

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. № 2017-1



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН
член-корреспондент РАН
А.А.Соловьев

«20» января 2017 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 2016 год)

Заведующий лабораторией № 1
канд. техн. наук

И.В. Кузнецов

Заведующий лабораторией № 4
докт. физ.-мат. наук

А.И. Горшков

Москва 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,
директор ИТПЗ РАН
чл.-корр. РАН



А.А. Соловьев

Ответственные исполнители:

ст. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук



И.А. Воробьева

зав. лаб.
докт. физ.-мат. наук



А.И. Горшков

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук



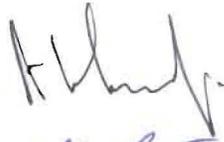
А.Т. Исмаил-Заде

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук



В.Г. Кособоков

ст. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук



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



П.Н. Шебалин

РЕФЕРАТ

Отчет 24 с., 9 рис., 2 табл., 44 источника

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

Исследования, проводимые по теме в 2016 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; подготовку к организации мониторинга сейсмической активности на территории Северного Кавказа и Прибайкалья на основе опыта подобного мониторинга для Италии и прилегающих территорий; применение нового алгоритма вероятностной многоместной оценки сейсмической опасности; 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; прогнозирование интенсивности афтершоков после сильных землетрясений в различных диапазонах магнитуд; изучение связи статистики сейсмичности с характером тектонических движений по разломам; анализ использования результатов определения мест возможного возникновения сильных землетрясений для долгосрочной оценки сейсмической опасности рассматриваемого региона; модификацию модели динамики блоковой структуры и сейсмичности и численные эксперименты с такой моделью Гималаев, направленные на выяснение влияния геодинамики на сейсмичность.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Разработка и применение методов прогноза землетрясений	7
2.2. Изучение сейсмичности и оценка сейсмической опасности	13
2.3. Моделирование динамики блоковых структур	17
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	19
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	20

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 разрабатываемых 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.

В рамках исследований, выполняемых по теме, в частности, осуществляется математическое моделирование динамики литосферных блоков и разломов. В отличие от других моделей сейсмичности блоковые модели позволяют учитывать реальное строение и геометрию разломов рассматриваемого региона, воспроизводить его сейсмичность в пространстве и во времени, изучать связь тектоники региона с главными характеристиками сейсмичности и решать фундаментальную задачу о восстановлении краевых условий и движущих тектонических сил, включая мантийные потоки, определяющих пространственное распределение наблюдаемой сейсмичности.

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; применение существующих и разработка новых методов оценки надежности и достоверности результатов прогноза; применение неопределенностного анализа сейсмической опасности и результатов прогноза мест возможного возникновения сильных землетрясений для уточнения оценок сейсмической опасности; моделирование динамики блоковых структур конкретных сейсмоактивных регионов; поиск универсальных закономерностей возникновения экстремальных событий в сложных системах.

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 2016 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 01.01.2016, а на рис. 3 и 4 приведены такие карты, полученные на 01.07.2016.

