

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ГЕОФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.34

№ госрегистрации 115080610013

Инв. № 2019-2



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН


докт. физ.-мат. наук

А.И.Горшков

«30» января 2019 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ
РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА
СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ
(заключительный, 2016-2018 годы)

Заведующий лабораторией регистрации
и интерпретации волновых полей
канд. физ.-мат. наук

 К.В. Кислов

Москва 2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,
вед. науч. сотр.
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

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




А.К. Некрасова

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ГЕОФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.34
№ госрегистрации 115080610013
Инв. № 2019-2

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТПЗ РАН
докт. физ.-мат. наук
_____ А.И.Горшков
« » 2019 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ
РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА
СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ
(заключительный, 2016 – 2018 гг.)

Заведующий лабораторией регистрации
и интерпретации волновых полей
канд. физ.-мат. наук

К.В. Кислов

Москва 2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,
вед. науч. сотр.
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 52 с., 14 рис., 2 табл., 82 источника

ФОКАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ТЕНЗОР ПЛОТНОСТИ МОМЕНТА, ВТОРЫЕ МОМЕНТЫ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ, ЦУНАМИГЕННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ, ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ, МОДЕЛИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ ГРУППА, ФАЗОВЫЕ АЛГОРИТМЫ ЛОКАЦИИ, РАННЕЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ

Исследования, проведенные по теме с 2016 по 2018 гг., включали: построение моделей очагов современных землетрясений; разработку программного обеспечения для быстрого определения параметров землетрясений; программ для оценки устойчивости определения параметров землетрясений к изменению используемого набора записей поверхностных волн; исследование Южно-Озерновского землетрясения; оперативное исследование Ближне-Алеутского землетрясения; исследование сейсмичности и цунамигенного потенциала Черного моря; построение моделей очагов Курило-Камчатской дуги; участие в составлении листа Геологической Карты РФ; разработку методики оценки магнитуды сильного субдукционного землетрясения по косейсмическим опусканиям морских побережий; модернизацию программы определения координат и времени землетрясений; реконструкцию геодинамических обстановок, приведших к образованию современной структуры зоны сочленения; исследование точности локации микросейсмических событий по данным поверхностных сейсмических групп; исследование применения в сейсмологии и разработку фазовых алгоритмов локации микросейсмических источников; разработку алгоритмов анализа сейсмических данных с использованием вейвлет-преобразования и нейросетей; разработку методов организации системы раннего предупреждения для защиты точечных и протяженных объектов; проведение опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеоданных; определение влияния глубины промерзания грунта на сейсмический сигнал; запись и формирование унифицированной библиотеки сейсмических шумов различной природы.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ	6
2.	ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	9
2.1.	Построение моделей очагов современных землетрясений из анализа широкополосных записей телесеismicических волн	9
2.1.1.	Построение модели очага Непальского землетрясения 25 апреля 2015 г.	9
2.1.2.	Детальное изучение двух Калининградских землетрясений 2004 года	10
2.1.3.	Землетрясение на Аляске 23 января 2018 г.	11
2.2.	Применение параллельных вычислений для ускорения расчета параметров очага землетрясения	11
2.3.	Оценка ошибок определения параметров землетрясения по записям поверхностных волн	12
2.4.	Исследование сейсмичности и цунамигенного потенциала Черного моря	13
2.5.	Исследование землетрясений Камчатки	14
2.6.	Сейсмичность, модели тектонических движений и очагов Курило-Камчатской и Алеутской дуг	15
2.6.1.	Сейсмичность и модели очагов Курило-Камчатской дуги	15
2.6.2.	Участие в составлении листа Геологической Карты РФ	17
2.6.3.	Детальная трехмерная модель зоны сочленения сейсмофокальных зон Камчатки и Алеут	18
2.6.3.1.	Модели очагов сильнейших землетрясений Камчатки	18
2.6.3.2.	Исследование Ильпырского землетрясения 2013 г.	20
2.7.	Реконструкция геодинамических обстановок, приведших к образованию современной структуры зоны сочленения	21
2.7.1.	Программа расчета движения жестких литосферных плит на поверхности сферической Земли (HAND_ROT)	21
2.7.2.	Программа расчета и визуализации древних реконструкций жестких литосферных плит, имевших произвольную историю движений на поверхности сферической Земли (ROT_GRD)	22
2.8.	Новые методики и программы для исследования очагов землетрясений. Новая методика оценки магнитуды	22
2.8.1.	Новая методика оценки магнитуды	22
2.8.2.	Программа расчета и графического представления диаграмм направленности для тензорных точечных очагов землетрясений (QBALL)	27
2.8.3.	Программа расчета годографов прямых и рефрагированных P и S-волн для горизонтально-однородной среды (LOC_TTTAB)	28

2.8.4.	Программа определения координат гипоцентра землетрясения и его магнитуды по временам вступления и амплитудам сейсмических волн на основе минимаксного критерия (НММ)	28
2.8.5.	Программа расчета и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений Р-волн (FA)	29
2.9.	Вычислительные методы анализа микро-сейсмичности на основе данных поверхностных малоапертурных сейсмических групп	29
2.9.1.	Теоретическое исследование точности локации слабых микросейсмических событий по данным поверхностных сейсмических групп	29
2.9.2.	Разработка и модельные исследования качества статистически оптимального фазового алгоритма оценки координат (локации) микро-сейсмических источников по данным групп	30
2.9.3	Робастные алгоритмы многоканальной обработки записей микро-землетрясений, зарегистрированных поверхностными малоапертурными сейсмическими группами)	30
2.10.	Использование искусственных нейронных сетей в качестве инструмента анализа сейсмических записей; методы предобработки сейсмических данных	32
2.11.	Раннее предупреждение о землетрясении	34
2.12.	Разработка аппаратуры автоматизированного мониторинга разноглубинной температуры грунта и мощности мерзлого слоя	37
2.13.	Сейсмическая регистрация и составление библиотеки шумов	38
3.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
4.	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	43

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.

Разработка и совершенствование методов получения и анализа сейсмических данных определяется сложностью задач, стоящих перед современными геофизическими исследованиями. Полнота знаний о процессах, происходящих в недрах Земли, о Земле, как о планете в целом, о взаимовлиянии геосфер, о полезных ископаемых во многом зависит от качества анализа данных.

Фокальный механизм землетрясения является одним из важнейших параметров, характеризующих сейсмическое событие. 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 и детально изучены параметрические модели Непальского землетрясения 2015 года, двух сильнейших за последние 300 лет землетрясений, произошедших в Калининградской области 21 сентября 2004 года с интервалом в два с половиной часа и землетрясения на Аляске, произошедшего 23 января 2018 года.

Определение фокального механизма и глубины очага землетрясения прямым перебором их возможных значений на сетке в параметрическом пространстве позволяет оценить уровень их разрешения. Такой подход, в случае достаточно высокой детальности перебора, требует значительных затрат компьютерного времени. В рамках исследований по теме была продолжена разработка программного обеспечения для быстрого определения параметров очага землетрясения, базирующегося на применении параллельных вычислений. Программы были оттестированы на моделях, построенных для ряда современных землетрясений.

Разработана предварительная версия программного обеспечения для оценки ошибок определения фокального механизма и глубины землетрясения, связанных с изменением используемого набора записей поверхностных волн.

По данным за 1900-2015 гг. рассчитана цифровая модель (карта) параметра сейсмической активности и цунамигенного потенциала для всего Черноморского региона. Для построения карты разработана методика

вычисления параметра активности, основанная на методе ядерного сглаживания.

Проведены исследования Южно-Озерновского, Ближне-Алеутского и Ильпырского землетрясений.

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 ИВиС ДВО РАН разработаны трехмерные количественные модели очагов возможных сильнейших землетрясений Камчатской зоны субдукции.

Разработана методика оценки магнитуды сильного субдукционного палеоземлетрясения по косейсмическим опусканиям морских побережий.

Модернизирована программа определения гипоцентра и времени землетрясений, допускающая совместную интерпретацию данных локальных и общемировых сейсмических сетей.

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.

Показано, что использование методов оптимального статистического синтеза позволяет предложить фазовый алгоритм, обеспечивающий уменьшение ошибки локации микросейсмических источников в условиях, когда помехи на выходах датчиков содержат сильную когерентную составляющую искусственного происхождения.

Продолжена модификация и отладка программ и алгоритмов анализа сейсмических данных с использованием вейвлет-преобразования и нейросетей. Подобный анализ необходим при высоком уровне сейсмических шумов, при исследовании маломagnitudeных событий и, из-за высокой скорости обработки данных необходим в системах раннего предупреждения о землетрясении.

Разработаны методологические основы раннего предупреждения о землетрясении, направленные на определение возможностей и ограничений существующих научно-технических подходов, предлагаемых сейсмологией в реальном времени для смягчения сейсмического риска на протяженных и точечных объектах.

Продолжено формирование унифицированной библиотеки сейсмических шумов.

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

Работы по теме включают: построение моделей очагов современных землетрясений; применение параллельных вычислений для ускорения определения очаговых параметров; оценку ошибок определения параметров землетрясений; тектонические исследования современных землетрясений; разработку новой методики оценки магнитуды; разработку методов определения параметров землетрясений по совместным данным локальных и общемировых сейсмических сетей; синтез фазового алгоритма локации микросейсмических источников; разработку алгоритмов анализа сейсмических данных с использованием вейвлет-преобразования и нейросетей; изучение кибербезопасности интеллектуальных систем; получение сейсмических записей с параллельной записью метеопараметров; определение влияния глубины промерзания грунта на сейсмический сигнал; расширение библиотеки шумов, их анализ и классификация.

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 моделей очагов современных землетрясений из анализа широкополосных записей телесеismicических волн

В 2016-2018 гг. выполнены исследования фокальных механизмов ряда современных землетрясений.

2.1.1. Построение модели очага Непальского землетрясения 25 апреля 2015 г.

Модель очага Непальского землетрясения 2015 года построена с использованием амплитудных спектров основных мод Лява и Рэлея в спектральной полосе от 200 до 250 секунд.

Получены следующие значения углов для фокального механизма - 102° для угла простираания, 84° для угла падения и 90° для угла подвижки (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 $M_w = 7.9$.

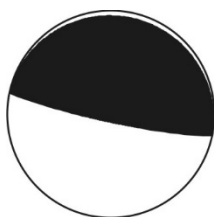


Рис. 1. Фокальный механизм Непальского землетрясения 25 апреля 2015.

Субгоризонтальная нодальная плоскость, погружающаяся на северо-северо-восток, была принята за плоскость разлома. Представлены интегральные характеристики очагового процесса, по вторыми моментам, определенным в полосе периодов от 80 до 120 секунд, и фиксированным фокальным механизмом, полученным в приближении мгновенного точечного источника. 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° и 180° .

Сравнение рассчитанных спектров с наблюдаемыми дает значение нормированной функции невязки амплитудных спектров ϵ для каждой комбинации значений искомым параметров. 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. Получаем для времени действия источника 38 с, для максимальной протяженности источника

значение 180 км. На рис. 2 представлена схема модели очага Непальского землетрясения 25 апреля 2015.

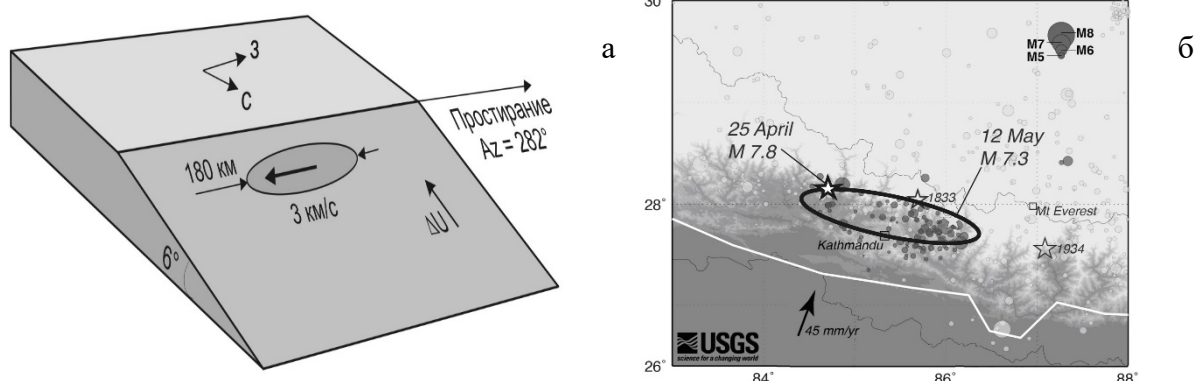


Рис. 2. Схема модели Непальского землетрясения 25 апреля 2015 (оси элипса соответствуют большой и малой оси очаговой области) (а); Сравнение распределения афтершоков землетрясения с оценками протяженности и ориентации очаговой области (б).

Сравнение оценок конфигурации очаговой области, с распределением афтершоков подтверждает оценку направления распространения разрыва с запада на восток. Результаты исследования получены с использованием программы [73], представлены в публикации [4] и докладах [42, 46].

2.1.2. Детальное изучение двух Калининградских землетрясений 2004 года

По результатам совместного анализа амплитудных спектров поверхностных волн и знаков первых вступлений совместно с Санкт-Петербургскими геологами изучено сильнейшее за последние 300 лет сейсмическое событие в Калининградской области (21 сентября 2004 г.).

