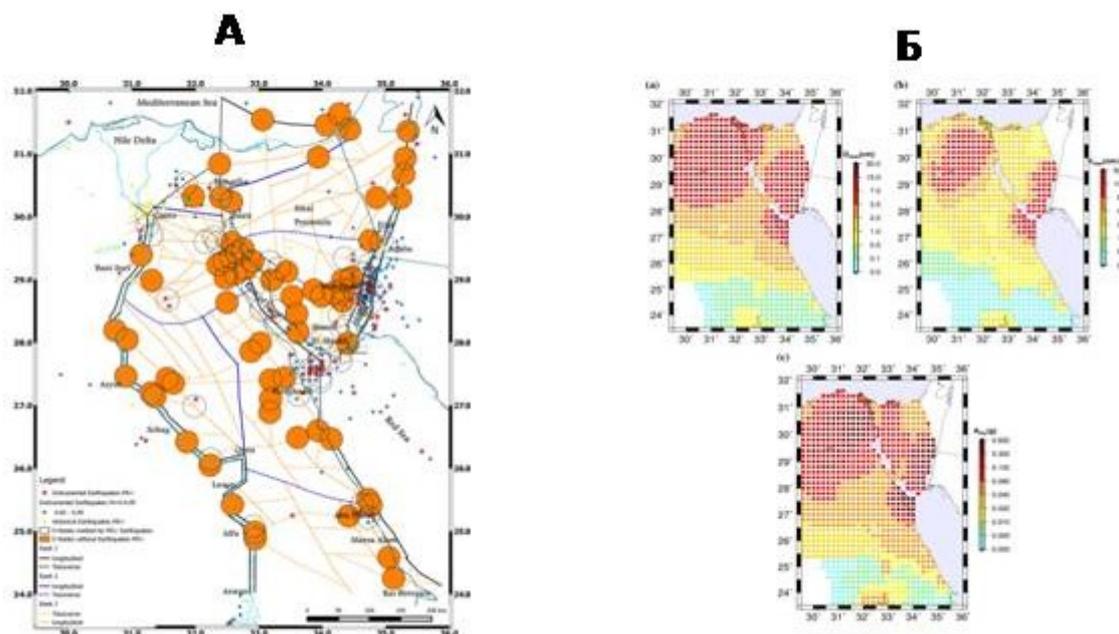


Рисунок 13. А – распознанные сейсмоопасные узлы для  $M \geq 5,0$ . Линиями показаны линейменты разных рангов. Кругами показаны распознанные сейсмоопасные узлы: круги без цветной заливки – узлы, где известны события с  $M \geq 5,0$ , оранжевые круги – узлы, где ранее события с  $M \geq 5,0$  не происходили. Красные звездочки – эпицентры инструментальных землетрясений с  $M \geq 5,0$ , желтые звездочки – эпицентры исторических землетрясений с  $M \geq 5,0$ , синие точки – события с  $M = 4,0-4,9$ . Б – карты (а) пиковых грунтовых смещений, (б) пиковых скоростей грунта, (в) максимальных горизонтальных ускорений грунта.

## 2.3. Изучение сейсмичности

### 2.3.1. Исследование афтершоковых последовательностей

Разработана методика прогнозирования интенсивности афтершоков после сильных землетрясений в различных диапазонах магнитуд. Методика основана на совместном использовании законов Гутенберга–Рихтера и Омори-Утсу. Главным новшеством предлагаемого подхода является последовательное уточнение параметров обеих составных частей метода. Получено простое и легко запоминающееся усредненное правило для оценки

ожидаемого числа афтершоков заданной магнитуды по данным за первые 12 часов после основного толчка: в течение 10 дней следует ожидать примерно столько же событий в произвольном диапазоне магнитуды, сколько событий такой магнитуды произошла за 12 часов после основного толчка. При этом правило справедливо для любого интервала магнитуды. По полученным результатам опубликована статья [2], и они вошли в доклады [40, 44-47, 69-71].

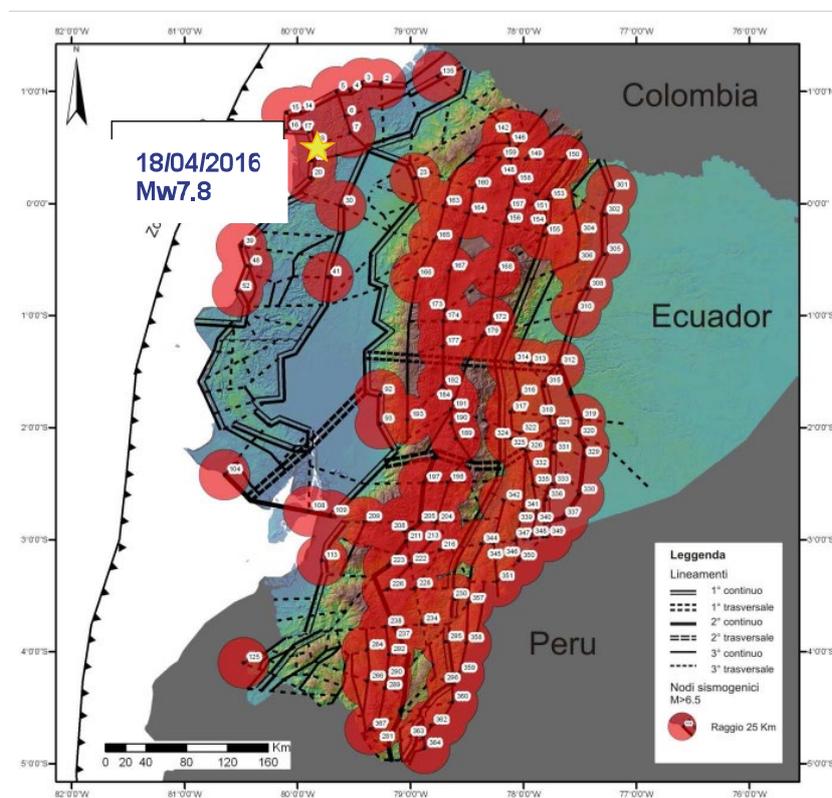


Рисунок 14. Схема морфоструктурного районирования Эквадора и распознанные сейсмоопасные пересечения линеаментов для  $M \geq 6.5$ . Толстыми линиями показаны линеаменты первого ранга, средними – второго ранга, тонкими – третьего ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, прерывистые – поперечные линеаменты. Кругами отмечены 25-километровые окрестности пересечений линеаментов, отнесенные в результате распознавания к высокосейсмичным для  $M \geq 6.5$ . Звездочкой отмечен эпицентр Эквадорского землетрясения с  $M = 7,8$  (18.04.2016).