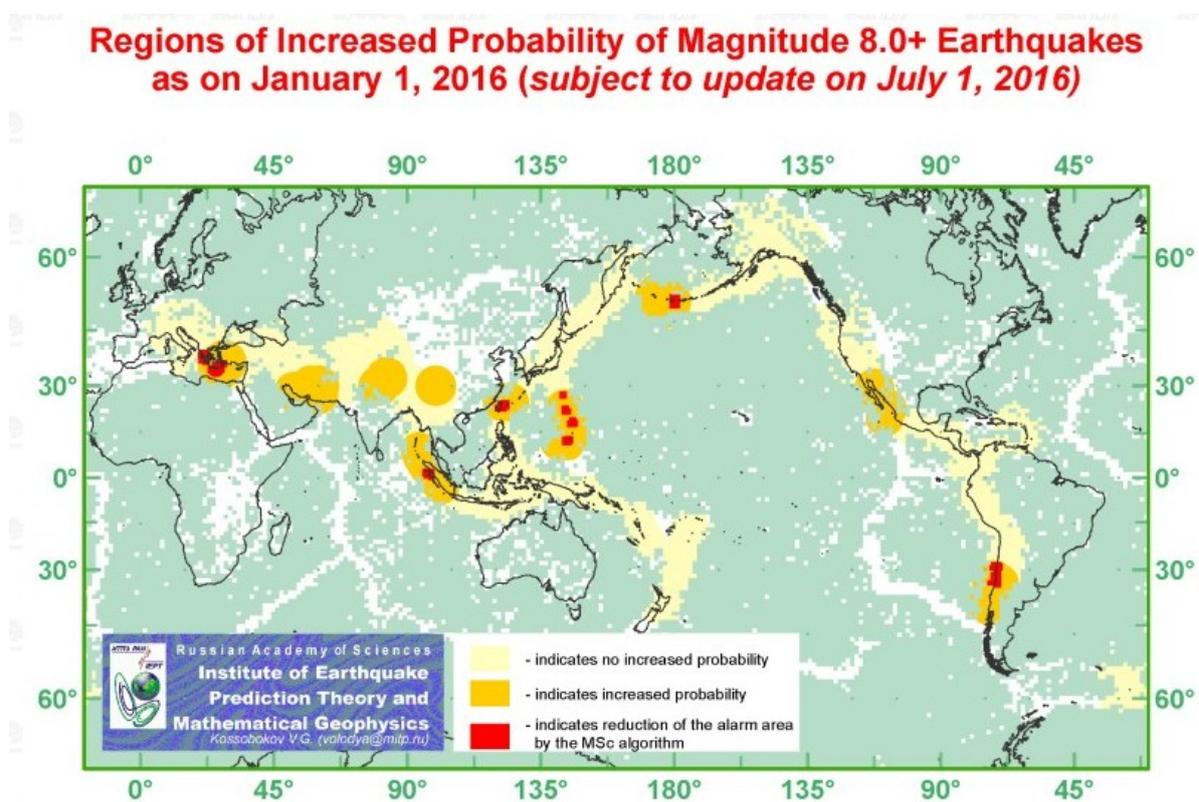


Рисунок 1. Прогноз землетрясений с $M \geq 8,0$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2016 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

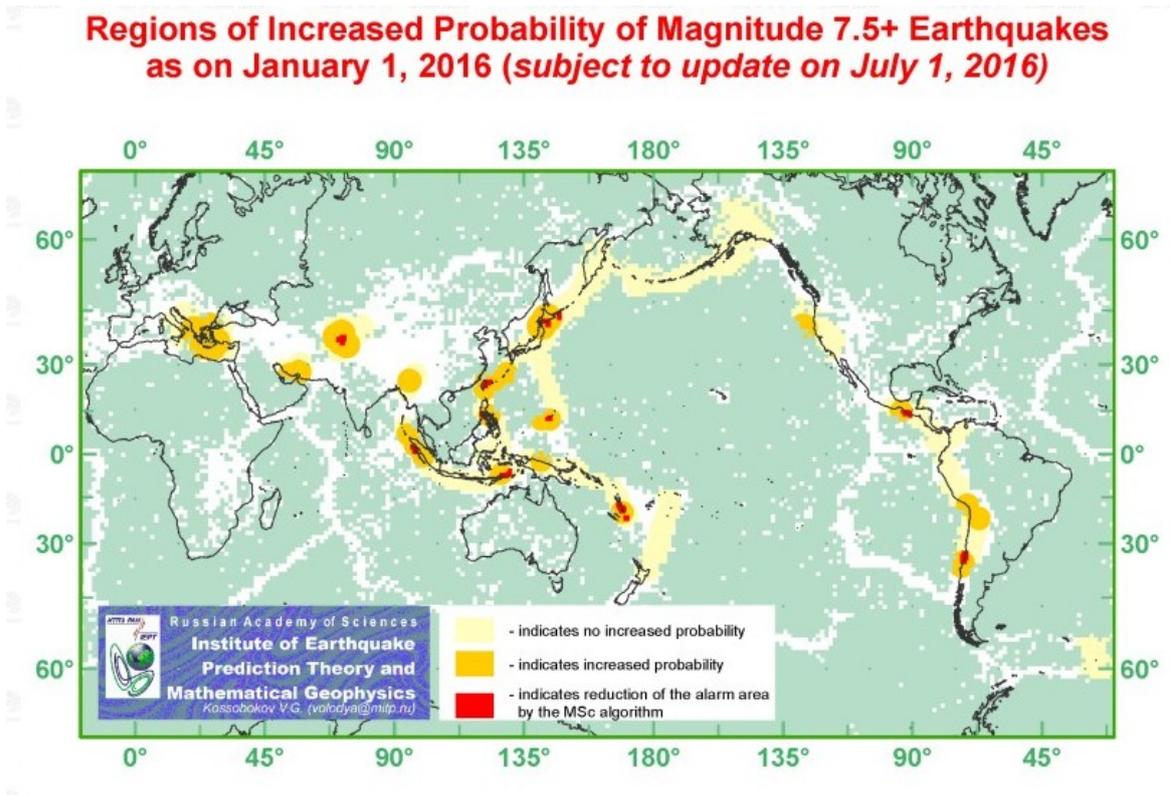


Рисунок 2. Прогноз землетрясений с $M \geq 7,5$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.01.2016 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