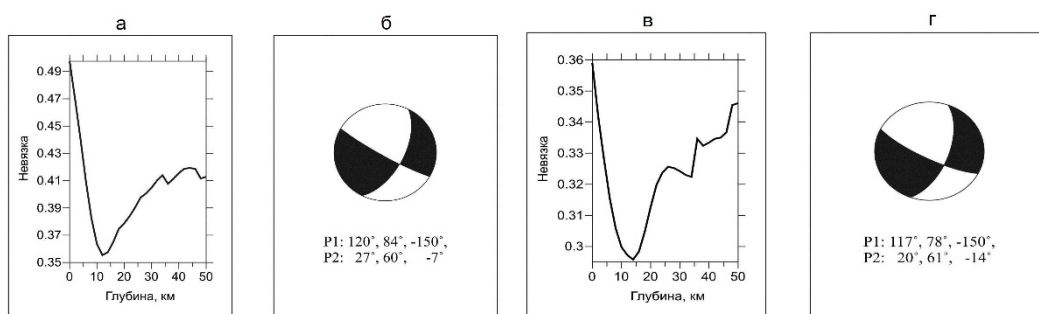


Рис. 3. Определение очаговых параметров землетрясения, 24 сентября 2004 г. 11 ч. 05 мин (а, б) и 13 ч 32 мин (в, г): а, в - частная функция невязки для глубины источника; б, г - фокальный механизм наилучшего двойного диполя; P1 и P2 - нодальные плоскости.

Оценки очаговых параметров сильнейших толчков (в 11:05 и в 13:32 по местному времени) приведены на рис.3. Для глубины источника принято значение, при котором совместная невязка (различие наблюдаемых и

теоретических значений) амплитудных спектров поверхностных волн и знаков первых вступлений минимально. Оценка глубины очага –12 км для первого толчка и 14 км для второго. Сейсмические моменты: $0,65 \times 10^{16}$ Н·м (соответствует моментной магнитуде $M_W=4,5$) 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.

Результаты исследования представлены в публикациях [2, 3] и в докладе [41].

2.1.3. Землетрясение на Аляске 23 января 2018 г.

Проведены оценки фокального механизма и уточнения глубины источника, землетрясения (рис 4). Полученная величина сейсмического момента $0,82 \cdot 10^{21}$ н·м соответствует магнитуде $M_w = 7,9$. Время действия источника 37,5 с. Максимальная протяженность источника 180 км.

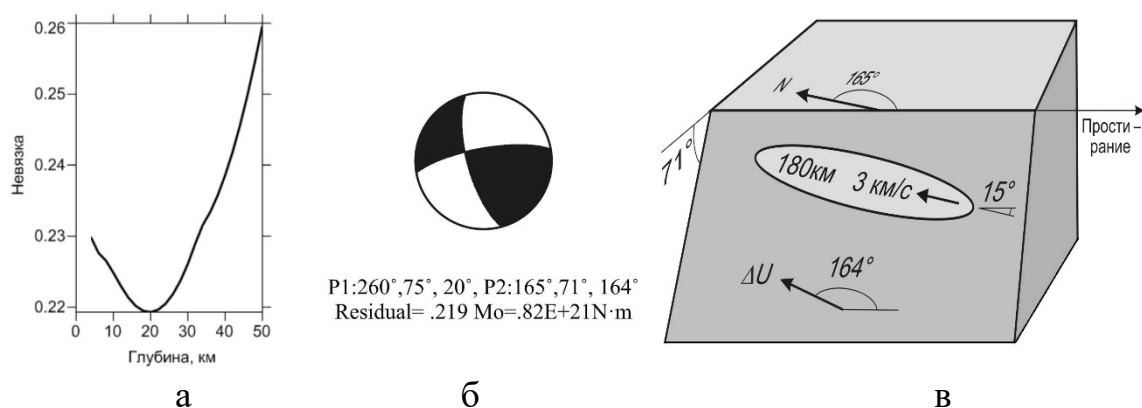


Рис. 4. Функция невязки для глубины источника (оценка глубины равна 20 км) (а); его фокальный механизм (б), модель очага землетрясения (в).

Проанализирована возможность идентификации плоскости разлома в приближении вторых моментов. Исследована возможность идентификации плоскости разлома, большая ось которого и распространение разрыва направлены вдоль оси простирания, в зависимости от фокального механизма землетрясения. Выводы подтверждены результатами, полученными для двух сильных землетрясений: Чилийского землетрясения 27 февраля 2010 г., и землетрясения 11 апреля 2012 г. у побережья Северной Суматры.

Результаты представлены в статье [11] и докладе [66].

2.2. Применение параллельных вычислений для ускорения расчета параметров очага землетрясения

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 и оценку моментной магнитуды события. Как следствие, применяемые к таким событиям методы оценки углов фокального механизма должны обеспечивать достаточно высокий уровень их разрешения, что приводит к большим вычислительным затратам. Для сокращения компьютерного времени создана программа с распараллеливанием вычислений по технологии OpenMP. Программа была успешно применена для ускорения определения параметров очага землетрясения по спектрам поверхностных волн. А именно, при изучении сильнейшего афтершока землетрясения в Тохоку, 11.03.2011, $M_w = 8.4$, произошедшего через полчаса после основного толчка. Записи сильно зашумлены излучением предшествующего главного события, что вызывает дополнительные сложности и временные затраты в их обработке. В Таблице 1 представлены фокальные механизмы и фазовые невязки для четырех эквивалентных решений, полученных из анализа амплитудных спектров поверхностных волн. Оптимальным является решение 1, где углы простирания, падения и подвижки: 33° , 89° и 91° соответственно. Значение сейсмического момента равно $0.46 \cdot 10^{22}$ Нм. Что соответствует значению моментной магнитуды $M_w = 8.4$. Оценка глубины наилучшего точечного источника равна 10 км.

Таблица 1. Фокальные механизмы и фазовые невязки для четырех эквивалентных решений.

Номер решения	Угол падения	Угол простирания	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

Время работы программы с распараллеливанием на 2 ядра уменьшилось больше чем в 2 раза по сравнению с ее версией для 1 ядра. Результаты исследования представлены в статье [32] и докладах [57, 65].

2.3. Оценка ошибок определения параметров землетрясения по записям поверхностных волн

В рамках программного обеспечения определения параметров очага землетрясения в приближении точечного двойного диполя разработана предварительная модификация программы, выполняющей оценку погрешности, связанной с неустойчивостью решения к изменению используемого набора записей поверхностных волн и включающей анализ устойчивости результата при использовании различных выборок

зарегистрированных записей поверхностных волн. В программе применяется метод «Джекнайф» — один из методов ресэмплинга, используемый для оценки погрешности в статистическом выводе (обобщение информации из выборки для получения представления о свойствах генеральной совокупности).

Программа использована для оценки параметров очага трех событий: землетрясения в Непале 25 апреля 2015 года, сильнейшего афтершока в Тохоку 11 марта 2011 года и землетрясения на Аляске 23 января 2018 года. Полученные оценки погрешности представлены в Таблице 2.

Детализация параметрической сетки для события в Непале - угол падения с шагом 2° от 60° до 90° , угол простирания с шагом 2° от 80° до 140° , угол подвижки с шагом 2° от 60° до 120° и глубина с шагом 2 км от 0 км до 40 км. Количество записей $n = 31$.

Детализация параметрической сетки для события в Тохоку - угол падения с шагом 0.1° от 86° до 90° , угол простирания с шагом 0.5° от 14° до 58° , угол подвижки с шагом 0.2° от 86° до 97° и глубина с шагом 0.5 км от 5 км до 20 км. Количество записей $n = 20$.

Детализация параметрической сетки для события на Аляске - угол падения с шагом 2° от 60° до 120° , угол простирания с шагом 2° от 60° до 90° , угол подвижки с шагом 2° от 0° до 60° и глубина с шагом 2 км от 0 км до 50 км. Количество записей $n = 40$.

Таблица 2. Результат применения метода «Джекнайф»

Параметры	Угол падения ($^\circ$)	Угол простирания ($^\circ$)	Угол подвижки ($^\circ$)	Глубина (км)
Непал 25 апреля 2015 года				
Среднее значение	85.23	116.71	92.77	5.42
Оценка погрешности	6.02	6.55	6.02	4.98
Тохоку 11 марта 2011 года (сильнейший афтершок)				
Среднее значение	89.09	34.45	90.75	10.35
Оценка погрешности	0.46	6.78	1.03	5.56
Аляска 23 января 2018 года				
Среднее значение	75.35	260	22	20.45
Оценка погрешности	5.85	0	0	6.47

Результаты исследования представлены в докладе [67].

2.4. 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 2016-2018 гг. детально разработана серия моделей типичных сильных землетрясений для всей акватории Черного моря, исследовано географическое распределение типичных магнитуд. По данным за 1900-2015 гг. рассчитана цифровая модель (карта) параметра сейсмической активности для Черноморского региона (рис. 5). На основе метода ядерного сглаживания разработана методика вычисления параметра активности, не требующая предварительного деления региона на условно-однородные области.

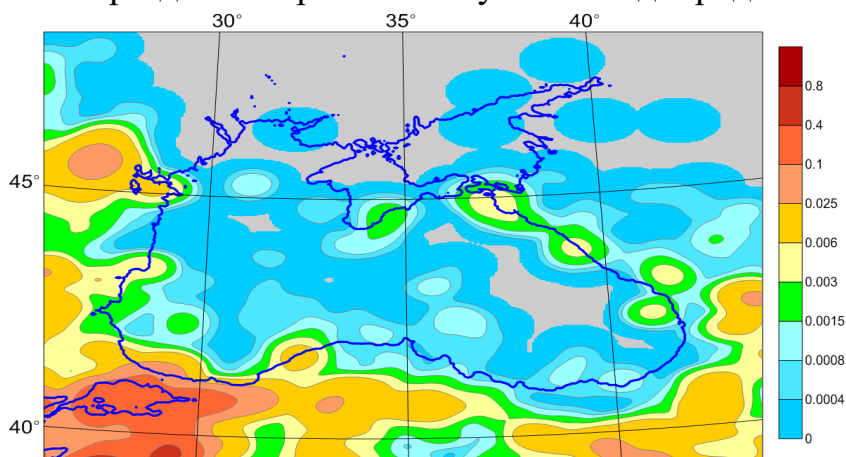


Рис. 5. Распределение параметра сейсмической активности (по приведенной магнитуде $M = 5.5$ и постоянном для всего региона наклоне графика повторяемости $b = 0.9$) Черноморского региона. Шкала активности в условных единицах (значения нормированы на максимальные значения).

Результаты исследования представлены в докладе [43].

2.5. Исследование землетрясений Камчатки

В сотрудничестве с Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" выполнены исследования современных землетрясений Камчатского региона.

Проведено подробное исследование Южно-Озерновского землетрясения, $M_w=6.6$, происшедшего 29 марта 2017 г. в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской сейсмоактивных дуг. Землетрясение представляет особый интерес для выяснения тектонической структуры и процессов, происходящих в данной цунамеопасной зоне.

Проведено оперативное исследование Ближне-Алеутского землетрясения, $M_w=7.7$, сильнейшего в районе Командорских островов за время инструментальных наблюдений на Камчатке. Землетрясение произошло в районе "Командорской брешли", где предполагается возможность возникновения сильнейшего цунамигенного мегаземлетрясения с магнитудой ~ 9 .

Подробно результаты исследования представлены в монографии [1], публикациях [15, 16, 17, 18] и докладах [55, 56]. Для выполнения исследований разработана программа для ЭВМ [76].

2.6. Сейсмичность, модели тектонических движений и очагов Курило-Камчатской и Алеутской дуг

2.6.1. Сейсмичность и модели очагов Курило-Камчатской дуги

Для потенциально опасных областей построены характерные модельные очаги землетрясений для использования в расчетах модельных цунами.

Гипоцентры цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской дуги 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 (рис. 6). Все эти области в разной степени, потенциально цунамиопасны.

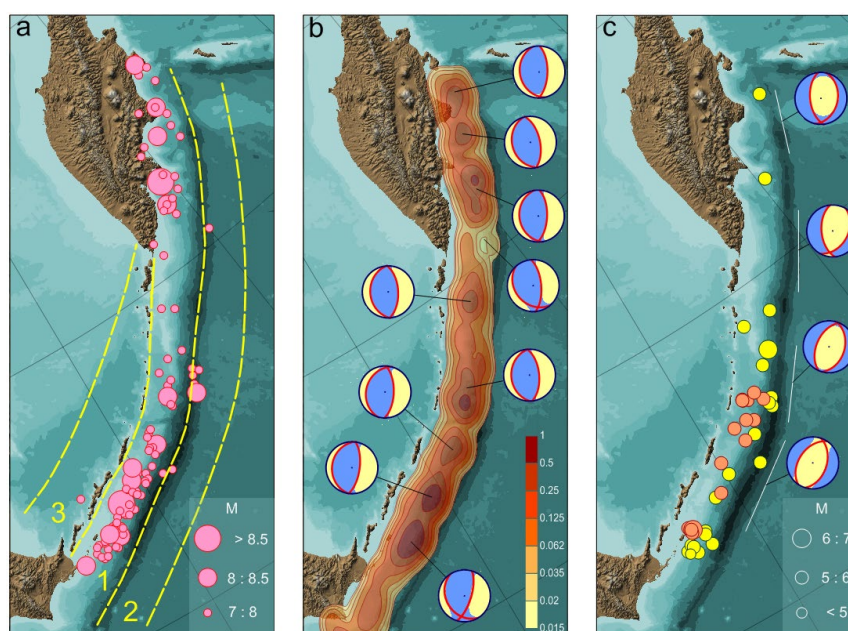


Рис. 6. Сейсмичность и механизмы землетрясений Курило-Камчатской дуги: **а** - эпицентры сильнейших землетрясений за период 1904-2014 гг. (желтым пунктиром и номерами показано деление региона на зоны); **б** - карта сейсмической активности области пологого залегания сейсмофокальной зоны и диаграммы типичных тензоров сейсмического момента для землетрясений этой области; **с** - эпицентры "нетипичных" землетрясений (желтые кружки - сдвиги, оранжевые - вертикальные подвижки) и средние тензоры сейсмического момента океанического вала.

Пологий участок зоны субдукции. Подавляющее число землетрясений региона, в том числе и сильнейших, происходит в Курило-Камчатской зоне субдукции (зона 1). 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 предполагается, 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.

