

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

УДК 550.34

№ госрегистрации 115080610013

Инв. № 2018-2



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

докт. физ.-мат. наук

А.И.Горшков

«29» *сентября* 2018 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ  
РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА  
СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ  
(промежуточный, за 2017 год)

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

Б.Г. Букчин

Москва 2018

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,  
вед. науч. сотр., зав. лаб.  
канд. физ.-мат. наук



Б.Г. Букчин

Ответственные исполнители:

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



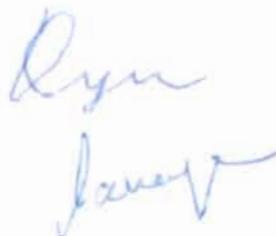
В.В. Гравиров

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



К.В. Кислов

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



А. Ф. Кушнир

ст. науч. сотр.

А.В. Ландер

ст. науч. сотр.  
канд. техн. наук



А.С. Фомочкина

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




А.К. Некрасова

## РЕФЕРАТ

Отчет 33 с., 8 рис., 1 табл., 20 источников

### ФОКАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ВТОРЫЕ МОМЕНТЫ, ЦУНАМИГЕННОЕ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ, ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ ГРУППА, СИСТЕМА РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ

Исследования, проведенные по теме в 2017 году, включали: построение моделей очагов современных землетрясений; разработку программного обеспечения для быстрого предварительного определения параметров землетрясений; разработку программ для оценки ошибок определения параметров землетрясений; подробное исследование Южно-Озерновского землетрясения; оперативное исследование Ближне-Алеутского землетрясения; разработку новой методики оценки магнитуды сильного субдукционного землетрясения по данным о вызванном им косейсмическим опусканиям морских побережий; модернизацию компьютерной программы определения координат и времени землетрясений; исследование применения в сейсмологии фазовых алгоритмов локации микросейсмических источников; разработку алгоритмов детектирования Р-волны на фоне шума высокого уровня для целей раннего предупреждения о землетрясении; разработку методов организации системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов; проведение длительной опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеорологических данных; определение влияния глубины промерзания грунта на сейсмический сигнал; формирование унифицированной библиотеки и записи сейсмических шумов различной природы, включая антропогенные.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Применение параллельных вычислений для ускорения расчета параметров очага землетрясения	7
2.2. Построение моделей очагов современных землетрясений	14
2.3. Оценка ошибок определения параметров землетрясений	14
2.4. Исследование землетрясений Камчатки	15
2.5. Новая методика оценки магнитуды	15
2.6. Модернизация программы определения координат и времени землетрясений	22
2.7. Исследование применения в сейсмологии фазовых алгоритмов локации микросейсмических источников	23
2.8. Разработка алгоритмов детектирования Р-волны на фоне шума высокого уровня для целей раннего предупреждения о землетрясении	23
2.9. Разработка методов организации системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов	24
2.10. Проведение длительной опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеорологических данных	26
2.11. Определение влияния глубины промерзания грунта на сейсмический сигнал	27
2.12. Продолжение формирования унифицированной библиотеки сейсмических шумов	28
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	30
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	31

## 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.

Определение фокального механизма и глубины очага землетрясения прямым перебором их возможных значений на сетке в параметрическом пространстве позволяет также оценить уровень их разрешения. Но 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, основанной на методе "Джекнайф".

Проведены исследования Южно-Озерновского и Ближне-Алеутского землетрясений.

Разработана методика оценки магнитуды сильного субдукционного палеоземлетрясения по данным о вызванных им косейсмическим погружениям морского побережья.

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

Показано, что использование методов оптимального статистического синтеза позволяет предложить фазовый алгоритм, обеспечивающий уменьшение ошибки локации микросейсмических источников в условиях сильных случайных помех.

Продолжена модификация и отладка программ и алгоритмов детектирования Р-волны для автоматизированного определения основных параметров сейсмических волновых фаз при наличии повышенного уровня сейсмических шумов.

Была продолжена разработка методологических основ, направленная на определение возможностей и ограничений существующих научно-технических подходов, предлагаемых сейсмологией в реальном времени для смягчения сейсмического риска на протяженных объектах.

Была продолжена работа по проведению длительной опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеорологических данных.

Разработана методика эксперимента по определению существования влияния глубины промерзания грунта на затухание высокочастотного сейсмического сигнала

Продолжено формирование унифицированной библиотеки сейсмических шумов.

Научная новизна выполняемых 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 совмещенным данным локальных и общемировых сейсмических сетей; синтез фазового алгоритма локации микросейсмических источников; продолжены работы по совершенствованию программы формирования выходных массивов данных для обучения нейронных сетей; изучение кибербезопасности современных и перспективных интеллектуальных систем; проведение четырех сеансов записей сейсмического сигнала длиной в 7 суток с параллельной записью метеорологических параметров; продолжение работы по определению 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. 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. Пример такого изменения диаграммы излучения фундаментальной моды волны Лява на периоде 200 с в зависимости от величины угла падения  $\delta$  приведен на рисунке 1. Источники представляют собой сдвиги по простиранию с различными значениями угла падения  $\delta$  и фиксированными значениями угла подвижки ( $\psi = 0^\circ$ ), угла подвижки ( $\lambda = 0^\circ$ ) и глубины источника ( $h = 30$  км). В верхнем ряду указаны текущие значения угла падения, в среднем ряду приведены соответствующие фокальные механизмы, а в нижнем ряду – соответствующие диаграммы излучения волны Лява.

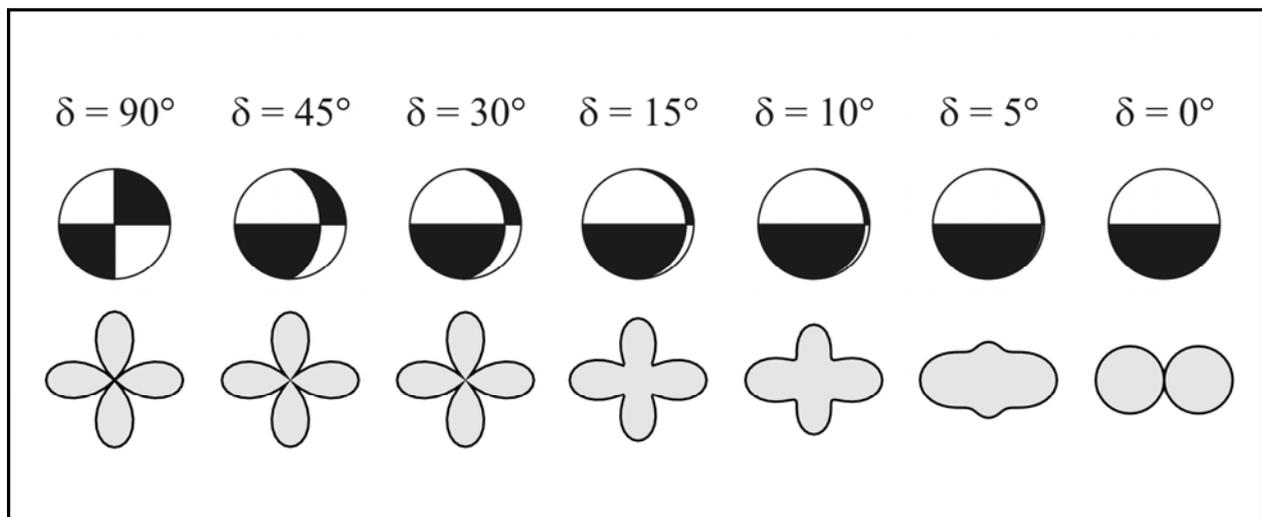


Рисунок 1. Диаграммы излучения фундаментальной моды волны Лява мелкофокусным источником, представляющим собой сдвиг по простиранию, для различных значений угла падения  $\delta$ .

