

Федеральное агентство научных организаций

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ГЕОФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.34

№ госрегистрации 115080610010

Инв. № 2018-1



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

докт. физ.-мат. наук

А.И.Горшков

«29» *сентября* 2018 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ
СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И
ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗА
(промежуточный, за 2017 год)

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 2018

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

Подписи сотрудников ИТПЗ РАН заверяю.
Ученый секретарь ИТПЗ РАН, к. ф.-м. н.



А.К. Некрасова

РЕФЕРАТ

Отчет 21 с., 9 рис., 2 табл., 23 источника

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

Исследования, проводимые по теме в 2017 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; продолжение прогнозного мониторинга сейсмичности по алгоритму RTP; изучение дополнительных возможностей эксперимента по применению алгоритма M8 на территории Северного Кавказа, Алтай-Саянского региона, Прибайкалья и Иранского плато; анализ применения методов оценки результатов прогнозов; разработку новых подходов к уменьшению опасности природных бедствий; построение карт изменяющейся сейсмической опасности отдельных регионов территории России и других стран и сравнительный анализ вероятностного (GSHAP) и нео-детерминистских (NDSHA) подходов к оценке 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.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Разработка и применение методов прогноза землетрясений	7
2.2. Оценка сейсмической опасности	13
2.3. Изучение сейсмичности	14
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	19

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 неопределенностного 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 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; 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

В 2017 году был продолжен 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>). На рис. 1 и 2 показаны такие карты, полученные на 01.01.2017, а на рис. 3 и 4 приведены такие карты, полученные на 01.07.2017.