Отдельно изучен вопрос о присутствии в зоне 1 "нетипичных" событий (вертикальные подвижки по вертикальным разломам ортогональным дуге и сдвиги по вертикальным плоскостям любого простирания). Отмечено, что землетрясения, которые могут отражать движения по поперечным к дуге структурам, происходят очень редко (в среднем раз в год), и являются относительно слабыми. Большинство нетипичных событий относится к району Южных и Средних Курил. Возможно, это связано с переходом, при движении с севера на юг, от нормальной к косо́й субдукции. При построении соответствующих модельных механизмов использовался реальный тензор сейсмического момента ближайшего нетипичного землетрясения при модельной магнитуде $M = 7.8$.

Океанический вал (зона 2). Землетрясения внешнего океанического вала связаны с вертикальным изгибом Тихоокеанской плиты перед погружением в зону субдукции. За столетие инструментальных наблюдений в зоне 2 зафиксировано 9 землетрясений с $M \geq 7$, и общий уровень сейсмической активности примерно на порядок ниже, чем 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 построено два ряда модельных очагов, соответствующих магнитудам 8.5 и 8.0.

Ориентируясь на описания рельефа и модели развития юго-восточного склона желоба, мы использовали здесь для модельных очагов в основном плоскости подвижки, падающими под океан (примерно на юго-восток). В северной части вала, в районе поднятия Обручева, модели построены для двух направлений падения.

Задуговые акватории Охотского моря (зона 3). В тылу дуги располагается много эпицентров землетрясений с $M \geq 7$, однако все они произошли в зоне субдукции на глубинах больше 100 км, исключая 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. западнее острова Итуруп и имело магнитуду 6.8 - 7. Как и в других

районах с подобным уровнем сейсмичности, для модельных очагов здесь была выбрана магнитуда 8 и тектоническая модель косо́го столкновения Южно-Курильского блока с Хоккайдо.

На рис. 7 приведены модели очагов, построенные для Курило-Камчатской дуги, Охотского и Берингова морей, океанического вала западной части Алеутского желоба (всего 114 моделей). 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.

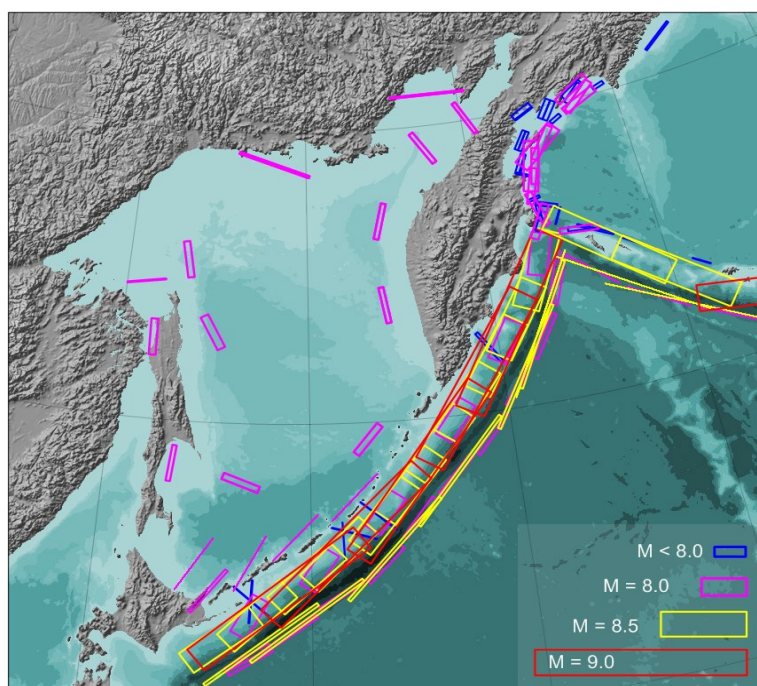


Рис. 7. Проекция модельных очагов на дневную поверхность.

Результаты представлены в публикациях [7, 8, 9, 33] и в докладе [45].

2.6.2. 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 опубликован в Объяснительной записке к данному листу геологической карты.

2.6.3. Детальная трехмерная модель зоны сочленения сейсмофокальных зон Камчатки и Алеут

2.6.3.1. Модели очагов сильнейших землетрясений Камчатки

В рамках совместных работ с ИВиС ДВО РАН разработаны трехмерные количественные модели очагов возможных сильнейших землетрясений Камчатской зоны субдукции. Используются данные Камчатского и мировых каталогов о пространственном расположении, размерах и механизмах землетрясений региона.

В ходе решения задачи оценки экстремальных амплитуд цунами получены модели очагов цунамигенных землетрясений у Восточного побережья Камчатки. Для максимального землетрясения выбрана магнитуда $M_w=9.0$, что соответствует имеющимся данным для региона за время наблюдений и по результатам исследования исторических и палео-землетрясений.

Географическое положение и механизмы модельных очагов соответствуют типичным для данного района. Подавляющее большинство сильнейших землетрясений, происходящих у восточного побережья Камчатки, относится к верхнему участку зоны субдукции. Это пологие (угол падения $\sim 20^\circ$) надвиги, соответствующие ортогональному погружению Тихоокеанской плиты под Камчатку (Охотскую плиту). Среди сотен таких однотипных по механизму событий зарегистрировано несколько нетипичных. Два из них произошли вблизи Шипунского полуострова. Хотя их магнитуды относительно невелики (до $M_w = 5.8$), возможность подобных более сильных подвижек требует специального рассмотрения. Кроме того, сильные землетрясения могут происходить с внешней стороны желоба на океаническом валу, где происходит искривление плиты перед погружением в зону субдукции. Обычно это сбросы либо вертикальные подвижки.

Для большинства землетрясений характерны устойчивые масштабные соотношения между размерами очага (длиной и шириной) и амплитудой подвижки. Это позволяет использовать при моделировании эмпирические соотношения, связывающие магнитуду землетрясения с геометрическими характеристиками его очага, непосредственно определяющими его цунамигенность. Однако в отдельных случаях происходят "цунами-землетрясения", порождающие неожиданно мощные (по отношению к его магнитуде) цунами.

Модельные очаги разделены на четыре группы (рис. 8):

- (модели 1 - 3) - типичные субдукционные землетрясения, для построения очаговых параметров которых использованы типичный для Восточной Камчатки надвиговый механизм и эмпирические соотношения между магнитудой и размерами очага (рис. 9);

- (модели 4 - 6) - "цунами-землетрясения", обладающие геометрией сходной с предыдущей группой, но меньшей (в данном случае в два раза)

шириной очага; возникающий при этом недостаток сейсмического момента компенсируется соответствующим увеличением амплитуды подвижки;

- (модели 7, 8) - нетипичные события, происходящие на разломах, ограничивающих Шипунский полуостров;

- (модель 9) - вертикальная подвижка по вертикальному разлому в районе внешнего океанического вала (с опусканием крыла, обращенного к желобу).

Две первых группы моделей включают по три события, разнесенные вдоль простирания Камчатской зоны субдукции. При этом южные модельные очаги соответствуют известным или реконструированным мегаземлетрясениям 1952 г., 1737 г. и ~ 700-900 г.н.э.. Модели центральных очагов располагаются напротив Шипунского полуострова и, позволят смоделировать максимальные возможные цунами в районе Авачинского и Кроноцкого заливов. Северные модели призваны оценить экранирующий эффект Шипунского полуострова при распространении волны цунами к побережью Южной Камчатки.

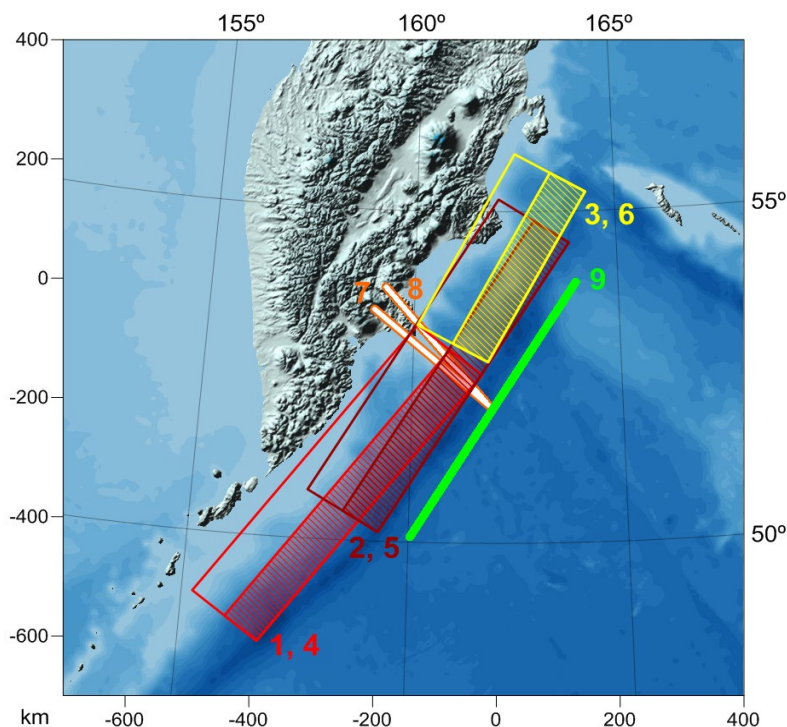


Рис. 8. Представленные модельные очаги.

По построенным модельным очагам были рассчитаны подвижки земной поверхности, необходимые для моделирования волн цунами.

Результаты исследования представлены в публикациях [27, 28, 34, 35] и докладах [61, 62].

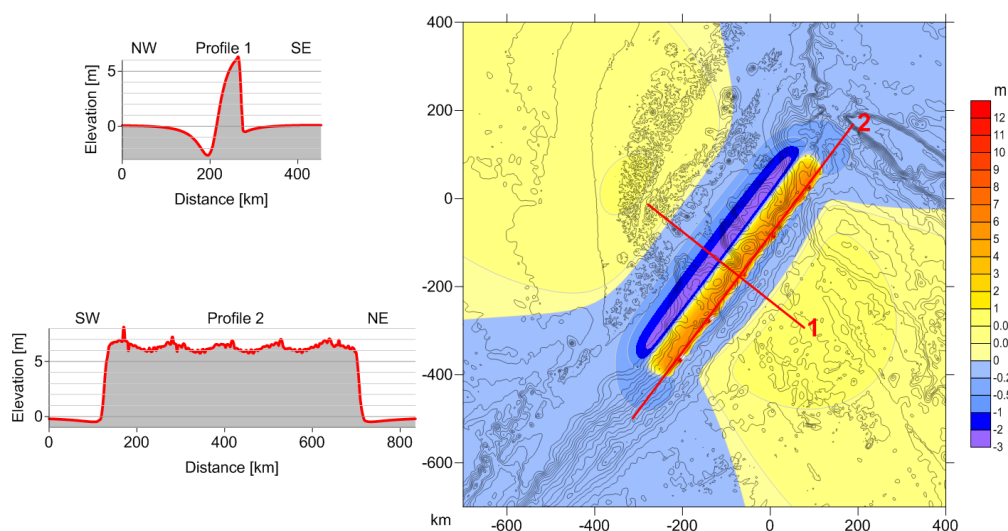


Рис. 9. Поле вертикальных смещений земной поверхности и дна океана в результате модельного землетрясения $M_w=9.0$. Слева приведены разрезы поля смещений по профилям 1 и 2, указанным на карте.

2.6.3.2. Исследование Ильпирского землетрясения 2013 г.

Совместно с КФ ФИЦ ЕГС РАН проведено комплексное изучение Ильпирского землетрясения 13 марта 2013 г. $M_w=5.8$, $M_L=6.2$. Оно является сильнейшим для этого района за время детальных сейсмологических наблюдений и произошло в нетипичном месте на севере Камчатского перешейка. Максимальная интенсивность сотрясений, вызванных этим землетрясением, зафиксирована на расстоянии ~ 30 км и оценена как $I = 6-7$ баллов по шкале MSK-64.

Механизм очага Ильпирского землетрясения определен как взброс-сдвиг с субгоризонтальной осью сжатия в направлении СВ-ЮЗ двумя независимыми методами определения механизма, согласующимися между собой: через инверсию широкополосных волновых форм региональных станций в тензор сейсмического момента (ТСМ) и по знакам первых вступлений продольных волн. Определены механизмы двух сильнейших афтершоков, в результате чего, выявлено изменение очаговых движений в ходе афтершокового процесса.

Зарегистрировано около 200 афтершоков Ильпирского землетрясения с в диапазоне магнитуд $M_L = 3.0-5.7$ ($K_S = 7.5-12.9$), гипоцентры большинства из них (80%) определены на глубине менее 10 км. Облако мелкофокусных афтершоков имеет размеры 48×12 км и вытянуто в направлении СЗ-ЮВ. Сильнейший афтершок с $M_L = 5.7$, $M_w = 4.8$ зарегистрирован 06.05.2013 г. При нем проявилась смена типа подвижки в очаге.

Сделан вывод об убывающем во времени характере афтершокового процесса, с двумя последовательными стадиями, имеющими разный характер затухания. Общая длительность затухающего процесса ~ 75 суток.

По результатам оперативной обработки афтершоковой последовательности афтершоковое облако Ильпырского землетрясения обладало ярко выраженной линейностью и большой протяженностью. Основная причина возникновения этого артефакта – малое количество станций, участвующих в определении гипоцентров большинства афтершоков и их квазилинейное расположение. Построены доверительные области, в пределах которых решения практически равноценны.

Сделано предположение о положении Ильпырского землетрясения на границе Северо-Американской и Охотской плит севернее области сочленения последней с Алеутской дугой.

Результаты исследования представлены в публикациях [26, 31] и докладе [64].

2.7. Реконструкция геодинамических обстановок, приведших к образованию современной структуры зоны сочленения

По данной тематике разработаны две программы для ЭВМ.