Как видно из рисунка, при изменении угла падения от  $90^\circ$  до  $15^\circ$  диаграмма излучения волны Лява почти не меняется, и лишь на последних десяти градусах, когда одна из нодальных плоскостей становится субгоризонтальной, небольшие изменения фокального механизма существенно меняют диаграмму поверхностно-волнового излучения. Как следствие, применяемые к таким событиям методы оценки углов фокального

механизма должны обеспечивать достаточно высокий уровень их разрешения.

*Определение фокального механизма землетрясения, его глубины и сейсмического момента по длиннопериодным амплитудным спектрам поверхностных волн.* Наиболее интенсивные смещения земной поверхности, регистрируемые сейсмическими станциями, наблюдаются в поверхностных волнах. Каждая из таких волн является результатом свертки соответствующей функции Грина, определяемой строением среды вдоль пути распространения волны, и тензора плотности сейсмического момента, характеризующего неупругие процессы, происходящие в очаге землетрясения. При расчете функции Грина мы используем модель среды со слабой горизонтальной неоднородностью. Поверхностно-волновая функция Грина для такой модели зависит от параметров среды в окрестности очага и в окрестности точки регистрации, от средней вдоль луча фазовой скорости волны, от ее геометрического расхождения и затухания. При этом амплитудный спектр смещений в поверхностной волне не зависит от ее фазовой скорости. Скорости поверхностных волн в реальной Земле не известны с достаточной точностью. Поэтому, как правило, мы используем для определения параметров источника лишь амплитудные спектры поверхностных волн. Описывая источник в приближении тензора момента, мы рассматриваем мгновенную точечную сдвиговую дислокацию (двойной диполь) на глубине  $h$ . Такой источник задается пятью параметрами: его глубиной, фокальным механизмом, определяемым тремя углами (простираения  $\psi$ , падения  $\delta$  и подвижки  $\lambda$ ) и сейсмическим моментом  $M_0$ . Четыре первых параметра мы определяем прямым перебором их возможных значений на сетке в параметрическом пространстве, а пятый параметр  $M_0$  – минимизируя отличия (невязку  $\varepsilon$ ) наблюдаемых амплитудных спектров от их теоретических значений для каждой текущей комбинации значений остальных параметров. Детальность сетки для углов фокального механизма может достигать одного градуса. Значения параметров, минимизирующие невязку мы рассматриваем, как оценки этих параметров. Для оценки степени разрешения каждого из этих четырех параметров мы строим четыре частные функции невязки:  $\varepsilon_h(h)$ ,  $\varepsilon_\psi(\psi)$ ,  $\varepsilon_\delta(\delta)$  и  $\varepsilon_\lambda(\lambda)$ . Осуществляя перебор возможных значений параметров, мы рассматриваем лишь ту из двух нодальных плоскостей, которая падает круче. Ее угол падения не может быть меньше  $45^\circ$ , и его область значений определяется неравенствами  $45^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ .

Как известно фокальный механизм не может быть однозначно определен из амплитудных спектров поверхностных волн. Для каждого двойного диполя существует три эквивалентных ему диполя, излучающих поверхностные волны с тем же амплитудным спектром. Эти четыре эквивалентных решения представляют две пары механизмов, повернутых относительно друг друга вокруг вертикальной оси на  $180^\circ$  и в каждой паре отличающиеся друг от друга противоположным направлением подвижки.

Поэтому частные функции невязки амплитудных спектров для углов простираения и подвижки являются периодическими с периодом  $180^\circ$ . Для выбора одного из четырех эквивалентных фокальных механизмов мы сравниваем синтетические фазовые спектры поверхностных волн на очень длинных периодах (обычно не короче 100 с), рассчитанные для каждого из этих четырех решений, с наблюдаемыми фазовыми спектрами. В качестве оптимального фокального механизма выбирается тот, для которого эти спектры наиболее близки.

*Применение параллельных вычислений для ускорения расчета параметров очага землетрясения.* По описанному выше алгоритму была написана программа с распараллеливанием вычислений. Одним из наиболее популярных средств параллельного программирования для компьютеров с общей памятью в настоящее время является технология OpenMP. Данная технология базируется на традиционных языках программирования, таких как Си, Си++ и Фортран. За основу берётся последовательная программа, а для создания её параллельной версии используется набор директив, функций и переменных окружения. Предполагается, что создаваемая параллельная программа будет переносимой между различными компьютерами с разделяемой памятью, поддерживающими OpenMP. Технология OpenMP нацелена на то, чтобы пользователь имел один вариант программы для параллельного и последовательного выполнения. Нами была рассмотрена возможность применения данной технологии для ускорения процесса определения параметров очага землетрясения по спектрам поверхностных волн. В общем виде алгоритм работы программы представлен на блок-схеме на рисунке 2.

