

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 115080610013

Инв. № 2015-2



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

член-корреспондент РАН

А.А.Соловьев

«20» января 2016 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ  
РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА  
СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ  
(промежуточный, за 2016 год)

Заведующий лабораторией № 2  
канд. физ.-мат. наук

Б.Г. Букчин

Москва 2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,  
зав. лаб.  
канд. физ.-мат. наук



Б.Г. Букчин

Ответственные исполнители:

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



В.В. Гравиров

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



К.В. Кислов

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



А. Ф. Кушнир

ст. науч. сотр.



А.В. Ландер

ст. науч. сотр.  
канд. техн. наук



А.С. Фомочкина

## РЕФЕРАТ

Отчет 22 с., 8 рис., 15 источников

**ФОКАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ТЕНЗОР ПЛОТНОСТИ МОМЕНТА, СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ, ЦУНАМИГЕННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ ГРУППА, СИСТЕМА РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ**

Исследования, проведенные по теме в 2016 году, включали: построение моделей очагов современных землетрясений; анализ устойчивости определения параметров очагов землетрясений по спектрам поверхностных волн к ошибкам их локализации; оценку ошибок определения параметров землетрясения по записям поверхностных волн; исследование сейсмичности и цунамигенного потенциала Черного моря; исследование сейсмичности и построение моделей очагов Курило-Камчатской дуги; участие в составлении листа Геологической Карты РФ; теоретическое исследование точности локации слабых микросейсмических событий по данным поверхностных сейсмических групп; разработка алгоритмов и методик детектирования Р-волны на фоне шума высокого уровня для целей раннего предупреждения; определение возможности детектирования слабых сейсмических событий с использованием искусственных нейронных сетей; разработка методов организации системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов; продолжение формирования унифицированной библиотеки сейсмических шумов сильных источников антропогенного шума.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Построение модели очага Непальского землетрясения 2015 года	7
2.2. Детальное изучение двух Калининградских землетрясений 2004 года	11
2.3. Анализ устойчивости определения параметров очагов землетрясений по спектрам поверхностных волн к ошибкам их выделения на сейсмограммах	12
2.4. Оценка ошибок определения параметров землетрясения по записям поверхностных волн	13
2.5. Исследование сейсмичности и цунамигенного потенциала Черного моря	13
2.6. Сейсмичность и модели очагов Курило-Камчатской дуги	13
2.7. Участие в составлении листа Геологической Карты РФ	17
2.8. Теоретическое исследование точности локации слабых микросейсмических событий по данным поверхностных сейсмических групп	18
2.9. Разработка алгоритмов и методик детектирования Р-волны на фоне шума высокого уровня для целей раннего предупреждения	18
2.10. Определение возможности детектирования слабых сейсмических событий с использованием искусственных нейронных сетей	18
2.11. Разработка методов системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов	19
2.12. Продолжение формирования унифицированной библиотеки сейсмических шумов сильных источников антропогенного шума	19
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	21

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования по теме выполнялись в рамках направления фундаментальных исследований 136 "Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий" Раздела IX "Науки о Земле" Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

Наиболее надежные измерения характеристик разрывных деформаций, возникающих в очаговых зонах землетрясений, основаны на интерпретации сейсмических волн, зарегистрированных станциями мировой сейсмической сети. Наиболее интенсивные смещения земной поверхности, регистрируемые сейсмическими станциями, наблюдаются в поверхностных волнах. В рамках исследований по теме из анализа широкополосных записей поверхностных волн были построены параметрические модели Непальского землетрясения 2015 года и двух сильнейших за последние 300 лет землетрясений, произошедших в Калининградской области 21 сентября 2004 года с интервалом в два с половиной часа.

Одним из основных принципов, на которых базируются разработанные в ИТПЗ РАН методы определения характеристик очагов землетрясений, является выделение на сейсмических записях различных волн и их последующая совместная инверсия. Используемая в настоящее время процедура локализации отдельных волн носит интерактивный характер и требует значительных затрат времени. В связи с этим становится актуальным создание автоматической процедуры грубой фильтрации поверхностных волн в спектрально-временной области, предназначенной для использования при быстром предварительном определении параметров очага землетрясения по телесеismicким записям поверхностных волн. В отчетный период была продолжена разработка такой процедуры.

Разработана предварительная версия алгоритма оценки ошибок определения фокального механизма и глубины землетрясения, основанного на методе "Джекнайф". Произведено тестирование алгоритма на записях реальных землетрясений.

Подготовлены к государственной регистрации программа анализа неоднозначности определения тензора момента мелкофокусного землетрясения по длиннопериодным записям поверхностных волн [14] и программа полуавтоматической калибровки сейсмических датчиков [15].

По данным за 1900-2015 гг. рассчитана цифровая модель (карта) параметра сейсмической активности для всего Черноморского региона. Для построения карты разработана методика вычисления параметра активности, основанная на методе ядерного сглаживания.

Гипоцентры цунамигенных землетрясений рассматриваемого региона пространственно и генетически разделяются на три области: зону субдукции Тихоокеанской плиты, внешний океанический вал (юго-восточнее океанического желоба) и прилегающие к Курильским о-вам (задуговые)

акватории Охотского моря. Все эти области, хотя и в разной степени, потенциально цунамиопасны. Для каждой из них построены модели характерных очагов землетрясений, для использования в расчетах модельных цунами.

В рамках совместных работ с КАМЧАТНЕДРА и ВСЕГЕИ им. А.П.Карпинского собран сейсмологический материал и написан раздел "Сейсмичность", составлены соответствующие схемы к Листу Р-59 Геологической Карты РФ масштаба 1:1000000 Третьего Поколения.

Рассмотрены свойства применяемого для локации микро-землетрясений метода адаптивного максимального правдоподобия в условиях, когда помехи на выходах датчиков содержат сильную когерентную составляющую искусственного происхождения.

Были продолжены работы по уточнению блок-схемы программы детектирования Р-волны при повышенном уровне сейсмических шумов разнообразной природы.

Были рассмотрены новые способы детектирования слабых сейсмических событий с использованием искусственных нейронных сетей.

Проводилась разработка методов организации системы раннего предупреждения, направленная на уменьшение материальных и людских потерь от землетрясений.

Проведены работы по длительной опытной записи сейсмического шума в осенне-зимний период с одновременной фиксацией метеорологических данных.

Научная новизна выполняемых исследований состоит в разработке и применении новых оригинальных методов интерпретации сейсмических записей.