Исследована последовательность афтершоков и процесс постсейсмической деформации очаговой зоны землетрясения в Паркфилде (2004,  $M = 6.0$ , Калифорния, США). Данное событие выбрано из-за возможности совместного анализа данных по довольно плотной локальной сети GPS станций и данных о последовательности афтершоков (<http://www.ncedc.org/ncedc/>). Процесс релаксации постсейсмической деформации продолжался примерно 400 дней после главного толчка, как и афтершоковая последовательность. Предполагается, что режимы афтершоков и релаксации деформаций являются разными сторонами одного и того же

процесса. Рассмотрена изменчивость отношения освобожденной сейсмической энергии и одновременной GPS-деформации и обнаружено, что величина отношения существенно отличается для главного толчка и для стадии афтершоков, а именно, это отношение существенно уменьшается для серии афтершоков. Подобное изменение отношения сейсмическая энергия / деформация справедливо и для ряда других сильных землетрясений, из чего можно сделать вывод, что такое уменьшение типично для афтершоковых последовательностей и указывает на уменьшение отношения упругой и неупругой деформации в процессе постшоковой релаксации, когда очаговая зона сильно разрушена при главном толчке, а процесс заживления еще не получил широкого развития. По полученным результатам опубликована статья [20].

Выполнен пространственно-временной анализ модифицированного закона Омори в рамках Байесовского подхода. По полученным результатам сделан доклад [83].

Обнаружен яркий эффект изменения времени задержки начала степенного характера убывания частоты повторения афтершоков с глубиной. На преобладающих глубинах эта задержка убывает с возрастанием глубины (рис. 15). Обнаруженный эффект является убедительным подтверждением связи этого времени задержки, обычно характеризуемого параметром  $c$  закона Омори-Утсу, с величинами напряжений в области очага основного толчка. Дана интерпретация эффекта на основе Кулоновской модели трения с учетом порового давления воды, меняющегося в зависимости от глубины и от проницаемости среды (вкладка на рис. 15). Результат может иметь важное практическое приложение для оценивания периода ожидания сильных афтершоков после землетрясений. Длительность периода афтершоков, в соответствие с моделью нелинейного трения Дитриха, приблизительно пропорциональна параметру  $c$  закона Омори-Утса, а значит, чем больше глубина очага, тем короче должен быть период сильных повторных толчков. Полученные результаты опубликованы в статье [21], и по ним сделан доклад [84].

### 2.3.2. Связь статистики сейсмичности со свойствами разломов и характером тектонических движений по ним

Показано, что статистика сейсмичности несет полезную информацию о характере тектонических движений по разломам. На примере разлома Сан Андреас в Калифорнии впервые обнаружено, что график повторяемости микроземлетрясений по магнитуде, имеющий, как правило, вид экспоненты (закон Гутенберга-Рихтера), в зонах быстрых неупругих деформаций имеет излом на значении около 3. Наклон графика повторяемости при значениях выше излома коррелирован со скоростью неупругих деформаций (крипа), при этом сохраняется постоянный наклон в диапазоне меньших магнитуд (рис. 16). По полученным результатам опубликована статья [11].

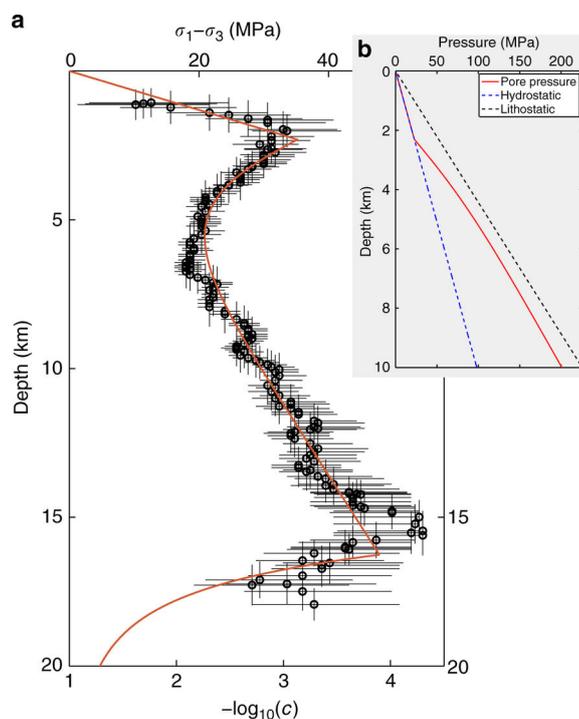
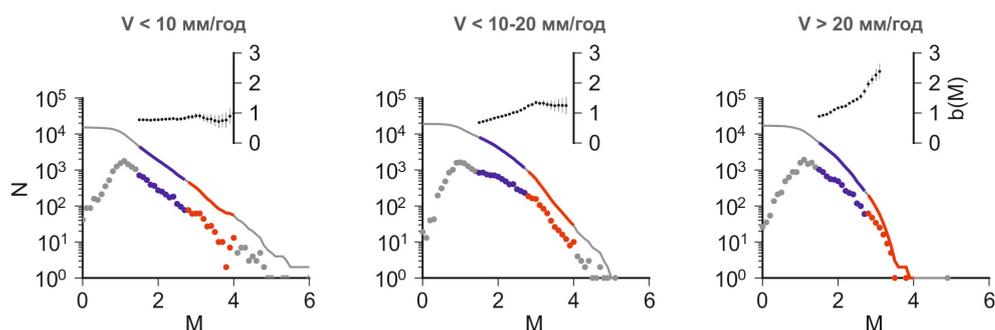
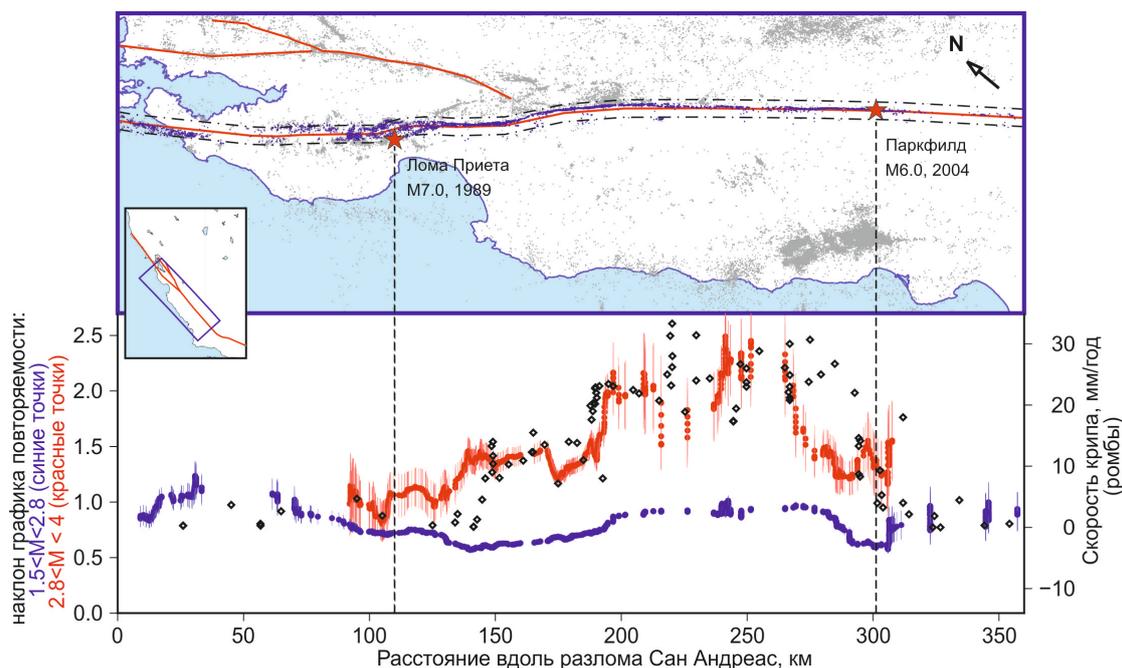