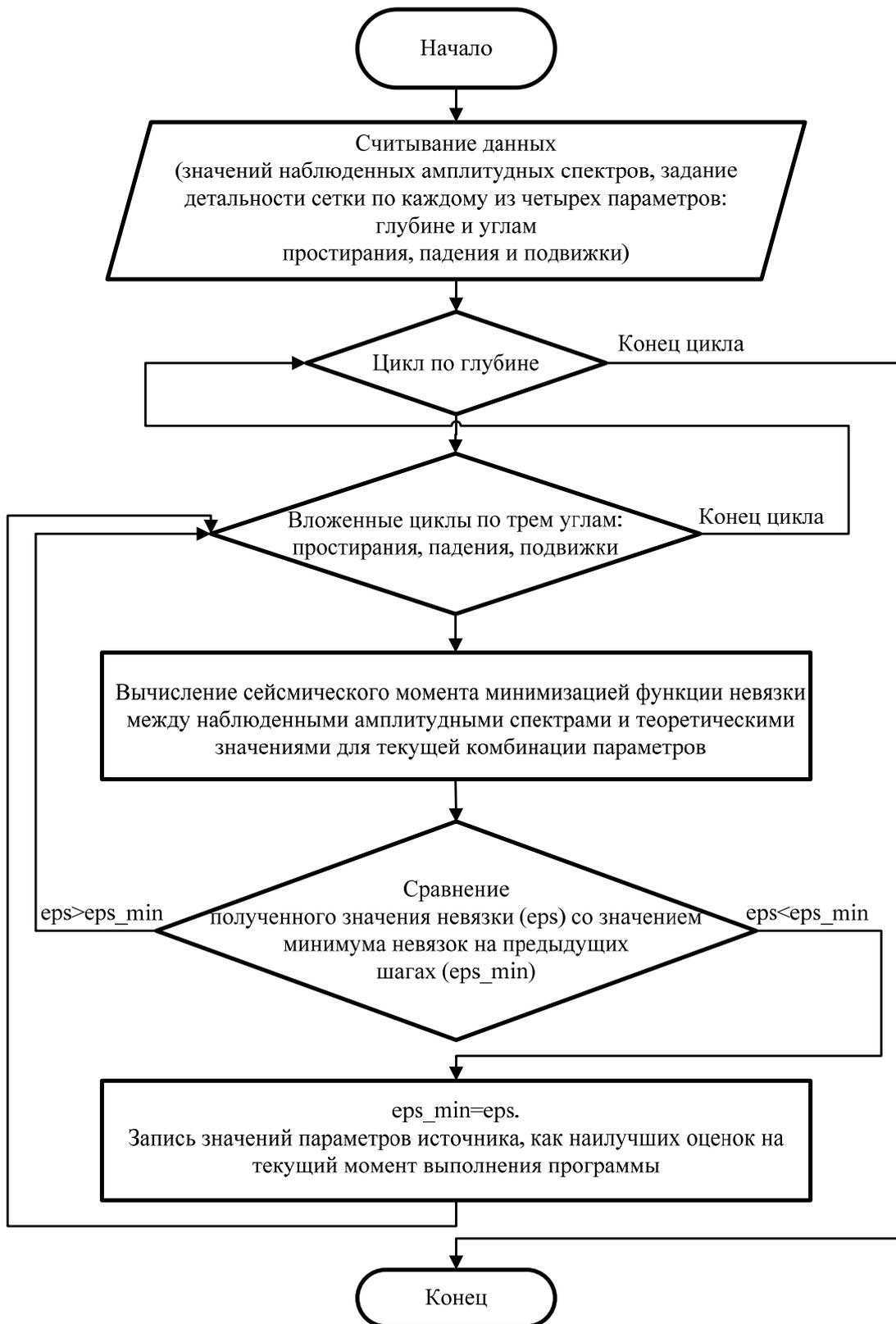


Рисунок 2. Блок-схема работы программы.

Как видно из блок-схемы самым внешним циклом является цикл по глубине. Именно по данному циклу проводится распараллеливание. Как описывалось выше, технология OpenMP представляет собой распараллеливание приложений на многопроцессорных системах с общей

памятью, в нашем случае – на ядрах одного процессора. Программа начинается с последовательной области – сначала работает один процесс (нить), при входе в параллельную область порождается ещё некоторое число процессов, между которыми в дальнейшем распределяются части программы. Итерации цикла по глубине распределяются на максимальное количество ядер и выполняются независимо на каждом из них за исключением критических секций. Под критической секцией подразумевается такая часть программы, которая может исполняться не более, чем одной нитью. Если критическая секция уже выполняется какой-либо нитью, то все другие нити, выполнившие директиву для секции с данным именем, будут заблокированы, пока вошедшая нить не закончит выполнение данной критической секции. Как только работавшая нить выйдет из критической секции, одна из заблокированных на входе нитей войдет в неё. Если на входе в критическую секцию стояло несколько нитей, то случайным образом выбирается одна из них, а остальные заблокированные нити продолжают ожидание. Мы используем критические секции для работы с глобальными (общими для всех ядер) минимумами невязок. Это необходимо для предотвращения одновременной перезаписи глобальных минимумов несколькими нитями, когда несколько текущих локальных минимумов меньше текущего глобального минимума.

*Сильнейший афтершок японского землетрясения в Тохоку, 11.03.2011,  $M_w = 8.4$ .* Описанный подход был использован для изучения сильнейшего афтершока землетрясения в Тохоку, произошедшего через полчаса после основного толчка. В результате его записи оказались сильно зашумленными излучением предшествующего главного события. С помощью программы спектрально-временного анализа СВАН мы отфильтровали в полосе периодов от 100 до 200 с и использовали для определения параметров изучаемого события фундаментальные моды Лява и Рэля, зарегистрированные 13 станциями сетей IRIS, GEOSCOPE и GEOFON. Расположение этих станций приведено на рисунке 3а. Шаг сетки для углов фокального механизма был выбран равным  $1^\circ$ . В таблице 1 представлены фокальные механизмы и фазовые невязки для четырех эквивалентных решений, полученных из анализа амплитудных спектров поверхностных волн.

Как видно из таблицы, оптимальным является решение 1, приведенное на рисунке 3б. Полученные значения углов простираания, падения и подвижки:  $33^\circ$ ,  $89^\circ$  и  $91^\circ$  соответственно. Полученное значение сейсмического момента равно  $0.46 \cdot 10^{22}$  Нм. Это значение соответствует значению моментной магнитуды  $M_w = 8.4$ . Наша оценка глубины наилучшего точечного источника равна 10 км. Частные функции невязки для глубины источника и для углов фокального механизма, характеризующие их разрешение, приведены на рисунке 4.

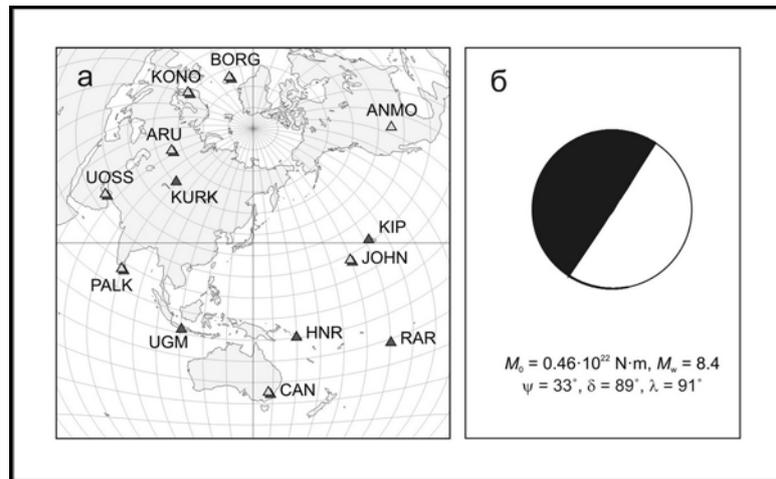


Рисунок 3. Распределение точек регистрации поверхностных волн (а) и наилучшее из четырех эквивалентных решений (б), полученных по амплитудным спектрам поверхностных волн. Темные треугольники соответствуют волнам Рэлея, светлые треугольники – волнам Лява.

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

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

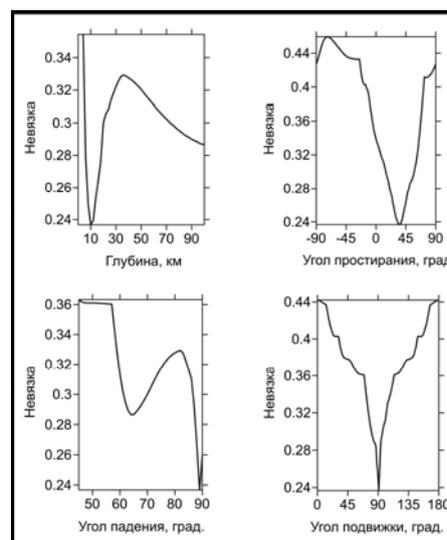


Рисунок 4. Частные функции невязки для глубины источника и углов фокального механизма.