Работы по теме включают:

построение моделей очагов современных землетрясений; анализ устойчивости определения параметров очагов землетрясений по спектрам поверхностных волн к ошибкам их локализациям; оценка ошибок определения параметров землетрясения по записям поверхностных волн; исследование сейсмичности и цунамигенного потенциала Черного моря; исследование сейсмичности и построение моделей очагов землетрясений Курило-Камчатской дуги; теоретическое исследование точности локации слабых микросейсмических событий по данным поверхностных сейсмических групп; разработка алгоритмов и методик детектирования Р-волны на фоне шума высокого уровня для целей раннего предупреждения; определение возможности детектирования слабых сейсмических событий с использованием искусственных нейронных сетей; разработка методов организации системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов; формирование унифицированной библиотеки сильных антропогенных сейсмических шумов.

Создаваемые методики и программы могут быть использованы в сейсмических центрах при рутинном определении параметров очагов землетрясений, для проверки адекватности решений, публикуемых в

Глобальном СМТ каталоге и для повышения точности работы сейсмических сетей России.

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Построение модели очага Непальского землетрясения 2015 года

Смещения в длиннопериодных поверхностных волнах не зависят от мелкомасштабных неоднородностей в Земле, что приводит к повышению устойчивости при определении по ним очаговых параметров. Каждая из таких волн является результатом свертки соответствующей функции Грина, определяемой строением среды вдоль пути распространения волны, и тензора плотности сейсмического момента, характеризующего неупругие процессы, происходящие в очаге землетрясения. При расчете функции Грина мы используем модель среды со слабой горизонтальной неоднородностью. Поверхностно-волновая функция Грина для такой модели зависит от параметров среды в окрестности очага и в окрестности точки регистрации, от средней вдоль пути распространения фазовой скорости волны и от ее геометрического расхождения. При этом амплитудный спектр смещений в поверхностной волне не зависит от средней фазовой скорости и на него не влияют ошибки в определении эпицентра события. Скорости поверхностных волн в реальной Земле известны с достаточной точностью лишь для периодов превышающих 100 - 150 с. Поэтому, как правило, мы используем для определения параметров источника лишь амплитудные спектры поверхностных волн, включая в рассмотрение их фазовые спектры лишь на очень длинных периодах.

Предполагаем, что производная по времени тензора плотности сейсмического момента, описывающая неупругие процессы в очаге землетрясения, может быть представлена в виде произведения неотрицательной скалярной функции  $f(\mathbf{x}, t)$  и нормированного тензора момента  $\mathbf{m}$ . Поместим начало системы координат в точку пространственного центра  $\mathbf{q}_c$  и будем отсчитывать время от момента, совпадающего с временным центроидом  $\tau_c$ , т.е. полагаем  $\mathbf{q}_c = \mathbf{0}$  и  $\tau_c = 0$ . Тогда первые моменты функции  $f(\mathbf{x}, t)$  относительно начала системы координат  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$  и начала отсчета времени  $t = 0$  равны нулю. При этих условиях спектры поверхностных волн на периодах, достаточно длинных по сравнению со временем действия источника, можно рассчитать через тензор момента источника, глубину центра и вторые моменты функции  $f(\mathbf{x}, t)$ . Ограничиваясь рассмотрением плоского сдвигового источника, можно выразить вторые моменты функции  $f(\mathbf{x}, t)$  через 6 следующих параметров:  $\Delta t$  – интегральную оценку продолжительности действия источника,  $l_{\max}$  – интегральную оценку максимального среднего размера очага (длину большой оси),  $\phi_l$  – угол между направлением большой оси и направлением простирания,  $l_{\min}$  – интегральную оценку минимального среднего размера очага (длину малой оси),  $v$  – абсолютное значение средней скорости  $v$

мгновенного пространственного центроида и  $\varphi_v$  – угол между направлением  $v$  и направлением простирания. Эти шесть параметров, описывающих форму очага и его развитие во времени, мы определяем по амплитудным спектрам поверхностных волн. Если все характеристики среды, глубина эквивалентного мгновенного точечного источника и его тензор сейсмического момента известны, а также одна из нодальных плоскостей идентифицирована как плоскость разлома, то для любой комбинации значений определяемых шести параметров могут быть рассчитаны амплитудные спектры поверхностных волн для всех точек регистрации. Сравнение рассчитанных значений спектров с наблюдаемыми дает значение нормированной функции невязки (различия) амплитудных спектров  $\varepsilon(\Delta t, l_{\max}, \varphi_l, l_{\min}, v, \varphi_v)$  для каждой комбинации значений искомых параметров. Оптимальные значения параметров, минимизирующие  $\varepsilon$ , мы принимаем за оценки этих параметров. Мы их ищем полным перебором на сетке в 6-мерном параметрическом пространстве, рассчитывая для каждого из них частную функцию невязки.

Анализируя самую длиннопериодную часть спектра телесеизмических поверхностных волн, мы аппроксимируем процесс в очаге эквивалентным мгновенным точечным двойным диполем и определяем его глубину, сейсмический момент и фокальный механизм. Переходя затем к рассмотрению более коротких периодов, мы описываем очаг в приближении вторых моментов тензора плотности момента и получаем интегральные оценки протяженности, ориентации очага и его развития во времени.

Для оценки сейсмического момента, фокального механизма и глубины наилучшего двойного диполя мы использовали амплитудные спектры основных мод Лява и Рэлея в спектральной полосе от 200 до 250 секунд. С помощью программ спектрально-временного анализа и плавающей фильтрации были отобраны 15 записей волн Лява и 16 записей волн Рэлея, зарегистрированных станциями мировых сетей IRIS и GEOSCOPE. Для фокального механизма были получены следующие значения углов:  $102^\circ$  для угла простирания,  $84^\circ$  для угла падения и  $90^\circ$  для угла подвижки. Фокальный механизм представлен на рис. 1. Для глубины наилучшего точечного источника было получено значение 12 км, а для сейсмического момента значение  $0.8 \cdot 10^{21}$  Н·м, которое соответствует значению магнитуды  $M_w = 7.9$ .

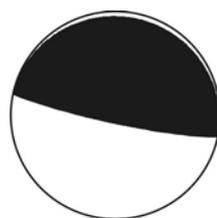


Рисунок 1. Фокальный механизм землетрясения.