Рисунок 15. Дифференциальное сдвиговое напряжение и время задержки  $c$  начала степенного характера убывания частоты повторения афтершоков в зависимости от глубины в Калифорнии. **a** Логарифм наиболее вероятного значения и разброс ошибок параметра  $c$  в интервалах глубины шириной 3 км. Дифференциальное сдвиговое напряжение (красная кривая) получена из теории Мора-Кулона при коэффициенте трения  $\mu=0.75$  с учетом снижения водной проницаемости среды на глубине 2 км и закона пластического течения для влажных кварцитов. **b** изменение с глубиной порового, литостатического и гидростатического давления.

Изучены формы графика повторяемости землетрясений вдоль системы разломов Сан-Андреас и Камчатского слаба. Исследована связь формы графика повторяемости с сейсмическим сцеплением и определена геометрия предполагаемых зон сцепления в Камчатской зоне субдукции. Показано, что эпицентры сильнейших землетрясений Камчатки приурочены к зонам с избытком сильных землетрясений, к этим же зонам приурочены максимальные смещения в очагах Камчатского (1952) и Кроноцкого (1997) землетрясений. Эти зоны являются местами высокого сцепления. Зоны с недостатком сильных землетрясений приурочены, в основном, к афтершоковой зоне Кроноцкого землетрясения, где было зафиксировано значительное асейсмическое смещение в пост-сейсмический период. Эти зоны являются областями слабого сцепления, и в них наблюдается нарушение линейности графика повторяемости, связанное с дефицитом сильных событий. Области повышенного сцепления океанической и континентальной плит характеризуются избытком сильных событий и обратным загибом графика повторяемости. Результаты картирования величины загиба графика повторяемости хорошо согласуются с выделением зон сцепления по спутниковым геодезическим данным и инверсии

мареограмм. Результаты исследований опубликованы в статье [22] и вошли в доклады [85, 96, 101, 102].



Графики повторяемости числа  $N$  микроземлетрясений по магнитуде  $M$  в условиях разных скоростей деформаций  $V$

Рисунок 16. Сравнение наклона графика повторяемости со скоростью неупругих деформаций вдоль разлома Сан Андреас.

### 2.3.3. Современная геодинамика и сейсмичность

В сотрудничестве с Государственным геологическим музеем им. В.И.Вернадского РАН выполнены исследования современной геодинамики и сейсмичности ряда регионов.

Рассмотрены главные горнопромышленные регионы востока азиатской части РФ. В пределах этой территории выделены 6 горнопромышленных регионов: 1. Север Иркутской обл., западная часть Республики Саха, Республики Бурятия и Забайкальского края; 2. Центральная часть Республики Саха, север Амурской обл. и Хабаровского края; 3. Северо-восток Республики Саха, Магаданская обл., Камчатский край и запад Чукотского АО; 4. Восток Чукотского АО и север Камчатского края; 5. Восток Республики Бурятия, Забайкальского края и прилегающие районы

Монголии и Китая; 6. Амурская и Сахалинская области, юг Хабаровского и Приморский край, Еврейская АО и прилегающие районы Китая. Перечисленные регионы включают большую площадь востока азиатской территории РФ, за исключением западной части побережья моря Лаптевых, островов на арктическом шельфе и северной половины Курильской островной дуги. В них сосредоточено большинство стратегически значимых энергетических объектов (одна АЭС и наиболее крупные ГЭС и ТЭС) и основных горнодобывающих и перерабатывающих сырьё предприятий на востоке РФ и в соседних странах ближнего зарубежья. Для каждого региона установлен уровень сейсмической энергии, высвобождающейся в нем, а также экологическая ситуация и степень индивидуального природного риска. Практическая значимость выполненных исследований состоит в том, что они помогают корректно оценить влияние негативных последствий, связанных с современной внутриконтинентальной геодинамической и сейсмической активностью, на работу и проектирование горнопромышленных предприятий и энергетических объектов. Полученные результаты опубликованы в статье [1], и вошли в доклады [41, 42].