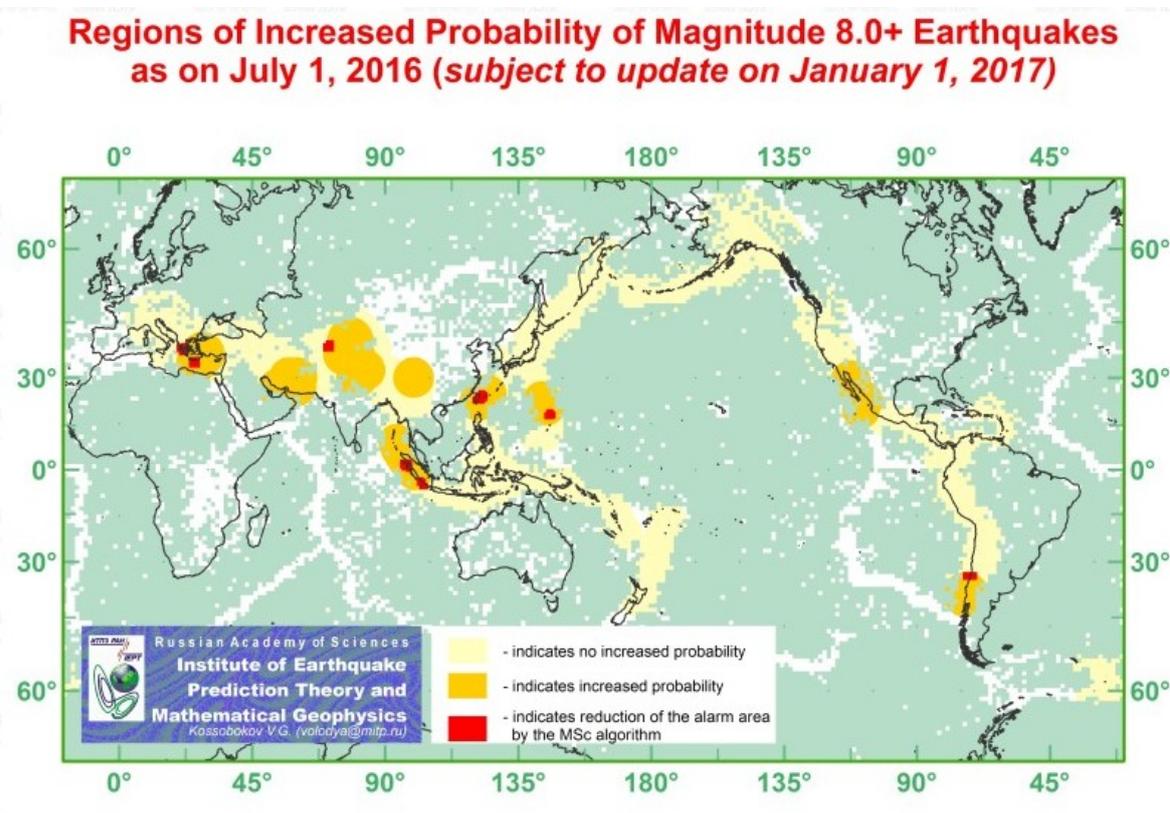


Рисунок 3. Прогноз землетрясений с $M \geq 8,0$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2016 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

**Regions of Increased Probability of Magnitude 7.5+ Earthquakes
as on July 1, 2016 (subject to update on January 1, 2017)**