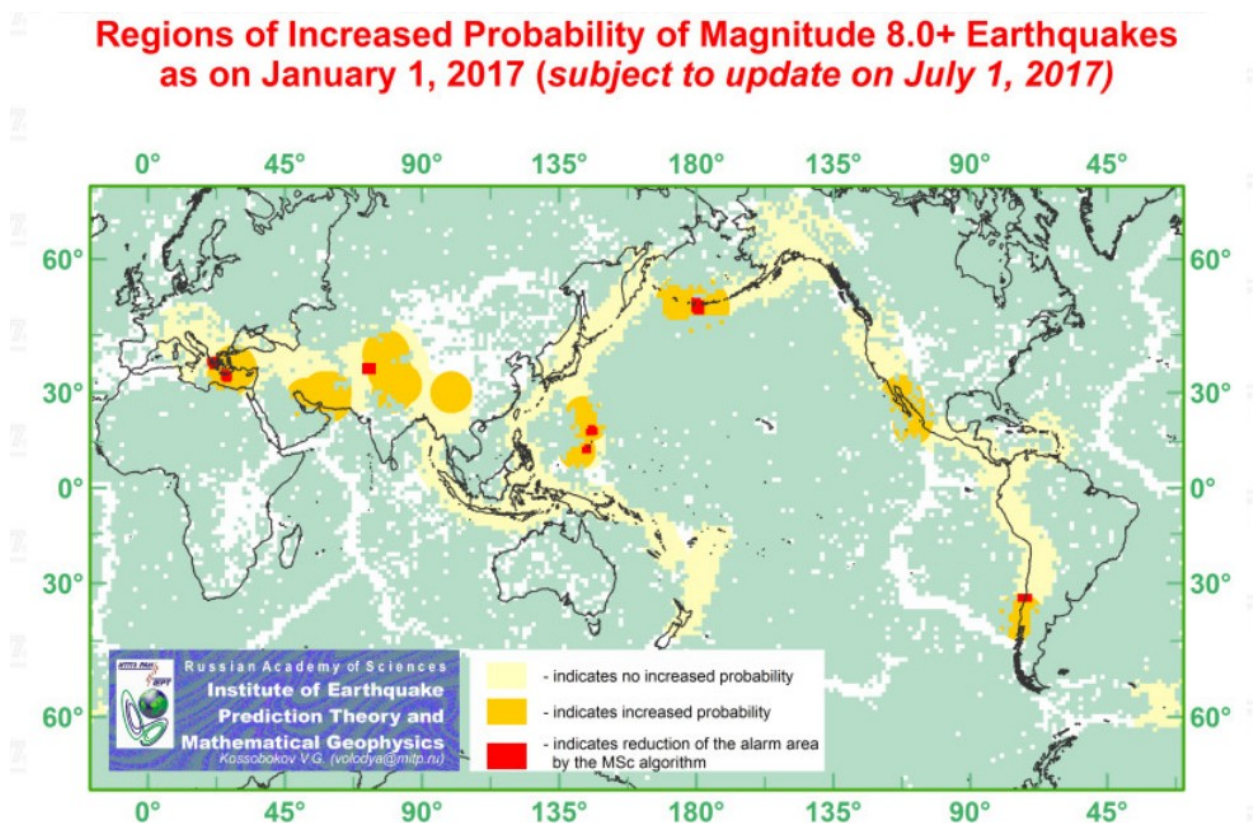


Рисунок 1. Прогноз землетрясений с $M \geq 8,0$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2017 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

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

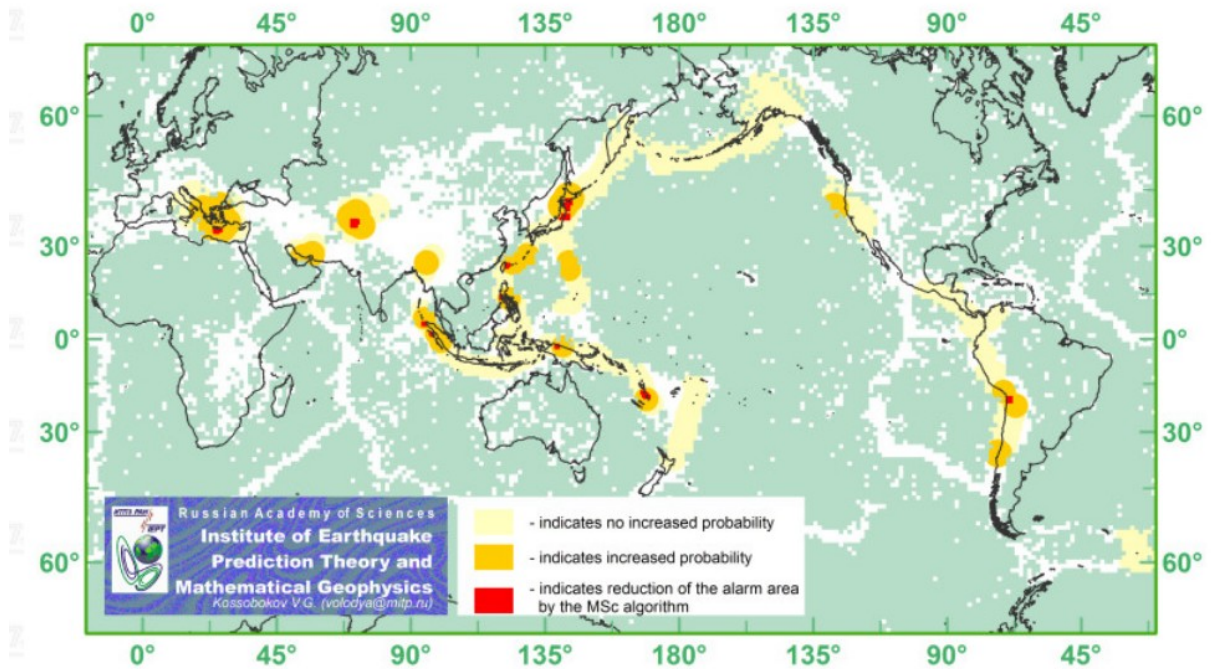


Рисунок 2. Прогноз землетрясений с $M \geq 7,5$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2017 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

**Regions of Increased Probability of Magnitude 8.0+ Earthquakes
as on July 1, 2017 (subject to update on January 1, 2018)**

