

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

УДК 550.34

№ госрегистрации 01201281967

Инв. № 2015-2



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИТПЗ РАН

член-корреспондент РАН

*А.А.Соловьев* А.А.Соловьев

«12» марта 2015 г.

**ОТЧЕТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ**  
**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ**  
**ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ**  
**ДАНЫМ**  
(промежуточный, за 2014 год)

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

Б.Г. Букчин

Москва 2015

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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



Б.Г. Букчин

Ответственные исполнители:

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



В.В. Гравиров

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



К.В. Кислов

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



А. Ф. Кушнир

ст. науч. сотр.



А.В. Ландер

## РЕФЕРАТ

Отчет 24 с., 9 рис., 12 источников

**ФОКАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, МЕТОДЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ, СИСТЕМА РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ, ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА НА ФОНЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ШУМОВ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ ГРУППА**

Исследования, проводимые по теме в 2014 году, включали: модификацию алгоритма и комплекса программ определения фокального механизма землетрясения, направленную на повышение их разрешающей способности; применение методов параллельного программирования для сокращения затрачиваемого процессорного времени; исследование неединственности решения задачи определения гипоцентрии и выработку рекомендаций по уменьшению или устранению возникающих ошибок; выбор вектора признаков, имеющего минимальную размерность, для снижения времени обработки сигнала при его выделении на фоне нестационарных шумов; выбор архитектуры нейронной сети, обеспечивающей минимизацию ошибок при решении той же задачи выделения сигнала; разработку математического обеспечения, позволяющего надежно классифицировать сейсмический сигнал за минимальное время.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	8
2.1. Исследование возможности идентификации плоскости разлома при построении модели землетрясения	8
2.2. Модификация программ определения фокального механизма землетрясения, направленная на повышение их разрешающей способности	13
2.3. Изучение глубокого Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г.	13
2.4. Сравнение точности различных алгоритмов локации микросейсмических событий, зарегистрированных поверхностной сейсмической группой в процессе гидроразрыва	20
2.5. Разработка алгоритмов и методик детектирования Р-волны землетрясения на фоне шума высокого уровня для целей раннего предупреждения	20
2.6. Изучение геодинамических процессов	21
2.7. Исследование условий образования пероксильных радикалов	21
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	22
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	23

## 1. ВВЕДЕНИЕ

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

Важнейшей характеристикой сейсмического события является тензор момента, определяющий его магнитуду и фокальный механизм. Известно, что тензор момента сейсмического источника принципиально не может быть однозначно определен по записям одних лишь поверхностных волн в случае неглубокого землетрясения. До последнего времени эта неоднозначность была изучена американскими сейсмологами лишь для двух частных случаев: сдвига по падению и сдвига по простиранию. Эта проблема была рассмотрена в общем виде, и проведенное на базе полученных результатов исследование особенностей излучения длиннопериодных поверхностных волн мелкофокусным землетрясением показало, что в случае, когда одна из нодальных плоскостей субгоризонтальна, небольшие изменения угла падения существенно меняют диаграмму поверхностно-волнового излучения такого источника. Для изучения таких событий требуется разработка методов с высоким разрешением углов фокального механизма. В рамках исследований по теме выполняется модификация программ расчета фокального механизма, сейсмического момента и глубины землетрясения с использованием методов параллельного программирования, направленная на повышение разрешения углов фокального механизма. При детальности определения углов фокального механизма в 1 градус решение задачи на современном персональном компьютере занимает 8-10 часов процессорного времени. Использование многоядерного компьютера и методов параллельного программирования позволяет сократить затраты процессорного времени в  $N$  раз, где  $N$  – число ядер в компьютере.

Многочисленные данные, полученные после сильнейшего землетрясения Тохоку, 2011г.,  $M_w = 9.1$  выявили присутствие в каталогах очень большого числа неверно определенных гипоцентров афтершоков. При формальном использовании эти определения приводят к неверным представлениям о строении очага, в частности выделению в нем реально не существующих структур. По-видимому, данные ошибки связаны с неединственностью решений для гипоцентров, возникающей при одностороннем (берег относительно акватории) расположении сейсмической сети. Другой причиной ошибок может служить немонотонная зависимость годографов сейсмических волн от глубины источника. Отдельные аналогичные ошибки были зафиксированы и в Камчатском регионе, в котором сеть располагается относительно большинства землетрясений аналогичным образом. В рамках работ по теме исследуются указанные

неединственности определения гипоцентрии и вырабатываются рекомендации по уменьшению или устранению возникающих ошибок.

