

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 01201281967

Инв. № 2016-2



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

член-корреспондент РАН

А.А.Соловьев

«21» января 2016 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ
ДАНЫМ**

(промежуточный, за 2015 год)

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

Б.Г. Букчин

Заведующий лабораторией № 3
канд. физ.-мат. наук

М.Г. Шнирман

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

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук



Г.М. Молчан

науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук



А.С. Фомочкина

РЕФЕРАТ

Отчет 23 с., 10 рис., 14 источников

ФОКАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ, РЕГИОНАЛИЗАЦИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ, ЦУНАМИГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, МИКРО-ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, СИСТЕМА РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ

Исследования, проведенные по теме в 2015 году, включали: тестирование разработанных методов оценки углов фокального механизма с высоким разрешением; построение моделей очагов современных землетрясений; анализ устойчивости определения параметров очагов землетрясений по спектрам поверхностных волн к ошибкам их выделения на сейсмограммах; работы по регионализации сейсмичности и уточнению сейсмических каталогов Дальнего Востока России и прилегающих территорий; разработка системы модельных очагов возможных цунамигенных землетрясений; исследование возможности повышения точности определения координат источников микро-землетрясений; разработка методов детектирования Р-волны на фоне сильного шума для целей раннего предупреждения; разработка системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов (железные дороги, трубопроводы); проведение длительной опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеорологических данных.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Тестирование разработанных методов оценки углов фокального механизма с высоким разрешением	7
2.2. Построение моделей очагов современных землетрясений	11
2.3. Анализ устойчивости определения параметров очагов землетрясений по спектрам поверхностных волн к ошибкам их выделения на сейсмограммах	11
2.4. Реконструкция расположения очагов землетрясений по отложениям цунами	12
2.5. Разработка системы модельных очагов возможных цунамигенных землетрясений	16
2.6. Модификация стандартной схемы регионализации сейсмической активности Камчатки	17
2.7. Регионализация сейсмичности и уточнение сейсмических каталогов Дальнего Востока России и прилегающих территорий	17
2.8. Повышение точности определения координат микро-землетрясений с помощью подавления когерентных помех	18
2.9. Разработка алгоритмов и методик детектирования Р-волны на фоне шума высокого уровня для целей раннего предупреждения	18
2.10. Проведение длительной опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеорологических данных	18
2.11. Разработка методов системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов (железные дороги, трубопроводы)	19
2.12. Продолжение формирования унифицированной библиотеки сейсмических шумов сильных источников антропогенного шума	19
2.13. Исследование стохастической модели очага землетрясения	20
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	21
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	22

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования по теме выполнялись в рамках подраздела 78 "Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий" Раздела VIII "Науки о Земле" Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

Анализ особенностей излучения длиннопериодных поверхностных волн мелкофокусным землетрясением, показал, что в случае, когда одна из нодальных плоскостей источника субгоризонтальна, небольшие изменения ее угла падения существенно меняют диаграмму поверхностно-волнового излучения такого очага. Как следствие, применяемые к таким событиям методы оценки углов фокального механизма землетрясения должны обеспечивать достаточно высокий уровень их разрешения. В рамках исследований по теме было проведено тестирование разработанного ранее метода на примере сильнейшего афтершока японского землетрясения в Тохоку, произошедшего в 2011 году.

При построении моделей очагов землетрясений по широкополосным записям телесейсмических волн большую роль играет адекватное выделение этих волн на сейсмограммах. В частности, для локализации поверхностных волн широкое применение в мире нашли разработанные в ИТПЗ РАН методы спектрально-временного анализа. Однако, такая обработка наблюдений носит интерактивный характер и требует значительных затрат времени. Это оправдано при детальном изучении сейсмического события, но не обеспечивает возможности быстрого получения предварительных оценок основных параметров землетрясения. За отчетный период разработана предварительная версия процедуры автоматической грубой фильтрации поверхностных волн в спектрально-временной области. Предполагается использование этой процедуры при подготовке исходных данных для быстрого предварительного определения параметров очага землетрясения по телесейсмическим записям поверхностных волн.

Для прогнозирования будущих цунами, а также движений грунта при сильных событиях, важно знать потенциальные источники будущих землетрясений. Одним из способов решения этой проблемы является реконструкция расположения очага землетрясения по отложениям цунами. Такое исследование отложений цунами было проведено для Камчатского побережья Берингова моря.

На основе современных тектонических и сейсмологических данных разработана система модельных очагов возможных цунамигенных землетрясений Черноморского региона.

Проведены работы по регионализации сейсмичности и уточнению сейсмических каталогов Дальнего Востока России и прилегающих территорий.

Исследована возможность повышения точности определения координат микро-землетрясений с помощью подавления когерентных помех.

Была продолжена разработка и отладка программ адаптивных алгоритмов с использованием техники вейвлет-преобразований для автоматизированного определения основных параметров сейсмических волновых фаз при наличии повышенного уровня сейсмических шумов.

Переход температуры через 0°C сопровождается значительными сейсмическими шумами в широком частотном диапазоне. Помимо этого глубина промерзания влияет на степень искажения высокочастотного сейсмического сигнала, так как при замерзании грунта его характеристики меняются скачкообразно. Для изучения этих эффектов была проведена длительная опытная сейсмическая регистрация с параллельной записью метеорологических данных.

Были рассмотрены возможные стратегии организации системы раннего предупреждения (СРП) о землетрясении. Определены основные функции системы.

Для обучения как классификационных, так и регрессионных сейсмических сетей необходимо использование «типичных» фрагментов сейсмических событий. Было продолжено формирование унифицированной библиотеки сейсмических шумов.

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

Работы по теме включают: тестирование разработанных методов оценки углов фокального механизма с высоким разрешением; построение моделей очагов современных землетрясений; анализ устойчивости определения параметров очагов землетрясений по спектрам поверхностных волн к ошибкам их выделения на сейсмограммах; регионализация сейсмичности и уточнение сейсмических каталогов Дальнего Востока России и прилегающих территорий; разработка системы модельных очагов возможных цунамигенных землетрясений; исследование возможности повышения точности определения координат источников микро-землетрясений; разработка методов детектирования Р-волны на фоне сильного шума для целей раннего предупреждения; разработка системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов (железные дороги, трубопроводы); проведение длительной опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеорологических данных.