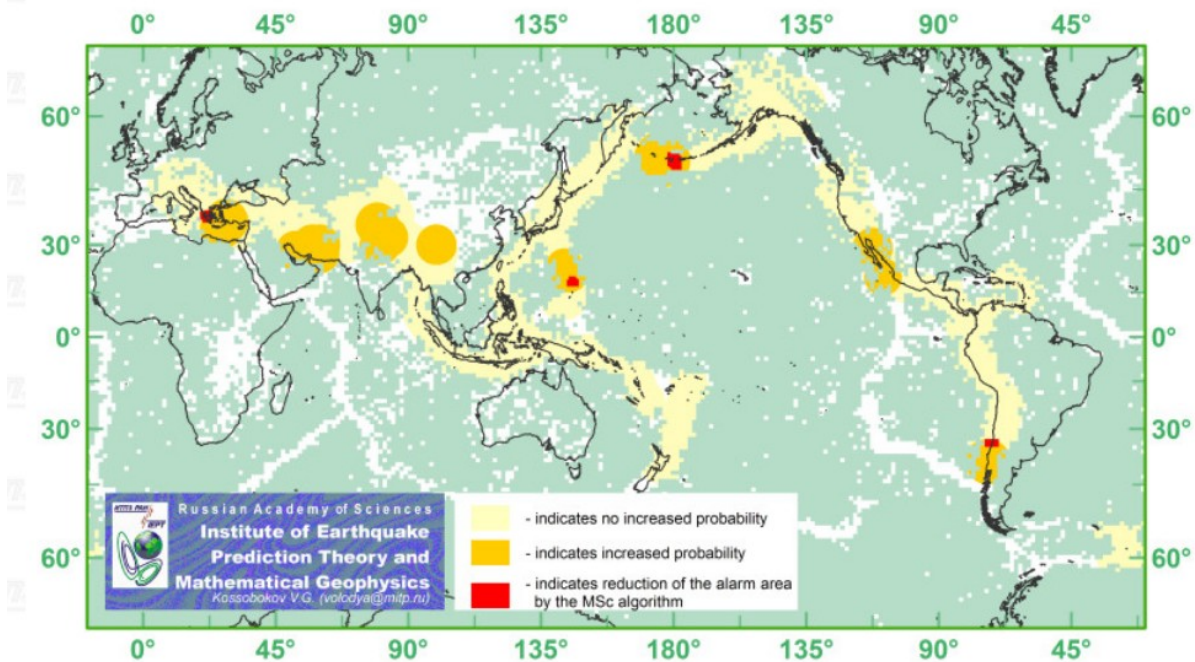


Рисунок 3. Прогноз землетрясений с $M \geq 8,0$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2017 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