Изучена геодинамика восточной части Центральной Азии и показано, что современная тектоническая активность этой территории, большую часть которой занимают Северо-Китайская и Южно-Китайская платформы, связана с делением на блоки, ограниченные активными разломами, и с взаимодействием этих блоков друг с другом и с соседними литосферными плитами. Наиболее активна западная граница Южно-Китайской платформы с блоками Тибета, где объемы энергии увеличиваются до 1010–1012 Дж, магнитуды до 8–9. На этой границе взаимодействие тибетских блоков с блоком Юго-Восточного Китая под влиянием давления Индостанского индентора вызывает срыв и поворот по часовой стрелке верхних горизонтов земной коры. В пределах высокосейсмичных районов Памира и Тянь-Шаня выделены зоны возникновения очагов землетрясений, к которым приурочено большинство катастрофических событий в этой части Высокой Азии. Выделение зон проведено на основе распространения эпицентров наиболее сильных сейсмических событий и максимальных значений величины высвобождающейся при землетрясениях энергии с подсчетом её объёмов и прогнозом возможного проявления повышенной сейсмичности. Рассмотрение глубинного строения зон позволило установить связь сейсмичности с аномалиями геофизических полей и влияние различных факторов глубинной и приповерхностной структуры литосферы и коры на их современную геодинамику. Результаты проведённого исследования позволяют оценить уровень сейсмической опасности в различных частях рассматриваемого региона. Полученные результаты опубликованы в статьях [12, 13].

Исследовано положение геораздела 102-103° в тектонической структуре Северной, Центральной и Южной Азии, геодинамика и сейсмичность центральной части геораздела и расположенной к западу от неё Центрально-Азиатской транзитной зоны. Более детально изучено блоковое строение восточной части этой зоны с анализом межблоковых зон, а также

сейсмоэнергетики геораздела и межблоковых зон и ее связи с поверхностными и глубинными структурами. Для понимания закономерностей распределения сейсмических событий по площади и глубине построены графики диссипации сейсмической энергии по данным NEIC2017 и глубинных сейсмических разрезов по данным СМТ2018 вдоль серии трансектов, пересекающих геораздел, блоки и межблоковые зоны к западу от него. Полученные результаты опубликованы в статье [26] и вошли в доклад [86].

Изучена связь геодинамики и сейсмичности для северной части горнопромышленного Каспийского региона. Регион в целом расположен на юго-западе Северо-Евразийской литосферной плиты и в пределах Альпийско-Иранской транзитной зоны, отделяющей её от Аравийской плиты. Большая его часть, включающая Волгоградскую и Астраханскую области, восток Ставропольского края, республики Кабардино-Балкария, Северная Осетия, Ингушетия, Чеченская, Калмыкия и Дагестан Российской Федерации, Южную Осетию, Восточную Грузию и Западный Казахстан, характеризуется высокой плотностью населения, развитой инфраструктурой и средствами коммуникации. Здесь расположены крупные разрабатываемые месторождения полезных ископаемых, в том числе, нефти и газа, включая морские платформы в шельфовых зонах Каспийского моря, а также действующие и проектируемые АЭС и крупные ГЭС и ТЭС. Наряду с перечисленными промышленными объектами в непосредственной близости к региону находятся действующие Ростовская и Ереванская АЭС, а на полуострове Мангышлак в Западном Казахстане расположена недостроенная АЭС Актау (бывшая Шевченковская). Из этого вытекает актуальность проведенных исследований по оценке и путям снижения последствий современных тектонических движений и землетрясений в северной части Каспийского региона. Полученные результаты опубликованы в статье [23].

### 3. 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 на территории Северного Кавказа, Алтай-Саянского региона, Прибайкалья и Иранского плато, определены возникающие при этом трудности и намечены пути их преодоления. Показана несостоятельность применения для оценки результатов детерминированного прогноза землетрясений игрового подхода (PG-метод), предназначенного для анализа прогнозов вероятностного типа

Разрабатываемые новые подходы к оценке сейсмической опасности (например, использование оценок параметров сейсмичности в рамках Общего закона подобия для землетрясений и применение не-детерминистских подходов к оценке сейсмической опасности) имеют важное значение для сокращения ущерба от землетрясений и, соответственно, повышения защищенности общества от сейсмической опасности. Для адекватной оценки сейсмической опасности остается также актуальным изучение сейсмичности, в частности, афтершоковых процессов. В то же время существует настоятельная необходимость коренным образом изменить научные подходы к уменьшению опасности бедствий, переключив нынешний акцент с индивидуальной оценки опасности и риска, доминирующий в геофизическом сообществе, на трансдисциплинарный системный анализ, ориентированный на конкретные действия по уменьшению опасности бедствий.

В рамках работ по теме исследованы возможности использования научной дипломатии для решения задачи уменьшения ущерба от стихийных бедствий и выработаны некоторые рекомендации в этом направлении.

Продолжены работы по распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений и рассмотрены следующие регионы: Черноморско-Каспийский регион, Французский центральный массив и северо-восточный Египет. Разработан подход, на основе которого результаты распознавания могут быть использованы для уточнения оценок сейсмической опасности.

Показано, что на основе статистики сейсмичности могут быть сделаны заключения о свойствах зон разломов и характере тектонических движений по ним. В частности, определена геометрия предполагаемых зон высокого и низкого сейсмического сцепления в Камчатской зоне субдукции. Отметим, что зоны высокого сцепления являются потенциальными местами возникновения сильнейших землетрясений региона.

По результатам выполненных исследований опубликовано 39 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах и сделано 63 доклада на международных и российских научных конференциях.