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. Тестирование разработанных методов оценки углов фокального механизма с высоким разрешением

Исследование особенностей излучения длиннопериодных поверхностных волн мелкофокусным землетрясением показало, что в случае, когда одна из нодальных плоскостей источника субгоризонтальна, небольшие изменения ее угла падения существенно меняют диаграмму поверхностно-волнового излучения такого очага. Как следствие, применяемые к таким событиям методы оценки углов фокального механизма должны обеспечивать достаточно высокий уровень их разрешения.

При расчете функции Грина, описывающей среду, 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 луча фазовой скорости волны, от ее геометрического расхождения и затухания. При этом амплитудный спектр смещений в поверхностной волне не зависит от ее фазовой скорости. Скорости поверхностных волн в реальной Земле не известны с достаточной точностью. Поэтому, как правило, мы используем для определения параметров источника лишь амплитудные спектры поверхностных волн.

Описывая источник в приближении тензора момента, мы рассматриваем мгновенную точечную сдвиговую дислокацию (двойной диполь) на глубине h . Такой источник задается пятью параметрами: его глубиной, фокальным механизмом, определяемым тремя углами (простираения ψ , падения δ и подвижки λ) и сейсмическим моментом M_0 . Четыре первых параметра мы определяем прямым перебором их возможных значений на сетке в параметрическом пространстве, а пятый параметр M_0 – минимизируя отличия (невязку ε) наблюдаемых амплитудных спектров от их теоретических значений для каждой текущей комбинации значений остальных параметров. Детальность сетки для углов фокального механизма может достигать одного градуса. Значения параметров, минимизирующие невязку мы рассматриваем, как оценки этих параметров. Для оценки степени разрешения каждого из этих четырех параметров мы строим четыре частные функции невязки: $\varepsilon_h(h)$, $\varepsilon_\psi(\psi)$, $\varepsilon_\delta(\delta)$ и $\varepsilon_\lambda(\lambda)$. Значение параметра, при котором соответствующая функция невязки амплитудных спектров достигает минимального значения, мы определяем как оценку данного параметра. В то же время каждая из этих функций характеризует степень разрешения соответствующей характеристики источника.

Осуществляя перебор возможных значений параметров, мы рассматриваем лишь ту из двух нодальных плоскостей, которая падает круче.

Ее угол падения не может быть меньше 45° , и его область значений определяется неравенствами $45^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$.

Как известно фокальный механизм не может быть однозначно определен из амплитудных спектров поверхностных волн. Для каждого двойного диполя существует три эквивалентных ему диполя, излучающих поверхностные волны с тем же амплитудным спектром. Эти четыре эквивалентных решения представляют две пары механизмов, повернутых относительно друг друга вокруг вертикальной оси на 180° и в каждой паре отличающиеся друг от друга противоположным направлением подвижки. Поэтому частные функции невязки амплитудных спектров для углов простирания и подвижки являются периодическими с периодом 180° . Для выбора одного из четырех эквивалентных фокальных механизмов мы сравниваем синтетические фазовые спектры поверхностных волн на очень длинных периодах (обычно не короче 100 с), рассчитанные для каждого из этих четырех решений, с наблюдаемыми фазовыми спектрами. В качестве оптимального фокального механизма выбирается тот, для которого эти спектры наиболее близки.

Описанный подход был использован для изучения сильнейшего афтершока землетрясения в Тохоку, произошедшего через полчаса после основного толчка. Его записи оказались сильно зашумленными излучением предшествующего главного события. С помощью программы спектрально-временного анализа СВАН, мы отфильтровали в полосе периодов от 100 до 200 секунд и использовали для определения параметров изучаемого события фундаментальные моды Лява и Рэлея, зарегистрированные 13 станциями сетей IRIS, GEOSCOPE и GEOFON. Расположение этих станций приведено на рисунке 1. Шаг сетки для углов фокального механизма был выбран равным 1° . В таблице 1 представлены фокальные механизмы и фазовые невязки для четырех эквивалентных решений, полученных из анализа амплитудных спектров поверхностных волн. Как видно из таблицы, оптимальным является решение 1. Частная функция невязки для глубины источника и наилучшее из четырех эквивалентных решений приведены на рисунке 2. Полученные значения углов простирания, падения и подвижки: 33° , 89° и 91° соответственно. Полученное значение сейсмического момента равно $0.46 \cdot 10^{22}$ Нм. Это значение соответствует значению моментной магнитуды $M_w = 8.4$. Наша оценка глубины наилучшего точечного источника равна 10 км.

Частные функции невязки для углов фокального механизма, характеризующие их разрешение, приведены на рисунке 3.

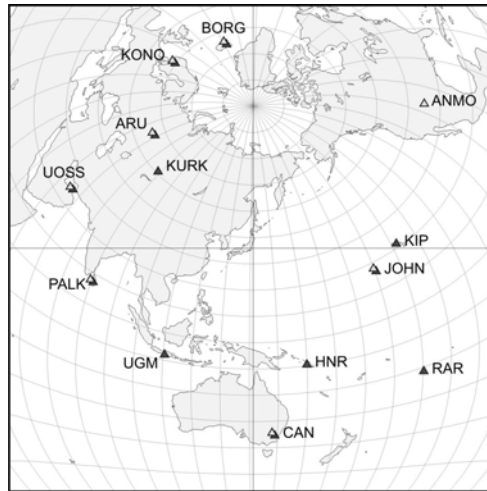


Рис.1. Тринадцать точек регистрации поверхностных волн, использованных для определения параметров точечного мгновенного источника. Темные треугольники соответствуют волнам Рэлея, светлые треугольники - волнам Лява.

Номер решения	Угол падения	Угол простираия	Угол подвижки	Нормированная фазовая невязка
1	89°	33°	91°	0.345
2	89°	213°	91°	0.483
3	89°	213°	-89°	0.621
4	89°	33°	-89°	0.717

Таблица 1. Фокальные механизмы и фазовые невязки для четырех эквивалентных решений, полученных из анализа амплитудных спектров поверхностных волн.