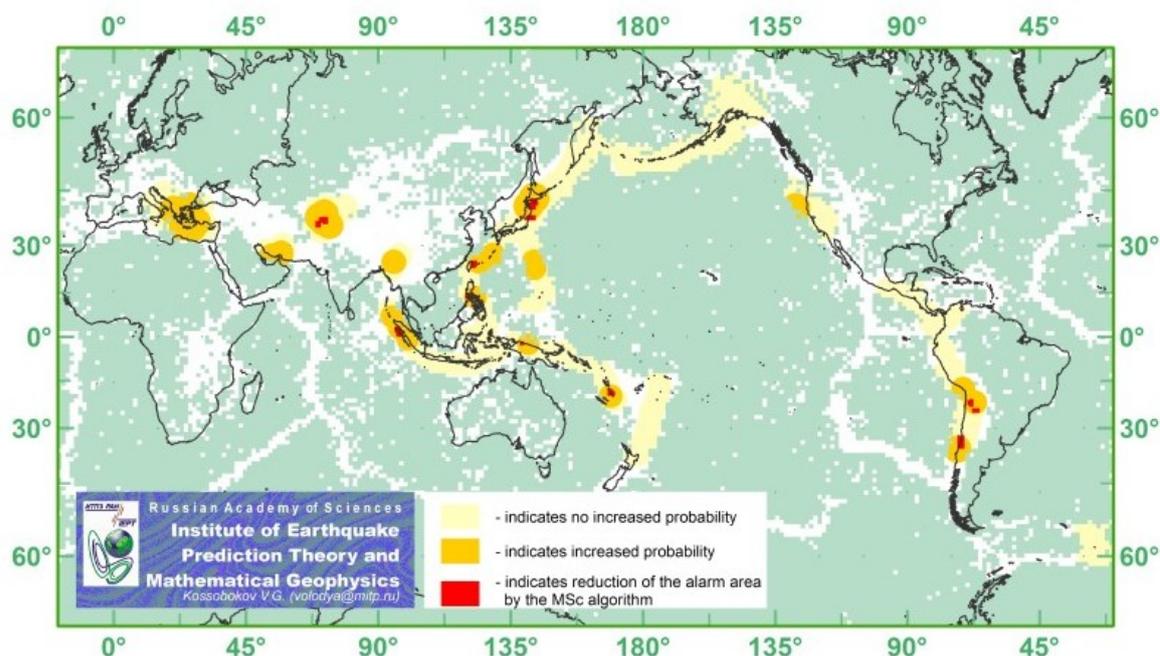


Рисунок 4. Прогноз землетрясений с $M \geq 7,5$, полученный с помощью алгоритма M8 на 01.07.2016 (области тревоги показаны желтым цветом), и его уточнение с помощью алгоритма MSc (показано красным цветом).

В 2016 г. не происходило землетрясений с магнитудой $M \geq 8,0$, и произошло пять землетрясений с $M \geq 7,5$, перечисленных в Таблице 1, эпицентры которых показаны на рис. 5. Параметры землетрясений приведены в соответствии с данными Геологической службы США.

Таблица 1. Землетрясения с магнитудой $M \geq 7,5$, которые произошли в 2016 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

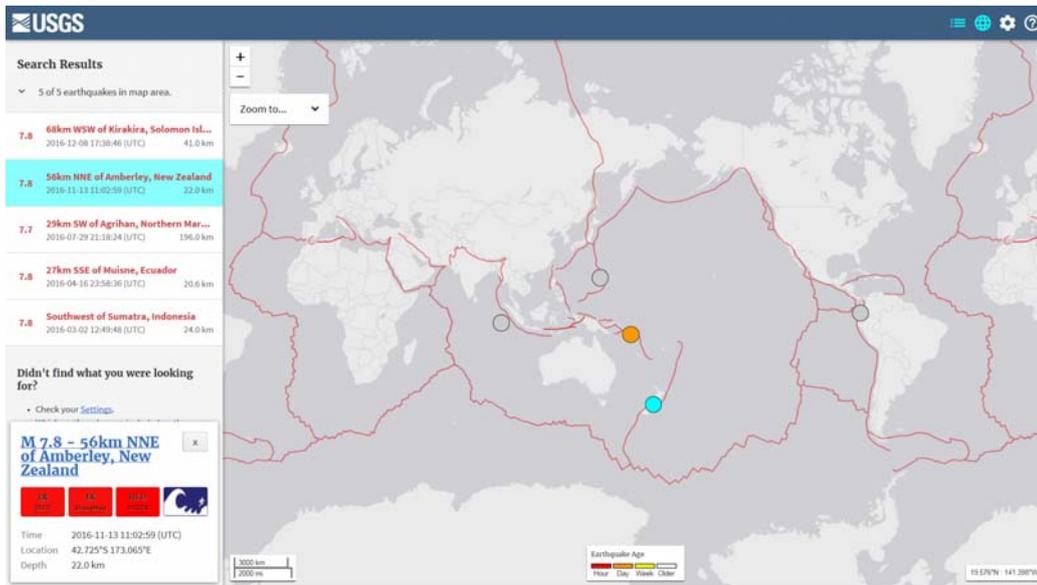


Рисунок 5. Эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 7,5$, которые произошли в 2016 году.

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. 6).

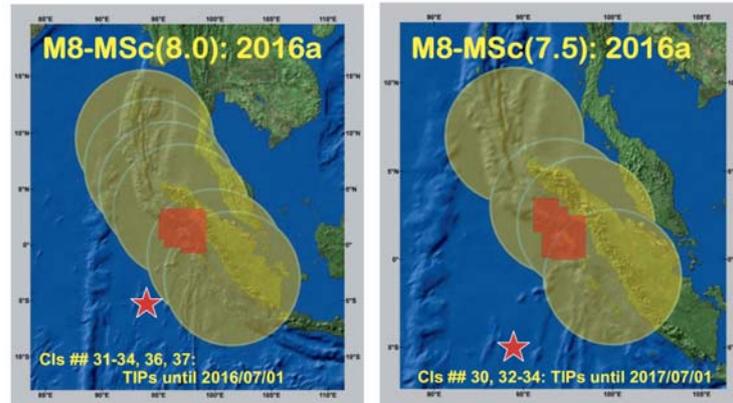


Рисунок 6. Эпицентр землетрясения 02.03.2016 (звездочка) и области тревоги (показаны желтым цветом), полученные с помощью алгоритма M8 (круги желтого цвета) для землетрясений с магнитудой $M \geq 8,0$ (слева) и $M \geq 7,5$ (справа). Уточнение области тревоги с помощью алгоритма MSc показано красным цветом.