Для вычисления интегральных характеристик очагового процесса, определяемых вторыми моментами, мы фиксировали фокальный механизм,

полученный в приближении мгновенного точечного источника. Субгоризонтальная нодальная плоскость, погружающаяся на северо-северо-восток, была принята за плоскость разлома. Определение вторых моментов проводилось по спектрам в полосе периодов от 80 до 120 секунд с использованием 13 записей волн Лява и 16 записей волн Рэлея. Частные функции невязки для интегральных характеристик очагового процесса приведены на рис. 2. Интегральная оценка времени действия источника равна 15 с, интегральная оценка длины большой оси очаговой области равна 60 км. Длина малой оси плохо разрешена в пределах от 0 до 30 км. Для оценки средней скорости мгновенного центроида получено значение порядка 3 км/с. Для углов, характеризующих направления большой оси очага и скорости центроида получены соответственно оценки  $0^\circ$  и  $180^\circ$ .

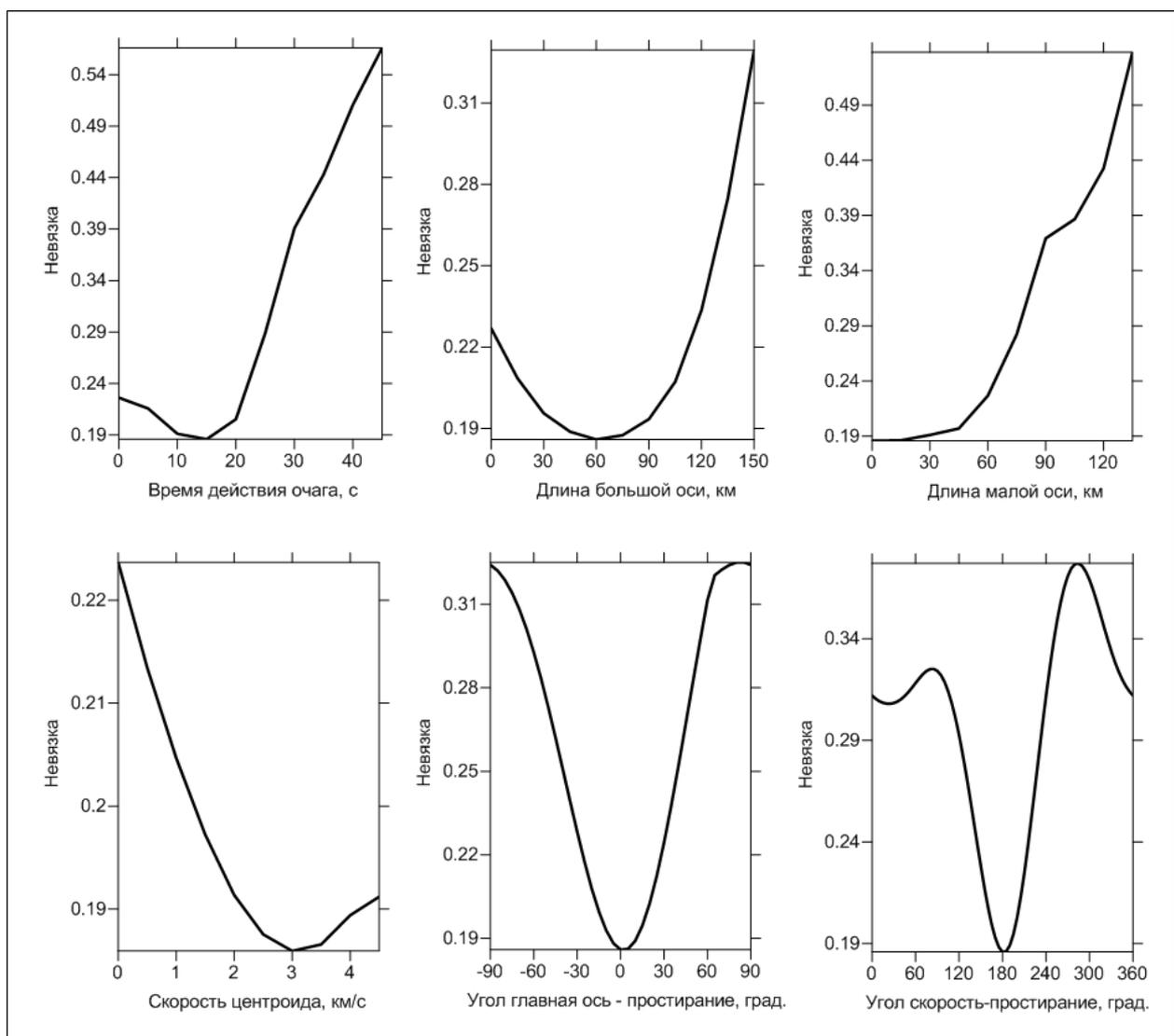


Рисунок 2. Частные функции невязки для параметров, определяемых вторыми моментами.

Соотношение между интегральными оценками времени действия источника и размеров очаговой области и их реальными значениями

проиллюстрируем на примере, когда  $f(x,t)$  - функция Гаусса. В качестве реального пространственного размера и реального времени действия источника примем значения, соответствующие 99% доверительному уровню. Тогда окажется, что реальное время действия источника превышает его интегральную оценку в 2.5 раза, а реальные размеры главных осей очага в случае плоского двумерного источника превышают их интегральные оценки в 3 раза. Умножая интегральную оценку длительности очагового процесса на 2.5, получаем для времени действия источника 38 с. Умножая оценку длины большой оси очага на 3, получаем для максимальной протяженности источника значение 180 км. На рис. 3 представлена схема модели очага рассматриваемого землетрясения. Приведенный на схеме эллипс характеризует форму очаговой области, ее протяженность и ориентацию. Его оси представляют собой большую и малую оси соответствующей очаговой области.

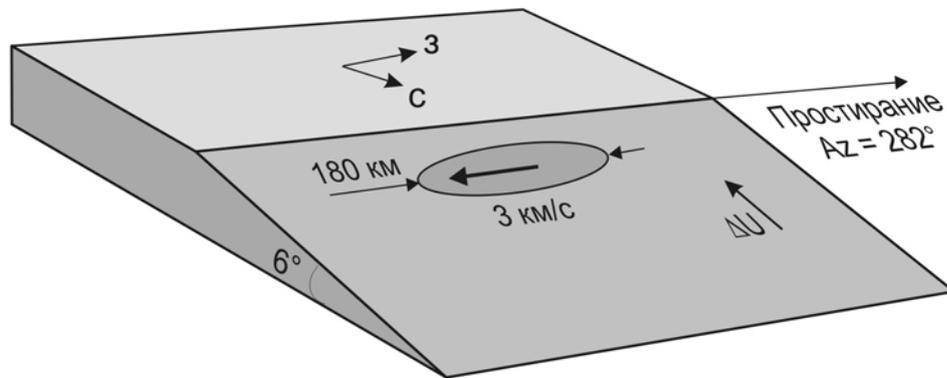


Рисунок 3. Схема модели Непальского землетрясения.