## 4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах*

**2016 год**

1. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В., Соловьев А.А. Современная геодинамика горнопромышленных регионов востока азиатской части России и ближнего зарубежья [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время, 2016, т.12, вып.2. С.15. Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprov\_r\_e-ast12-2.2016.71.
2. Baranov, S.V. and P.N. Shebalin, Forecasting aftershock activity: 1. Adaptive estimates based on the Omori and Gutenberg-Richter laws. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2016, **52**, 3: 412-431, doi:10.1134/S1069351316020038.
3. Ismail-Zadeh, A. Geoscience international: the role of scientific unions. *History of Geo- and Space Sciences*, 2016, **7**, 2: 103-123, doi:10.5194/hgss-7-103-2016.
4. Ismail-Zadeh, A.T. Geohazard research, modeling, and assessment for disaster risk reduction. *Russ. J. Earth Sci.*, 2016, **16**, 3, ES3002, doi:10.2205/2016ES000572.
5. Keilis-Borok, V., A. Soloviev, and A. Gabrielov, On predictive understanding of extreme events: pattern recognition approach; prediction algorithms; applications to disaster preparedness. In M. Chavez, M. Ghil, and J. Urrutia-Fucugauchi (eds), *Extreme Events: Observations, Modeling, and Economics, Geophysical Monograph 214*. American Geophysical Union, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ISBN: 978-1-119-15701-4, 2016: 391-406.
6. Le Mouel, J.-L., V.G. Kossobokov, F. Perrier, and P. Morat, Intermittent heat instabilities in an air plume. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2016, **23**, 4: 319-330, doi:10.5194/npg-23-319-2016.
7. Nekrasova, A.K., and V.G. Kossobokov, Unified scaling law for earthquakes in Crimea and Northern Caucasus. *Doklady Earth Sciences*, 2016, **470**, 2: 1056-1058, doi:10.1134/S1028334X16100032.
8. Nekrasova, A., V. Kossobokov, X. Tao, Z. Tao, and L. Wang, Spatial pattern of seismicity in Central China recognized by USLE. *World Information on Earthquake Engineering*, 2016, **32**, 2: 170-175.
9. Peresan, A., V. Kossobokov, L. Romashkova, A. Magrin, A. Soloviev, and G.F. Panza, Time-dependent neo-deterministic seismic hazard scenarios: Preliminary report on the M6.2 Central Italy earthquake, 24th August 2016. *New Concepts in Global Tectonics Journal*, 2016, **4**, 3, September 2016: 487-493.
10. Sokolov, V., and A. Ismail-Zadeh, On the use of multiple-site estimations in probabilistic seismic-hazard assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, **106**, 5: 2233-2243, doi:10.1785/0120150306.
11. Vorobieva, I., P. Shebalin, and C. Narteau, Break of slope in earthquake size distribution and creep rate along the San Andreas Fault system. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**, 13: 6869-6875, doi:10.1002/2016GL069636.

**2017 год**

12. Gatinsky, Y.G., T.V. Prokhorova, and D.V. Rundquist, Geodynamics and seismicity of the Eastern part of Central Asia. *Doklady Earth Sciences*, 2017, **472**, 1: 119-122, doi:10.1134/S1028334X17010226.
13. Gatinsky, Y.G., T.V. Prokhorova, and D.V. Rundquist, Zones of the origin of seismic centers in the Pamir-Tien Shan sector of High Asia. *Doklady Earth Sciences*, 2017, **475**, 2: 887-890, doi:10.1134/S1028334X17080049.
14. Ismail-Zadeh, A.T., S.L. Cutter, K. Takeuchi, and D. Paton, Forging a paradigm shift in disaster science. *Natural Hazards*, 2017, **86**, 2: 969-988, doi:10.1007/s11069-016-2726-x.
15. Kossobokov, V.G. Testing an earthquake prediction algorithm: The 2016 New Zealand and Chile earthquakes. *Pure Appl. Geophys.*, 2017, **174**, 5: 1845-1854, doi:10.1007/s00024-017-1543-9.
16. Magrin, A., A. Peresan, T. Kronrod, F. Vaccari, and G.F. Panza, Neodeterministic seismic hazard assessment and earthquake occurrence rate. *Engineering Geology*, 2017, **229**: 95-109, doi:10.1016/j.enggeo.2017.09.004.
17. Mojarab, M., H. Memarian, M. Zare, and V. Kossobokov, Adjusting the M8 algorithm to earthquake prediction in the Iranian plateau. *Journal of Seismology*, 2017, **21**, 4: 921-940, doi:10.1007/s10950-017-9644-6.
18. Molchan, G., L. Romashkova, and A. Peresan, On some methods for assessing earthquake predictions. *Geophys. J. Int.*, 2017, **210**, 3: 1074-1080, doi:10.1093/gji/ggx239.
19. Parvez, I.A., A. Nekrasova, and V. Kossobokov, Earthquake hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: State of Gujarat, India. *Pure Appl. Geophys.*, 2017, **174**, 3: 1441-1452, doi:10.1007/s00024-017-1475-4.
20. Rodkin, M.V., and V.I. Kaftan, Post-seismic relaxation from geodetic and seismic data. *Geodesy and Geodynamics*, 2017, **8**, 1: 13-16, doi:10.1016/j.geog.2017.01.001.
21. Shebalin, P. and C. Narteau, Depth dependent stress revealed by aftershocks. *Nature Communications*, 2017, **8**: Article 1317, doi:10.1038/s41467-017-01446-y.

**2018 год**

22. Воробьева И.А., Соловьев А.А., Шебалин П.Н. Картирование межплитового сцепления в Камчатской зоне субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности // ДАН, 2018, т.484. № 4.
23. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В., Соловьев А.А. Современные тектонические движения и землетрясения в северной части Каспийского горнопромышленного региона // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2018, т.16, № 1-2. С.13, doi:10.24411/2227-9490-2018-11071.
24. Гливенко Е.В., Фомочкина А.С., Прохорова Т.В. Идея применения степени отображения при прогнозе землетрясений // Вопросы радиоэлектроники, 2018. № 5. С.54-58.