Обе версии программы (без распараллеливания и с распараллеливанием) были отхронометрированы на записях сильнейшего афтершока Тохоку. Время работы программы без распараллеливания оказалось равным 99 минутам, с распараллеливанием на 2 ядра (каждое ядро – 2 потока) – 41-й минуте. Как видим, время работы программы уменьшилось больше чем в 2 раза (количество ядер), но меньше чем в 4 раза (количество потоков). Это связано с несколькими факторами. Во-первых, в программе помимо параллельной части есть еще последовательные, связанные со считыванием данных, критическими секциями, записью и выводом результатов. Во-вторых, стоит отметить, что потоки не эквивалентны ядрам. В отличие от «настоящих» ядер, являющихся полными и независимыми копиями, в случае многопоточности в одном процессоре дублируется лишь часть внутренних узлов, в первую очередь отвечающих за хранение и подготовку данных. Исполнительные же узлы, ответственные за организацию и обработку данных, остаются в единственном числе, и в любой момент времени используются максимум одним из потоков.

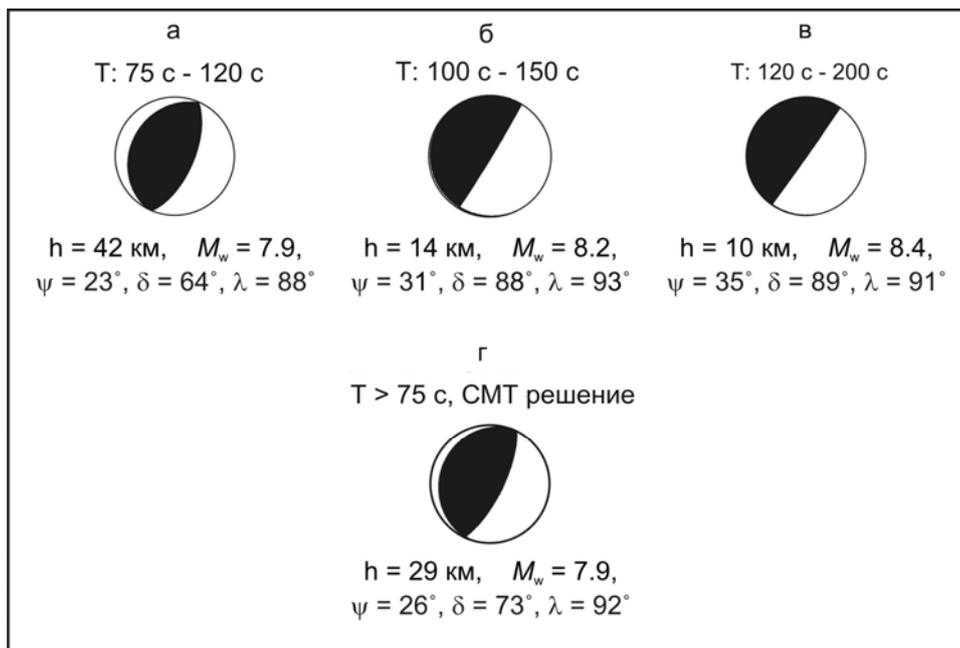


Рисунок 5. Результаты инверсии спектров поверхностных волн в трех спектральных диапазонах. Сравнение с ГСМТ решением.

*Сравнение результатов с СМТ решением.* Было произведено сравнение полученного решения с решением из Глобального СМТ каталога (решение ГСМТ). Прежде чем продемонстрировать его результаты, рассмотрим проблему выбора спектрального диапазона наблюдений. При перемещении этого диапазона из области периодов, недостаточно длинных для использования приближения точечного мгновенного источника, в область более длинных периодов оценки параметров очага существенно изменяются. Когда же периоды становятся достаточно длинными и указанное

приближение – адекватным, оценки параметров принимают свои предельные значения и перестают изменяться с дальнейшим ростом периодов. Соответствующая иллюстрация для сильнейшего афтершока землетрясения в Тохоку приведена на рисунке 5 (а, б, в). Здесь изображены решения, полученные из одного и того же набора записей поверхностных волн, отфильтрованных в трех разных спектральных диапазонах.

Сравним теперь решение, приведенное на рисунке 5в, с ГСМТ решением, представленном на рисунке 5г. Эти решения существенно различаются. Так полученная нами оценка  $M_w$  равна 8.4, в то время как ГСМТ оценка  $M_w$  равна 7.9. Заметим, однако, что сравниваемые решения получены по записям поверхностных волн, отфильтрованных в разных спектральных диапазонах. Если же мы сравним ГСМТ решение ( $T > 75$  с) с решением, приведенном на рисунке 5а ( $75 \text{ с} < T < 120 \text{ с}$ ), то увидим, что эти решения весьма близки. Но как было отмечено выше, диапазон периодов  $75 \text{ с} < T < 120 \text{ с}$  является недостаточно длиннопериодным для рассматриваемого события. Это дает нам основание предполагать, что существенные отличия нашего решения от ГСМТ решения объясняются неадекватным выбором спектрального диапазона наблюдений при расчете последнего.

Результаты исследования представлены в докладе [18].

## 2.2. Построение моделей очагов современных землетрясений

Результаты построения моделей очагов ряда современных землетрясений опубликованы в статье [2]. В работе проанализирована возможность идентификации плоскости разлома при описании очага землетрясения в приближении вторых моментов. Подробно рассмотрен часто встречающийся тип очага землетрясения, большая ось которого и распространение разрыва направлены вдоль оси простирания. Исследовано влияние фокального механизма землетрясения на возможность идентификации плоскости разлома такого очага. Сделанные выводы подтверждены результатами, полученными для двух сильных землетрясений: Чилийского землетрясения, происшедшего в Мауле 27 февраля 2010 г., и землетрясения, происшедшего 11 апреля 2012 г. у побережья Северной Суматры.

## 2.3. Оценка ошибок определения параметров землетрясений

Разработана предварительная версия программного обеспечения для оценки ошибок определения углов фокального механизма и глубины землетрясения, по методу "Джекнайф". Метод основан на анализе устойчивости результата при использовании различных выборок зарегистрированных записей поверхностных волн.

## 2.4. 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,  $M_w=6.6$ , произошедшего 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. Результаты исследования опубликованы в статье [7].

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 брешы", где предполагается возможность возникновения сильнейшего цунамигенного мегаземлетрясения с магнитудой  $\sim 9$ . Результаты исследования опубликованы в статье [8].

Полученные результаты опубликованы также в монографии [1], по ним сделаны доклады [14, 17] и при выполнении соответствующих исследований использовалась программа для ЭВМ, на которую было получено свидетельство о государственной регистрации [20].

## 2.5. Новая методика оценки магнитуды

Детальные исследования морских аккумулятивных террас на восточном побережье Камчатки позволили выявить в их геологическом строении следы быстрых вертикальных перемещений берега относительно уровня моря. Эти явления удастся сгруппировать по возрасту в несколько крупных событий, которые естественно интерпретировать как древние мегаземлетрясения. На Юге Камчатки (южнее Шипунского полуострова) выявлено три таких события за доисторический период времени, охватывающий последние  $\sim 3.5$  тыс. лет по  $^{14}\text{C}$  (1150 – 1250  $^{14}\text{C}$  л. н., 2400-2500  $^{14}\text{C}$  л. н. и 3300 – 3500  $^{14}\text{C}$  л. н.). Т.к. все перечисленные события произошли резко и имели меняющиеся вдоль берега амплитуды, они не связаны с колебанием абсолютного уровня моря и были проинтерпретированы как следы древних мегаземлетрясений.