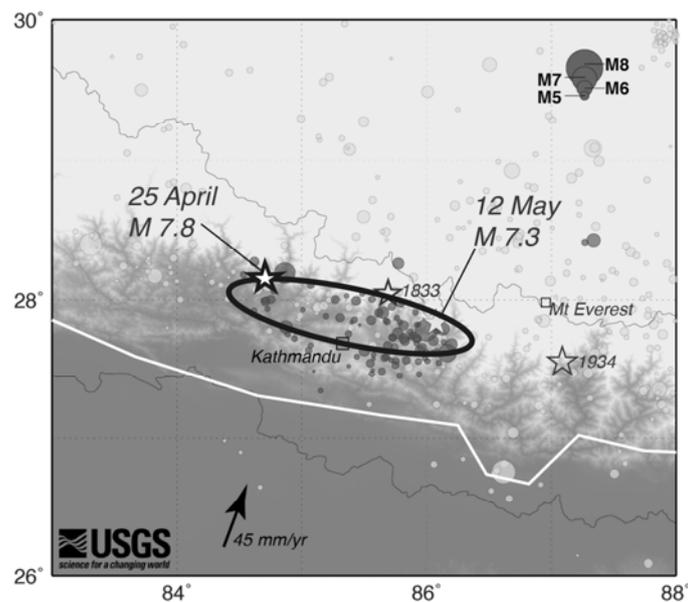


Рисунок 4. Сравнение распределения афтершоков землетрясения с оценками протяженности и ориентации очаговой области.

Сравнение оценок, характеризующих пространственную конфигурацию очаговой области, с распределением афтершоков землетрясения иллюстрируется рис. 4. Как видно из рисунка, эллипс, характеризующий протяженность очаговой области и ее ориентацию, вполне согласуются с распределением афтершоков. Заметим также, что расположение эпицентра землетрясения относительно облака афтершоков подтверждает нашу оценку направления распространения разрыва вдоль оси простирания с запада на восток.

Результаты исследования представлены в докладах [7, 11].

## 2.2. Детальное изучение двух Калининградских землетрясений 2004 года

21 сентября 2004 года в Калининградской области произошло самое сильное за последние 300 лет сейсмическое событие. Оно состояло из нескольких толчков, два из которых (в 11:05 и в 13:32 по местному времени) были наиболее сильными. Это событие было изучено совместно с Санкт-Петербургскими геологами. Параметры землетрясений определялись по результатам совместного анализа амплитудных спектров поверхностных волн и знаков первых вступлений. Для этого были использованы:

семь записей основных мод волн Лява и девять записей основных мод волн Рэлея в диапазоне периодов от 30 до 60 с для первого толчка;

восемь записей основных мод волн Лява и десять записей основных мод волн Рэлея в диапазоне периодов от 40 до 80 с для второго толчка.

Записи были получены с удаленных станций SUMG, KBS, KEV, YSS, ULN, СНТО, GNI, ISP, PSZ, STU, IBBN, KONO, PAB, расположенных вокруг эпицентральной зоны. Поверхностные волны выделялись на записях с помощью программы спектрально-временного анализа. Наблюдаемые знаки первых вступлений были подвергнуты сглаживанию.

Полученные оценки очаговых параметров приведены на рис. 5. В качестве оценки глубины источника принято значение, при котором совместная невязка (различие между наблюдаемыми и теоретическими значениями) амплитудных спектров поверхностных волн и знаков первых вступлений достигает минимального значения. Оценка глубины очага равна 12 км для первого толчка и 14 км для второго. Сейсмические моменты равны  $0,65 \times 10^{16}$  Н·м (что соответствует значению моментной магнитуды  $M_W = 4,5$ ) и  $0,13 \times 10^{17}$  Н·м ( $M_W = 4,7$ ).

Учитывая общую геодинамическую обстановку растяжения, следует предположить, что движение произошло по разрыву с азимутом простирания  $20^\circ - 27^\circ$  при падении его плоскости на юго-восток под углом  $60^\circ - 61^\circ$ . Это полностью совпадает с результатами моделирования, проведенного ранее.

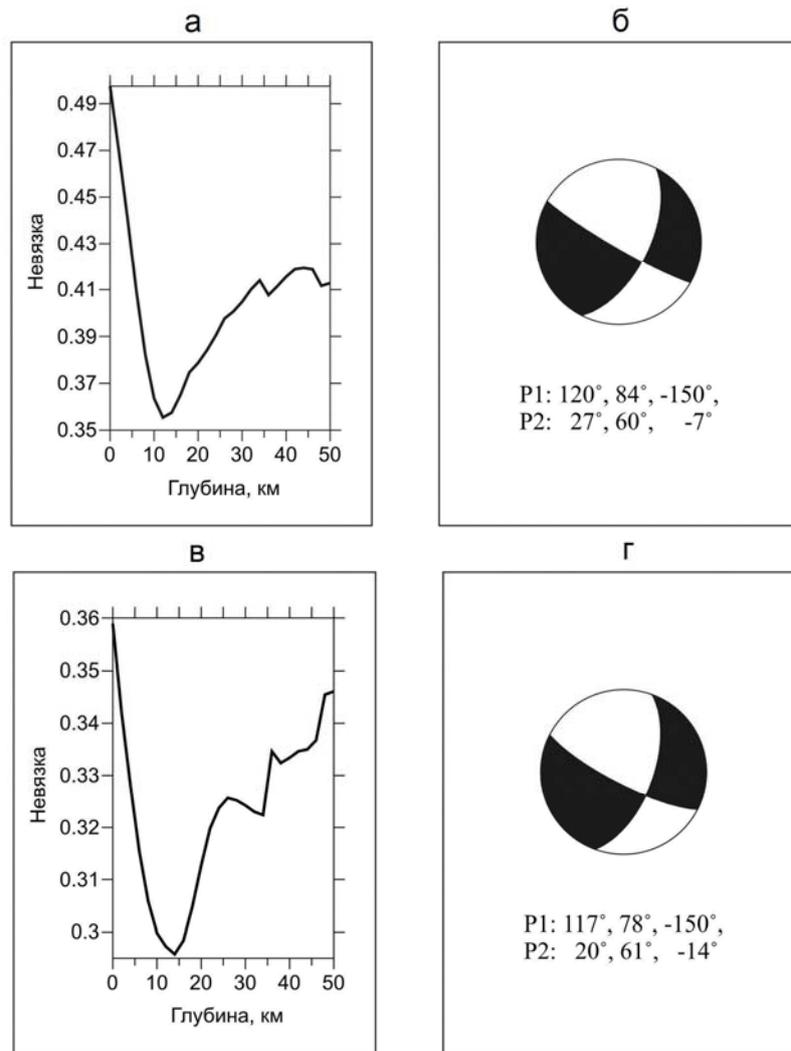


Рисунок 5. Результаты определения очаговых параметров землетрясений, произошедших 24 сентября 2004 г. в 11:05 (а, б) и в 13:32 (в, г): а, в - частная функция невязки для глубины источника; б, г - фокальный механизм наилучшего двойного диполя;  $P1$  и  $P2$  - нодальные плоскости.