25. Baro,O., A.Kumar, and A.Ismail-Zadeh, Seismic hazard assessment of the Shillong Plateau, India. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2018, **9**, 1: 841-861, doi: 10.1080/19475705.2018.1494043.
26. Gatinsky,Yu.G., T.V.Prokhorova, and D.V.Rundquist, The 102-103° E geodivider in the modern lithosphere structure of central Asia // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, **9**, 3: 989-1006, doi:10.5800/GT-2018-9-3-0380.
27. Gorshkov,A., and Y.Gaudemer, Seismogenic nodes defined with pattern recognition in the French Massif Central. *Journal of Iberian Geology*, 2018, doi:10.1007/s41513-018-0087-x.
28. Gorshkov,A.I., H.M.Hassan, and O.V.Novikova, Seismogenic nodes ( $M \geq 5.0$ ) in Northeast Egypt and implications for seismic hazard assessment. *Pure Appl. Geophys.*, 2018, doi:10.1007/s00024-018-2012-9.
29. Gorshkov,A., and O.Novikova, Estimating the validity of the recognition results of earthquake-prone areas using the ArcMap. *Acta Geophysica*, 2018, **66**, 5: 843-853, doi:10.1007/s11600-018-0177-3.
30. Ismail-Zadeh,A. Geohazard analysis for disaster risk reduction and sustainability. In T.Beer, J.Li and K.Alverson (eds) *Global Change and Future Earth: The Geoscience Perspective* (Special Publications of the International Union of Geodesy and Geophysics). Cambridge: Cambridge Univ. Press, ISBN 9781316761489, 2018: 349-363, doi:10.1017/9781316761489.034.
31. Ismail-Zadeh,A. Earthquake hazard modelling and forecasting for disaster risk reduction. In R.Vacareanu and C.Ionescu (eds) *Seismic Hazard and Risk Assessment*. Springer Natural Hazards, ISBN 978-3-319-74724-8, 2018: 3-21, doi:10.1007/978-3-319-74724-8\_1.
32. Ismail-Zadeh,A. Earthquake risk assessment for seismic safety and sustainability. In R.Vacareanu and C.Ionescu (eds) *Seismic Hazard and Risk Assessment*. Springer Natural Hazards, ISBN 978-3-319-74724-8, 2018: 225-236, doi:10.1007/978-3-319-74724-8\_15.
33. Ismail-Zadeh,A., A.Soloviev, V.Sokolov, I.Vorobieva, B.Muller, and F.Schilling, Quantitative modeling of the lithosphere dynamics, earthquakes and seismic hazard. *Tectonophysics*, 2018, **746**, 30 October 2018: 624-647, doi:10.1016/j.tecto.2017.04.007.
34. Kontar,Y.Y., T.Beer, P.A.Berkman, J.C.Eichelberger, A.Ismail-Zadeh, I.Kelman, J.L.LaBrecque, A.E.Sztein, and Y.Zaika, Disaster-related science diplomacy: advancing global resilience through international scientific collaborations. *AAAS Science & Diplomacy*, 2018, **7**, 2: <http://www.sciencediplomacy.org/article/2018/disaster-related-science-diplomacy-advancing-global-resilience-through-international>.
35. Molchan,G., A.Peresan, G.F.Panza, L.Romashkova, and V.Kossobokov, Comment on "Assessing CN earthquake predictions in Italy" by M. Taroni, W. Marzocchi, P. Roselli. *Annals of Geophysics*, 2018, **61**, 1: SE106, doi:10.4401/ag-7374.
36. Novikova,O.V., and A.I.Gorshkov, High seismicity intersections of morphostructural lineaments: the Black-Sea–Caspian region, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2018, **12**, 6: 378-385, doi:10.1134/S0742046318060064.

37. Parvez, I.A., A.Nekrasova, and V.Kossobokov, Seismic hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: thirteen principal urban agglomerations of India. *Natural Hazards*, 2018, 92, 3: 1509-1522, doi:10.1007/s11069-018-3261-8.
38. Shebalin, P., Combining probabilistic seismicity models with precursory information. In D.Ouzounov, S.Pulinets, K.Hattori and P.Taylor *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, Geophysical Monograph 234*. American Geophysical Union, John Wiley & Sons, Inc., ISBN: 978-1-119-15693-2, 2018: 173-195.
39. Soloviev, A.N., A.A.Soloviev, A.D.Gvishiani, B.P.Nikolov, and Yu.I.Nikolova, GIS-oriented database for seismic hazard assessment in regions of the Caucasus and Crimea. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, 54, 9: 1363-1373, doi:10.1134/S0001433818090505.

*Доклады на международных и российских научных конференциях*

**2016 год**

40. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Применение законов Омори и Гутенберга-Рихтера к прогнозированию афтершоковой активности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016. С.49-53.
41. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В. Высокосейсмичные внутриконтинентальные зоны азиатской части России и прилегающих стран // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 6-9.
42. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В. Высокосейсмичные внутриконтинентальные зоны азиатской части России и прилегающих стран // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике. 2016, 06 сент.
43. Горшков А.И., Писаренко В.Ф., Родкин М.В., Лы Н.Т., Туен Н.Х., Орунбаев С.Ж. Старые и новые подходы к проблеме оценки долгосрочной сейсмической опасности // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Юбилейная конференция, посвященная 25-летию образования ИГЭ РАН / отв. ред. В.И. Осипов. М.: РУДН, 2016. С.135-140.
44. Шебалин П.Н., Баранов С.В. Проблема прогноза сильных афтершоков // X Международная школа-семинар "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород", 13-17 июня 2016 г., Апатиты, Россия  
([http://media.wix.com/ugd/fc0c0d\\_2a9dd32694d94a4d8e1cf5f36810de84.pdf](http://media.wix.com/ugd/fc0c0d_2a9dd32694d94a4d8e1cf5f36810de84.pdf))

45. Шебалин П.Н., Нарто К. Влияние глубины очага на характеристики афтершоковых последовательностей // X Международная школа-семинар "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород", 13-17 июня 2016 г., Апатиты, Россия
46. Шебалин П.Н., Баранов С.В., Дзедобоев Б.А. Сейсмическая опасность от афтершоков сильных землетрясений: задача и пути ее решения // 1-ая Международная конференция "Проблемы совершенствования сейсмической шкалы интенсивности", 25-27 октября 2016 г, Гюмри, Армения.
47. Baranov,S., and P.Shebalin, Forecasting area of strong aftershock occurrence. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-6220, 2016. EGU General Assembly 2016.
48. Chunga,K., M.Mulas, D.Besenzon, A.Gorshkov, C.Gordillo, and G.Loayza, Coseismic ground effects of the 2016 Mw 7.8 Pedernales earthquake (Ecuador). 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-705  
([http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral\\_program/22640](http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral_program/22640)).
49. Gorshkov,A., K.Chunga, A.Soloviev, A.Michetti, and G.Panza, The correlation of the 16 April 2016 Ecuador earthquake M7.8 with the potential nodes (M6.5+) defined in Ecuador in 2010. 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-687.
50. Ismail-Zadeh,A.T. Geohazard modeling and assessments for disaster risk reduction. In Kedrov E., Editor (2016), Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies". Session 3. Earth surface hazards: tectonic and induced earthquakes, volcano activity, landslides, sandstorms. *Geoinf. Res. Papers Ser.*, 4, BS4002, doi:[10.2205/2016BS03Sochi](https://doi.org/10.2205/2016BS03Sochi), P.7.
51. Ismail-Zadeh,A.T. Geohazards: Basic science for disaster risk reduction. In Abstracts of the 35<sup>th</sup> International Geological Congress, 27 August – 4 September 2016, Cape Town, South Africa.
52. Ismail-Zadeh,A. Toward paradigm shift in disaster risk research. In Abstract Book of the UArctic Congress 2016, 12-16 September, St. Petersburg, Russia. P.65 (invited).
53. Ismail-Zadeh,A. Geohazard research for disaster risk reduction. In Abstract Book of the Second Congress of Geodesy and Geophysics, Nanjing, China, 23-25 September 2016 (invited).
54. Ismail-Zadeh,A.T., S.L.Cutter, K.Takeuchi, and D.Paton, (2016). On a paradigm shift in disaster science. Abstract NH23C-1875 presented at 2016 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 12-16 Dec., 2016.
55. Kossobokov,V. Earthquake hazard assessment: Basics of evaluation. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-7695, 2016. EGU General Assembly 2016.
56. Kossobokov,V.G. State-of-the-art assessment of seismic hazard and risks. In Kedrov E., Editor (2016), Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies". Session 3. Earth surface hazards: tectonic and induced earthquakes, volcano activity, landslides,