События сопровождалось резким опусканием прибрежной полосы на протяжении десятков и даже сотен километров. При этом выявляется четкая закономерность в пространственном распределении амплитуд опусканий, одинаково выполняющаяся для каждого из обнаруженных событий. На рис. 6 приведен пример наиболее полно исследованного палеоземлетрясения, произошедшего в интервале 738 - 965 гг.н.э. (1150 – 1250  $^{14}\text{C}$  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  $2.5 \div 4$  м. Резкий скачок измеренных амплитуд погружений происходит на коротком участке побережья, не превышающем по протяженности 40 км.

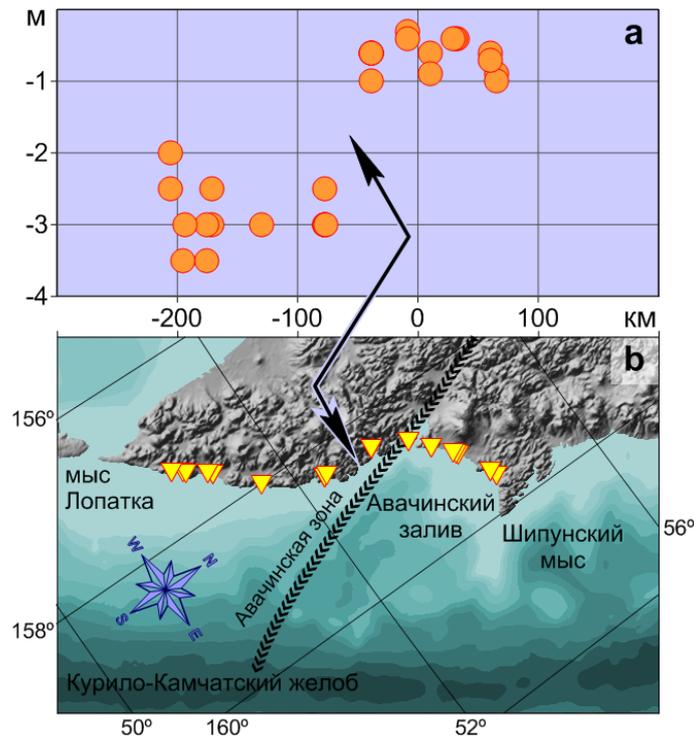


Рисунок 6. Амплитуды опусканий побережья Южной Камчатки при палеоземлетрясении 738 - 965 гг.н.э. **a** - результаты полевых измерений быстрых погружений берега для различных пунктов побережья, отмеченных треугольниками на **b** - карте района исследований. Координаты (км) на горизонтальных осях графика измерений и карты совпадают. Линия со стрелками отмечает участок побережья, на котором происходит резкий скачок опусканий. Показано использованное в настоящей работе предполагаемое положение поперечной Авачинской зоны.

Важно отметить, что резкое изменение амплитуд погружений происходит в окрестности пересечения берегом крупнейшей поперечной структуры Южной Камчатки. Здесь выделяется зона дислокаций юго-восточного простирания, называемая Малко-Петропавловской или Начикинской. Зона протянулась в юго-восточном направлении 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. Ниже мы будем называть совокупность этих наземных и подводных структур поперечной Авачинской зоной (рис. 6).

Присутствие поперечной структуры в рассматриваемом районе не ограничивается современным тектоническим этапом. На протяжении не менее чем 50 млн. лет, на различных стадиях развития Камчатки 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. Остановимся подробнее на последнем тезисе.

На развитие современных субдукционных процессов и связанных с ними обсуждаемых в данной работе крупнейших землетрясений наибольшее влияние могла повлиять серьезная перестройка Камчатской зоны субдукции, произошедшая в период примерно 10 - 2 млн. лет. Согласно 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. В результате произошло запираение зоны субдукции, следы которой сохранились западнее полуостровов. 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.

Однако структуры, связанные с неогеновой коллизией (и, в частности, фрагменты столкнувшейся дуги - полуострова) наблюдаются только севернее района поперечной Авачинской зоны. Южнее с более раннего времени (по крайней мере, 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 простирания Авачинской зоны резко меняется максимальная глубина наблюдаемых землетрясений (с 650-700 км на юге до 350-400 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.

Различие между северным и южным сегментами зоны субдукции выражено и в структуре Восточно-Камчатского континентального склона. В его нижней части параллельно глубоководному желобу протянулась серия подводных хребтов-барьеров, отделяющих в рельефе дна впадины Авачинского, Кроноцкого и Камчатского заливов от океана. По-видимому, эти хребты отражают формирование аккреционных призм и, тем самым, рост внешней невулканической дуги над молодой зоной субдукции. На юге хребты-барьеры продолжают 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.

В распределении мелкофокусной сейсмичности, соответствующей верхней пологой части сейсмофокальной зоны также можно заметить различие северного и южного сегментов. 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.

Приведенные факты позволяют предположить, что различия в возрасте и строении северного и южного сегментов Камчатской зоны субдукции могут отражаться и в характерных параметрах очагов сильнейших землетрясений обоих районов. Южный сегмент выглядит относительно запертым, обладающим в целом большим сцеплением крыльев зоны, чем северный. Данные предположения ранее высказывались при интерпретации данных Камчатской региональной сети GNNS и на основе моделирования Камчатского цунами 1952 г.

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.

Таким образом, представленный на рис. 6 скачок амплитуд косейсмических опусканий побережья 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 попытаться грубо оценить главные очаговые параметры соответствующего палеоземлетрясения и, в частности, возможное влияние Авачинской границы на структуру очага. При имеющемся наборе данных и многопараметрической модели очага, соответствующая обратная задача не устойчива. Поэтому при поиске решения мы привлекали кратко описанную выше априорную информацию о геологической структуре возможной очаговой области.

Решение задачи основано на известных формулах смещений свободной поверхности при внутренней точечной дислокации в однородном полупространстве. Согласно имеющимся наблюдениям, рассматриваются только вертикальные смещения свободной поверхности. Комбинирование малых дислокаций в принципе позволяет моделировать движение земной поверхности, вызванное произвольным сейсмическим источником. В принятой модели очаг рассматривается как набор плоских многоугольников

(субочагов) произвольной формы с разной подвижкой, но однородной в пределах каждого из них. В расчетах использовались только многоугольники, принадлежащие общей плоскости, моделирующей поверхность субдуцирующей плиты. Наземный и подводный рельеф не учитывался. Модельная плоскость субдукции пересекает свободную поверхность в окрестности глубоководного желоба и имеет простирание  $217^\circ$  и наклон  $18^\circ$ . Таким образом, предполагалось, что очаг может располагаться только в пределах верхней пологой части Камчатской зоны субдукции (до глубин 50-60 км). Учитывая реальную ширину этой зоны, субочаги выбирались в пределах полосы размером  $800 \times 150$  км, повернутой длинной стороной вдоль простирания зоны субдукции. Такая максимальная протяженность очага позволяет охватить все области, которые могут оказывать существенное влияние на опускания берега в районах, для которых имеются данные. Подавляющее большинство известных в этой полосе механизмов землетрясений близко к взбросам. Поэтому для большинства модельных субочагов использовалась чисто взбросовая подвижка. В некоторых случаях допускалась также небольшая сдвиговая компонента, однако в окончательных решениях она отсутствует.