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

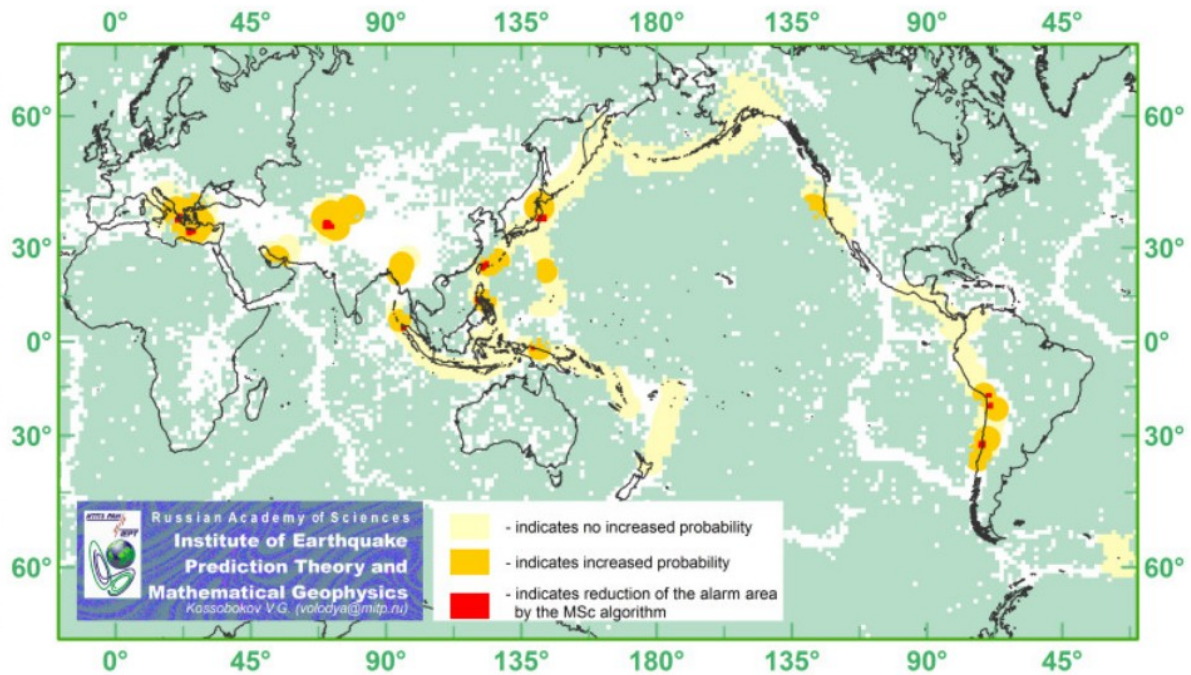


Рисунок 4. Прогноз землетрясений с $M \geq 7,5$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2017 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

По данным Геологической службы США в 2017 году произошло два землетрясения с магнитудой $7,5 \leq M < 8,0$ и одно землетрясений с $M \geq 8,0$. Их параметры приведены в Таблице 1, а положения эпицентров показаны на рис. 5.

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
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



Рисунок 5. Эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 7,5$, которые произошли в 2017 году.

Первое из землетрясений, перечисленных в Таблице 1 произошло на глубине 135 км в 35 км от Пангуна, Папуа Новая Гвинея и формально является пропуском цели для диапазона $M7.5+$; второе произошло к востоку от Командорских островов и также формально является пропуском цели для диапазона $M7.5+$, однако, находится внутри области тревоги для диапазона $M8.0+$ (круг исследования CI # 103, рис. 6); третье произошло у побережья Мексики вдали от области тревоги для диапазона $M8.0+$.

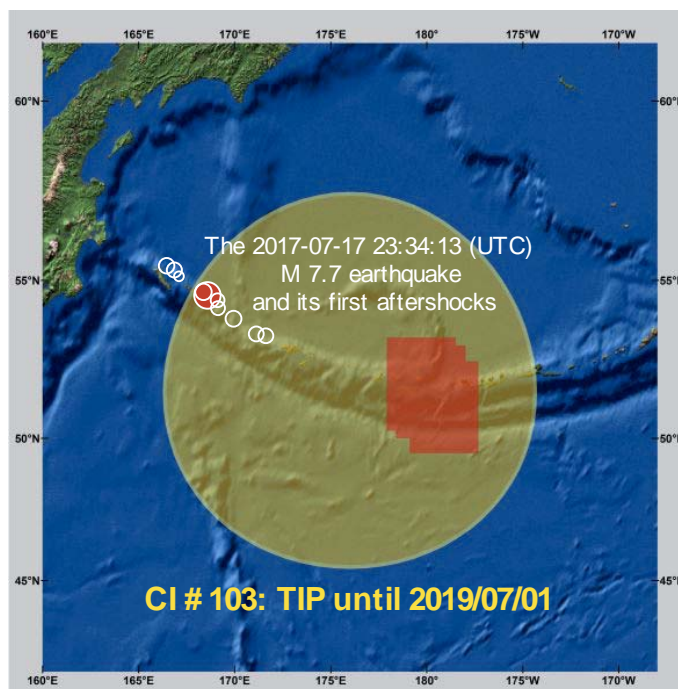


Рисунок 6. Эпицентры землетрясения 17.07.2017 (красный круг) и его первых афтершоков (белые окружности) и область тревоги, полученная с помощью алгоритма $M8$ (круг желтого цвета) для землетрясений с магнитудой $M \geq 8,0$. Уточнение области тревоги с помощью алгоритма MSc показано красным цветом.

В 2017 году уточнен анализ результатов этого многолетнего эксперимента за период до конца 2017 года. Полученные оценки эффективности алгоритмов при прогнозе землетрясений с магнитудой $M \geq 8,0$ и $M \geq 7,5$ приведены в Таблице 2.

По результатам выполнения Глобального эксперимента пополнен архив прогнозных карт в среде ArcGis, опубликована статья [4] и сделан доклад [18].