2.7.1. Программа расчета движения жестких литосферных плит на поверхности сферической Земли (HAND_ROT) [79]

Программа "*HAND_ROT*" предназначена для решения прямой и обратной задач расчета движения литосферных плит на поверхности сферической Земли. В случае прямой задачи используются известные параметры вращения плит за заданный промежуток геологического времени. Программа включает встроенную базу данных с параметрами абсолютного движения более чем 300 плит (микроплит, блоков, горячих точек) за последние 160 млн.лет. Возможно пополнение базы. По этим параметрам путем интерполяции рассчитываются абсолютные или относительные перемещения любой плиты (или пары плит) для заданного возрастного промежутка. Возможен расчет траекторий отдельных точек, в том числе переходящих с одной плиты на другую. Допускается расчет как прямых, так и обратных движений во времени. Решение обратной задачи подразумевает оценку параметров вращения по перемещению плиты, заданному мышью на экране. Границы плит задаются пользователем. Построенные перемещения и траектории отображаются на экране, фиксируются в протоколе параметров, и могут быть сохранены для графических построений и дальнейших вычислений. В основе алгоритма программы лежит использование ортогональных матриц, описывающих вращения. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения.

2.7.2. Программа расчета и визуализации древних реконструкций жестких литосферных плит, имевших произвольную историю движений на поверхности сферической Земли (ROT_GRD) [80]

Программа **"ROT_GRD"** предназначена для создания цифровых моделей и визуализации древних геодинамических реконструкций многочисленных литосферных плит, каждая из которых имела сложную независимую историю перемещений на поверхности сферической Земли. Современные границы участвующих в реконструкции плит могут быть выбраны произвольно и задаются контурами их границ. Также произвольными могут быть и движения каждой из плит, которые задаются последовательностями стадийных полюсов и углов поворота. Результатом работы программы является карта реконструкции плит в заданной географической проекции. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения.

2.8. Новые методики и программы для исследования очагов землетрясений. Новая методика оценки магнитуды

2.8.1. Новая методика оценки магнитуды

Проведено детальное исследование морских аккумулятивных террас на восточном побережье Камчатки. Выделены следы быстрых вертикальных перемещений берега относительно уровня моря в их геологическом строении. Эти явления можно сгруппировать по возрасту в несколько крупных событий, интерпретируемых как древние мегаземлетрясения. На Юге Камчатки (южнее Шипунского полуострова) выявлено три таких события за доисторический период времени, охватывающий последние ~3.5 тыс. лет по ^{14}C (1150 – 1250 ^{14}C л. н., 2400-2500 ^{14}C л. н. и 3300 – 3500 ^{14}C л. н.). События сопровождались резким опусканием прибрежной полосы на протяжении десятков и даже сотен километров. Выявлена четкая закономерность в пространственном распределении амплитуд опусканий, одинаково выполняющаяся для каждого мегаземлетрясения. На рис.10 приведен пример наиболее полно исследованного палеоземлетрясения, произошедшего в интервале 738 - 965 гг.н.э. (1150 – 1250 ^{14}C л.н.). Все побережье разделяется на два участка. Если на северо-западном побережье Авачинского залива наблюдаются опускания не превосходящие 1 м, то южнее на протяжении не менее 150 км те же события вызвали существенно большие погружения берега на 2.5 ÷ 4 м. Резкий скачок измеренных амплитуд погружений происходит на коротком участке побережья, не превышающем по протяженности 40 км.

Отмечено, что резкое изменение амплитуд погружений происходит в окрестности пересечения берегом крупнейшей поперечной структуры

Южной Камчатки. Выделена Малко-Петропавловская или Начикинская зона дислокаций юго-восточного простирания. Зона протянулась поперек основного простирания Камчатских структур примерно от южного замыкания Центрально-Камчатской депрессии к Авачинской бухте. Вполне вероятно, что она продолжается и далее в Авачинском заливе серией разломов на шельфе и континентальном склоне вплоть до глубоководного желоба. Ее можно назвать поперечной Авачинской зоной. Амплитуды опусканий побережья Южной Камчатки представлены на рис. 10.

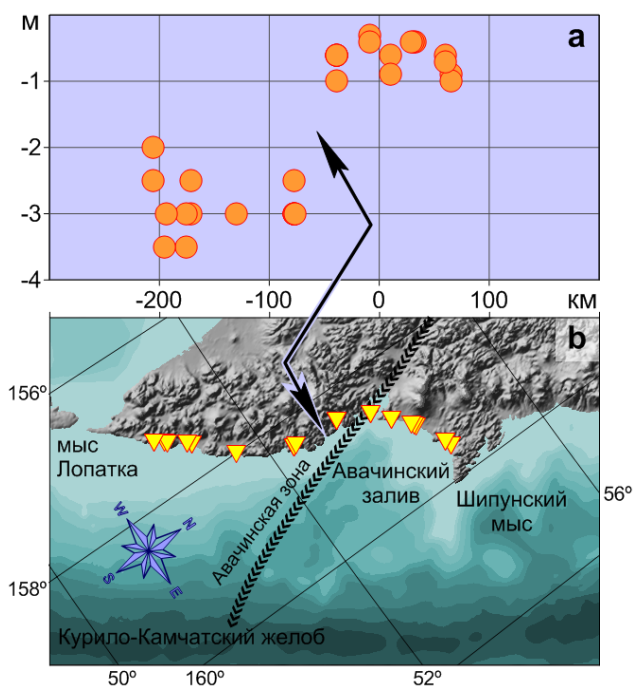


Рис. 10. Амплитуды опусканий побережья Южной Камчатки при палеоземлетрясении 738 - 965 гг.н.э. **а** - результаты полевых измерений быстрых погружений берега различных пунктов побережья, отмеченных треугольниками на **б** - карте района исследований. Координаты (км) на горизонтальных осях графика и карты совпадают. Линия со стрелками отмечает участок побережья, где происходит резкий скачок опусканий. Показано предполагаемое положение поперечной Авачинской зоны.

Присутствие поперечной структуры в рассматриваемом районе не ограничивается современным тектоническим этапом. Не менее чем 50 млн. лет, на различных стадиях развития, Камчатка район Авачинской зоны неоднократно разделял (не обязательно в строгом соответствии с современной структурой) крупные области континентальной окраины с различной геодинамикой. Это следует из существенных различий в геологической структуре Камчатки севернее и южнее данного района, и дает возможность предполагать различие в реологии соответствующих отрезков зоны субдукции.

На развитие субдукционных процессов и связанных с ними крупнейших землетрясений наибольшее влияние могла оказать серьезная перестройка Камчатской зоны субдукции, произошедшая в период примерно

10 - 2 млн. лет. По современным представлениям в это время с тихоокеанской окраиной Камчатки столкнулись фрагменты потухшей мел-палеогеновой вулканической дуги, представленные в современной структуре крупными полуостровами: Шипунским, Кроноцким и, возможно, Камчатским. Произошло запираение зоны субдукции, следы которой сохранились западнее. А восточнее, в результате продолжавшегося движения Тихоокеанской плиты, возникла новая - современная зона субдукции, практически параллельная предыдущей. Приблизительно в тот же интервал времени на Камчатке происходит соответствующее параллельное смещение на восток активного вулканического пояса.

Отмечено, что структуры, связанные с неогеновой коллизией наблюдаются только севернее района поперечной Авачинской зоны. Южнее с конца палеогена, по-видимому, продолжается стационарное погружение Тихоокеанской плиты под континент, без заметных преобразований зоны субдукции. Различия в возрастах соответствующих северного и южного сегментов сейсмофокальной зоны ярко выражено в глубинной сейсмичности. Приблизительно на линии простираения Авачинской зоны резко меняется максимальная глубина наблюдаемых землетрясений (с 650-700 км на юге до 350-400 км на севере). Такой скачок глубины сейсмичности хорошо соответствует переходу от древней зоны субдукции на юге к молодой на севере, в которой слэб еще не успел достигнуть значительных глубин.

Выделено отраженное в структуре Восточно-Камчатского континентального склона различие между северным и южным сегментами зоны субдукции. В его нижней части параллельно глубоководному желобу протянулась серия подводных хребтов-барьеров, отделяющих в рельефе дна впадины Авачинского, Кроноцкого и Камчатского заливов от океана. На юге хребты-барьеры продолжаются до склона Авачинского залива. Дальше на древнем южном сегменте Камчатской зоны субдукции внешняя дуга вообще отсутствует, и вновь появляется лишь в ~250 км юго-западнее, уже в Курильской части зоны, в виде подводного хребта Витязь.

Различие подтверждается распределением мелкофокусной сейсмичностью, соответствующей верхней пологой части сейсмофокальной зоны. Согласно Камчатскому региональному каталогу при пересечении Авачинской зоны в южном направлении плотность регистрируемых землетрясений быстро падает. Особенно отчетливо это заметно в полосе шириной около 100 км, прилегающей к желобу и включающей область хребтов барьеров. Здесь в северном сегменте наблюдаются многочисленные рои слабых землетрясений. В противоположность этому на южном сегменте, на протяжении не менее чем 200 км в рассматриваемой полосе отчетливо выделяется сейсмическая брешь, в которой плотность регистрируемых землетрясений примерно на порядок ниже, чем в северном.

Сделан вывод о различии характерных параметров очагов сильнейших землетрясений обоих районов. Южный сегмент выглядит более запертым, обладающим в целом большим сцеплением крыльев зоны, чем северный.

Учитывая, что скорость пододвигания Тихоокеанской плиты под континент для двух сегментов мало отличается (до 3%), из более высокого сцепления крыльев южного сегмента может следовать, что происходящие там сильнейшие землетрясения обладают меньшей частотой повторяемости и большей магнитудой. Это предположение косвенно подтверждается при сравнении высот заплесков палеоцунами на двух рассматриваемых сегментах за последние ~2000 лет.

Скачок амплитуд косейсмических опусканий побережья, представленный на рис. 10, по своему положению хорошо вписывается в представление о двух различных сегментах современной Камчатской зоны субдукции. Измеренные амплитуды опусканий и их распределение вдоль берега дают возможность грубо оценить главные очаговые параметры соответствующего палеоземлетрясения и, в частности, возможное влияние Авачинской границы на структуру очага. Однако при имеющемся наборе данных и многопараметрической модели очага, соответствующая обратная задача не устойчива. При поиске решения мы привлекали кратко описанную выше априорную информацию о геологической структуре возможной очаговой области.

Промоделирован очаг палеоземлетрясения, произошедшего между 738 и 965 гг.н.э. (1150 – 1250 ^{14}C л. н.), для которого имеются наиболее полные данные. Амплитуды опусканий побережья для двух других палеоземлетрясений лежат в тех же пределах.

Простейший однородный очаг, охватывающий всю выбранную область, позволяет оценить влияние формы береговой линии на опускания. Во внутренней части Авачинского залива берег отодвигается на северо-запад поперек общего простирания камчатских структур, располагаясь примерно на 30 км дальше от модельного очага, чем в южных районах. Такое расположение, действительно должно приводить к уменьшению амплитуды косейсмических опусканий. Однако расчет показывает, что это изменение составляет максимум 1 м, в то время как данные наблюдений фиксируют скачок амплитуд более чем на 2 м. Таким образом, причина скачка, по-видимому, содержится и в изменении характеристик очага в направлении общего простирания.

В результате, предпочтительными оказались два различных решения, описывающие главные характеристики очага землетрясения, приведшего к опусканиям побережья. Первый вариант соответствует простейшему решению, содержащему единственный субочаг, охватывающий всю область, расположенную южнее выбранной "Авачинской границы". Оценка величины подвижки составила 24 м. В северный сегмент данный очаг не продолжается. На рис. 11 представлены: график соответствия исходным данным модельных опусканий, рассчитанных в точках наблюдений, и общая карта модельных вертикальных движений земной поверхности, соответствующая данному решению. Модель удовлетворительно описывает скачок амплитуд погружений, но предполагает, что в северной части Авачинского залива

амплитуды монотонно убывают при удалении от очага, что не соответствует исходным данным, и, возможно, это связано с ошибками измерений.

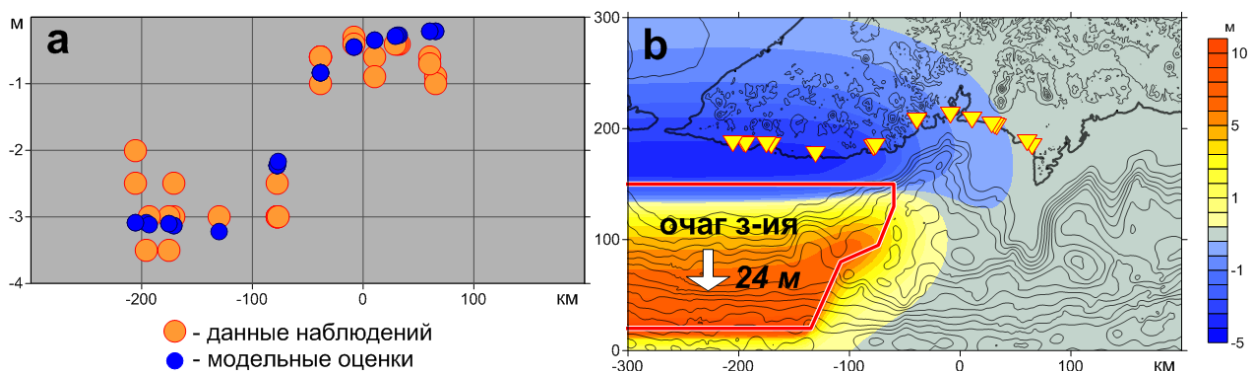


Рис. 11. Модель с единственным очагом землетрясения, расположенным южнее Авачинской зоны. **а** - сравнение опусканий берега, рассчитанных в пунктах наблюдений с реальными данными, приведенными на рис. 21. **б** - карта модельных вертикальных движений района, вызванных данным модельным очагом; жирная линия - проекция очага на земную поверхность, белая стрелка подвижка висячего крыла разрыва в очаге модельного землетрясения.