Результаты исследования представлены в статье [1] и в докладе [6].

### 2.3. Анализ устойчивости определения параметров очагов землетрясений по спектрам поверхностных волн к ошибкам их выделения на сейсмограммах

Продолжена разработка процедуры автоматической грубой фильтрации поверхностных волн в спектрально-временной области. Процедура предназначена для использования при быстром предварительном определении параметров очага землетрясения по телесеismicким записям поверхностных волн.

## 2.4. Оценка ошибок определения параметров землетрясения по записям поверхностных волн

Разработана предварительная версия алгоритма оценки ошибок определения фокального механизма и глубины землетрясения, основанного на методе "Джекнайф". Произведено тестирование алгоритма на записях сильнейшего афтершока ( $M_w = 8.4$ ) японского землетрясения в Тохоку, произошедшего 11 марта 2011 года, и землетрясения в Непале ( $M_w = 7.9$ ), произошедшего 25 апреля 2015 года.

## 2.5. Исследование сейсмичности и цунамигенного потенциала Черного моря

Пространственные распределения характеристик сейсмичности: параметров закона Гутенберга-Рихтера, периодов повторяемости и характерных механизмов землетрясений - лежат в основе расчета вероятностей высот цунами для различных участков побережий.

В 2015 г. была разработана серия моделей типичных сильных землетрясений для всей акватории Черного моря. При этом упор был сделан на построение типичных механизмов землетрясений, а при выборе магнитуд использовались только оценки максимальных событий. За отчетный период вопрос о географическом распределении типичных магнитуд землетрясений исследован детальнее.

По данным за 1900-2015 гг. рассчитана цифровая модель (карта) параметра сейсмической активности для всего Черноморского региона (рис.6). Для построения карты разработана методика вычисления параметра активности, не требующая предварительного деления региона на условно-однородные области. Методика основана на методе ядерного сглаживания. В данной реализации параметр активности пересчитан на магнитуду  $M=5.5$  при постоянном для всего региона наклоне графика повторяемости  $b=0.9$ . Подготовлены компьютерные программы для использования данной цифровой карты - автоматического получения параметра сейсмической активности для любой географической точки региона.

Результаты исследования представлены в докладе [8].

## 2.6. Сейсмичность и модели очагов Курило-Камчатской дуги

Решаемая задача - построение для потенциально опасных областей характерных модельных очагов землетрясений, для использования в расчетах модельных цунами.

Гипоцентры цунамигенных землетрясений дуги пространственно и генетически разделяются на три области (рис. 7а): зону субдукции Тихоокеанской плиты, внешний океанический вал (юго-восточнее океанического желоба) и прилегающие к Курильским о-вам (задуговые) акватории Охотского моря. Все эти области, хотя и в разной степени, потенциально цунамиопасны.

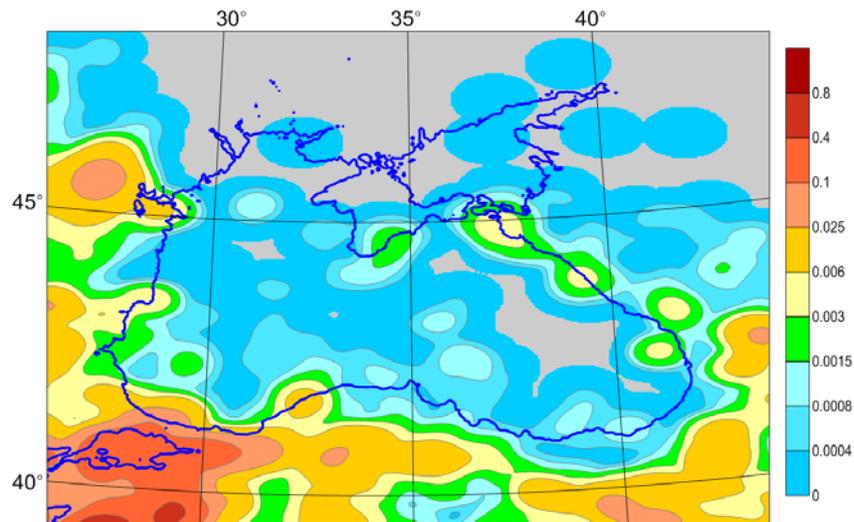


Рисунок 6. Схема географического распределения параметра сейсмической активности (по приведенной магнитуде  $M=5.5$ ) Черноморского региона. Шкала активности дана в относительных единицах (при построении рисунка соответствующая цифровая карта нормирована на максимальное значения).

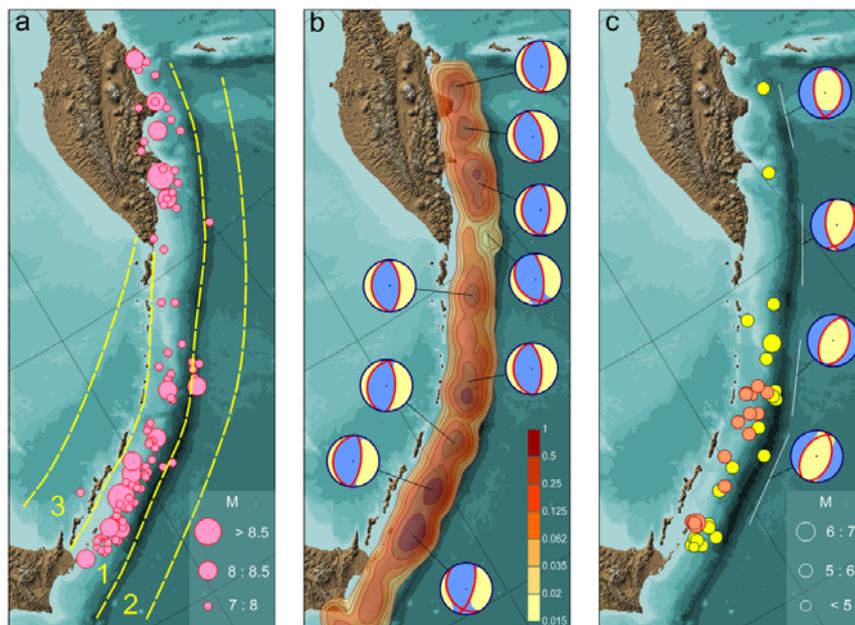


Рисунок 7. Сейсмичность и механизмы землетрясений Курило-Камчатской дуги: **a** - эпицентры сильнейших землетрясений за период 1904-2014 гг. (желтым пунктиром и номерами показано используемое в тексте деление региона на зоны); **b** - карта сейсмической активности области пологого залегания сейсмофокальной зоны и диаграммы типичных тензоров сейсмического момента для землетрясений этой области; **c** - эпицентры "нетипичных" землетрясений (желтые кружки - сдвиги, оранжевые - вертикальные подвижки) и средние тензоры сейсмического момента океанического вала.