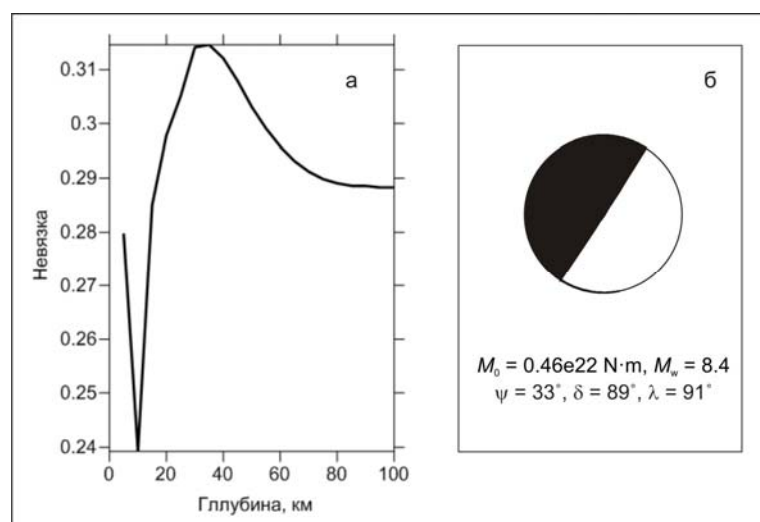


Рис. 2. Частная функция невязки для глубины источника (а) и наилучшее из четырех эквивалентных решений (б), полученных по амплитудным спектрам поверхностных волн.

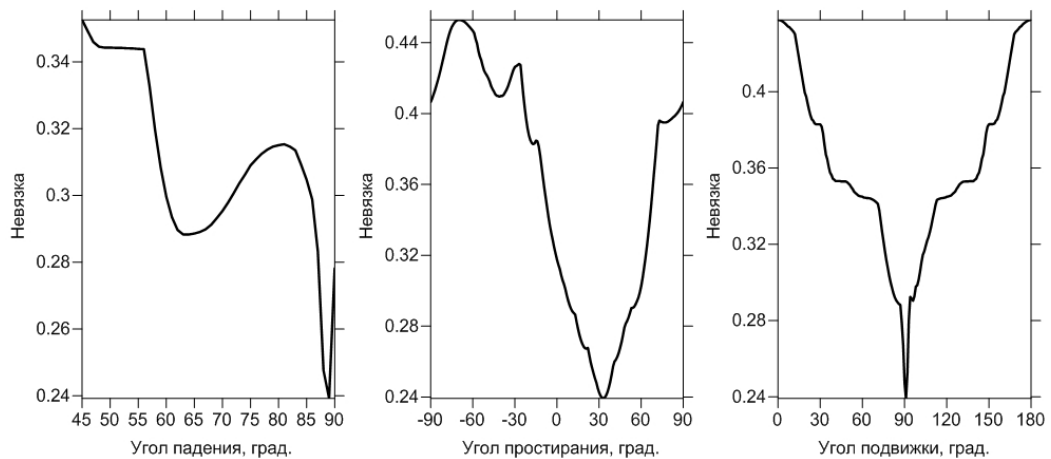


Рис. 3. Частные функции невязки для углов фокального механизма, полученные по амплитудным спектрам поверхностных волн, зарегистрированных на 13 станциях.

Для проверки надежности полученных результатов было проведено повторное определение параметров источника по спектрам поверхностных волн, зарегистрированных на 9 станциях из числа рассмотренных 13. Были отобраны станции, обеспечивающие максимально равномерное распределение по азимуту. Они приведены на рисунке 4.

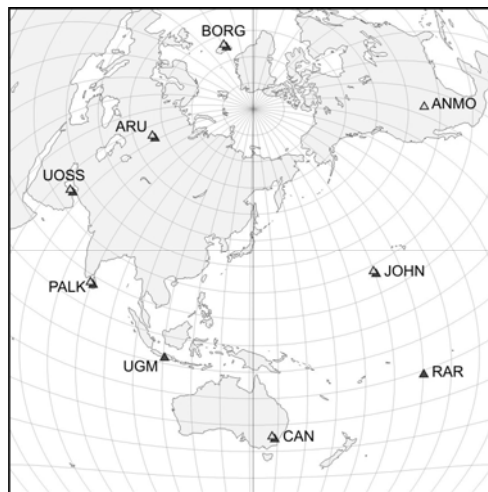


Рис. 4. Девять точек регистрации поверхностных волн, использованных для повторного определения параметров точечного мгновенного источника.

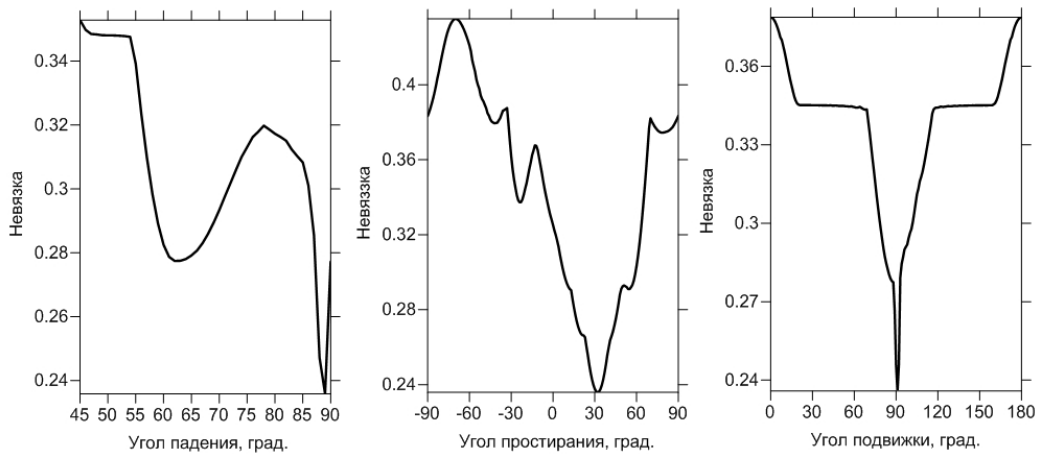


Рис. 5. Частные функции невязки для углов фокального механизма, полученные по амплитудным спектрам поверхностных волн, зарегистрированных на 9 сейсмических станциях.

В результате повторного определения были получены те же значения для всех параметров, что и по 13 станциям. На рисунке 5 приведены полученные частные функции невязки для углов фокального механизма, которые полностью подтверждают полученные ранее результаты.

Результаты исследования представлены в докладе [7].

2.2. Построение моделей очагов современных землетрясений

Из анализа широкополосных записей телесеismicических волн были построены модели очагов следующих событий:

- землетрясения в Непале $M_w = 7.9$, произошедшего 25 апреля 2015 года;
- землетрясения в Египте $M_w = 5.6$, произошедшего в заливе Акаба 27 июня 2015 года;
- двух землетрясений $M_w = 4.5$ и $M_w = 4.7$, произошедших близ Калининграда 21 сентября 2004 года с интервалом в два с половиной часа;
- сильнейшего афтершока ($M_w = 8.4$) японского землетрясения в Тохоку, произошедшего 11 марта 2011 года через полчаса после основного толчка.