Второй вариант включает дополнительный субочаг, расположенный севернее Авачинской границы (рис. 12). Моделирование показало, что для удовлетворительного описания скачка амплитуд погружений этот субочаг должен располагаться достаточно далеко от берега. Добавление третьего субочага, расположенного во внутренней части Авачинского залива, во всех рассмотренных примерах формально приводило к обратной сбросовой подвижке в его пределах. Это означало принятие для нее нулевого значения, то есть исключение третьего субочага. Следовательно, полный модельный очаг не распространяется под внутреннюю часть Авачинского залива.

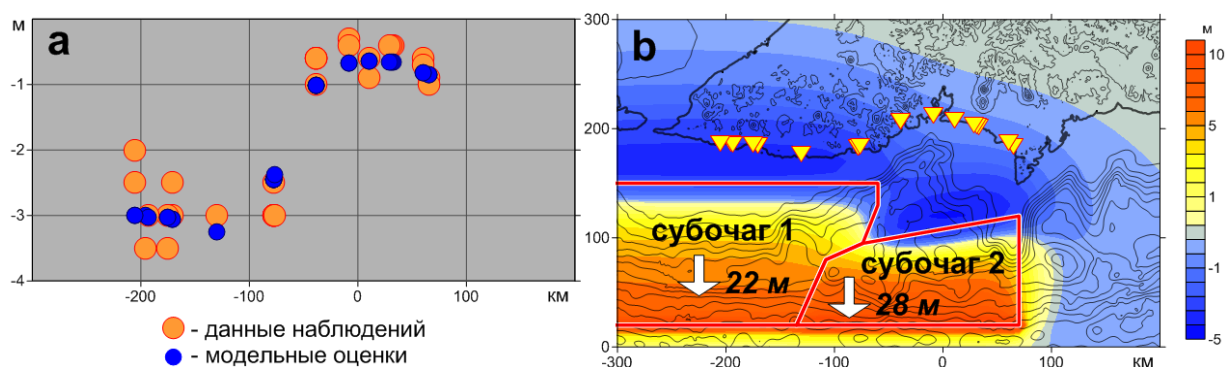


Рис. 12. Модель с двумя субочагами по разные стороны Авачинской зоны. жирная линия - проекция очага на земную поверхность, белая стрелка подвижка висячего крыла разрыва в очаге модельного землетрясения.

Таким образом, второй субочаг построен только под внешними областями залива, где располагается хребет-барьер (хребет Шатского),

протянувшийся вдоль желоба. Северо-западная граница второго субочага выбрана исходя из структуры дна Авачинского залива. В его внутренней части располагается котловина, параллельная хребту-барьеру. Ограничение субочага приблизительно соответствует границе положительной и отрицательной структур, выраженной разломами на дне Авачинского залива.

Добавление второго субочага позволяет точнее, чем в первой модели, описать наблюдаемые опускания берега в северо-западной части Авачинского залива. Оценки подвижек в двух субочагах результирующей модели: 22 м для южного, 28 м для северного. Продолжение первого субочага в южном направлении, либо второго в северном, слабо влияет на амплитуды опусканий на участке побережья, для которого мы имеем данные наблюдений.

Полученные модели позволяют оценить магнитуду палеоземлетрясения, приведшего к изучаемым погружениям побережья. Для этого сейсмические моменты субочагов вычисляются по их площади и оцененной подвижке. Для результирующей модели, состоящей из двух субочагов, такая оценка магнитуды равна 9.2. При интерпретации палео-деформаций побережья обычно трудно разделить ко- и постсейсмические процессы. Если предположить, что их амплитуды приблизительно равны, то оценка магнитуды должна быть уменьшена на 0.2 - 0.3. Кроме того, следует учесть, что данная оценка является нижней, поскольку расширение модельного очага к северу или югу, приведет к возрастанию его магнитуды, но не скажется на качестве соответствия модели и данных. Окончательно получим оценку магнитуды рассматриваемого палеоземлетрясения $M > 9$.

Можно предположить, что для сильнейших землетрясений Камчатки наибольший сброс тектонических напряжений происходит только в южном сегменте зоны субдукции (южнее поперечной Авачинской зоны), относительно запертом в промежутке времени между главными событиями.

Другая гипотеза подразумевает, что очаги сильнейших событий могут распространяться и севернее. Для ее проверки необходимы специальные работы по изучению и интерпретации вертикальных движений побережья на северном сегменте Камчатской зоны субдукции.

Результаты исследования представлены в публикации [14] и докладах [53, 54].

2.8.2. Разработана программа расчета и графического представления диаграмм направленности для тензорных точечных очагов землетрясений (QBALL) [81].

Программа "**QBALL**" предназначена для расчета и графического представления диаграммы направленности излучения Р-волн точечного сейсмического источника. Параллельно могут вычисляться и выдаваться в виде таблицы - направления выхода лучей из источника для произвольного

набора станций наблюдения. Программа содержит встроенную иобновляемую базу данных с координатами более чем 20 тыс. станций. Вычисляется также положение тензора на специальных диаграммах (например треугольной: "сброс-надвиг-сдвиг"), используемых при интерпретации полей сеймотектонических напряжений. Допускается одновременная обработка нескольких землетрясений, заданных в общем входном файле. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения.

2.8.3. Разработана программа расчета годографов прямых и рефрагированных P и S-волн для горизонтально-однородной среды (LOC_TTTAB) [78].

Программа "*LOC_TTTAB*" предназначена для расчета годографов (таблиц времен пробега сейсмических фаз), необходимых в задачах текущей регистрации и исследования региональной сейсмичности. Применяется для простого и быстрого построения новых или уточнения старых моделей Земли в ближней зоне. Допускается произвольная горизонтально-слоистая модель среды без волноводов. Рассчитываются годографы любых, существующих в заданной модели прямых и рефрагированных сейсмических волн, или годографы первых вступлений. Результатом является двумерная таблица модельного времени пробега волны как функции эпицентрального расстояния и глубины, которая может быть представлена как в цифровой, так и в графической форме. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения.

2.8.4. Разработана программа определения координат гипоцентра землетрясения и его магнитуды по временам вступления и амплитудам сейсмических волн на основе минимаксного критерия (НММ) [77].

Программа «НММ» предназначена для определения координат гипоцентров землетрясений и их магнитуд по данным сейсмологических бюллетеней. Для расчета времен пробега используются встроенные глобальные годографы фаз P и S, а также произвольные (стандартные либо задаваемые пользователем) региональные модели среды. Программа содержит встроенную и обновляемую базу данных с координатами более чем 20 тыс. сейсмических станций. Для расчета магнитуд или энергетических классов включен ряд стандартных калибровочных кривых. Результаты выдаются в виде таблиц, графиков и двумерных диаграмм функции качества, что позволяет оценивать доверительные области решения произвольной формы, либо их эллиптические приближения. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения.

2.8.5. Разработана программа расчета и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений Р-волн (FA) [82].

Программа "FA" предназначена для расчета механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений Р-волн на станциях региональных и мировых сетей. Используется в работе глобальных или региональных сейсмологических сетей с целью быстрого и рутинного определения механизмов землетрясений. Программа позволяет использовать данные любых сейсмических станций расположенных на произвольных эпицентральных расстояниях, на которых наблюдаются Р-волны, и содержит встроенную обновляемую базу данных с координатами более чем 20 тыс. станций. Программа позволяет одновременно использовать глобальные и региональные модели Земли. При этом она содержит встроенный набор стандартных моделей, но позволяет включать и произвольные, задаваемые пользователем, горизонтально-слоистые региональные модели. Отдельно может быть рассчитан набор углов выхода лучей из очага землетрясения для станций, расположенных на произвольных эпицентральных расстояниях. Результаты выдаются в виде таблиц, графиков и двумерных диаграмм. Программа предназначена для использования на персональных компьютерах и работает под управлением операционной системы WINDOWS в виде консольного приложения.

2.9. Вычислительные методы анализа микро-сейсмичности на основе данных поверхностных малоапертурных сейсмических групп.

2.9.1. 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 микро-землетрясений, 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 микро-землетрясений.

Результаты исследования представлены в публикации [10].

2.9.2. Разработка и модельные исследования качества статистически оптимального фазового алгоритма оценки координат (локации) микро-сейсмических источников по данным групп

Фазовые алгоритмы обработки многоканальных данных широко используются для локации источников волнового излучения (в частности электромагнитной и акустической природы). Это связано с устойчивостью их точности к изменению характеристик помех.

На базе методов оптимального статистического синтеза с использованием концепции максимального правдоподобия разработан фазовый алгоритм обеспечивающий снижение ошибки оценивания координат микро-сейсмических источников в условиях сильных случайных помех.

Результаты исследования представлены в статье [20].

2.9.3. Робастные алгоритмы многоканальной обработки записей микро-землетрясений, зарегистрированных поверхностными малоапертурными сейсмическими группами)

Проанализирована эффективность фазового алгоритма для локации микро-сейсмических событий, возникающих в результате гидроразрыва пластов среды, содержащих углеводороды. Показано, экспериментально, что фазовые алгоритмы локации сейсмических источников также более устойчивы к изменению статистических характеристик сейсмических помех, чем алгоритм сейсмической эмиссионной томографии СЭТ. Был теоретически синтезирован и экспериментально исследован статистически оптимальный фазовый алгоритм, предназначенный для случая, когда источники генерируют случайные сигналы большой длительности. Этот случай имеет место, например, в таких важных геофизических задачах, как локация источников подземных вод в гидротермальных месторождениях, локация магматических камер в вулканических зонах и локация утечек в подземных трубопроводах для транспортировки углеводородов. Алгоритмы позволяют оценивать координаты микро-сейсмических источников с требуемой точностью даже при низких соотношениях сигнал-шум, используя сейсмическую группу с небольшим количеством датчиков.

Совместно с сотрудниками Института динамики геосфер РАН разработаны и апробированы робастные алгоритмы многоканальной обработки записей микро-землетрясений. Они ориентированы на анализ наведенной микро-сейсмичности, возникающей при добыче полезных ископаемых или при взрывном дроблении среды в шахтах и карьерах.

Разработан и экспериментально исследован алгоритм перебора возможных вариантов расположения знаков вступлений Р-волны от очага микро-события со сложным тензором сейсмического момента на разных датчиках с перерасчетом фазовой F-K диаграммы для каждого варианта,

который позволяет найти диаграмму с наиболее сильным локальным максимумом. Положение этого максимума дает наилучшую оценку направления прихода луча Р-волны на группу, а соответствующая конфигурация знаков вступлений Р-волны на датчиках группы позволяет охарактеризовать тензор сейсмического момента очага микро-землетрясения. Алгоритм фазового F-K анализа с перебором знаков вступлений позволяет также оценить форму колебаний подвижек среды в очаге в случае сложного тензора его сейсмического момента.

Алгоритмы обеспечивают детектирование сейсмических сигналов наведенных микро-землетрясений на фоне сильных техногенных сейсмических помех, оценивает ряд характеристик очагов этих землетрясений. По временным интервалам записей датчиков группы, в которых зафиксированы значения меры когерентности Р-волн, превышающие заданный порог, определяются характеристики очагов микро-землетрясений: направление прихода на группу луча Р-волны, излучаемой очагом, и характер тензора сейсмического момента очага - чисто взрывной или содержащий сдвиговые компоненты. Выявление сдвигового характера этого тензора для серии наведенных микро-землетрясений позволяет судить о степени устойчивости среды в районе горных выработок и, в конечном счете, предотвратить обрушения в шахтах и карьерах. Методика обработки данных малоапертурных сейсмических групп была апробирована на реальных записях группы, установленной в районе Курской магнитной аномалии на горных выработках для добычи железной руды. Удалось показать, что для значительного числа из 340 микро-землетрясений процедура перебора комбинаций знаков вступлений на датчики сигналов от события позволяет получить по исходным данным новую диаграмму F-K анализа с единственным сильным локальным максимумом. Т.е., удалось выделить события, для которых тензор сейсмического момента имеет сдвиговые компоненты.

С помощью фазового фильтра Кейпона была установлена схожесть (с точностью до знака вступления) форм колебаний подвижек среды для очагов ряда слабых сейсмических событий. Длительность этих колебаний не превышала 0.2 с, а временная форма была подобна форме импульса Рикера.

Для указанных 340 микро-землетрясений была построена кумулятивная диаграмма зависимости числа микро-землетрясений, произошедших до заданного момента времени. Она демонстрирует, что 120 из этих событий произошло в течение 2.5 часов после промышленного взрыва в шахте, а остальные 130 из общего числа событий были зарегистрированы в последние 15 часов наблюдений. Т.е. промышленный взрыв вызвал сильную наведенную сейсмичность, связанную с перестройкой напряжений в среде после взрыва. Именно среди наведенных микро-землетрясений были выявлены события со сдвиговым характером тензора сейсмического момента.

Результаты исследования представлены в публикациях [21, 40], и в докладе [72].