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. 7 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* ;

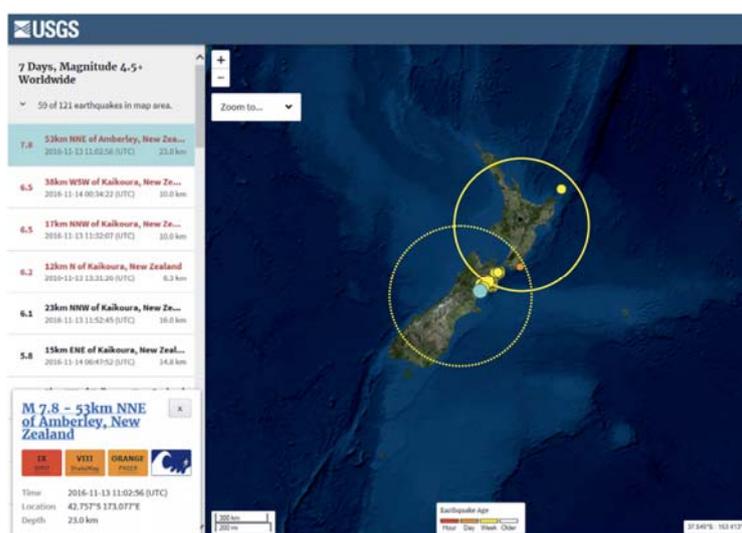


Рисунок 7. Эпицентры землетрясения 13.11.2016 (голубой круг) и его афтершоков (желтые круги) и границы зон тревоги (желтые окружности), которые могли бы быть получены с помощью алгоритма $M8$ для диапазона $M7.5+$ по данным на 01.07.2016.

Событие 08.12.2016, которое произошло на Соломоновых островах, формально является пропуском цели, поскольку диагностика тревоги в соответствующем круге на период с 2014 по 2018 годы ассоциирована алгоритмом $M8$ с землетрясением 6 февраля 2013 года в 76 км к западу от города Лата (Соломоновы острова). Следует отметить, что эта тревога уже подтверждалась ранее событием с $M = 7,6$ 12 апреля 2014 года.

В 2016 году выполнен анализ результатов этого многолетнего эксперимента за период до конца 2016 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 и сделаны доклады [29, 31].

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	25	17	11	32,84	16,62	0,03	0,12
1992-2015	23	15	9	29,80	14,78	0,05	0,38
<i>Диапазон M7,5+</i>							
1985-2015	78	41	17	28,54	9,30	< 0,01	0,07
1992-2015	66	31	11	23,16	8,33	< 0,01	1,99

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 2016 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 2016 г. не было диагностировано новых тревог. Землетрясение 30 января 2016 г. 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. диагностированы не были. Это является следствием искусственно введенной в 2009 г. неполноты используемого каталога ANSS для Европы. Результаты мониторинга доступны в сети интернет по адресу <http://rtptest.org/>. 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 сделан доклад [40].

В 2016 г. 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 и опубликованы в статье [9], по ним также сделаны доклады [38, 39].

Исследована возможность применения алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений M8 на территории Северного Кавказа и Прибайкалья, для которых имеющиеся каталоги землетрясений достаточно полны для магнитуд выше 2 и 2,5, соответственно, однако, их оперативно доступные версии имеют задержку порядка года. На рис. 8, который иллюстрирует представительство каталога землетрясений Прибайкалья, очевиден дефицит представительности событий с магнитудой ниже 2.8 в 2015 году. Показано, что для этих территорий возможен в режиме тестирования экспериментальный мониторинг сейсмичности с целью прогноза сильных землетрясений на базе регулярного комбинирования региональных данных, поступающих с задержкой, и оперативных глобальных каталогов.