Результаты исследований представлены в работах [7, 14].

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

Разработана предварительная версия процедуры автоматической грубой фильтрации поверхностных волн в спектрально-временной области. Предполагается использование этой процедуры при подготовке исходных данных для быстрого предварительного определения параметров очага землетрясения по телесеismicическим записям поверхностных волн. Возможность использования отфильтрованных таким образом сейсмограмм для быстрой оценки очаговых параметров была подтверждена результатами,

полученными для девяти землетрясений в диапазоне значений магнитуды M_w от 4.4 до 8.0.

2.4. Реконструкция расположения очагов землетрясений по отложениям цунами

Берингоморское побережье Камчатки совпадает с границей между Охотским и Берингоморским блоками или (микро) плитами, являющимися частью Северо-американской плиты на российском Дальнем Востоке. Вопрос о конфигурации плит в регионе, являющимся северным окончанием Курило-Камчатской зоны субдукции, остается открытым. Моделирование источников отложений цунами может внести важный вклад в региональные тектонические построения. Исследования цунамигенных отложений в тысячелетнем масштабе времени также важны для расширения исторических каталогов землетрясений и вероятностного анализа опасности сильнейших землетрясений и цунами.

Для прогнозирования будущих цунами, а также движений грунта при сильных событиях, важно знать потенциальные источники будущих землетрясений. Один из способов решения этой проблемы является реконструкция расположения очага землетрясения по отложениям цунами. Отложения цунами изучались на Камчатском побережье Берингова моря в течение многих лет. Результаты показывают что высота цунами в данном районе может достигать 10 м и более, и приводить к катастрофическим последствиям для населенных пунктов, расположенных вдоль побережья. Для сравнения: история цунами за последние 4000 лет показывает, что зона северной части Курило-Камчатской зоны субдукции испытывает цунамигенные землетрясения каждые несколько столетий.

В данном исследовании мы попытались реконструировать очаги цунамигенных палеоземлетрясений, путем численного моделирования высот цунами и их сравнения с реальными данными, полученными в результате полевых исследований береговых отложений. Для этого мы смоделировали цунами для набора очагов на потенциально активных разломах в акваториях Берингова моря (см. Рис. 6). В общей сложности были подготовлены 47 исходных моделей очагов.

Модельные землетрясения строились, исходя из общих представлений о тектонике и сейсмичности региона и включали широкие диапазоны очаговых параметров. При этом мы ориентировались на три группы данных:

- пространственное распределение сейсмичности в акватории и прибрежных районах Берингова моря и Алеутской дуги (с учетом распределения максимальных наблюдавшихся магнитуд землетрясений);
- характерные для различных районов механизмы землетрясений;
- залегания и кинематические характеристики современных и голоценовых сейсморазрывов, зафиксированных при полевых наблюдениях и дешифрировании космических снимков на западном побережье моря.

Далее, при выборе исходной магнитуды модели, были учтены следующие параметры:

- максимальная магнитуда, наблюдаемая или расчетная, в окрестностях (50-250 км) от центроида модели;

- тектоническое расположение исходной модели (например, принадлежность к границе плиты), и распределения магнитуд, характерных для землетрясений в этом районе;

- типа движения по разлому - взброс, сброс, или сдвиг, а также максимальная магнитуда наблюдаемая для землетрясений этого типа во всем регионе.

Для всех регионов со сравнительно низким уровнем зарегистрированной сейсмичности, максимальные магнитуды модели были взяты на уровне Олюторского, 2006 г. землетрясения. Используются значения: $M=7.5$ для взбросов, $M=7.0-7.5$ для сдвигов и сбросовых разломов. Для областей, включающих зарегистрированные землетрясения с $M \sim 7.5$, для взбросов, помимо указанного значения, рассчитывалась модель с $M = 8.0$. Аналогичная магнитуда была использована при моделировании взбросовых землетрясений, происходящих у подножья западного континентального склона Командорской котловины. Для задуговых сдвигов Алеутской дуги модельные магнитуды также выбраны в интервале 7.0–7.5, но здесь они соответствуют наблюдавшимся значениям. В Алеутской зоне субдукции зарегистрированы сильнейшие события до $M = 9$. Здесь модельные магнитуды выбирались из интервала 8.5–9.0 с постепенным возрастанием в восточном направлении, что соответствует возрастанию в очагах взбросовой составляющей подвижки.

Используется простейшая модель очага – однородный мгновенный сдвиг по поверхности плоского прямоугольного разрыва. Верхнее и нижнее ребра площадки разрыва предполагаются горизонтальными.

Численное моделирование цунами требует наличие трех компонент: (1) модели очага, определяющей место разрыва и распределение подвижки; (2) океанической батиметрии и прибрежной топографии, и (3) модели распространения цунами и набега волны на берег. Смещение дна моделируется по классической модели плоского дислокационного источника со сдвигом на косо́й плоскости разрыва врезанной в полубесконечную упругую среду. Модуль сдвига принят равным 4.0×10^{10} кг/(мсек²). Начальное распределение высот поверхности моря равно распределению вертикального смещения морского дна.

Для расчета цунами использовалась модель батиметрии и топографии берега скомпилированная из глобальной модели батиметрии и топографии (GEBCO) и данных нивелировки во всех пунктах обследования отложений цунами. Данные глубин были приведены к прямоугольной сетке с шагом 500м при помощи линейной триангуляции. Карта распределения глубины моря показана на Рис. 7. Шаг батиметрических данных 500 м вполне достаточен для расчета распространения цунами и набега в прибрежной зоне при простой конфигурации берега. Однако, в сложных условиях побережья

западной части Берингова моря, с многочисленными проливами и заливами, а также для небольших глубин в Карагинском заливе, большие ошибки моделирования возможны при расчете подтопления и набега волны. Другой причиной усиления волны цунами является эффект геометрической фокусировки на структурах берегового мыса. Поэтому для моделирования затопления и набега волны на берег мы также подготовили батиметрические данные с шагом 90 м.