2.10. Использование искусственных нейронных сетей как инструмент анализа сейсмических записей; методы предобработки сейсмических данных

Автоматическое обнаружение фаз землетрясения на записи становится все большей проблемой в сейсмологии. Это связано, во-первых, с возрастающими потоками данных, а во-вторых, с тем, что сейсмостанции организуются в сейсмически шумных местах, или оказываются там, из-за развития инфраструктуры. Применение нейронных сетей (НС), как мощнейших инструментов классификации, находит все большее применение при детектировании и анализе сейсмических сигналов в настоящее время. Высокая скорость работы обученной НС позволяет проводить сложные исследования данных в реальном времени. Это особенно важно для систем раннего предупреждения о землетрясении, когда каждая лишняя секунда обработки сигнала оборачивается дополнительными жертвами и экономическими потерями. Обученная НС не требует квалифицированного обслуживания, настроек и тестирования. Результат классификации выдается в полностью автоматическом режиме. НС обучается на реальных примерах сигналов, т.е. в нее не закладывается никаких допущений о свойствах шумов или полезных сигналов. Становится возможным анализировать нестационарные сигналы, работать с данными, загрязненными техногенным шумом. НС могут решать проблемы, используя искаженную, зашумленную и внутренне противоречивую информацию, что позволяет снизить магнитудный порог изучаемых явлений. НС применяются в сейсмологии при решении следующих задач:

- детектирование маломagnitudeных событий на фоне шума;
- выделение Р-волны опасного землетрясения в системах раннего предупреждения;
- разделение сейсмических событий по классам (например, локальные, региональные, телесеизмические землетрясения, взрывы, горные удары, шум);
- исследование сейсмического шума и его динамики.

НС используются как на сейсмостанциях, так и для обработки данных сейсмических сетей. В первом случае в качестве входного вектора обычно используется движущееся окно, содержащее сейсмический сигнал, каким-либо образом отфильтрованный или преобразованный или набор характерных признаков сигнала. Во втором случае на НС подаются один или несколько параметров сигнала, уже выделенного на каждой станции.

Хотя НС с одним скрытым слоем способна с любой точностью аппроксимировать почти любую функцию, ее можно рассматривать как справочную таблицу обучающей выборки, с более или менее правильной интерполяцией промежуточных значений и экстраполяцией по краям. Анализ

временных рядов высокой размерности, содержащих шум, не может быть качественно выполнен традиционными методами мелких НС. Такие сети выполняют лишь небольшое число нелинейных преобразований и не имеют возможности точно моделировать сложные данные.

Теория и практика НС в последние годы получила новый импульс, вызванный успешным применением методов глубокого обучения. Глубокое обучение представляет собой набор алгоритмов, основанных на изучении множества уровней представления данных. Особенности обучающей выборки автоматически выявляются одновременно на большом количестве уровней, позволяя использовать их для создания выходного сигнала.

Сейчас для работы с временными рядами, к коим относятся и сейсмические данные, успешно применяют рекуррентные НС, сверточные НС и всевозможные гибридные архитектуры. Это позволяет использовать для идентификации событий не только первое вступление, но и другие фазы землетрясения без непомерного раздувания входного вектора и увеличения количества нейронов на скрытых слоях. Препятствием широкого применения глубоких НС служит сложность первоначального обучения НС. Качественная предварительная обработка сейсмического сигнала уменьшает трудности обучения.

Проведено исследование вариантов оптимальной предварительной обработки сейсмических данных, не приводящих к существенным потерям потенциально необходимой информации и позволяющих практически реализовать возможность автоматизированного выделения наиболее информативных особенностей сейсмических событий с последующим выходом на создание принципиально новых интеллектуальных систем автоматизированного детектирования и классификации. Одним из наиболее перспективных направлений является использование техники вейвлет преобразований (ВП) с дальнейшим детектированием и классификацией сейсмического сигнала НС. В случае сильнозашумленных сейсмических сигналов традиционные алгоритмы предварительной фильтрации данных малоэффективны и часто приводят к весьма неудовлетворительным результатам: многочисленным ложным срабатываниям и пропускам землетрясений. ВП позволяют проводить гибкую очистку данных, преобразовывать для входа НС информацию, полученную с разной частотой опроса и от разных датчиков. ВП отлично подходят для работы с нестационарными сигналами, и одновременно позволяет отмечать моменты изменения структуры сигнала. Очищенный от шума и искажений сигнал может быть восстановлен в первоначальной форме. Это удобно, если вместо НС выбран другой вид дальнейшей обработки данных.

Результаты исследования представлены в публикациях [5, 12, 19, 37] и докладе [48]. Разработана и использовалась программа для ЭВМ [75].

2.11. Раннее предупреждение о землетрясении

Системы раннего предупреждения (СРП) – комбинации приборов, методик и программного обеспечения – обеспечивают принятие защитных мер до того, как разрушительные сейсмические волны достигают объекта. Раннее предупреждение о землетрясении основано на способности обрабатывать и передавать информацию быстрее, чем распространяются сейсмические волны.

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 протяженного объекта;
- через 5 мин. - карту возможных повреждений, в т.ч. вызванных вторичными эффектами (оползнями, лавинами и др.).

Экономически наиболее эффективны такие виды СРП, как защита отдельных ответственных объектов и защита протяженных объектов. Под протяженными объектами понимаются инженерно-строительные объекты и устройства, предназначенные для транспортирования жидкостей, газов, иных объектов, передачи энергии, сигнала. Т.е. имеются ввиду автомобильные и железные дороги, линии связи и электропередач, нефте-, газо- и иные трубопроводы, инженерно-технические сети. Так как сигнал может быть получен до сильного сотрясения, можно путем автоматических отключений (остановка поездов, включение запрещающих сигналов светофоров, отключение электроэнергии, снижение давления в нефте-, газопроводах и т.д.) снизить материальные и людские потери, избежать экологических катастроф. После события мониторинг позволит оценить разрушения, определить меры спасения и средства восстановления объекта. Помимо этого, СРП может и должна быть задействована в системе сейсмического мониторинга состояния объектов.

Экономическое развитие Российской Федерации подразумевает увеличение нагрузок на протяженные объекты, повышение скоростей транспортирования, ввод новых протяженных объектов. Протяженные объекты проходят по районам с разной сейсмичностью и с разным административным подчинением, их отдельные участки и сооружения могут обладать различной сейсмостойкостью. А повреждение одного элемента может привести к отказу всего объекта или к экологической катастрофе, захватывающей соседние районы. СРП должна интегрировать данные своей сейсмической сети и региональных сетей и использовать сигналы от других служб.

Отдельные объекты (ОО) – это небольшие объекты, расположенные обособлено от региональных СРП, либо требующие предупреждения с

особым набором параметров, достаточно важные, чтобы создание СРП было для них оправдано. На объекте должна быть возможность принять экстренные меры по снижению потерь. К ОО можно отнести отдельные предприятия с высоким потенциалом повреждения (АЭС, плотины, объекты химической промышленности, морские платформы и т. д.); дорогие производственные объекты, которые уязвимы во время работы (турбогенераторы, автоматические производственные линии, аэродромы и т.п.); социально и политически значимые объекты (города, места проведения Олимпийских игр и т.д.).

Защита ОО наиболее дешевый и легко реализуемый вид СРП, основанный на малом количестве датчиков. Однако различные ОО могут обладать разной сейсмостойкостью и располагаться в районах разной сейсмичности, с разным геологическим строением. Могут существовать свои особые требования к системам мониторинга и обработки сигнала: необходимое время предупреждения, пороги сотрясений, вероятность ошибок 1-го и 2-го рода, их соотношение, характеристики сотрясения на месте объекта. При этом СРП ОО должна взаимодействовать с региональными СРП и сейсмическими сетями, получая от них и передавая им информацию.

Разработана методологическая основа, направленная на определение возможностей и ограничений существующих научно-технических решений смягчения сейсмического риска на ОО. Необходимо четко определить (рис. 13) какая интенсивность сотрясений приведет к нарушению работы объекта, а какая к разрушению; какое необходимо минимальное время для предупреждения, есть ли смысл в предупреждениях с меньшим временем, какие меры можно экстренно принять для снижения потерь, как изменяется уязвимость объекта во время принятия мер (рис. 14), какую выгоду дает СРП.

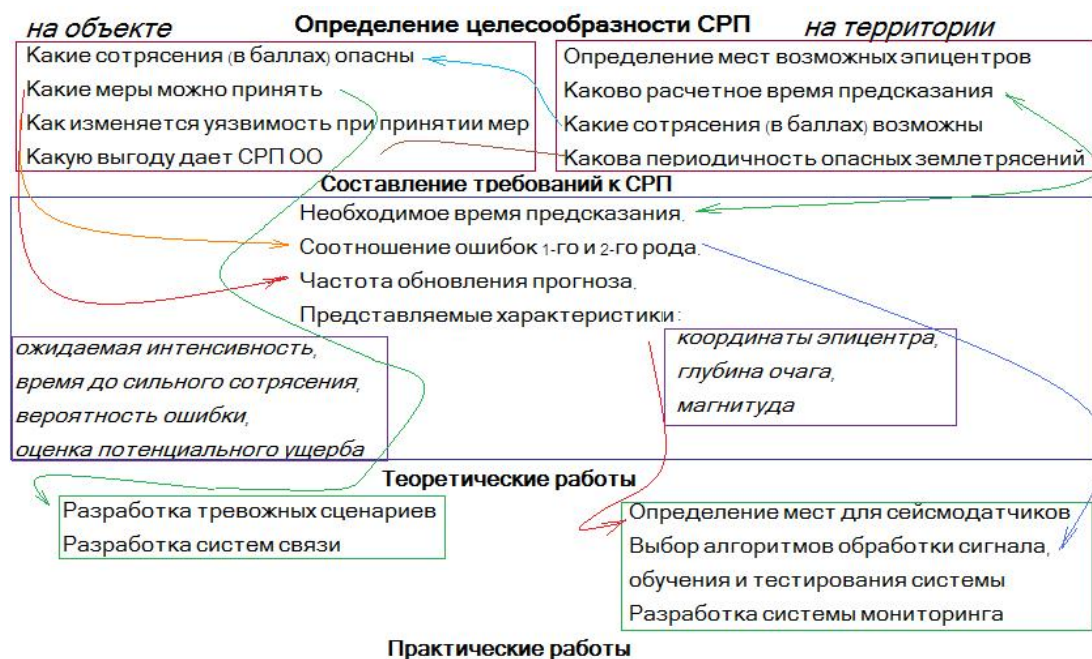


Рис. 13. Разработка СРП.



Рис. 14. Условный график уязвимости АЭС после запуска тревожного сценария.

Так же рассмотрена организации СРП для протяженных объектов, Расчет необходимости и экономической целесообразности создания СРП для протяженных объектов требует предварительного исследования территорий его простираения, сейсмостойкости его элементов и определения мер, которые могут быть приняты по тревожному сигналу.

Разработаны блок-схемы тревожного узла и узла мониторинга, намечена общая структура системы. Чаще всего сейсмические станции СРП протяженных объектов приходится устанавливать в сейсмически шумных местах. Чтобы сохранить возможность автономной работы каждой станции и, в то же время, включить ее в сеть, после блока решения необходимо ввести блок восстановления данных, в котором при детектировании сигнала землетрясения синтезируется этот сигнал, очищенный от помех. Такой синтез осуществляется восстановлением сигнала, отфильтрованного при помощи вейвлет-преобразования. Быстрое определение характеристик событий также осуществляется посредством детальной классификации с использованием вейвлет-преобразований и нейронных сетей. В блоке определения характеристик вычисляются азимут на эпицентр, эпицентральное расстояние и глубина очага, магнитуда, интенсивность и допуски на эти величины.

Использование нейросетевого классификатора позволяет по сейсмическим сигналам идентифицировать оползни, обвалы, сели, просадки, схлопывание карстовых полостей, абразию морских берегов, лавины, мерзлотные явления, взрывы. Каждое из этих явлений может нарушить объект. Преимущества нейросетевого классификатора при его использовании в СРП состоит в том, что он не требует квалифицированного обслуживания и работает невероятно быстро, что особенно важно, когда время между

тревожным сигналом и сильными сотрясениями грунта измеряется секундами.

Отдельное внимание было уделено вопросам кибербезопасности современных и перспективных интеллектуальных систем. Результаты исследования представлены в публикациях [6, 13] и докладах [44, 49 – 52,].

2.12. Разработка аппаратуры автоматизированного мониторинга разноглубинной температуры грунта и мощности мерзлого слоя

Проведены работы по теоретической и практической разработке основ аппаратуры, предназначенной для автоматизированного мониторинга температуры грунта. Особое внимание уделялось определению толщины мерзлого слоя. Мониторинг мощности мерзлого слоя грунта используется при определении распространения сейсмических и звуковых волн в приповерхностном слое, электрических свойства мерзлых грунтов разной толщины, может быть полезен при сейсмическом микрорайонировании территорий с мерзлыми грунтами. Разработан макет аппаратурного комплекса, предназначенный для автоматизированного измерения глубины промерзания грунта в нескольких точках наблюдения. При проектировании комплекса использована оригинальная технология, позволяющая проводить измерения без использования сложных и дорогостоящих цифровых систем сбора информации, за счет применения схемы преобразования аналоговых сигналов, поступающих с термодатчиков, в цифровой вид без использования аналого-цифровых преобразователей. В ходе первых испытаний макет аппаратурного комплекса для измерения глубины промерзания грунта показал свою пригодность для проведения как научных, так и прикладных исследований.

Для определения механических, электрических и др. характеристик грунта важна не столько глубина границы промерзания грунта, сколько толщина мерзлого грунта, ее динамика с учетом местных локальных условий. Как и предполагалось результаты показывают, что измеренная мощность мерзлого слоя грунта и динамика глубины промерзания очень сильно зависят от условий в месте установки термодатчика (тип грунта, его влажность и плотность, толщина снежного и растительного покрова, освещенность и продуваемость). Максимальная зафиксированная разница по абсолютному значению составила 20% толщины мерзлого слоя. Также получены первые результаты по динамике температурных процессов.

Разработана методика эксперимента по определению существования влияния глубины промерзания грунта на затухание высокочастотного сейсмического сигнала. Проведены испытания оборудования и определена его пригодность для проведения эксперимента, рассчитаны необходимые параметры сейсмической станции, метеоприборов, мерзлотомера, системы возбуждения искусственного калиброванного сейсмического сигнала. Подготовлена схема сверки метеоприборов с приборами Росгидромета.

Разработана и изготовлена аэродинамическая труба для поверки анемометров. Выполнены эскизные проекты:

- электронного блока компрессии данных анеморумбомера;
- механической системы установки и демонтажа приборов на мачте высотой 12 м;
- трехкомпонентного высокочастотного сейсмометра.