После фиксации модельной плоскости субдукции задача сводится к перебору (путем проб и ошибок) различных возможных наборов многоугольников-субочагов и выбору оптимального из них, наилучшим образом соответствующего данным о погружении берега. Каждый шаг перебора состоит из двух частей. Сначала задается пробная форма субочагов. Это может быть либо сетка прямоугольников, либо набор фигур более сложной формы, построенных исходя из априорной информации о структуре региона. После фиксации формы субочагов оставшаяся часть решения обратной задачи является линейной относительно величин подвижек в каждом из них. Коэффициенты соответствующей системы уравнений находятся путем вычисления полей отдельных субочагов при подвижке равной единице. Система часто оказывается плохо обусловленной. Поэтому при обращении ее (умножением на псевдообратную матрицу) использовались дополнительные ограничения. В частности отбраковывались решения содержащие встречные подвижки.

Был промоделирован очаг палеоземлетрясения, произошедшего между 738 и 965 гг.н.э. ( $1150 - 1250$   $^{14}\text{C}$  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.

При более детальном выборе субочагов полный очаг первоначально разбивался в обоих направлениях на неравные прямоугольные ячейки. Однако выяснилось, что при имеющемся расположении точек наблюдений возможно устойчиво оценить не более 2-х независимых параметров. Во всех рассмотренных примерах эффективный ранг построенной системы линейных уравнений был равен 2 (третье сингулярное значение матрицы меньше первого на два порядка). В частности это означает, что возможно использовать разбиение только на два субочага.

Тем не менее, проведение границы между субочагами вблизи поперечной Авачинской зоны позволяет вполне удовлетворительно описать наблюдаемый скачок амплитуд опусканий берега. Мы провели данную границу по западному склону Авачинского каньона - основной структуры рельефа дна этого района. Приблизительно здесь предполагается "присутствие тектонически активной в четвертичное время структуры СЗ простирания, прослеживаемой в пределах континентального склона". В нижней части склона граница проведена таким образом, чтобы ограничить с юга крайний хребет-барьер - структуру характерную для северного сегмента зоны субдукции.

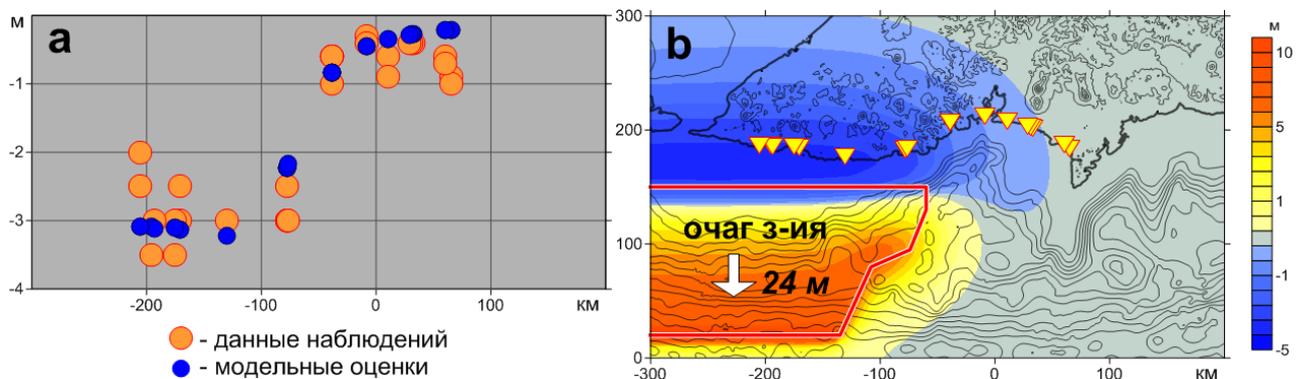


Рисунок 7. Модель с единственным очагом землетрясения, расположенным южнее Авачинской зоны. **а** - сравнение опусканий берега, рассчитанных в пунктах наблюдений с реальными данными, приведенными на рис.6. **б** - карта модельных вертикальных движений района, вызванных данным модельным очагом. На карте, соответствующей рис.6б: жирная линия - проекция очага на земную поверхность, белая стрелка (со значением в метрах) - подвижка висячего крыла разрыва в очаге модельного землетрясения.

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. 7 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. Последняя тенденция в исходных данных отсутствует, хотя, возможно, это связано с ошибками измерений.

Второй вариант включает дополнительный субочаг, расположенный непосредственно севернее Авачинской границы (рис. 8). 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 (в результате решения линейной системы) приводило к обратной сбросовой подвижке в его пределах. Учитывая наложенное ограничение на направление подвижки, это означало принятие для нее нулевого значения, то есть исключение третьего субочага. Следовательно, полный модельный очаг не распространяется под внутреннюю часть Авачинского залива.

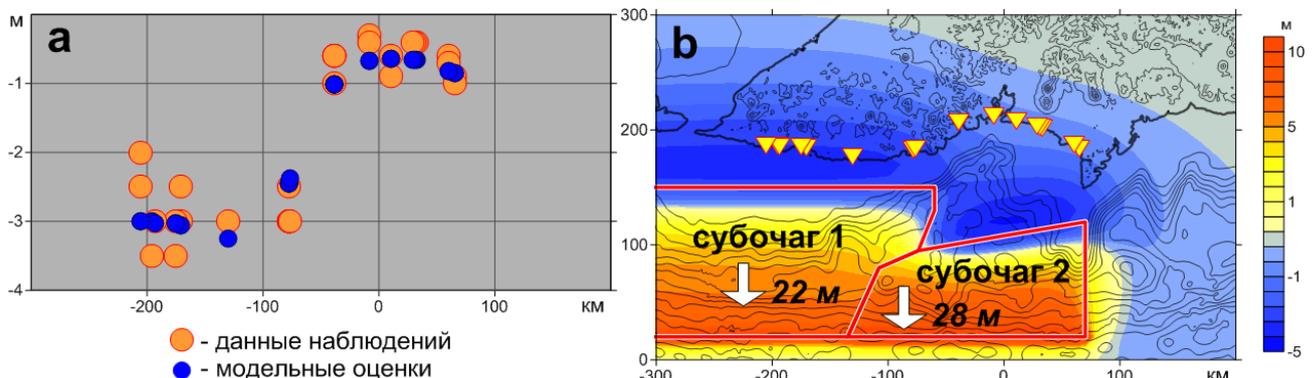


Рисунок 8. Модель с двумя субочагами, расположенными по разные стороны Авачинской зоны. Обозначения аналогичны рис.7.

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  $M > 9$ .

Идентифицированное по геологическим данным землетрясение, по-видимому, относится к сильнейшим из произошедших в Камчаткой зоне субдукции за последние несколько тысяч лет. Соответственно, две представленные гипотетические модели могут иметь несколько различную тектоническую интерпретацию. В первом варианте 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.

Вторая гипотеза подразумевает, что очаги сильнейших событий могут распространяться и севернее. Экстраполируя полученные результаты, можно предположить, что для них в пределах северного сегмента зоны субдукции основные подвижки происходят только в ее внешней части (между внутренним краем хребтов-барьеров и глубоководным желобом). Меньшая ширина очагов (при сравнимых подвижках) может объяснять в целом меньшие амплитуды цунами в северном сегменте, по сравнению с южным. Тем не менее вторая гипотеза, на сегодня, не достаточно обоснована. Для ее проверки необходимы специальные работы по изучению и интерпретации вертикальных движений побережья на северном сегменте Камчатской зоны субдукции.