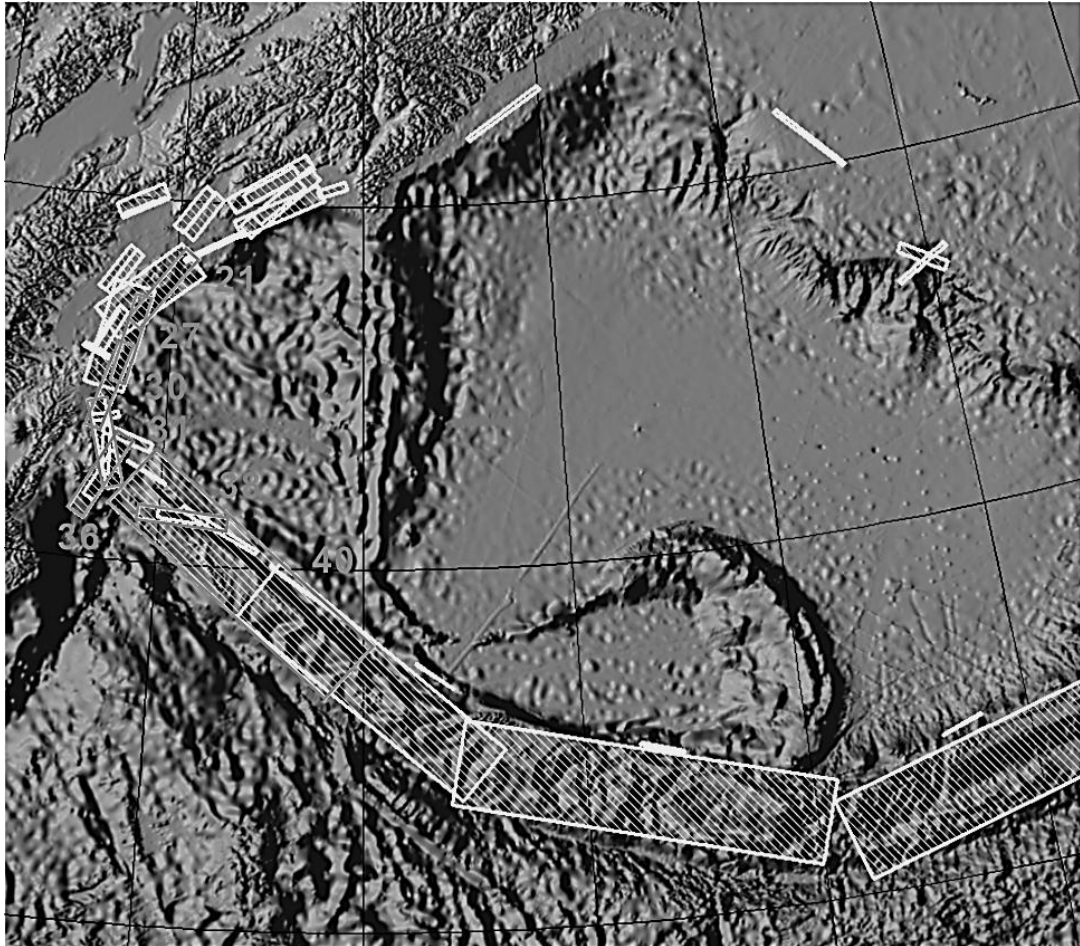


Рис. 6. Распределение очагов землетрясений (заштрихованные прямоугольники). Очаги, которые были использованы для моделирования набега волны на берег, выделены белым.

Изначально, мы рассчитывали цунами для всех источников на Рис. 6, которые находятся внутри модели батиметрии на Рис. 7. Для этих расчетов мы использовали сетку 500м. На Рис. 8 показан пример распределения пиковых высот цунами. Далее мы моделировали набег на берег для выборки из 6 очагов, для которых величины расчетных пиковых амплитуд совместимы с наблюдаемыми максимальными высотами заплеска цунами определенными по отложениям цунами. А именно, были выбраны очаги 21, 27, 30, 31, 36, 38 и 40.

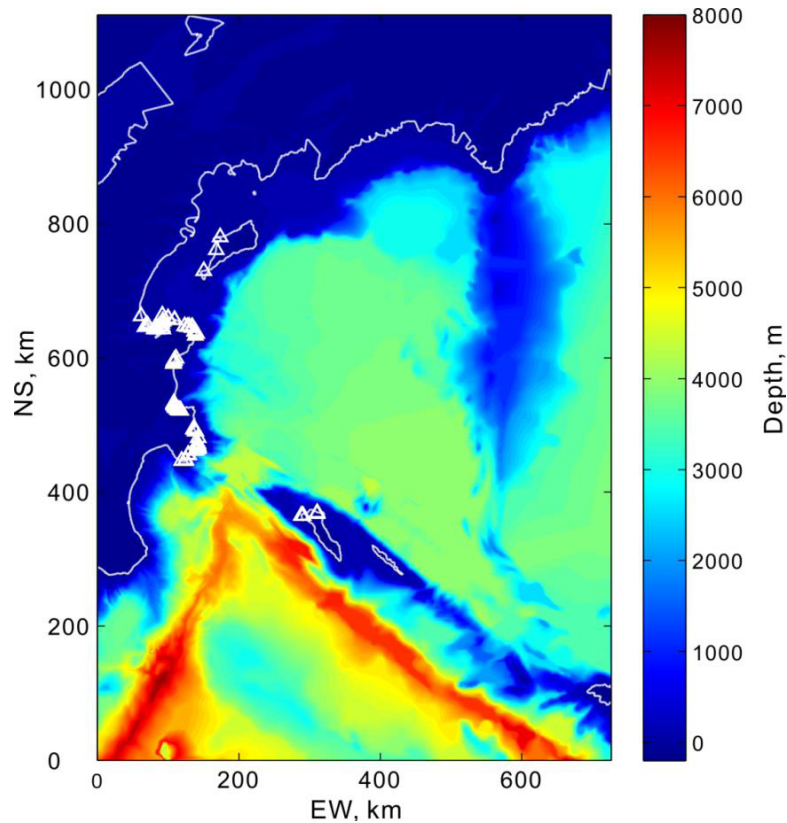


Рис. 7. Батиметрическая карта исследуемого района. Глубина моря в метрах показана цветом. Белая линия - береговая линия по батиметрической модели (линия нулевой глубины). Треугольники отмечают пункты закладки шурфов для изучения отложений палеоцунами.