Разработан эскизный проект мерзлотомера, предназначенного для многоточечной и многоканальной высокоточной системы измерения. Проведены расчеты, подтверждающие возможность создания системы температурных измерений с требуемыми характеристиками. Разработаны блок-схемы прототипов мерзлотомера различных типов и стоимости.

Проработан макет многоканальной автономной информационно-измерительной системы для сбора малоамплитудных температурных вариаций грунта. Разработано несколько возможных принципиальных схем прибора, включая аналоговый и цифровой варианты. Для принципиальной схемы аналогового прибора собран, отлажен и настроен опытный 16-ти канальный макет. Проведены его натурные испытания.

С целью исследования тонкой структуры температурных полей в толще горных пород, созданы прецизионные термометры, позволяющие проводить температурные измерения с чувствительностью не хуже 0.005 °С. Достичь требуемой чувствительности измерений удалось за счет сужения измерительного диапазона, применения платиновых терморезисторов, оригинальной измерительной схемы и 24-разрядного АЦП для цифровой регистрации сигналов.

Результаты исследования представлены в публикациях [22, 23, 25, 29, 30, 38, 39] и докладах [47, 60, 63, 69, 71].

2.13. Сейсмическая регистрация и составление библиотеки шумов

Для обучения как классификационных, так и регрессионных искусственных нейронных сетей необходимо использование «типичных» фрагментов сейсмических событий (в том числе и их смесей). Исследованы записи сейсмических шумов, вызванных прохождением большегрузного транспорта разного типа, деформациями сооружений при замерзании/оттаивании грунта, ветровыми ударами в здания.

Значительная часть сейсмических помех природного происхождения вызывается изменениями метеорологических полей. Особенно возрастает шумовая составляющая сигнала при резких изменениях давления и температуры, при грозах, переходе температуры через ноль, при сильном ветре. Продолжены работы по длительной сейсмической регистрации помеховых сигналов на сейсмическом пункте д. Устьяново, Егорьевского р-на, МО (55°.47455 с.ш., 38°.99133 в.д.). Проведен сеанс записи характерных шумов на берегу реки Волги в Кимрском районе Тверской области (56.787755 с.ш., 37.250996 в.д.). Используется трехкомпонентная

сейсмическая станция (рабочий частотный диапазон 500 с - 100 Гц, динамический диапазон 145 дБ, тактовая частота оцифровки 0,1 -100 Гц, разрядность оцифровки 24 бит, время автономной непрерывной работы не менее 12 часов), разработанная в ИТПЗ РАН. Для параллельной записи метеорологических параметров использовалось оригинальное оборудование, разработанное в ИТПЗ РАН.

Разработан инновационный проект анеморумбомера. В зимнее время проведена пробная регистрация мощности мерзлого слоя грунта. С целью исследования тонкой структуры температурных полей грунта на глубине ниже сезонного промерзания разработаны прецизионные термометры.

Разработана портативная расширяемая модульная система сбора сейсмических данных, не требующая постоянного подключения к компьютеру и проведено тестирование макетов. Рассчитаны и проанализированы энергетические спектры наиболее характерных фрагментов записей. Получены сейсмические записи шумовых сигналов и их основные ключевые характеристики.

Продолжены работы по формированию унифицированной библиотеки и записи сейсмических шумов различной природы, включая антропогенные. Основное назначение создаваемой библиотеки сейсмических шумов – накопление данных для обучения и тестирования систем детектирования полезного сейсмического сигнала на базе искусственных нейронных сетей. Проведены работы по записи сейсмического шума, длительностью непрерывной записи не менее суток в трех географических локациях с координатами (44.397608, 33.980912), (44.413195, 33.990949), (44.557081, 33.407609). Проведен спектральный анализ записанных сигналов, определены возможные источники сейсмических помех и их вклад в общую шумовую картину. Запись сейсмического шума в этих точках представляет особый интерес, так как указанные места наблюдений соответствуют принципиально различным условиям установки сейсмической станции (на вершине горы, в штольне на берегу моря и на морском дне).

В результате анализа данных сейсмической регистрации на сейсмическом пункте д. Устьяново выявлены недостатки в работе станции. Проведены работы по выявлению причин снижения работоспособности станции, профилактические и ремонтные работы.

Одним из основных факторов, вызывающих шум в точной длиннопериодной сейсмометрии, являются колебания температуры механических элементов датчиков, а также тепловые потоки в их внутреннем пространстве. Теоретическими исследованиями установлено, что изменение температуры отдельных элементов прибора даже на 0.001°C может привести к появлению заметного температурного шума. Разработан высокочувствительный термодатчик, способный одновременно контролировать температуру в нескольких наиболее важных точках сейсмического устройства с точностью не менее 0,005 градуса Цельсия. Достичь подобной чувствительности удалось за счет сужения

измерительного диапазона, применения высокоточных терморезисторов и 24-разрядного АЦП для цифровой регистрации сигналов. Выходные дифференциальные сигналы термометра позволяют легко подключать его к большинству современных электронных систем сбора информации.

Разработана новая малопотребляющая система сбора информации, созданная на базе 24-х разрядного аналого-цифрового преобразователя для расширения возможностей сейсмической станции. Создана принципиальная схема модуля аналого-цифрового преобразователя (АЦП), изготовлены и проведены испытания двух первых опытных образцов системы сбора, базирующейся на использовании в качестве управляющего контроллера микрокомпьютера типа Raspberry Pi3. Разработанная система сбора данных обладает качественными характеристиками не хуже мировых аналогов, а по некоторым параметрам и превосходит их. Несомненным плюсом является ее гибкость, возможность легкой замены одной модели управляющего компьютера на другую. Размер разработанной платы АЦП не превышает базовых габаритов микрокомпьютера Raspberry Pi3. За счет применения в системе широко распространенных микросхем известных производителей удалось существенно уменьшить ее себестоимость. Система построена по модульно-блочному принципу, что позволяет гибко менять как количество используемых полностью независимых входных каналов данных, так и тип/модель управляющего контроллера в соответствии с решаемыми задачами.

Разработана программа полуавтоматической калибровки сейсмических датчиков [74]. Результаты исследования опубликованы в статьях [24] и представлены в докладах [36, 58, 59, 68, 70].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследований по теме было разработано программное обеспечение для быстрого предварительного определения параметров очага землетрясения по телесеismicким записям длиннопериодных поверхностных волн. Программа оттестирована на моделях, построенных для ряда современных землетрясений. Разработана версия программного обеспечения для оценки ошибок определения параметров землетрясения, по методу "Джекнайф".

Разработана методика оценки магнитуды сильного субдукционного землетрясения по косейсмическим опусканиям морских побережий. Модернизирована программа определения координат и времени землетрясений. Разработаны программы расчета движения литосферных плит на поверхности сферической Земли; расчета и визуализации древних реконструкций жестких литосферных плит, имевших произвольную историю движений на поверхности сферической Земли; расчета диаграмм направленности для тензорных точечных очагов землетрясений; расчета годографов прямых и рефрагированных Р и S-волн для горизонтально-однородной среды; определения гипоцентра землетрясения и его магнитуды по временам вступления и амплитудам сейсмических волн на основе минимаксного критерия; расчета и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений Р-волн.

Синтезирован новый фазовый алгоритм локации микросейсмических источников. Рассмотрены уникальные свойства метода адаптивного максимального правдоподобия в условиях, когда помехи на выходах датчиков группы содержат сильную когерентную составляющую искусственного происхождения. Алгоритм в этом случае демонстрирует способность подавлять когерентную составляющую помех и существенно повышать точность определения координат очагов микро-землетрясений.

Для потенциально цунамиопасных областей Курило-Камчатской дуги построены модели характерных очагов землетрясений, предназначенные для использования в расчетах модельных цунами.

Подробно исследовано Южно-Озерновское землетрясение, $M_w=6.6$, произошедшее 29 марта 2017 г. в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской сейсмоактивных дуг. Проведено оперативное исследование Ближне-Алеутского землетрясения, $M_w=7.7$, сильнейшего в районе Командорских островов за время инструментальных наблюдений на Камчатке. Исследовано Ильпырское землетрясение 2013 г. Построены модели очагов Курило-Камчатской дуги, детальная трехмерная модель зоны сочленения сейсмофокальных зон Камчатки и Алеут.

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 деления региона на условно-однородные области. Методика основана на методе ядерного сглаживания.

Проведено детальное изучение моделей Непальского землетрясения 25.04.2015 года, двух сильнейших за последние 300 лет землетрясений, происшедших в Калининградской области 21.09.2004 года и землетрясения на Аляске 23.01.2018 года. Для сильнейшего афтершока землетрясения Тохоку 11.03.2011 года было проведено исследование устойчивости решения к изменению используемого набора записей поверхностных волн.

Проведены работы по совершенствованию программ анализа сейсмических данных с использованием вейвлет-преобразования и искусственных нейронных сетей. Разработаны методологические основы организации систем раннего предупреждения (СРП) о землетрясении для защиты точечных и протяженных объектов на основе применения стандартизованных решений и интеграции каждой отдельной системы в общую. СРП должны полностью использовать возможности анализа сигналов, поступающих в реальном времени от сейсмических сетей, для широкого круга мероприятий, повышающих защищенность общества от сейсмической опасности.

Проведены сеансы длительной опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеорологических данных. Разработано нестандартное оборудование для записи мощности мерзлого слоя грунта и многоканальная автономная информационно-измерительная система для сбора малоамплитудных температурных вариаций грунта. Расширена библиотека сейсмических шумов, проведен их анализ и классификация.

Результаты выполненных исследований представлены в монографии, 39-ти статьях в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах и в 32-х докладах на международных и российских научных конференциях. Получено 10 свидетельств государственной регистрации программ для ЭВМ.

4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Монографии

2017 год

1. Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Иванова Е.И., Гусева Е.М., Воропаев П.В., Ландер А.В. / Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – 540 с. – ISSN 1818–6254.

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

2016 год

2. 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.
3. Ассиновская Б.А., Овсов М.К., Букчин Б.Г. О сеймотектонике и глубинном строении Центрально-Балтийского региона // Инженерные изыскания, 2016, № 8. с.36-44.
4. Букчин Б.Г., Фомочкина А.С. Определение параметров очага Непальского землетрясения 2015 г. по записям телесеismicческих 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.
5. Кислов К.В., Гравиров В.В. Использование искусственных нейронных сетей в классификации зашумленных сейсмических сигналов // Сейсмические приборы, 2016, т.52, № 2. с.46-64.
6. 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.
7. Левина В.И., Ландер А.В., Чеброва А.Ю., Сеньюков 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.
8. 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.
9. 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.
 10. Kushnir A., Varypaev A. 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.

2017 год

11. Букчин Б.Г. Описание очага землетрясения в приближении вторых моментов и идентификация плоскости разлома // Физика Земли, 2017, № 2. с.76-83, doi:[10.7868/S0002333717020041](https://doi.org/10.7868/S0002333717020041).
12. Кислов К.В., Гравиров В.В. Глубокие искусственные нейронные сети как инструмент анализа сейсмических данных // Сейсмические приборы, 2017, т.53, № 1. с.17-38, doi:10.21455/si2017.1-2.
13. Кислов К.В., Гравиров В.В. Система раннего предупреждения о землетрясении для железных дорог: Перспективы, проблемы, решения // Научное приборостроение, 2017, т.27, № 1. с.40-45, doi:10.18358/nr-27-1-i4045.
14. Ландер А.В., Пинегина Т.К. Моделирование очагов сильнейших палеоземлетрясений Южной Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1-7 октября 2017 г / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. с.221-225. http://www.emsd.ru/static/library/2017_conf/070.pdf.
15. Ландер А.В., Шевченко Н.А., Матвеев Е.А. Уточнение координат землетрясений в юго-западной части камчатской сейсмофокальной зоны // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1-7 октября 2017 г / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. с.118-122
16. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Воропаев П.В., Гусев А.А., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Иванова Е.И., Кравченко Н.М., Ландер А.В., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л., Серафимова Ю.К., Скоркина А.А., Титков Н.Н. Сильные землетрясения на Камчатке в 2016–2017 гг. // Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1-7 октября 2017 г / Отв. ред. Д.В. Чебров. –

Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. с.89-96
(http://www.emsd.ru/static/library/2017_conf/050.pdf).

17. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Титков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w = 7.8$ на границе Командорской сейсмической бреши // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2017, № 3. с.22-25.
18. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Воропаев П.В., Гусев А.А., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Иванова Е.И., Кравченко Н.М., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л., Скоркина А.А., Серафимова Ю.К. Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с $M_w = 6.6$, $K_s = 15.0$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2017, № 3. с.7-21.
19. Kislov K.V. and Gravirov V.V. Use of artificial neural networks for classification of noisy seismic signals. Seismic Instruments, 2017, **53**, 1: 87-101, <https://doi.org/10.3103/S0747923917010054>.
20. Kushnir A., Varypaev A. Robustness of statistical algorithms for location of microseismic sources based on surface array data. Computational Geosciences, 2017, **21**, 3: 459-477, doi:10.1007/s10596-017-9623-6.