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

Период теста	Сильные события		Доля объема тревоги τ , % *		Вероятность p , % **		
	Всего	Предсказано	M8	M8-MSc	M8	M8-MSc	
		M8					M8-MSc
<i>Диапазон M8,0+</i>							
1985-2015	26	17	11	32,84	16,62	0,07	0,2
1992-2015	24	15	9	29,80	14,78	0,09	0,5
<i>Диапазон M7,5+</i>							
1985-2015	81	41	17	28,54	9,30	< 0,01	0,1
1992-2015	69	31	11	23,16	8,33	< 0,01	2,7

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.

В 2017 г. продолжен 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 2017 г. не было диагностировано ни одной тревоги в тестируемых регионах. Землетрясений указанных магнитуд в рассматриваемых областях в 2017 г. также не произошло. Разработанная ранее новая схема анализа и комплексирования с помощью 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) восьми предвестников, используемых в алгоритме RTP, в течение 2017 года применялась в 6 рассматриваемых регионах. Тревог по новой схеме также диагностировано не было ни в одном из регионов. Результаты мониторинга доступны в сети интернет по адресу <http://rtpctest.org/>. По полученным результатам сделан доклад [12].

Исследованы дополнительные возможности эксперимента по применению алгоритма М8 на территории Северного Кавказа, Алтай-Саянского региона, Прибайкалья и Иранского плато. Для этих регионов имеющиеся каталоги землетрясений достаточно полны для среднесрочного прогноза событий диапазона $M_{6,5+}$. К сожалению, доступные версии каталогов имеют значительную задержку и недостаточно однородны. На рис. 7, 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. Результаты исследования вошли в статьи [4, 6] и доклад [18].

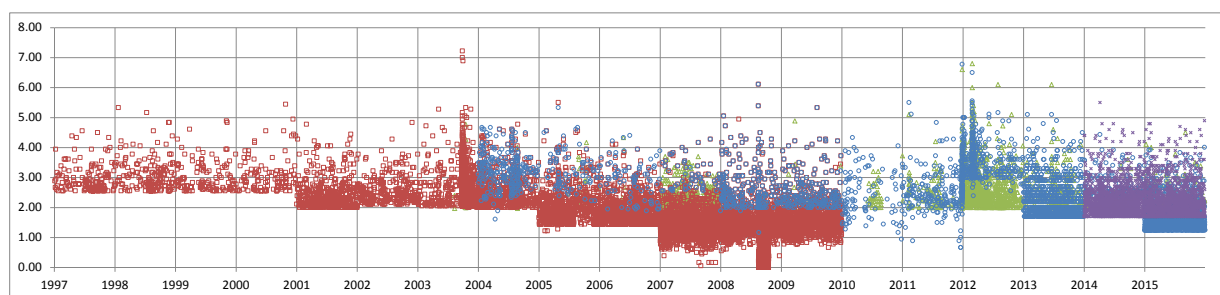


Рисунок 7. Магнитуда землетрясения как функция времени для региона Алтай-Саяны за 1997-2015 гг. *Примечание:* разным цветом показаны данные, представленные в разных региональных каталогах РФ.

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 статье [7].

2.2. Оценка сейсмической опасности

Несмотря на значительные достижения в области знаний рисков стихийных бедствий, вызванных опасными природными явлениями, ущерб от стихийных бедствий остается значительным. Привлечение естественных, технических и социальных наук к выработке политики должно способствовать снижению рисков от бедствий, вызванных природными опасностями. С этой целью необходимо 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. 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 [3] и сделаны доклады [14-16].

В 2017 г. продолжена работа по сравнению и оценке эффективности карт сейсмического районирования на основе вероятностного (GSHAP) и нео-детерминистских (NDSHA) подходов к оценке сейсмической опасности, а также полученных на базе многомасштабного оценивания параметров сейсмичности в рамках Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ), обобщающего соотношение Гутенберга-Рихтера. Проведено сравнение полученных карт сейсмической опасности с аналогичными картами других исследователей. В качестве примера на рис. 8 показаны результаты такого сравнения для регионов Алтай-Саяны и Прибайкалье. На рис. 8a и 8c показаны результаты оценки сейсмической опасности на основе применения ОЗПЗ и результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений, а рис. 8b и 8d показаны результаты оценки сейсмической опасности в соответствии с картами ОСР-97А. Сравнение показывает явную недооценку опасности в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье. Расхождение в расчетах может быть объяснено во многом субъективным выбором относительно небольшого числа очагов сильных землетрясений для построения ОСР-97А в сравнении с объективным систематическим анализом всех исторических и инструментальных данных о землетрясениях территории исследования на основе ОЗПЗ и распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе схемы морфоструктурного районирования региона. Результаты оценки сейсмической опасности опубликованы в статьях [5, 8] и вошли в доклады [17, 19, 20].