Сейсмические записи, полученные на станции, имеющей повышенный уровень шума (особенно нестационарного шума, например, антропогенного происхождения), обычно просто бракуются. Потеря данных даже одной сейсмостанции может привести к потере полезной информации при отсутствии плотной сейсмической сети, при исследовании тремора, сопровождающего тихие землетрясения, при раннем предупреждении о землетрясении, при мониторинге маломagnitudeных событий. Российские ученые имеют уникальный опыт создания алгоритмов выделения полезного сигнала на фоне нестационарных шумов в режиме реального времени. Дальнейшее развитие этого опыта на основе применения современных нейросетевых методов и анализа накапливаемых баз данных, позволяет разрабатывать новое поколение алгоритмов классификации и создавать базу для разработки автоматизированных систем распознавания и принятия решений. В рамках работ по теме создается специализированного математического обеспечения для формирования вектора признаков на основе трехкомпонентных сейсмограмм и классификации сейсмических сигналов с помощью искусственной нейронной сети. В отличие от других методов, нейросетевые технологии позволяют учитывать зашумленные, противоречивые и избыточные данные и аппроксимировать практически любую функцию. Основные затраты времени приходятся на обучение искусственной нейронной сети, так что далее система может работать в реальном времени.

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

Работы по теме включают: модификацию алгоритма и комплекса программ определения фокального механизма землетрясения, направленную на повышение их разрешающей способности; применение методов параллельного программирования для сокращения затрачиваемого процессорного времени; исследование неединственности решения задачи определения гипоцентрии и выработку рекомендаций по уменьшению или устранению возникающих ошибок; выбор вектора признаков, имеющего минимальную размерность, для снижения времени обработки сигнала при его выделении на фоне нестационарных шумов; выбор архитектуры нейронной сети, обеспечивающей минимизацию ошибок при решении той же задачи выделения сигнала; разработку математического обеспечения, позволяющего надежно классифицировать сейсмический сигнал за минимальное время; выработку рекомендаций по применению нейросетевых классификаторов в системах контроля за ядерными испытаниями, системах раннего предупреждения о землетрясениях и системах сейсмического мониторинга.

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 Дальневосточных сейсмических сетей России, а также приведут к разработке технологий классификации сейсмических сигналов по типу источника и энергетическим характеристикам явления и, соответственно, создадут базу для создания интеллектуальных систем автоматического принятия решений.

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Исследование возможности идентификации плоскости разлома при построении модели землетрясения

Одной из основных характеристик землетрясения, определяемых при построении его модели, является фокальный механизм, определяющий две ортогональные нодальные плоскости. Одна из этих плоскостей является плоскостью разлома, а другая – плоскостью, ортогональной к вектору подвижки. При описании очага землетрясения в приближении точечного двойного диполя эти две плоскости не различимы по сейсмологическим данным. При учете конечных размеров очаговой области идентификация плоскости разлома становится принципиально возможной.

Была проанализирована возможность такой идентификации при описании очага в приближении вторых моментов и ее зависимость от фокального механизма землетрясения. Полученные выводы были сделаны на основании прямых расчетов и подтверждены примерами реальных землетрясений.

Представляем скорость плотности сейсмического момента, описывающую неупругие процессы в очаге землетрясения, в виде произведения неотрицательной скалярной функции  $f(\mathbf{x}, t)$  и нормированного тензора момента  $\mathbf{m}$ . Поместим начало системы координат в точку пространственного центра  $\mathbf{q}_c$  и будем отсчитывать время от момента, совпадающего с временным центроидом  $\tau_c$ , т.е. полагаем  $\mathbf{q}_c = \mathbf{0}$  и  $\tau_c = 0$ . Тогда первые моменты функции  $f(\mathbf{x}, t)$  относительно начала системы координат  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$  и начала отсчета времени  $t = 0$  равны нулю. При этих условиях спектры поверхностных волн на периодах, достаточно длинных по сравнению со временем действия источника, можно рассчитать через тензор момента источника, глубину центра и вторые моменты функции  $f(\mathbf{x}, t)$ . Ограничиваясь рассмотрением плоского источника, можно выразить вторые моменты функции  $f(\mathbf{x}, t)$  через 6 следующих параметров:  $\Delta t$  – интегральную оценку продолжительности действия источника,  $l_{\max}$  – интегральную оценку максимального среднего размера очага (длину большой оси),  $\varphi_l$  – угол между направлением большой оси и направлением простираения,  $l_{\min}$  – интегральную оценку минимального среднего размера очага (длину малой оси),  $V$  – абсолютное значение средней скорости  $\mathbf{v}$  мгновенного пространственного центра и  $\varphi_v$  – угол между направлением  $\mathbf{v}$  и направлением простираения. Эти шесть параметров, описывающих форму очага и его развитие во времени, мы определяем по амплитудным спектрам поверхностных волн. Если все характеристики среды, глубина эквивалентного мгновенного точечного источника и его тензор сейсмического момента известны, а также одна из нодальных плоскостей идентифицирована как плоскость разлома, то для любой комбинации значений определяемых шести параметров могут быть рассчитаны амплитудные спектры поверхностных волн для всех точек

регистрации. Сравнение рассчитанных значений спектров с наблюдаемыми дает значение нормированной функции невязки (различия) амплитудных спектров  $\varepsilon(\Delta t, l_{\max}, \varphi_l, l_{\min}, v, \varphi_v)$  для каждой комбинации значений искоемых параметров. Оптимальные значения параметров, минимизирующие  $\varepsilon$ , мы принимаем за оценки этих параметров. Мы их ищем полным перебором на сетке в 6-мерном параметрическом пространстве. Для оценки степени разрешения каждого из этих параметров мы строим частные функции невязки.