- sandstorms. *Geoinf. Res. Papers Ser.*, 4, BS4002, doi:[10.2205/2016BS03Sochi](https://doi.org/10.2205/2016BS03Sochi), P.8.
57. Kossobokov, V. Global testing of earthquake prediction algorithms. 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-529 ([http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral\\_program/22640](http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral_program/22640)).
  58. Kossobokov, V. What do we know for assessing of seismic hazard? 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-236 ([http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral\\_program/22635](http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral_program/22635)).
  59. Kossobokov, V.G. Earthquake prediction in a big data world. Abstract NH54B-03 presented at 2016 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 12-16 Dec., 2016.
  60. Kossobokov, V., and A.Nekrasova, Seismic Hazard and Risk Assessment (SHandRA): the Greater Caucasus and Crimea. 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-103.
  61. Nekrasova, A., and V.Kossobokov, Earthquake hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes the Greater Caucasus and Crimea. In Kedrov E., Editor (2016), Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies". Poster Session, *Geoinf. Res. Papers Ser.*, 4, BS4002, doi:[10.2205/2016BS08Sochi](https://doi.org/10.2205/2016BS08Sochi).
  62. Nekrasova, A.K., and V.G.Kossobokov, Dynamic evaluation of seismic hazard and risks based on the Unified Scaling Law for Earthquakes. Abstract S11B-2448 presented at 2016 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 12-16 Dec., 2016.
  63. Nekrasova, A., V.Kossobokov, and I.Parvez, Earthquake hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: State of Gujarat, India. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-7794, 2016. EGU General Assembly 2016.
  64. Nekrasova, A., A.Peresan, A.Magrin, and V.Kossobokov, The Unified Scaling Law for Earthquakes in the Friuli Venezia Giulia Region. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-17706, 2016. EGU General Assembly 2016.
  65. Peresan, A., A.Magrin, A.Nekrasova, V.Kossobokov, and G.F.Panza, Neodeterministic and probabilistic seismic hazard assessments: a comparative analysis. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-17535, 2016. EGU General Assembly 2016.
  66. Peresan, A., L.Romashkova, V.Kossobokov, and G.Panza, Operational earthquake forecasting practice: the CN and M8S algorithms in Italy. In Book of abstracts of the 1st general Assembly of the African Seismological Commission, 2-5 April, Luxor-Aswan, Egypt.
  67. Peresan, A., L.Romashkova, V.Kossobokov, and G.F.Panza, Operational earthquake forecast: about two decades of CN and M8S algorithms practice in Italy. 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-288 ([http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral\\_program/22635](http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral_program/22635)).

68. Shebalin, P. A composite model of expected earthquake rates in California based on intermediate-term precursory patterns. 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-483 ([http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral\\_program/22635](http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral_program/22635)).
69. Shebalin, P., and S. Baranov, Applying error diagram for evaluating spatial forecasting model of large aftershocks. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-6215, 2016. EGU General Assembly 2016.
70. Shebalin, P., and S. Baranov, Operative forecasting of the hazard from aftershocks of large earthquakes. 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-536 ([http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral\\_program/22635](http://meetingorganizer.copernicus.org/ESC2016/oral_program/22635)).
71. Shebalin, P.N., S.V. Baranov, B.A. Dzeboev, and A.K. Nekrasova, Seismic hazard from aftershocks of large earthquakes. In Kedrov E., Editor (2016), Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies". Session 3. Earth surface hazards: tectonic and induced earthquakes, volcano activity, landslides, sandstorms. *Geoinf. Res. Papers Ser.*, 4, BS4002, doi:[10.2205/2016BS03Sochi](https://doi.org/10.2205/2016BS03Sochi), P.13.
72. Sokolov, V., and A. Ismail-Zadeh, Multiple-site estimations in probabilistic seismic hazard assessment. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-17776, 2016. EGU General Assembly 2016.

#### 2017 год

73. Новикова О.В., Горшков А.И. Идентификация сейсмоопасных мест для землетрясений с  $M \geq 7$  в Черноморско-Каспийском регионе // Сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» (27-28 сентября 2017), Москва: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2017. С.92-93.
74. Шебалин П.Н. Converting precursory patterns into rate-based form and combining models using differential probability gains // Школа молодых ученых «Методы комплексной оценки сейсмической опасности», Москва, ИФЗ РАН, 3-7 июля 2017 г.
75. Gorshkov, A., Y. Gaudemer, and O. Novikova, Possible locations of  $M7+$  earthquakes in Greece defined by pattern recognition. In Kedrov E., Editor, Book of Abstracts of the International Conference "Global Challenges and Data-Driven Science". *Geoinf. Res. Papers Ser.*, 5, BS1002, <https://doi.org/10.2205/CODATA2017>, 2017. P.49.
76. Ismail-Zadeh, A., S. Sokolov, and A. Soloviev, Numerical earthquake simulations for seismic hazard assessment. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 19, EGU2017-2648. EGU General Assembly 2017.
77. Ismail-Zadeh, A. From lithosphere dynamics and earthquake modelling through seismic hazard and risk assessments to disaster risk reduction: A long way towards seismic safety and sustainability. *The 6th National Conference on Earthquake Engineering and the 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology – 6CNIS & 2CNIS, June 14-17, 2017, Bucharest, Romania*.
78. Ismail-Zadeh, A., A. Soloviev, and S. Sokolov, Lithosphere dynamics and earthquake simulation: implication for seismic hazard analysis. In *IAG-IASPEI*

*Joint Scientific Assembly. Kobe, Japan, July 30 – August 4, 2017. Book of abstracts.* Abstract J03-3-05, [http://iag-iaspei-2017.jp/files/IAG-IASPEI2017\\_Programbook.pdf](http://iag-iaspei-2017.jp/files/IAG-IASPEI2017_Programbook.pdf)