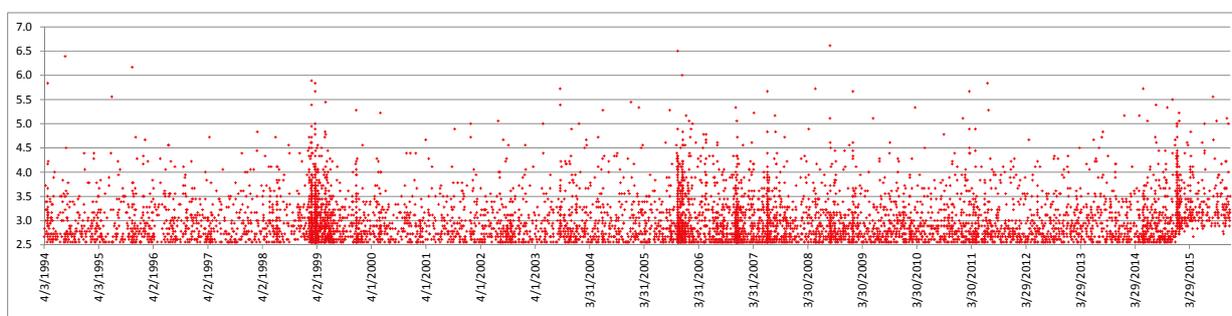


Рисунок 8. Представительность каталога землетрясений Прибайкалья: по горизонтальной оси отложено время, по вертикальной – магнитуда; красные точки соответствуют событиям из каталога.

2.2. Изучение сейсмичности и оценка 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], и по ним сделаны доклады [22-26, 44].

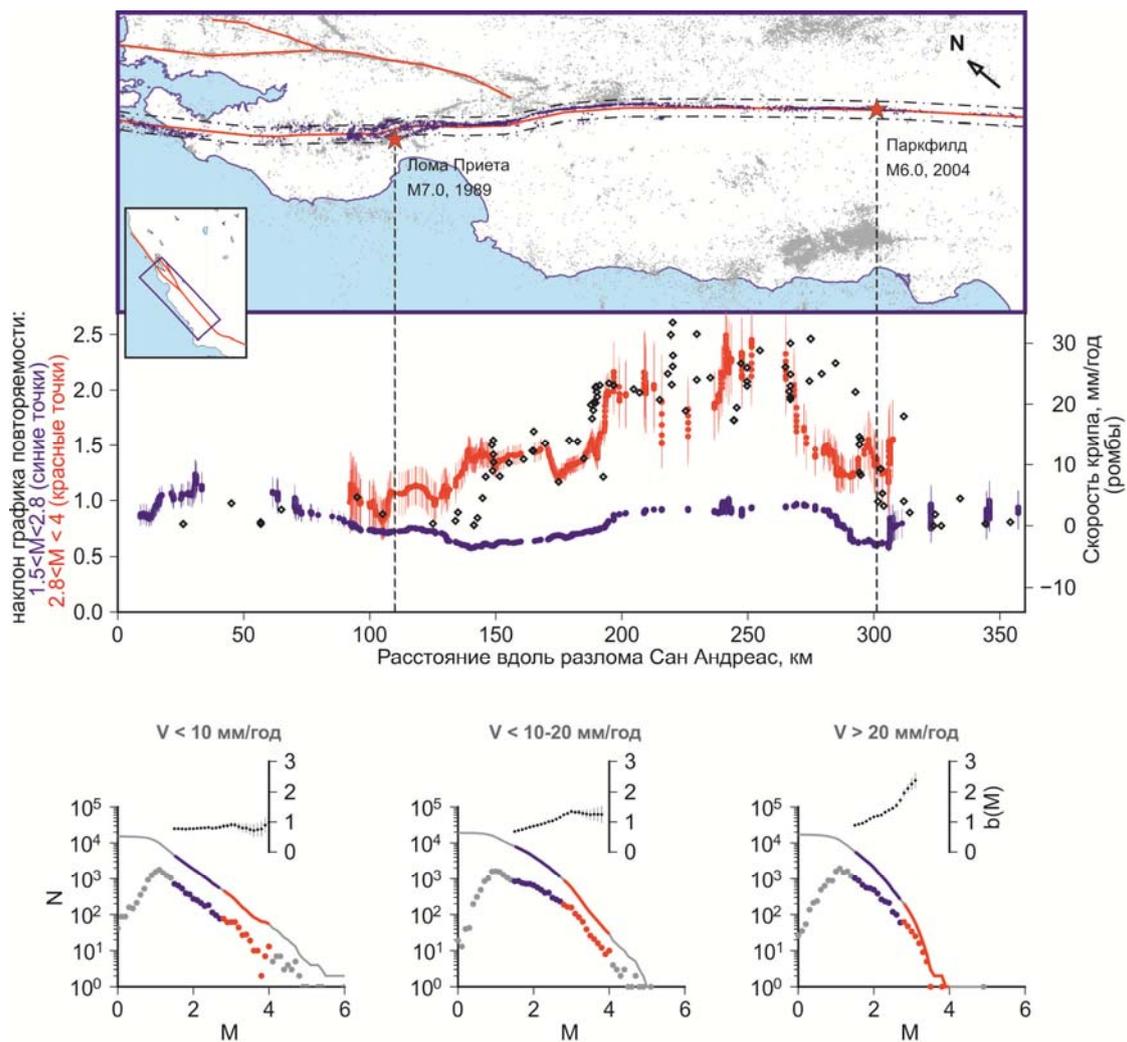
В 2016 г. продолжена разработка метода оценки динамического изменения сейсмической опасности по оперативным сейсмологическим данным на основе последовательного добавления в стационарную модель сейсмической опасности информации о различных предвестниках с помощью метода "Differential probability gain". Установлены условия, при которых в качестве результирующего повышающего/понижающего коэффициента может использоваться прямое произведение коэффициентов для каждого предвестника относительно исходной модели сейсмичности, а когда необходимо оценивание коэффициентов относительно комбинированной модели.