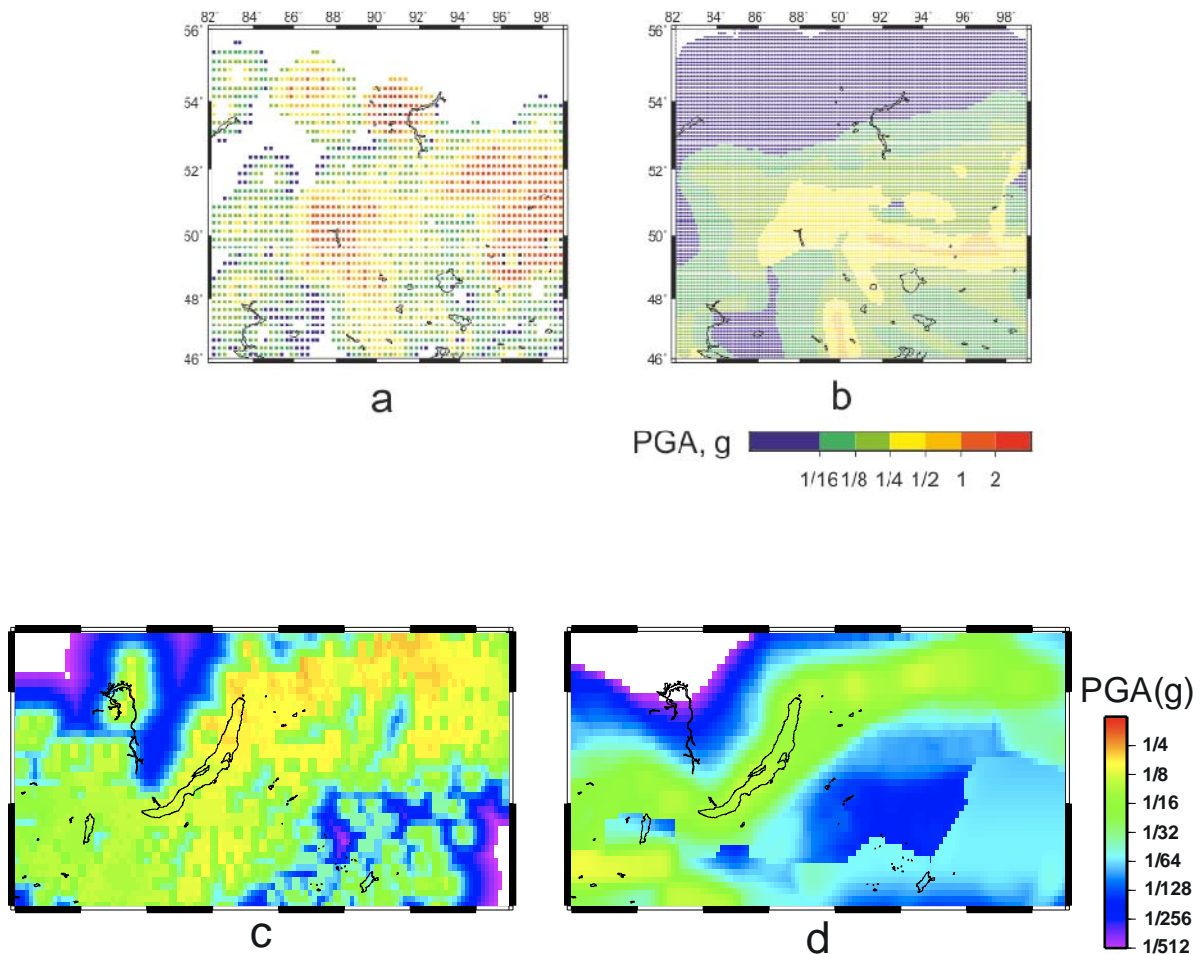


Рисунок 8. Карты сейсмической опасности для региона Алтай-Саяны (а, б) и Прибайкалья (с, д) в терминах ускорения на скальном основании, PGA, с вероятностью превышения 10% за 50 лет. Карты а и с получены на основе ОЗПЗ; карты б и д – на основе ОСР-97А.