79. Kossobokov, V., and A. Nekrasova, Hazard assessment in a Big Data World. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 19, EGU2017-13843, 2017. EGU General Assembly 2017.
80. Nekrasova, A.K., and V.G. Kossobokov, Seismic dynamics in advance and after the recent strong earthquakes in Italy and New Zealand. Abstract S21B-0702 presented at 2017 Fall Meeting, AGU, New Orleans, 11-15 Dec., 2017.
81. Peresan, A., V. Kossobokov, G.F. Panza, and M. Crespi, Time-dependent neo-deterministic seismic hazard scenarios for the Italian territory: recent advances and testing issues. In *IAG-IASPEI Joint Scientific Assembly. Kobe, Japan, July 30 – August 4, 2017. Book of abstracts*. Abstract S10-P-03.
82. Peresan, A., V. Kossobokov, L. Romashkova, and G.F. Panza, Time-dependent neo-deterministic seismic hazard scenarios for the 2016 Central Italy earthquakes sequence. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 19, EGU2017-6938, 2017. EGU General Assembly 2017.
83. Rezaneshad, V., C. Narteau, P. Shebalin, G. Zoeller, and M. Holschneider, Spatio-temporal analysis of Modified Omori law in Bayesian framework. Abstract S21B-0705 presented at 2017 Fall Meeting, AGU, New Orleans, 11-15 Dec., 2017.
84. Shebalin, P., and C. Narteau, Depth dependent stress revealed by aftershocks. Abstract S23F-03 presented at 2017 Fall Meeting, AGU, New Orleans, 11-15 Dec., 2017.
85. Vorobieva, I., P. Shebalin, and C. Narteau, Break of slope in earthquake size distribution and creep rate along the San Andreas Fault system. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 19, EGU2017-9115, 2017. EGU General Assembly 2017.

#### **2018 год**

86. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Современный геораздел 102-103° Центральной Азии и его роль в структуре коры и литосферы // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России. Материалы XXI Научно-практической Щукинской конференции с международным участием / Под ред. Е.А. Рогожина, Л.И. Надежка. Москва, 2018. С.97-103.
87. Ismail-Zadeh, A. Science-based geohazard risk reduction. International Conference on Geoinformation for Disaster Management (GI4DM2018), Istanbul, Turkey, 18-21 March 2018 (*пленарный доклад*).
88. Ismail-Zadeh, A. Geodynamic modelling, hazard assessment and forecasting of great earthquakes. General Assembly of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Honolulu, USA, 3-8 June 2018 (*приглашенный доклад*).
89. Ismail-Zadeh, A. Geodynamics and geodesy for earthquake modeling and seismic hazards of the Tibet-Himalayan region. International Symposium on Geodesy and Geodynamics – Tectonics, Earthquake, and Geohazards (ISGG 2018), Kunming, China, 30 July – 2 August 2018 (*приглашенный доклад*).

90. Ismail-Zadeh, A. Paradigm shift in disaster science: Transdisciplinary system analysis with action-oriented research. International Summit on Earth Science: Earth Sciences and Sustainable Development, Beijing, China, 20-21 August 2018 (*пленарный доклад*).
91. Ismail-Zadeh, A. International cooperation in Earth and Space sciences. Annual Meeting of the Mexican Geophysical Union, Puerto Vallarta, Mexico, 29 October – 2 November 2018 (*пленарный доклад*).
92. Ismail-Zadeh, A. International scientific cooperation to address challenges facing society (Invited). Abstract PA12A-10 presented at 2018 Fall Meeting, AGU, Washington D.C., 10-14 Dec., 2018 (<https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/354699>).
93. Ismail-Zadeh, A., S. Cutter, K. Takeuchi, and D. Paton, Paradigm shift in disaster science: Transdisciplinary system analysis with action-oriented research (Invited). Abstract PA54B-04 presented at 2018 Fall Meeting, AGU, Washington D.C., 10-14 Dec., 2018 (<https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/380654>).
94. Kossobokov, V., A. Nekrasova, and P. Schepalina, Seismic dynamics in advance and after the World's largest earthquakes, 1985-2017. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 20, EGU2018-17814, 2018. EGU General Assembly 2018.
95. Kossobokov, V.G., A. Nekrasova, and P.D. Schepalina, Statistical analysis of seismic dynamics associated with the world's largest earthquakes. Abstract NG43A-0972 presented at 2018 Fall Meeting, AGU, Washington D.C., 10-14 Dec., 2018 (<https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/390715>).
96. Narteau, C., P. Shebalin, I. Vorobieva, and M. Holschneider, Band-limited power-laws in statistical seismology. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 20, EGU2018-6064, 2018. EGU General Assembly 2018.
97. Nekrasova, A., V. Kossobokov, and A. Peresan, Unified Scaling Law for Earthquakes in the Friuli Venezia Giulia Region: time dependent assessment. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 20, EGU2018-19588, 2018. EGU General Assembly 2018.
98. Nekrasova, A.K., V.G. Kossobokov, and A. Peresan, Seismic dynamics in Northeastern Italy, 1995-2018. Abstract S12B-02 presented at 2018 Fall Meeting, AGU, Washington D.C., 10-14 Dec., 2018 (<https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/433069>).
99. Nekrasova, A., A. Peresan, and V. Kossobokov, A time-dependent assessment of the Unified Scaling Law for Earthquakes in Northeastern Italy. Book of Abstracts of the 36th General Assembly of the European Seismological Commission (2-7 September 2018, Valletta - Malta), ESC2018-S16-761.
100. Novikova, O., and A. Gorshkov, Seismogenic nodes capable of M6+ and M7+ earthquakes recognized in the Caucasus-Alburz-Kopet Dag region. Proceedings and Abstract Volume of the 36th National and the 3rd International Geosciences Congress. 25th-27th February, 2018 Tehran-Iran: 213.
101. Vorobieva, I., P. Shebalin, and C. Narteau, Tracing asperities in Kamchatka area using break of slope in magnitude-frequency distribution. Book of Abstracts of the 36th General Assembly of the European Seismological

Commission (2-7 September 2018, Valletta - Malta), ESC2018-S21-410 (приглашенный доклад).

102. Vorobieva, I., P. Shebalin, and A. Soloviev, Tracing asperities in Kamchatka area using break of slope in magnitude-frequency distribution. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 20, EGU2018-15860, 2018. EGU General Assembly 2018.