*Пологий участок зоны субдукции (зона 1 на рис. 7а).* Подавляющее число землетрясений региона, в том числе и сильнейших, происходит в Курило-Камчатской зоне субдукции. Непосредственно к желобу прилегает пологий участок зоны шириной 100-120 км, падающий от океана под дугу под углами от 15° на северо-востоке, в районе Кроноцкого п-ова Камчатки, до 25° на Южных Курильских о-вах. Северо-Западнее сейсмофокальная зона резко изгибается вниз и падает под Охотское Море под углами от 55° на севере до 35° на юго-западе. Глубина области изгиба составляет 40-50 км. Землетрясения, происходящие за изгибом (северо-западнее) слишком глубоки для порождения цунами. Это накладывает ограничение на возможную ширину очаговой поверхности сильнейших Курило-Камчатских цунамигенных землетрясений значениями 100-130 км. Сильные землетрясения происходят не только вдоль границы пододвигающейся плиты, но также и в висячем крыле зоны. Соответствующие разрывы могут достигать берега. При построении моделей очагов мы предполагали, что потенциально цунамигенные землетрясения зоны 1 могут возникать во всем объеме, располагающемся под восточным Курило-Камчатским шельфом и континентальным склоном на глубинах до 30-50 км.

Рис. 7а,б демонстрируют распределение сильнейших землетрясений с  $M \geq 7$  вдоль Курило-Камчатской дуги. Статистика по зоне 1 за весь период наблюдений:  $M \geq 7$  - 91 землетрясение,  $M \geq 7.5$  - 29,  $M \geq 8$  - 15,  $M \geq 8.5$  - 3,  $M \geq 9$  - 1 (1952 г.).

Пространственное распределение событий не равномерно. На рис.7б приведена карта изолиний сейсмической активности по приведенной магнитуде 6. В районе южного окончания Камчатки активность примерно на порядок ниже максимальных по дуге значений. Однако, при имеющейся статистике и продолжительности наблюдений мы не можем утверждать, имеет ли здесь место неоднородность сейсмического режима. При построении моделей мы использовали для всей зоны 1 максимальное значение  $M = 9$ . Другой важнейший параметр модели - механизм разрыва. На рис. 7б приведены диаграммы характерных тензоров сейсмического момента для различных участков зоны 1, полученных путем локального пространственного осреднения данных каталога Global CMT за 1976-2014 гг. Для большинства районов Камчатки, Северных и Средних Курил это почти чистые взбросы с пологой плоскостью, погружающейся под дугу и простиранием близким к последней, что хорошо соответствует субдукционной схеме. Значимая сдвиговая компонента проявляется в механизмах землетрясений только в районе Малой Курильской дуги. Мы учли перечисленные закономерности пространственного распределения механизмов в моделях меньших магнитуд: 8 и, частично, 8.5. Для модельных механизмов крупнейших событий Южных Курил с  $M = 9$  принято простирание вдоль дуги, и лишь в самый южный механизм введена небольшая правосдвиговая компонента.

Отдельно изучен вопрос о присутствии в зоне 1 "нетипичных" событий. В качестве нетипичных выбраны два типа механизмов: вертикальные подвижки по вертикальным разломам ортогональным дуге и сдвиги по вертикальным плоскостям любого простирания. Каталог Global CMT для зоны 1 Курило-Камчатской дуги включает на середину сентября 2014 г. 1073 механизма. Из них "нетипичным" требованиям удовлетворяет всего 38 событий (~4%): 22 сдвига и 16 вертикальных подвижек с максимальной магнитудой 6.5 (рис.7с). Таким образом, землетрясения, которые могут отражать движения по поперечным к дуге структурам, происходят очень редко (в среднем раз в год), и являются относительно слабыми. Нетипичные события распределены вдоль дуги весьма неравномерно. Большинство из них относится к району Южных и Средних Курил, причем секущие дугу вертикальные подвижки севернее вообще не встречаются. Возможно, это связано с переходом, при движении с севера на юг, от нормальной к косой субдукции. При построении соответствующих модельных механизмов использовался реальный тензор сейсмического момента ближайшего нетипичного землетрясения при модельной магнитуде  $M = 7.8$ .

*Океанический вал (зона 2 на рис. 7а).* Землетрясения внешнего океанического вала связаны с вертикальным изгибом Тихоокеанской плиты перед погружением в зону субдукции. За столетие инструментальных наблюдений в зоне 2 зафиксировано всего 9 землетрясений с  $M \geq 7$ , и общий уровень сейсмической активности примерно на порядок ниже, чем в на пологом участке зоны субдукции. Однако сильнейшее из землетрясений зоны океанического вала Симуширское 2007 г. с  $M_w = 8.1$  породило трансокеанское цунами. На всем протяжении океанического вала мы построили два ряда модельных очагов, соответствующих магнитудам 8.5 и 8.0.

Для большинства землетрясений океанического вала характерен сбросовый механизм по плоскостям субпараллельным простиранию желоба (рис. 7с). Выбор одной из двух плоскостей механизма в данном случае не очевиден. Ориентируясь на описания рельефа и модели развития юго-восточного склона желоба, мы использовали здесь для модельных очагов в основном плоскости подвижки, падающие под океан (примерно на юго-восток). Только в северной части вала, в районе поднятия Обручева, построены разные модели с обоими направлениями падения.

*Задуговые акватории Охотского моря (зона 3 на рис. 7а).* В тылу дуги располагается много эпицентров землетрясений с  $M \geq 7$ , однако все они произошли в зоне субдукции на глубинах больше 100 км, исключающих возникновение цунами. В южной части Охотского моря вдоль Курильской дуги за время инструментальных наблюдений зафиксировано более тысячи мелкофокусных событий меньших магнитуд. Сильнейшее из них произошло в 1962 г. вблизи (западнее) острова Итуруп и имело магнитуду 6.8 - 7. В результате, как и в других районах с подобным уровнем сейсмичности, для модельных очагов здесь была выбрана магнитуда 8.