2018 год

21. Варыпаев А.В., Санина И.А., Чулков А.Б., Кушнир А.Ф. Применение робастных фазовых алгоритмов для выявления сейсмической эмиссии в районе проведения взрывных работ в шахтах // Сейсмические приборы. 2018 Т. 54, № 2 с.5–18. DOI: 10.21455/si2018.
22. Гравиров В.В., Кислов К.В., Лиходеев Д.В., Котов А.Н. Аппаратурный комплекс для измерения глубины промерзания грунта // Научное приборостроение, 2018, том 28, № 4, с. 98-102. DOI: 10.18358/np-28-4-i98102
23. Гравиров В.В., Кислов К.В., Лиходеев Д.В., Нумалов А.С. Прецизионная автономная модульная 24-х разрядная система сбора геофизических данных // II-я Всероссийская научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития», Сборник материалов, Казань, 2018, с. 101-103.
24. Гравиров В.В., Кислов К.В., Лиходеев Д.В., Нумалов А.С. Прецизионная автономная модульная 24-разрядная система сбора геофизических данных // Научное приборостроение, 2018, том 28, № 4, с. 64-72. DOI: 10.18358/np-28-4-i6472
25. Кислов К.В., Гравиров В.В., Лиходеев Д.В., Котов А.Н. Аппаратурный комплекс для измерения глубины промерзания грунта // II-я Всероссийская научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития», Сборник материалов, Казань, 2018, с. 98-100.

26. Кугаенко Ю.А., Дрознина С.Я., Салтыков В.А., Павлов В.М., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Абубакиров И.Р. Ильпирское землетрясение 13 марта 2013 г. с $M_w = 5.8$, $M_L = 6.2$, $K_S=13.9$, $I_0p = 8$ (Камчатский перешеек) // Землетрясения Северной Евразии, 2013 год. – Обнинск: ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН, 2018. (принято к печати)
27. Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Титков Н.Н., Воропаев П.В. Особенности Командорского сегмента Алеутской островной дуги и Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.017 г. с $M_w = 7.8$ // Материалы XXI научно-практической Щукинской конференции, г. Москва, 1-4 октября 2018 г. М.: ИФЗ РАН, 2018. С. 94-98.
28. Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Салтыков В.А., Павлов В.М., Абубакиров И.Р., Кравченко Н.М., Титков Н.Н., Воропаев П.В. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$ (Командорский сегмент Алеутской островной дуги) // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – с.136–140.
29. Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В. Прецизионные дифференциальные термометры для исследования тепловых процессов на базе северокавказской геофизической обсерватории // Наука и технологические разработки, 2018, т. 97, № 1, с. 15–24. DOI: 10.21455/std2018.1-2.
30. Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В., Долов С.М. Прецизионные узкодиапазонные дифференциальные температурные датчики // II Всероссийская научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития», Сборник материалов, Казань, 2018, с. 104-106.
31. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Дрознина С.Я., Ландер А.В. Ильпирское землетрясение 13.03.2013 г. с $M_L=6.2$, $M_w=5.8$ (Камчатский перешеек, предполагаемая граница Охотской и Северо-Американской литосферных плит) Материалы XXI научно-практической Щукинской конференции, г. Москва, 1-4 октября 2018 г. М.: ИФЗ РАН, 2018. С. 331-335.
32. Фомочкина А. С., Букчин Б. Г. Применение параллельных вычислений при определении параметров очагов землетрясений с высоким разрешением // Физика Земли, 2018, № 4 приложение, с. 41–47. DOI: 10.1134/S0002333718070037
33. Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Матвеев Е.А., Чеброва А.Ю., Митюшкина С.В., Иванова Е.И., Гусева Е.М., Воропаев П.В., Ландер А.В., Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Обзор сейсмичности. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – с. 184–196.
34. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А, Павлов В.М., Титков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$. I. Протяженный

- разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. Наука. Москва. 2018, (принято к печати)
35. Чеброва А.Ю., Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Дрознина С.Я., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Титков Н.Н., Чебров Д.В.. Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 года ($M_w=8.3$, $I=6$) // Землетрясения Северной Евразии, 2013 год. – Обнинск: ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН, 2018. (принято к печати)
 36. Gravirov V.V., Kislov K.V., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E. PEMSDAS – Portable Expandable Modular Seismic Data Acquisition System // Proceedings of 12th International Conference and School “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, 2018, Springer, 5p. (принято к печати)
 37. Kislov K.V., Gravirov V.V. Deep Artificial Neural Networks as a Tool for the Analysis of Seismic Data // Seismic Instruments, 2018, Vol. 54, No. 1, pp. 8–16. DOI: 10.3103/S0747923918010073.
 38. Kislov K.V., Gravirov V.V. Some Remarks on the Seismometric Experiments Taking into Account the Thickness of the Frozen Layer Soil // Proceedings of 12th International Conference and School “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, 2018, Springer, 5p. (принято к печати)
 39. Likhodeev D.V., Gravirov V.V. and Kislov K.V. Precision Differential Thermometers for Studying Thermal Processes at the Northern Caucasus Geophysical Observatory // Seismic Instruments, 2018, Vol. 54, No. 6, pp. 673–676. DOI: 10.3103/S0747923918060075
 40. Varypaev A. Kushnir A. Algorithm of micro-seismic source localization based on asymptotic probability distribution of phase difference between two random stationary Gaussian processes // GEM - International Journal on Geomathematics. 2018, Volume 9, Issue 2 , pp 335–358; DOI: 10.1007/s13137-018-0108-0

Доклады на международных и российских научных конференциях

2016 год

41. Ассиновская Б.А., Овсов М.К., Букчин Б.Г. 12 лет после Калининградского землетрясения 2004 года // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. XI Международная сейсмологическая школа. Обнинск: ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016.
42. Букчин Б.Г., Фомочкина А.С. Определение параметров очага Непальского землетрясения 2015 г. по записям телесеismicческих поверхностных волн // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. XI Международная сейсмологическая школа. Обнинск: ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016.

43. Гусьяков 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 // Научная конференция «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология»: г. Севастополь, 26-30 сентября 2016 г.
44. 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». Москва, 2016.
45. Левина В.И., Ландер А.В., Чеброва А.Ю., Сеньюков 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. XI Международная сейсмологическая школа. Обнинск: ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016.
46. Fomochkina A., Bukchin B. The use of parallel programming in problems of earthquake parameters determination. In 11th International Conference "Problems of Geocosmos". St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, October 3-7, 2016.
<http://onlinereg.ru/geocosmos/Geocosmos2016.pdf>.
47. Gravirov V.V., and K.V. Kislov, An electronic freezometer. In 11th International Conference "Problems of Geocosmos". St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, October 3-7, 2016.
48. Kislov 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". St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, October 3-7, 2016.

2017 год

49. Гравиров В.В. Насколько защищены от взлома современные ИТ-системы // Круглый стол Ассоциации Автонет «Внедрение беспилотного транспорта на дорогах РФ», Москва, 16 марта 2017 г.,
<http://rosautonet.ru/about/events/kruglyy-stol-vnedrenie-bespilotnogo-transporta-na-dorogah-rf>.
50. Гравиров В.В., Кислов К.В. Кибербезопасность современных ИТ-систем // Конференция «Цифровая индустрия промышленной России – 2017» (ЦИПР), Казань, Иннополис, 17-24-26 мая 2017 г.,
http://cipr.ru/table_schedules/.
51. Гравиров В.В., Кислов К.В. Проблемы уязвимости современных ИТ-систем, Пленарный доклад // Конференция «Формирование Сообщества «Автонет», Казань, Иннополис, 17-18 апреля 2017 г.,
<http://rosautonet.ru/about/events/konferenciya-formirovanie-soobshchestva-avtonet>.

52. Кислов К.В., Гравиров В.В. Раннее предупреждение о землетрясении и сейсмический мониторинг отдельных объектов / XVI Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» (27-28 сентября 2017), Москва: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2017.
53. Ландер А.В., Пинегина Т.К. Методика оценки нижней границы магнитуды палеоземлетрясения, по данным об опускании побережья // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. VI научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 7 октября 2017 г., Петропавловск-Камчатский. 2017.
54. Ландер А.В., Пинегина Т.К. Моделирование очагов сильнейших палеоземлетрясений Южной Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. VI научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 7 октября 2017 г., Петропавловск-Камчатский. 2017.
http://www.emsd.ru/static/library/2017_conf/070.pdf
55. Ландер А.В., Шевченко Н.А., Матвеев Е.А. Уточнение координат землетрясений в юго-западной части камчатской сейсмофокальной зоны / Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. VI научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 7 октября 2017 г., Петропавловск-Камчатский. 2017.
http://www.emsd.ru/static/library/2017_conf/050.pdf
56. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Воропаев П.В., Гусев А.А., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я., Иванова Е.И., Кравченко Н.М., Ландер А.В., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л., Серафимова Ю.К., Скоркина А.А., Титков Н.Н. Сильные землетрясения на Камчатке в 2016–2017 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. VI научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 7 октября 2017 г., Петропавловск-Камчатский. 2017.
http://www.emsd.ru/static/library/2017_conf/050.pdf
57. Fomochkina A., Bukchin B. Application of parallel calculations to speed up the determination of earthquake parameters by a systematic exploration of their values. In The third international conference "Quasilinear Equations, Inverse Problems and their Applications", Dolgoprudny (Russia), December 5-7, 2017.
<http://www.cmap.polytechnique.fr/~novikov/miptip17/program.html>.

2018 год

58. Гравиров В.В., Кислов К.В. Разработка и применение прецизионных дифференциальных термометров / Однодневная конференция «Научные итоги 2018», 29 ноября 2018 г.; Москва, 2018.
59. Гравиров В.В., Кислов К.В., Лиходеев Д.В., Нумалов А.С. Прецизионная автономная модульная 24-х разрядная система сбора геофизических данных // II-я Всероссийская научно-практическая конференция «Научное

- приборостроение – современное состояние и перспективы развития», Казань, 2018.
60. Кислов К.В., Гравиров В.В., Лиходеев Д.В., Котов А.Н. Аппаратурный комплекс для измерения глубины промерзания грунта // II-я Всероссийская научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития», Казань, 2018.
 61. Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Титков Н.Н., Воропаев П.В. Особенности Командорского сегмента Алеутской островной дуги и Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.017 г. с $M_w = 7.8$ / XXI научно-практическая Щукинская конференция, г. Москва, 1-4 октября 2018 г. ИФЗ РАН, 2018.
 62. Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Салтыков В.А., Павлов В.М., Абубакиров И.Р., Кравченко Н.М., Титков Н.Н., Воропаев П.В. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$ (Командорский сегмент Алеутской островной дуги) / Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. XIII Международная сейсмологическая школа, Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018.
 63. Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В., Долов С.М. Прецизионные узкодиапазонные дифференциальные температурные датчики // II-я Всероссийская научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития», Казань, 2018.
 64. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Дрознина С.Я., Ландер А.В. Ильпирское землетрясение 13.03.2013 г. с $M_L=6.2$, $M_w=5.8$ (Камчатский перешеек, предполагаемая граница Охотской и Северо-Американской литосферных плит) / XXI научно-практическая Щукинская конференция, г. Москва, 1-4 октября 2018 г. ИФЗ РАН, 2018.
 65. Фомочкина А.С. Модификация программы определения параметров очага землетрясения по длиннопериодным записям поверхностных волн. Параллельная версия и оценка погрешности /Однодневная конференция ИТПЗ РАН «Научные итоги 2018», 29 ноября 2018 г.; Москва, 2018.
 66. Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Построение модели Аляскинского землетрясения 2018г. по спектрам поверхностных волн / XIII Международная сейсмологическая школа "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных", Душанбе (Таджикистан), 11-15 сентября 2018 г.
 67. Fomochkina A., Bukchin B. The estimate of the errors of earthquake parameters determination from surface wave amplitude spectra/ The fourth international conference "Quasilinear Equations, Inverse Problems and their Applications", MPTI, Dolgoprudny (Russia), December 3-5, 2018.
 68. Gravirov V.V., Kislov K.V., Likhodeev D.V. High-Sensitivity Sensor for Correction of Instrumental Thermal Noise of Seismic Devices // XII-th international Conference and School Problems of Geocosmos, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2018.

69. Gravirov V.V., Kislov K.V., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E. PEMSDAS - Portable Expandable Modular Seismic Data Acquisition System // XII-th international Conference and School Problems of Geocosmos, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2018.
70. Kislov K.V., Gravirov V.V. On the question of the rotational seismology // XII-th international Conference and School Problems of Geocosmos, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2018.
71. Kislov K.V., Gravirov V.V. Some Remarks on the Seismometric Experiments Taking into Account the Thickness of the Frozen Layer Soil // XII-th international Conference and School Problems of Geocosmos, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2018.
72. Varypaev A., Sanina I., Chulkov A., Kushnir A. Revealing the presence of the p-wave generated by weak seismic sources with complex focal mechanism using surface array data / European Seismological Commission 36th General Assembly 2-7 September 2018 Valletta – Malta ESC2018-S25-709

Программы для ЭВМ

2016 год

73. 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.
74. 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.

2017 год

75. Гравиров В.В., Кислов К.В. Программа подстраивающегося оптимального фильтра (Slave_OptFilter) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661235 от 06 октября 2017 г.
76. Ландер А.В. Программа разделения каталогов землетрясений по произвольным трехмерным географическим регионам и структурам (TERRITORIA) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661234 от 06 октября 2017 г.

2018 год

77. Ландер А.В. Программа определения координат гипоцентра землетрясения и его магнитуды по временам вступления и амплитудам сейсмических волн на основе минимаксного критерия (НММ) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

2018660921. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 29 августа 2018 г.
78. Ландер А.В. Программа расчета годографов прямых и рефрагированных Р и S-волн для горизонтально-однородной среды (LOC_TTTAB) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660650. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 28 августа 2018 г.
79. Ландер А.В. Программа расчета движения жестких литосферных плит на поверхности сферической Земли (HAND_ROT) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660492. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 23 августа 2018 г.
80. Ландер А.В. Программа расчета и визуализации древних реконструкций жестких литосферных плит, имевших произвольную историю движений на поверхности сферической Земли (ROT_GRD) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660920. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 29 августа 2018 г.
81. Ландер А.В. Программа расчета и графического представления диаграмм направленности для тензорных точечных очагов землетрясений (QBALL) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660491. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 23 августа 2018 г.
82. Ландер А.В. Программа расчета и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений Р-волн (FA) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662004. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 25 сентября 2018 г.