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 [12, 16-19, 41-43].

Построены карты изменяющейся сейсмической опасности отдельных регионов территории России, включая Большой Кавказ и Крым, на базе многомасштабного оценивания параметров сейсмичности в рамках Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ). 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. Проведено сравнение полученных карт сейсмической опасности с аналогичными

картами других исследователей, в частности, глобального проекта GSHAP и неопредетерминистской оценки NDSHA. Полученные результаты опубликованы в статье [7] и вошли в доклады [27, 28, 30, 32-35].

В 2016 г. продолжена работа по сравнению и оценке эффективности карт сейсмического районирования на основе вероятностного (GSHAP) и нео-детерминистского (NDSHA) подходов к оценке сейсмической опасности, а также полученных на базе многомасштабного оценивания параметров сейсмичности в рамках ОЗПЗ, обобщающего соотношение Гутенберга-Рихтера. По полученным результатам опубликована статья [8], и они вошли в доклады [27, 28, 30, 36, 37].



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

Рисунок 9. Сравнение наклона графика повторяемости со скоростью неупругих деформаций вдоль разлома Сан Андреас.

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. 9). По полученным результатам опубликована статья [11].

В сотрудничестве с Государственным геологическим музеем им. В.И.Вернадского РАН исследована современная геодинамика и сейсмичность главных горнопромышленных регионов 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 сырье 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 [13, 14].

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. 10), что подтвердило эффективность методологии распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. По полученным результатам сделаны доклады [15, 20, 21].