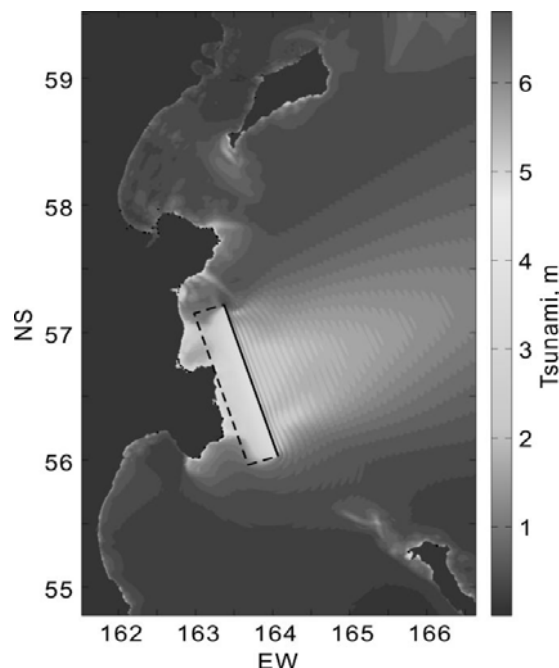


Рис. 8. Пример распределения пиковых амплитуд цунами для очага 31, в метрах. Точки вдоль береговой линии отмечают места шурфования отложений цунами. Прямоугольник – модельный очаг, его верхний край отмечен сплошной линией.

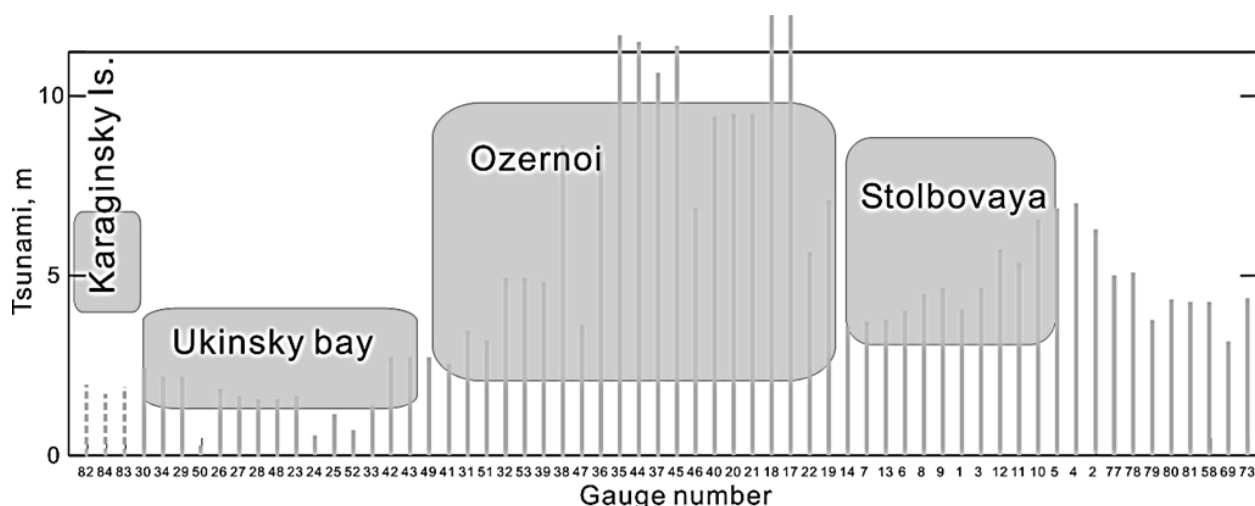


Рис. 9. Сравнение наблюдаемых ("серая зона") и смоделированных высот цунами (максимальное значение среди выбранных очагов 21, 27, 30, 31, 36, 38 и 40). Места шурфования располагаются с севера (левая сторона рисунка) на юг (правая сторона рисунка). Порядок расположения от Карагинского острова через залив Ука, полуостров Озерной, река Столбовая, до Камчатского мыса. Для острова Карагинский показаны результаты по начальной сетке моделирования 500м.

Для этих моделирований мы использовали сетку 90м. По сравнению с обычно используемыми сетками от 10 до 30м, сетка 90м довольно груба, однако она совместима с нехваткой прибрежных батиметрических и топографических данных в этом малоизученном районе. На Рис. 9 показано сравнение высот модельных и наблюдаемых цунами. Хотя амплитуда слегка недооценена на некоторых участках, наблюдается хорошее согласие рассчитанных и наблюдаемых высот между мысами Озерной и Камчатский. Следует отметить не учтенную в модели неопределенность в соотношении между сдвигом на разломе и размером очага, которая позволяет нам слегка скорректировать величину подвижки и, в конечном итоге, высоту цунами до ± 1.5 раз. С помощью такого рода коррекции мы можем получить хорошее совпадение в среднем по группе очагов.

Результаты исследований представлены в работе [8].

2.5. Разработка системы модельных очагов возможных цунамигенных землетрясений

В рамках совместных с Сибирским Отделением РАН работ по подготовке основ цунамирайонирования на основе современных тектонических и сейсмологических данных разработана система модельных очагов возможных цунамигенных землетрясений Черноморского региона (рис.10). Модели переданы в СО РАН для дальнейшего расчета возможных проявлений цунами на российском побережье Черного моря.

На основе тектонических и сейсмологических данных разработана система 114 модельных очагов потенциальных цунамигенных землетрясений

Дальнего Востока России: Курило-Камчатского региона, Командорского сегмента Алеутской дуги, Охотского и Берингова морей.

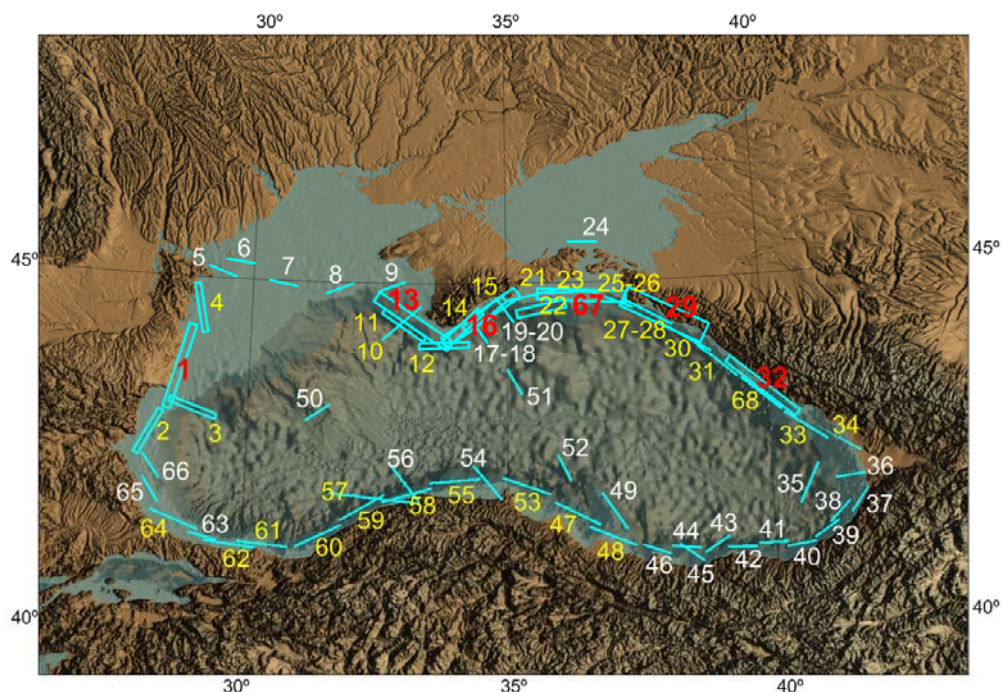


Рис.10. Модели очагов потенциальных цунамигенных землетрясений Черного моря. Приведены (в реальном масштабе) проекции на горизонтальную поверхность площадок разрыва модельных землетрясений.