Единичные определенные механизмы задуговых курильских землетрясений достаточно противоречивы. При выборе типа модельных подвижек мы использовали тектоническую модель косого столкновения Южно-Курильского блока с Хоккайдо.

*Модели очагов.* На рис. 8 приведены модели очагов, построенные для Курило-Камчатской дуги, Охотского и Берингова морей, океанического вала западной части Алеутского желоба (всего 114 моделей). На карте каждый очаг спроектирован на дневную поверхность и изображен в соответствующем масштабе (прямоугольники - пологие разрывы, отрезки - крутые). Цветом отмечены очаги разных магнитуд. Все модели очагов представлены в цифровом виде и могут непосредственно использоваться для расчетов модельных цунами.

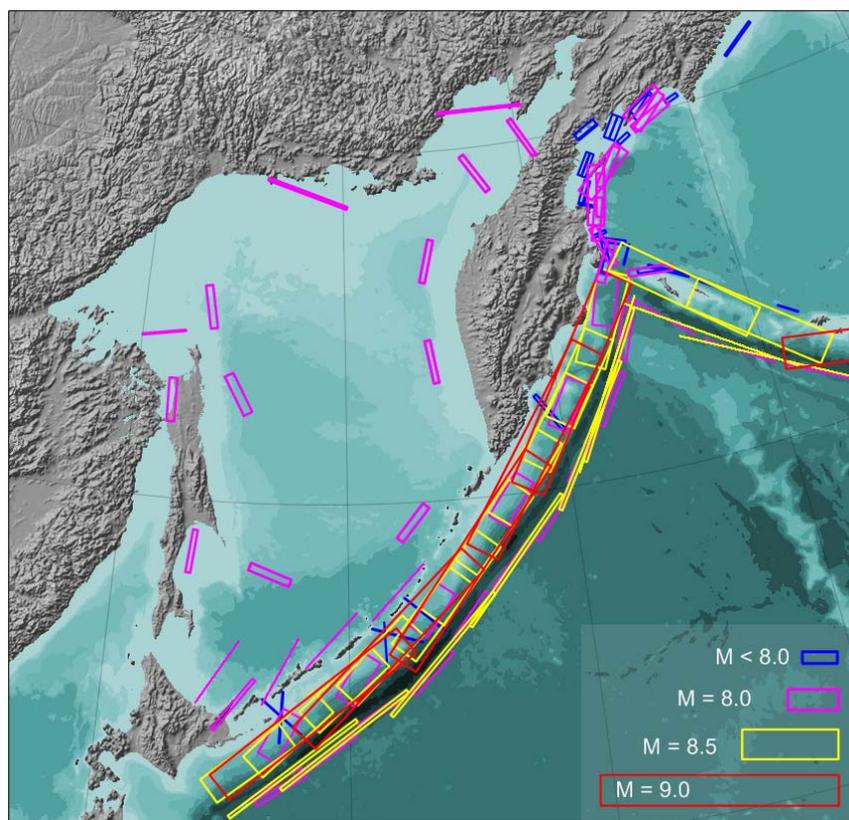


Рисунок 8. Проекция модельных очагов на дневную поверхность.

Результаты исследования представлены в статьях [3, 4] и в докладе [10].

## 2.7. Участие в составлении листа Геологической Карты РФ

В рамках совместных работ с КАМЧАТНЕДРА и ВСЕГЕИ им. А.П.Карпинского собран сейсмологический материал и написан раздел "Сейсмичность", составлены соответствующие схемы к Листу Р-59 Геологической Карты РФ масштаба 1:1000000 Третьего Поколения. Раздел

будет опубликован в Объяснительной записке к данному листу геологической карты.

## 2.8. Теоретическое исследование точности локации слабых микросейсмических событий по данным поверхностных сейсмических групп

Рассмотрены уникальные свойства метода адаптивного максимального правдоподобия (АМП) в условиях, когда помехи на выходах датчиков группы содержат сильную когерентную составляющую искусственного происхождения. Эти условия являются типичными в случаях, когда АМП алгоритм применяется для определения координат очагов микроземлетрясений, вызванных гидравлическими разрывами земных пластов на месторождениях углеводородов. АМП алгоритм в этом случае демонстрирует способность подавлять когерентную составляющую помех и существенно повышать точность определения координат очагов микроземлетрясений.

Результаты исследования опубликованы в статье [5].

## 2.9. Разработка алгоритмов и методик детектирования Р-волны на фоне шума высокого уровня для целей раннего предупреждения

Были продолжены работы по уточнению блок-схемы программы детектирования Р-волны при повышенном уровне сейсмических шумов разнообразной природы. Продолжена отладка программ адаптивных алгоритмов с использованием техники вейвлет-преобразований для автоматизированного выделения основных параметров сейсмических волновых фаз.

Результаты исследования представлены в докладе [9].

## 2.10. Определение возможности детектирования слабых сейсмических событий с использованием искусственных нейронных сетей

Рассмотрены новые способы детектирования слабых сейсмических событий с использованием искусственных нейронных сетей. Выработаны рекомендации по составлению вектора признаков и архитектуры нейронной сети. Была исследована применимость сетей 3-го поколения – глубоких нейронных сетей в сейсмологии. Отмечено, что для простых нейронных сетей и деревьев требуется большая предварительная обработка данных, в том числе с применением вейвлет-фильтрации, а для глубоких нейронных сетей – минимальная предварительная обработка.

Результаты исследования опубликованы в статье [2] и вошли в доклад [13].

## 2.11. Разработка методов системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов

Современные технологии позволяют обрабатывать сейсмический сигнал и передавать данные быстрее, чем распространяются волны от землетрясения. Таким образом, можно путем автоматических отключений (экстренное торможение поездов, включение запрещающих сигналов светофоров, отключение электроэнергии, снижение давления в трубопроводах и т.д.) уменьшить материальные и людские потери, избежать экологических катастроф. После события мониторинг позволит оценить разрушения, определить меры спасения и средства восстановления. Помимо этого система раннего предупреждения может и должна быть задействована в системе сейсмического мониторинга состояния объектов.

Правильно организованная система раннего предупреждения может обеспечить:

- через 4 сек. - тревожный сигнал, если землетрясение представляет опасность;
- через 12 сек. - расчет интенсивностей сотрясений на разных участках железных дорог;
- через 5 мин. - карту возможных повреждений, в т.ч. вызванных вторичными эффектами (оползнями, лавинами и др.).