Выполнен предварительный анализ задачи идентификации сейсмоопасных мест для землетрясений с $M \geq 7$ в Черноморско-Каспийском регионе. По полученным результатам сделаны доклады [11, 13].

2.3. Изучение сейсмичности

Исследована последовательность афтершоков и процесс пост-сейсмической 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 [9].

Выполнен пространственно-временной анализ модифицированного закона Омори в рамках Байесовского подхода. По полученным результатам сделан доклад [21].

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. 9). 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. 9). 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 [10], и по ним сделан доклад [22].

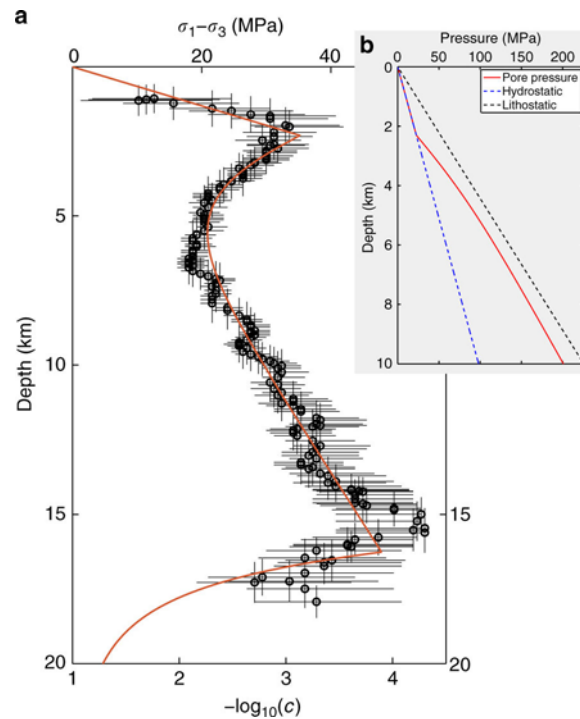


Рисунок 9. Дифференциальное сдвиговое напряжение и время задержки c начала степенного характера убывания частоты повторения афтершоков в зависимости от глубины в Калифорнии. **a** Логарифм наиболее вероятного значения и разброс ошибок параметра c в интервалах глубины шириной 3 км. Дифференциальное сдвиговое 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. В результате картирования формы графика повторяемости в зоне субдукционной сейсмичности Камчатки выявлены зоны как со статистически значимым избытком, так и с недостатком сильных землетрясений. 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. Предполагается, что эти зоны являются местами высокого сцепления (asperities). Зоны с недостатком сильных землетрясений приурочены, в основном, к афтершоковой зоне Кроноцкого землетрясения, где было зафиксировано значительное асейсмическое смещение в пост-сейсмический период. Предполагается, что эти зоны являются областями слабого сцепления (creeping zones). Форма графика повторяемости позволяет на качественном уровне определять величину сейсмического сцепления при

отсутствии геодезических измерений (GPS). Результаты исследований частично вошли в доклад [23].

В сотрудничестве с Государственным геологическим музеем им. В.И.Вернадского РАН 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 10^{10} – 10^{12} 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 [1, 2].

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 M8 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.

По результатам выполненных исследований опубликовано 10 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах и сделано 13 доклада на международных и российских научных конференциях.

4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Shebalin, P. and C.Narteau, Depth dependent stress revealed by aftershocks. *Nature Communications*, 2017, **8**: Article 1317, doi:10.1038/s41467-017-01446-y.

Доклады на международных и российских научных конференциях

11. 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.
12. 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.

13. 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.
14. 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.
15. 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*.
16. 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
17. Kossobokov, V., and A. Nekrasova, Hazard assessment in a Big Data World. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 19, EGU2017-13843, 2017. EGU General Assembly 2017.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.