Результаты исследования представлены в докладах [15, 16].

## 2.6. Модернизация программы определения координат и времени землетрясений

Модернизирована компьютерная программа определения координат и времени землетрясений для возможности использования ее на совметных данных локальных и общемировых сейсмических сетей.

## 2.7. Исследование применения в сейсмологии фазовых алгоритмов локации микросейсмических источников

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. Однако, как правило, известные фазовые алгоритмы синтезированы с помощью эвристических методов. Нашей задачей было показать, что использование методов оптимального статистического синтеза позволяет предложить фазовый алгоритм, обеспечивающий меньшие ошибки оценивания координат микросейсмических источников в условиях сильных случайных помех. Синтез такого алгоритма был осуществлен с использованием концепции максимального правдоподобия. Полученный алгоритм локации микросейсмических источников был исследован с помощью моделирования методом Монте-Карло для сравнения его точности с точностью наиболее популярного фазового алгоритма локации. Было показано, что для микросейсмических источников длительностью более 15 сек. синтезированный алгоритм обеспечивает, по крайней мере, вдвое более точную оценку координат этих источников, чем известный фазовый алгоритм локации волновых излучений.

Результаты исследования представлены в статье [6].

## 2.8. Разработка алгоритмов детектирования Р-волны на фоне шума высокого уровня для целей раннего предупреждения о землетрясении

Продолжены работы по совершенствованию программы формирования выходных массивов данных для обучения нейронных сетей. Кроме этого продолжена модификация и отладка программ и алгоритмов детектирования Р-волны для автоматизированного выделения основных параметров сейсмических волновых фаз при наличии повышенного уровня сейсмических шумов, функционирующих в масштабе времени, максимально приближенному к реальному. Поскольку в случае сильнозашумленных сейсмических сигналов традиционные алгоритмы предварительной фильтрации данных малоэффективны и приводят зачастую к весьма неудовлетворительным результатам: многочисленным ложным срабатываниям и пропускам землетрясений, то особое внимание уделялось дальнейшему улучшению алгоритма вейвлет-преобразования для предварительной фильтрации входных сейсмических цифровых данных. Вейвлет-преобразование позволяет проводить всю необходимую фильтрацию и одновременно отмечать моменты изменения волновой

структуры сигнала. Кроме выше перечисленного оно позволяет осуществлять хорошую частотно-временную локализацию сейсмических событий, обладает хорошей наглядностью получаемых результатов и возможностью исследования не только стационарных, но и нерегулярных сигналов. Продолжены исследования о возможности применимости искусственных нейронных сетей для целей раннего предупреждения о землетрясении. Применение нейронных сетей, как мощнейших инструментов классификации, находит все большее применение при детектировании и анализе сейсмических сигналов в настоящее время. Качественно обученная искусственная нейронная сеть обладает высокой скоростью работы и может достаточно детально выделять, и классифицировать землетрясения. При этом особое внимание следует уделять выбору типа и структуры применяемых нейронных сетей, так как не существует жестких и формализованных критериев, определяющих этот выбор. Однако следует подчеркнуть, что искусственные нейронные сети все еще не находят применения для классификации сильнозашумленных сейсмических сигналов, так как они напрямую не могут справиться с поставленной задачей и требуется специфическая специальная предварительная обработка входных массивов данных. Также не решена задача оценки качества работы нейросетевого классификатора сейсмических событий при большом количестве классов и при выходных векторах сети, содержащих большое количество параметров входного сигнала. Эти проблемы должно решить применение глубоких рекуррентных нейронных сетей. Это позволит 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.

Результаты исследования представлены в публикациях [3, 5] и при их выполнении использовалась программа для ЭВМ, на которую было получено свидетельство о государственной регистрации [19].

## 2.9. Разработка методов организации системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов

Продолжена разработка методологических основ, направленная на определение возможностей и ограничений существующих научно-технических подходов, предлагаемых сейсмологией в реальном времени для смягчения сейсмического риска на протяженных объектах. 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. 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 России подразумевает увеличение нагрузок на протяженные объекты, повышение скоростей транспортирования, ввод новых протяженных объектов. Попытки создания подобных систем в нашей стране проводятся, но отсутствие методологии, разобщенность и малая проработка проектов делают их малоэффективными.

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.

Существуют две стратегии организации СРП протяженных объектов. По первой сейсмостанции устанавливаются вдоль объекта. Так проще налаживать передачу данных, проще осуществлять диагностику повреждений, мониторинг состояния объекта. Однако этот подход не обеспечивает наиболее быструю оценку параметров землетрясений. Вторая стратегия состоит в том, что сейсмические станции устанавливаются вблизи эпицентров возможных землетрясений. Преимущество этой стратегии в том, что значительно уменьшается количество сейсмостанций и увеличивается время для реагирования на тревожный сигнал. Наилучший вариант - это объединение обеих стратегий. Расчет необходимости и экономической целесообразности создания СРП требует предварительного исследования территорий его простираения, сейсмостойкости его элементов и определения мер, которые могут быть приняты по тревожному сигналу.

Тревожные сигналы включают автоматизированные системы, способные за несколько секунд остановить или замедлить поезда, включить красные сигналы светофоров, отключить электроэнергию, закрыть газовые вентили и линейные задвижки на нефтепроводах, оповестить население и т.д. СРП рассчитывает интенсивность землетрясения в каждой точке объекта. По интенсивности определяется возможный ущерб, и организуются аварийно-спасательные и восстановительные работы.

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.

Большая часть территории России имеет сейсмичность, которая, с глобальной точки зрения, является низкой, но не является ничтожно малой. Землетрясения происходят и влекут за собой разрушения и жертвы. Важно, чтобы СРП разрабатывались как начальная стадия общей программы, надо учесть возможность модернизации и интеграции в общую систему. СРП нуждается в соответствующем стандартизированном решении.

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. Естественно, должны учитываться местные особенности сейсмичности и геологического строения, необходимые для определения затуханий сейсмических волн, для оценки интервалов времени между Р и S-волнами в зависимости от гипоцентрального расстояния.

Отдельное внимание было уделено вопросам кибербезопасности современных и перспективных интеллектуальных систем. Наше видение проблем и современных вызовов в этом вопросе было доложено на 4-х конференциях и круглых столах [9-13].

Результаты исследования представлены в статьях [3-5].

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

Сейсмические помехи природного происхождения обусловлены, прежде всего, изменениями атмосферного давления и температуры. Для записи сейсмических данных на сейсмическом пункте д. Устьяново, Егорьевского р-на, МО (широта  $55^{\circ}.47455$  с.ш., долгота  $38^{\circ}.99133$  в.д.) использовалась трехкомпонентная сейсмическая станция, разработанная в ИТПЗ РАН. Для параллельной записи метеорологических параметров использовалось нестандартное оборудование, также разработанное в ИТПЗ

РАН. Для определения характеристик ветра (направление и скорость) разработан инновационный проект анеморумбомера, для крепления которого установлена мачта высотой 12 м.