## 2.12 Продолжение формирования унифицированной библиотеки сейсмических шумов сильных источников антропогенного шума

Для обучения как классификационных, так и регрессионных сейсмических сетей необходимо использование «типичных» фрагментов сейсмических событий (в том числе и их смесей). С помощью разработанной в Институте мобильной трехкомпонентной сейсмической станции, были продолжены работы по записи сейсмических шумов, вызванных прохождением большегрузного транспорта разного типа, деформациями сооружений при замерзании/оттаивании грунта, ветровыми ударами в здания. Проведены работы по длительной опытной записи сейсмического шума в осенне-зимний период в Московской области с одновременной фиксацией метеорологических данных (температура, направление и скорость ветра). Рассчитаны и проанализированы энергетические спектры наиболее характерных фрагментов записей. Получены сейсмические записи шумовых сигналов и их основные ключевые характеристики. Начата разработка электронного мерзлотомера для целей автоматизированного измерения глубины промерзания грунта в месте установки сейсмической станции. Эти данные будут необходимы для дальнейшего изучения изменения характеристик сейсмического шума в зависимости от глубины промерзания.

Результаты исследования представлены в докладе [12].

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследований по теме из анализа широкополосных записей поверхностных волн были построены модели Непальского землетрясения 2015 года и двух сильнейших за последние 300 лет землетрясений, произошедших в Калининградской области 21 сентября 2004 года. Продолжена разработка автоматической процедуры локализации поверхностных волн в спектрально-временной области, предназначенной для использования при быстром предварительном определении параметров очага землетрясения по телесеismicким записям поверхностных волн. Разработана предварительная версия алгоритма оценки ошибок определения фокального механизма и глубины землетрясения, основанного на методе "Джекнайф". По данным за 1900-2015 гг. рассчитана цифровая модель (карта) параметра сейсмической активности для всего Черноморского региона. Для построения карты разработана методика вычисления параметра активности, не требующая предварительного разделения региона на условно-однородные области. Методика основана на методе ядерного сглаживания. Для потенциально цунамиопасных областей Курило-Камчатской дуги построены модели характерных очагов землетрясений, предназначенные для использования в расчетах модельных цунами. Рассмотрены уникальные свойства метода адаптивного максимального правдоподобия (АМП) в условиях, когда помехи на выходах датчиков группы содержат сильную когерентную составляющую искусственного происхождения. АМП алгоритм в этом случае демонстрирует способность подавлять когерентную составляющую помех и существенно повышать точность определения координат очагов микро-землетрясений. Были продолжены работы по уточнению блок-схемы программы детектирования Р-волны при повышенном уровне сейсмических шумов разнообразной природы. Рассмотрены новые способы детектирования слабых сейсмических событий с использованием искусственных нейронных сетей. Продолжена разработка методов организации системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов. Продолжено формирование унифицированной библиотеки сильных антропогенных сейсмических шумов.

Результаты выполненных исследований представлены в 5 статьях в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах и в 8 докладах на международных и российских научных конференциях. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

#### 4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

1. Ассиновская Б.А., Овсов М.К., Букчин Б.Г. О сейсмоструктуре и глубинном строении Центрально-Балтийского региона // Инженерные изыскания, 2016, №8. С.36-44.
2. Кислов К.В., Гравиров В.В. Использование искусственных нейронных сетей в классификации зашумленных сейсмических сигналов // Сейсмические приборы, 2016, т.52, № 2. С.46-64.
3. Чебров В.Н., Левина В.И., Ландер А.В., Чеброва А.Ю., Сеньюков С.Л., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов 1962-2010 гг.: технология и методика создания // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. Обнинск: ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016. С. 396-406.
4. Чебров В.Н., Матвеев Е.А., Ромашева Е.И., Чеброва А.Ю., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Иванова Е.И., Гусева Е.М., Воропаев П.В., Ландер А.В. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. Обнинск: ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016. С. 211-224.
5. Kushnir, A., and A. Varypaev, Accuracy of adaptive maximum likelihood algorithm for determination of micro earthquake source coordinates using surface array data in condition of strong coherent noise. *GEM - International Journal on Geomathematics*, 2016, 7, 2: 203-237, doi:10.1007/s13137-016-0082-3.

*Доклады на международных и российских научных конференциях*

6. Ассиновская Б.А., Овсов М.К., Букчин Б.Г. 12 лет после Калининградского землетрясения 2004 года // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016. С.37-42.
7. Букчин Б.Г., Фомочкина А.С. Определение параметров очага Непальского землетрясения 2015 г. по записям телесеизмических поверхностных волн // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016. С.61-64.
8. Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Никонов А.А., Ландер А.В., Бейзель С.А. Оценка цунамиопасности черноморского побережья России на основе исторических данных и численного моделирования. // Мировой Океан: модели, данные и оперативная океанология, г.Севастополь, 26-30 сентября 2016 г., тезисы докладов. С.48.

9. Кислов К.В., Гравиров В.В. Система раннего предупреждения о землетрясении для железных дорог: перспективы, проблемы, решения // Научно практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития». Сборник материалов. - М.: «Богородский печатник», 2016. С.236-238.
10. Левина В.И., Ландер А.В., Чеброва А.Ю., Сенюков С.Л., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Изменения в региональном каталоге Камчатки и Командорских островов на рубеже 2009-2010 гг. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016. С.177-180.
11. Fomochkina, A., and V. Bukchin, The use of parallel programming in problems of earthquake parameters determination. In 11th International Conference "Problems of Geocosmos". Book of Abstracts. St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, October 3-7, 2016: 207-208 (<http://onlinereg.ru/geocosmos/Geocosmos2016.pdf>).
12. Gravirov, V.V., and K.V. Kisllov, An electronic freezometer. In 11th International Conference "Problems of Geocosmos". Book of Abstracts. St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, October 3-7, 2016: 209-210.
13. Kisllov, K.V., and V.V. Gravirov, On the problem of the application of deep neural networks in seismology. In 11th International Conference "Problems of Geocosmos". Book of Abstracts. St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, October 3-7, 2016: 211-212.

#### *Программы для ЭВМ*

14. Букчин Б.Г. Программа анализа неоднозначности определения тензора момента мелкофокусного землетрясения по длиннопериодным записям поверхностных волн (MISFIT\_DC\_ODV) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611218 от 27 января 2016 г.
15. Гравиров В.В., Кислов К.В. - программа полуавтоматической калибровки сейсмических датчиков (SeisCal) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611214 от 27 января 2016 г.