2.6. Модификация стандартной схемы регионализации сейсмической активности Камчатки.

С учетом новых данных [1-3, 9] (полученных, в частности, при изучении глубокого Охотоморского землетрясения 2013 г., локальной сейсмичности при извержениях вулканов в 2014-15 гг.) внесены изменения в стандартную схему регионализации активности Камчатки. Изменения представлены в цифровой форме. В соответствии с дополнительными требованиями модернизирована программа автоматической трехмерной регионализации сейсмичности "territoria". Результаты внедрены в текущую работу Камчатского Филиала ГС РАН и, в частности, отражены в новой версии базы данных, доступной на сайте:

<http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>

2.7. Регионализация сейсмичности и уточнение сейсмических каталогов Дальнего Востока России и прилегающих территорий

Проведена детальная трехмерная цифровка сейсмофокальных зон запада и севера Тихого океана: Марианской, Идзу-Бононинской, Рюкю, Японской, Курило-Камчатской, Алеутской и Аляскинской. Ведется работа по построению трехмерной модели и цифровых карт перечисленных зон,

включающая методические разработки географических проекций сложных трехмерных поверхностей.

2.8. Повышение точности определения координат микро-землетрясений с помощью подавления когерентных помех

Была исследована способность алгоритма оценивания по методу максимума правдоподобия (АОМП) подавлять когерентные компоненты помех, и как следствие, существенно увеличивать точность определения координат источников микро-землетрясений. Для подтверждения и детализации теоретического анализа в работе было предпринято компьютерное моделирование локации микро-землетрясений при помощи алгоритма АОМП с использованием модельных данных поверхностной сейсмической группы, состоящей из 150 сейсмоприемников, размещенных в апертуре 3.5 x 3.5 км. Результаты проведенного компьютерного моделирования показывают, что при мощности когерентной помехи, превышающей на порядок мощность диффузной помехи, среднеквадратические значения ошибок определения горизонтальных координат источника микро-землетрясения с помощью алгоритма АОМП не превышают 15-20 м.

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

В течение 2015 года была продолжена разработка и отладка программ адаптивных алгоритмов с использованием техники вейвлет-преобразований для автоматизированного выделения основных параметров сейсмических волновых фаз при наличии повышенного уровня сейсмических шумов, функционирующих в масштабе времени максимально приближенном к реальному. Особое внимание уделялось дальнейшему улучшению алгоритма вейвлет-преобразования для предварительной фильтрации входных сейсмических цифровых данных. Преимуществами разработанных алгоритмов являются хорошая частотно-временная локализация, наглядность получаемых результатов и возможность исследования не только стационарных сигналов, но и нерегулярных, фрактальных рядов, имеющих иерархическую структуру.

Результаты исследований представлены в работах [10-13].

2.10. Проведение длительной опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеорологических данных

Как хорошо известно, сейсмические помехи природного происхождения обусловлены, прежде всего, изменениями атмосферного давления и температуры. Для параллельной записи метеорологических и сейсмических данных на сейсмическом пункте д. Устьяново, Егорьевского р-на,

Московской области (широта - 55.47455 с.ш., долгота - 38.99133 в.д.) был установлен электронный мерзлотомер, разработанный в 2015 году. Мерзлотомер включает в себя электронную плату и четыре выносных температурных щупа с встроенными в них датчиками температуры окружающего пространства. Щупы заглубляются в землю вокруг сейсмической станции и позволяют проводить оперативный мониторинг глубины промерзания грунта (фиксировать переход температуры через 0°C). Сейсмический сигнал регистрировался с помощью мобильной 3-х компонентной сейсмической станции, 24-х разрядной системы сбора информации на базе модуля E-24 производства фирмы L-Card (РФ) и разработанной нами программы Seismic Acquisition Monitor (SAM). Целью проведенных экспериментов было зафиксировать изменения структуры шумов в зависимости от глубины промерзания грунта, вызванные переходом температуры грунта через нулевую температуру. Эксперименты проводились с использованием тестовых калибровочных сейсмических сигналов.

2.11. Разработка методов системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов (железные дороги, трубопроводы)

Были рассмотрены возможные стратегии организации системы раннего предупреждения (СРП) о землетрясении. Определены основные функции системы: оценка магнитуды сейсмического события и расположения его гипоцентра, оценка уязвимости объекта и способы генерации предупреждения после детектирования начального участка волны Р на одной станции. По первым секундам в режиме реального времени должны рассчитываться такие параметры, как азимут, преобладающая частота, отношение вертикальной и горизонтальной составляющей; затем оцениваются параметры землетрясения: магнитуда, эпицентральное расстояние, направление на очаг и его глубина. Параметры землетрясения определяются с помощью искусственной нейронной сети. После этого рассчитывается карта интенсивности сотрясений и время до прибытия S-волны для разных участков протяженного объекта (ПО). Особое внимание было уделено способам передачи обработанной сейсмической информации и вопросам организации электропитания для обеспечения работоспособности сейсмостанций, систем связи, всей СРП при катастрофических сотрясениях. Был проведен анализ существующих на сегодняшний день иностранных СРП ПО, их функциональные достоинства и недостатки.

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 мобильной трехкомпонентной сейсмической станции, проводились записи

сейсмических шумов, вызванные прохождением большегрузного транспорта разного типа, деформациями сооружений при замерзании/оттаивании грунта, ветровыми ударами в здания. С помощью разработанной программы, были рассчитаны энергетические спектры наиболее характерных фрагментов записей. Получены сейсмические записи шумовых сигналов и их базовые характеристики.