Проведены четыре сеанса записей сейсмического сигнала с параллельной записью метеорологических параметров. Длина каждого сеанса 7 суток. Выяснено, что для проведения эксперимента по определению влияния глубины промерзания почвы на затухание сейсмического сигнала необходимо провести следующие работы.

1. Расширить диапазон сейсмической регистрации в более высокие частоты. Это обусловлено тем, что при создании системы возбуждения искусственного калиброванного сейсмического сигнала, между точками возбуждения и регистрации сигнала должно уместиться не менее 4 – 5 длин волн колебаний грунта.
2. Применить для измерений мощности мерзлого слоя грунта более точный и совершенный мерзлотомер, чем использованный макет. Во-первых, для эксперимента важно знать не глубину нижней границы промерзания, а именно толщину мерзлого слоя. Во-вторых, для оценки влияния на эту характеристику рельефа, растительности, мощности снежного покрова и других условий, необходимо увеличить разрешение прибора по глубине. В-третьих, прибор должен быть дистанционным, чтобы не нарушался снежный покров в месте установки.
3. Использовать для фильтрации атмосферных помех более точную метеоаппаратуру, установленную согласно принятым стандартам. Необходимо применять постоянную цифровую запись параметров для возможности дальнейшей их обработки. Для регистрации характеристик ветра анеморумбомер должен быть установлен выше ветровой тени для всех направлений ветра. Для уменьшения количества регистрируемых каналов должна быть создана система компрессии данных.

Для проведения дальнейших работ нестандартная аппаратура должна быть разработана, сконструирована и изготовлена к следующему зимнему сезону.

## 2.11. Определение влияния глубины промерзания грунта на сейсмический сигнал

Данные о зависимости распространения сейсмических волн в приповерхностных грунтах от глубины их промерзания имеет немаловажное значение при проведении сейсморазведочных работ, а также в малоглубинной геофизики в целом, при определении разрешающей способности сейсмостанций, изучении сейсмических шумов и других практических, научных и методических работах. Глубина промерзания грунта оказывает влияние на точность сейсмоакустических методов в горном деле, сейсмоакустическом каротаже, при инженерно-геологических изысканиях для изучения геологического строения массива, нарушений угольных пластов, физико-технических свойств горных пород, оценки

напряжённого состояния геологической среды, при малоглубинной томографии.

За 2017 год проведено испытание существующего оборудования и определена его пригодность для проведения эксперимента, рассчитаны необходимые параметры сейсмической станции, метеоприборов, мерзлотомера, системы возбуждения искусственного калиброванного сейсмического сигнала. Разработана методика эксперимента по определению существования влияния глубины промерзания грунта на затухание высокочастотного сейсмического сигнала. Подготовлена схема сверки метеоприборов с приборами Росгидромета (поверка). Разработаны эскизные проекты:

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

Изменения скоростей сейсмических волн будем измерять путем проведения натуральных экспериментов в осенне-весенний период. Для измерения глубины промерзания грунта был разработан эскизный проект прибора – мерзлотомера, предназначенного для многоточечной и многоканальной высокоточной системы измерения динамического изменения температур окружающего грунта и сверхдлиннопериодных малоамплитудных температурных вариаций. 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 сверхдлиннопериодных 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. Использование его в дальнейших натуральных экспериментах позволит получить данные о локальной динамике теплового режима грунта с дифференциацией по глубине, что предоставит возможность в дальнейшем получить более полные данные о тепловом режиме Земли.

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

Для обучения как классификационных, так и регрессионных искусственных нейронных сетей осуществляющих автоматизированную обработку поступающих необходимо использование «типичных» фрагментов сейсмических событий (в том числе и их смесей). С помощью, разработанной автономной системы сбора сейсмической информации и мобильной

трехкомпонентной сейсмической станции (рабочий частотный диапазон 500 с - 50 Гц, динамический диапазон 145 дБ, тактовая частота сейсмических данных 0,1 -100 Гц, разрядность оцифровки 24 бит, время автономной непрерывной работы не менее 12 часов), были 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. Расширение библиотеки шумов, их анализ и классификация являются в этом случае абсолютно необходимой работой. 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 и позволяет нам оценить не только уровень шума, но и качество разработанной мобильной сейсмической станции, так как указанные места наблюдений соответствуют принципиально различным условиям установки сейсмической станции (на вершине горы, в штольне на берегу моря и на морском дне).

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследований по теме была продолжена разработка программного обеспечения для быстрого предварительного определения параметров очага землетрясения по телесеismicким записям длиннопериодных поверхностных волн. Программы оттестированы на моделях, построенных для ряда современных землетрясений. Разработана предварительная версия программного обеспечения для оценки ошибок определения параметров землетрясения, по методу "Джекнайф". Проведено подробное исследование Южно-Озерновского землетрясения,  $M_w=6.6$ , произошедшего 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. Разработана методика оценки магнитуды сильного субдукционного землетрясения по данным о вызванном им косейсмическим опусканиям морских побережий. Модернизирована компьютерная программа определения координат и времени землетрясений. Синтезирован новый фазовый алгоритм локации микросейсмических источников. Продолжены работы по совершенствованию программы формирования выходных массивов данных для обучения нейронных сетей. Продолжена разработка методологических основ организации системы раннего предупреждения для защиты протяженных объектов. Проведены сеансы длительной опытной сейсмической регистрации с параллельной записью метеорологических данных. Проработан макет многоканальной автономной информационно-измерительной системы для сбора сверхдлиннопериодных малоамплитудных температурных вариаций грунта. Расширена библиотека шумов, проведен их анализ и классификация.

Результаты выполненных исследований представлены в монографии, 7 статьях в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах и в 10 докладах на международных и российских научных конференциях. Получено 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ.

## 4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

*Монография*

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*

2. 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).
3. 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.
4. 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/np-27-1-i4045.
5. 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>.
6. Kushnir, A., and A. Varypaev, 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.
7. 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.
8. 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 брешы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2017, № 3. С.22-25.

*Доклады на международных и российских научных конференциях*

9. 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>.
10. 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-bes-pilotnogo-transporta-na-dorogah-rf>.
11. 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/](http://cipr.ru/table_schedules/).
  12. Кислов К.В., Гравиров В.В. Раннее предупреждение о землетрясении и сейсмический мониторинг отдельных объектов // Сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» (27-28 сентября 2017), Москва: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2017. С.49-50.
  13. Кислов К.В., Гравиров В.В. Сейсмический мониторинг и раннее предупреждение о землетрясении для отдельных объектов. Пленарный доклад // Сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» (27-28 сентября 2017), Москва: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2017.
  14. Ландер А.В., Шевченко Н.А., Матвеев Е.А. Уточнение координат землетрясений в юго-западной части камчатской сейсмофокальной зоны // 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 ([http://www.emsd.ru/static/library/2017\\_conf/050.pdf](http://www.emsd.ru/static/library/2017_conf/050.pdf)).
  15. 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., г. Петропавловск-Камчатский. Программа. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С.45.
  16. Ландер А.В., Пинегина Т.К. Моделирование очагов сильнейших палеоземлетрясений Южной Камчатки // 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](http://www.emsd.ru/static/library/2017_conf/070.pdf)).
  17. 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., Сенюков 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](http://www.emsd.ru/static/library/2017_conf/050.pdf)).

18. Fomochkina, A., and V. Bukchin, 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>

#### *Программы для ЭВМ*

19. 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.
20. 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.