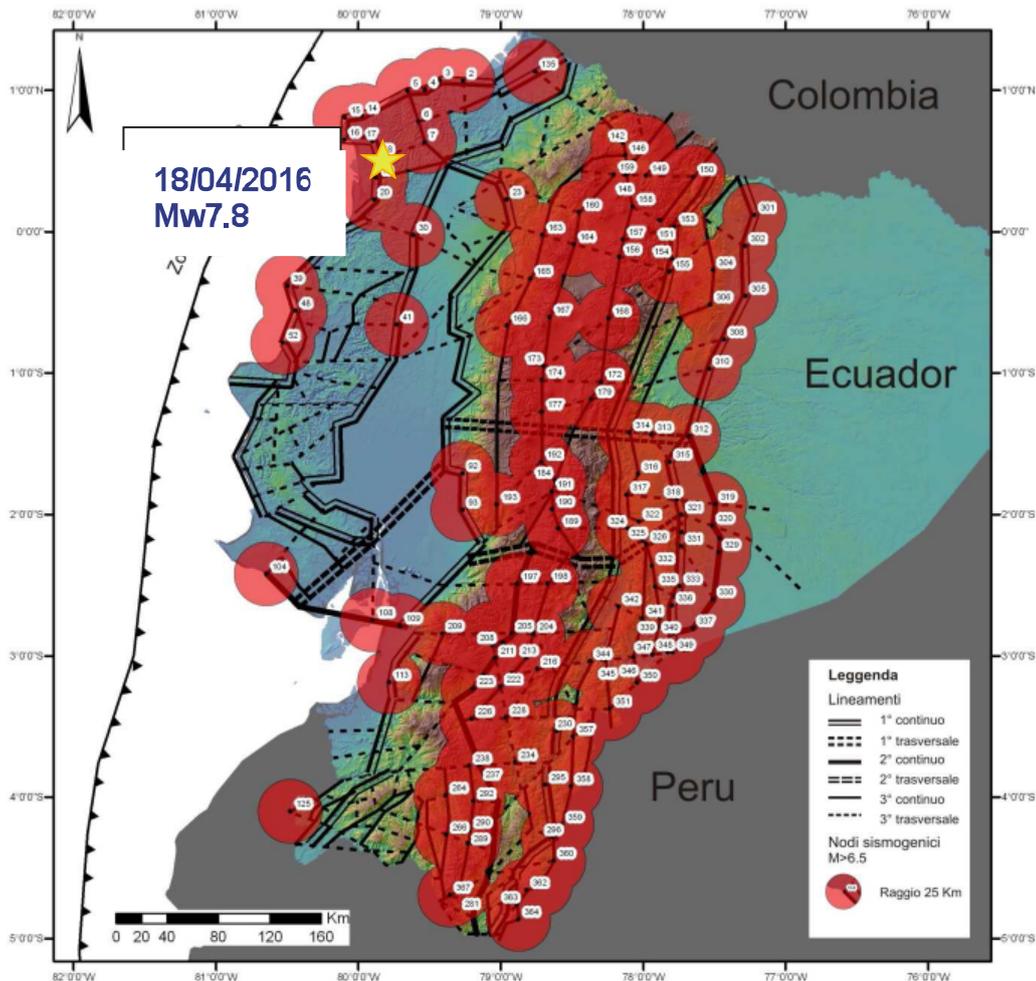


Рисунок 10. Схема морфоструктурного районирования Эквадора и распознанные сейсмоопасные пересечения линейментов для $M_{6.5+}$. Толстыми линиями показаны линейменты первого ранга, средними – второго ранга, тонкими – третьего ранга. Сплошные линии – продольные линейменты, прерывистые – поперечные линейменты. Кругами отмечены 25-километровые окрестности пересечений линейментов, отнесенные в результате распознавания к высокосейсмичным для $M_{6.5+}$. Звездочкой отмечен эпицентр Эквадорского землетрясения с $M = 7,8$ (18.04.2016).

2.3. Моделирование динамики блоковых структур

Выполнена серия численных экспериментов с разработанной ранее на основе региональной схемы морфоструктурного районирования блоковой моделью Гималаев. Сейсмичность, полученная в модели соответствует периоду порядка 30000 лет. Интегральные характеристики искусственного каталога землетрясений хорошо воспроизводят характеристики инструментально зарегистрированной сейсмичности. Выявлены сейсмические циклы продолжительностью 700-900 лет, которые подтверждаются историческими записями о значительных землетрясениях в течение последних 500 лет, а также палеосейсмическими исследованиями. Показана связь длительности сейсмического цикла с динамикой дефицита

проскальзывания. Численные эксперименты с различными вариантами описания тектонических движений выявили существенное влияние геодинамики микроплит Шиллонг и Ассам на сейсмичность Восточных Гималаев.

Разработана модификация модели динамики блоковой структуры и сейсмичности, в которой отражена нелинейная реология путем ведения степенной зависимости коэффициента проскальзывания от скорости относительно движения в плоскости разлома. Эта модификация модели опробована при моделировании геодинамики и сейсмичности Гималаев.

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). Показана возможность применения алгоритма М8 для среднесрочного прогноза сильных землетрясений на территории Северного Кавказа и Прибайкалья. Для развития теории прогноза землетрясений существенно изучение литосферы, как примера сложной динамической системы, в которой роль экстремальных событий играют сильные землетрясения. В этом отношении представляет интерес исследование экстремальных явлений в других сложных системах. Результаты такого исследования для нескольких типов сложных систем, включая социо-экономические системы, содержатся в статье [5]. Статья [6] содержит результаты тепловых экспериментов с воздушной массой, находящейся в изолированном объеме, которая демонстрирует поведение, имеющее классическую форму стационарного плюма. Такое поведение может быть универсальной чертой некоторых турбулентных плюмов в геофизических средах.

Разрабатываемые новые подходы к оценке сейсмической опасности (вероятностная многоместная оценка сейсмической опасности, использование оценок параметров сейсмичности в рамках Общего закона подобия для землетрясений, прогнозирование интенсивности афтершоков после сильных землетрясений, использование моделирования динамики блоковых структур для понимания связей между геодинамикой и сейсмичностью) имеют важное значение для сокращения ущерба от землетрясений и, соответственно, повышения защищенности общества от сейсмической опасности.

В области прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности большое значение имеет международное научное сотрудничество. Этому вопросу посвящена статья [3].

По результатам выполненных исследований опубликовано 11 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах и сделано 33 доклада на международных и российских научных конференциях.

4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

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. Gabriellov, 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.

Доклады на международных и российских научных конференциях

12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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)
17. 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
18. 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.
19. Baranov,S., and P.Shebalin, Forecasting area of strong aftershock occurrence. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-6220, 2016. EGU General Assembly 2016.
20. 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).
21. 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.
 22. 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.
 23. Ismail-Zadeh, A.T. Geohazards: Basic science for disaster risk reduction. In Abstracts of the 35th International Geological Congress, 27 August – 4 September 2016, Cape Town, South Africa.
 24. 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).
 25. 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).
 26. 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.
 27. Kossobokov, V. Earthquake hazard assessment: Basics of evaluation. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-7695, 2016. EGU General Assembly 2016.
 28. 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.
 29. 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).
 30. 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).
 31. 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.

32. 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.
33. 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).
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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).
40. 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).
41. 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.
42. 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).

43. 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.
44. 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.