2.13. Исследование стохастической модели очага землетрясения

Теоретически исследована стохастическая модель сейсмического очага, предложенная ранее А.А. Гусевым (ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН). Найдены условия, при которых в модели реализуются важные свойства сейсмического поля в дальней зоне: убывание спектра смещения как обратный квадрат частоты и независимость высокочастотной асимптотики от положения приемника. По полученным результатам опубликована статья [6].

2.14. Исследование условий образования пероксильных радикалов

Совместно с ФГБУН Институт биохимической физики РАН исследованы условия фотоиндуцированного образования пероксильных радикалов в водных растворах производных нуклеиновых оснований при 77 К и условия образования пероксида водорода, фотоиндуцируемого ближним УФ-излучением в водных растворах производных аденина при 77 К. Полученные результаты опубликованы в статьях [4, 5].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследований по теме было проведено тестирование разработанного ранее метода оценки углов фокального механизма с высоким разрешением на примере сильнейшего афтершока японского землетрясения в Тохоку, произошедшего в 2011 году. Было показано, что значение моментной магнитуды этого события, опубликованное в Глобальном СМТ каталоге, недооценено на 0.5. Из анализа широкополосных записей телесеismicких волн были построены модели очагов ряда современных землетрясений. Разработана предварительная версия процедуры автоматической грубой фильтрации поверхностных волн в спектрально-временной области. Проведены работы по реконструкции расположения очагов землетрясений по отложениям цунами на Камчатском побережье Берингова моря. На основе современных тектонических и сейсмологических данных разработана система модельных очагов возможных цунамигенных землетрясений Черноморского региона. Проведены работы по регионализации сейсмичности и уточнению сейсмических каталогов Дальнего Востока России и прилегающих территорий. Исследована возможность повышения точности определения координат микроземлетрясений с помощью подавления когерентных помех. Получены оценки ошибок. Была продолжена разработка и отладка программ адаптивных алгоритмов для автоматизированной оценки основных параметров сейсмических волновых фаз при наличии повышенного уровня сейсмических шумов. Преимуществами разработанных алгоритмов являются хорошая частотно-временная локализация, наглядность получаемых результатов и возможность исследования не только стационарных сигналов, но и нерегулярных, фрактальных рядов, имеющих иерархическую структуру. Были изучены изменения структуры шумов в зависимости от глубины промерзания грунта, вызванные переходом температуры грунта через нулевое значение. Были рассмотрены возможные стратегии организации системы раннего предупреждения о землетрясении. Было продолжено формирование унифицированной библиотеки сейсмических шумов сильных источников антропогенного шума.

Результаты выполненных исследований представлены в одной коллективной монографии, в 5 статьях в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах и в 5 докладах на международных и российских научных конференциях. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 1 программа представлена для государственной регистрации.

4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сильные камчатские землетрясения 2013 г. / Под ред. В.Н. Чеброва. - Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. "Новая книга", 2014. - 252 с., 4 с. ил. - коллективная монография.

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

2. Chebrova, A.Y., V.N.Chebrov, A.A.Gusev, A.V.Lander, E.M.Guseva, S.V.Mityushkina, and A.A.Raevskaya, The impacts of the M-W 8.3 Sea of Okhotsk earthquake of May 24, 2013 in Kamchatka and worldwide. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2015, 9, 4: 223-241, doi:10.1134/S074204631504003X.

3. Gordeev, E.I., T.K.Pinegina, A.V.Lander, and A.I.Kozhurin, Beringia: Seismic hazard and fundamental problems of geotectonics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2015, 51, 4: 512-521, doi:10.1134/S1069351315030039.

4. Lozinova, T.A., and A.V.Lander, Photoinduced formation of peroxy radicals in aqueous solutions of nucleobase derivatives at 77 K. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2015, 89, 5: 898-906, doi:10.1134/S0036024415050258.

5. Lozinova, T.A., A.V.Lobanov, and A.V.Lander, Hydrogen peroxide formation photoinduced by near-UV radiation in aqueous solutions of adenine derivatives at 77 K. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2015, 89, 8: 1492-1499, doi:10.1134/S0036024415080191.

6. Molchan, G. Stochastic earthquake source model: the omega-square hypothesis and the directivity effect. *Geophys. J. Int.*, 2015, 202, 1: 497-513, doi:10.1093/gji/ggv158.

Доклады на международных и российских научных конференциях

7. Букчин Б.Г., Фомочкина А.С., Панца Ж.Ф. Определение параметров очагов землетрясений с высоким разрешением // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2015. С.49-53.

8. Петухин А., Пинегина Т., Ландер А. Моделирование возможных источников отложений цунами на Камчатском побережье Берингова моря // Пятая научно-техническая конференция "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России", Петропавловск-Камчатский, 27 сентября - 3 октября 2015 г., <http://emsd.ru/conf2015lib/mlib5.html>

9. Чеброва А.Ю., Шевченко Н.А., Токарев А.В., Ландер А.В. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов: состояние, дополнение, контроль качества // Пятая научно-техническая конференция "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России", Петропавловск-Камчатский, 27 сентября - 3 октября 2015 г.

10. Gravirov, V., K.Kislov, and L.Gravirova, Application of a wavelet transform as pre-filtration unit for strong noisy seismic records. *CTBT: Science and*

Technology, 2015 Conference. Book of Abstracts. 22-26 June, Hofburg Palace, Vienna, Austria. T3.3-P4, p.139,

https://www.ctbto.org/fileadmin/user_upload/SnT2015/SnT2015_Abstracts.pdf

11. Kislov, K. and V. Gravirov, On use of artificial neural networks as a classifier of strong noisy seismic signals. *CTBT: Science and Technology, 2015 Conference. Book of Abstracts. 22-26 June, Hofburg Palace, Vienna, Austria. T3.3-P24, p.146,*

https://www.ctbto.org/fileadmin/user_upload/SnT2015/SnT2015_Abstracts.pdf

Программы для ЭВМ

12. Гравиров В.В., Кислов К.В., Винберг Ф.Э. SeismicDataReading - Программа чтения разноформатных сейсмических файлов данных для формирования выходных ASCII текстовых файлов, легко доступных для применения в независимых программах Matlab // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015611849, от 06/02/2015.

13. Гравиров В.В., Кислов К.В. DataCollector - Программа формирования выходных массивов данных для обучения нейронных сетей в системе Matlab // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015611797, от 06/02/2015.

14. Букчин Б.Г. Программа анализа неоднозначности определения тензора момента мелкофокусного землетрясения по длиннопериодным записям поверхностных волн (MISFIT_DC_ODV) (*представлена для государственной регистрации*).