В приближении точечного мгновенного источника очаг землетрясения описывается тензором момента. В случае плоской подвижки нормированный тензор момента  $\mathbf{m}$  может быть представлен в виде

$$\mathbf{m} = \mathbf{n}\Delta\mathbf{u}^T + \Delta\mathbf{u}\mathbf{n}^T,$$

где  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к плоскости разлома,  $\Delta\mathbf{u}$  – единичный направляющий вектор подвижки, а  $T$  – символ транспонирования. Как видно из приведенной формулы, векторы  $\mathbf{n}$  и  $\Delta\mathbf{u}$  входят в нее симметрично, откуда следует, что они неразличимы, и в приближении точечного источника в качестве плоскости разлома может быть выбрана любая из двух нодальных плоскостей. В случае же описания очага в приближении вторых моментов диаграмма излучения поверхностных волн в общем случае зависит от того, какая из двух нодальных плоскостей выбрана в качестве плоскости разлома. Соответственно та из плоскостей, выбор которой обеспечивает меньшие различия между наблюдаемыми и синтетическими амплитудными спектрами поверхностных волн, и может быть идентифицирована в качестве плоскости разлома. Но такой выбор не всегда возможен. Рассмотрим вторые моменты функции  $f(\mathbf{x}, t)$ , зависящие от выбора плоскости разлома. Вектор смешанного момента определяет среднюю скорость мгновенного центроида  $\mathbf{v}$ , лежащую в плоскости разлома, и зависит от ее выбора. Матрица второго пространственного момента определяет ориентацию и размер большой и малой осей очага землетрясения. Эти две ортогональные оси лежат в плоскости разлома и определяют ее выбор. В то же время вклады в поверхностно-волновое излучение, обусловленные размерами этих осей, относятся как квадраты их длин. Таким образом, если длина большой оси очага в несколько раз превосходит длину его малой оси, то в приближении вторых моментов очаг можно считать одномерным. В этом приближении выбор плоскости разлома обусловлен тем фактом, что в ней лежат как большая ось очага, так и средняя скорость мгновенного центроида  $\mathbf{v}$ . Этот выбор становится невозможным в случае, когда и большая ось очага, и вектор скорости  $\mathbf{v}$  направлены вдоль линии пересечения нодальных плоскостей, т.е. могут лежать в обеих плоскостях. Если линия пересечения нодальных плоскостей горизонтальна, то рассмотренный источник представляет собой сдвиг по падению: взброс или сброс.

Был детально рассмотрен часто встречающийся тип очага землетрясения, большая ось которого и скорость мгновенного центроида направлены вдоль оси простираения. Была проанализирована зависимость

возможности идентификации плоскости разлома такого очага от фокального механизма. Без потери общности значение угла простирания полагалось равным нулю, т.к. любое другое его значение означает поворот источника на этот угол вокруг вертикальной оси и не влияет на все дальнейшие выводы. Для каждой возможной комбинации значений углов падения и подвижки на сетке с шагом  $30^\circ \times 30^\circ$  были рассчитаны амплитудные спектры фундаментальных мод Лява и Рэлея в полосе периодов от 200 с до 300 с для шести точек регистрации, равномерно окружающих очаг землетрясения. Параметры, определяющие очаг в приближении вторых моментов, были заданы следующими значениями, фиксированными для всех фокальных механизмов: сейсмический момент  $0.75 \cdot 10^{22}$  Н·м, глубина 40 км, интегральная оценка продолжительности события 50 с, длина большой оси 150 км, угол между направлением простирания и большой осью  $0^\circ$ , длина малой оси 25 км, средняя скорость мгновенного центра 3 км/с, угол между направлениями простирания и скорости  $180^\circ$ . Текущие значения фокального механизма определяют плоскость разлома и направление вектора подвижки, лежащего в этой плоскости. Рассчитанные амплитудные спектры рассматривались в качестве наблюдаемых и сравнивались со спектрами, излучаемыми источником, лежащим во второй нодальной плоскости для всех возможных комбинаций значений параметров, определяющих его вторые моменты. Ассоциируя минимальное значение нормированной функции невязки этих спектров  $\varepsilon(\Delta t, l_{\max}, \varphi_l, l_{\min}, v, \varphi_v)$  с текущим фокальным механизмом, была рассчитана функция минимальной невязки  $\varepsilon(\lambda, \delta)$ , где  $\lambda$  и  $\delta$  - значения углов подвижки и падения соответственно. Если эта функция для некоторых значений  $\lambda$  и  $\delta$  пренебрежимо мала, то это означает, что нодальные плоскости для данного источника неразличимы и идентификация плоскости разлома невозможна. В случае же если функция  $\varepsilon(\lambda, \delta)$  существенно отлична от нуля, то плоскость разлома может быть идентифицирована, и тем надежнее, чем больше значение этой функции. Рассчитанная функция минимальной невязки приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, плоскость разлома может быть надежно идентифицирована для сдвигов по простиранию ( $\lambda = 0^\circ$  или  $\lambda = 180^\circ$ ) и не может быть идентифицирована для сдвигов по падению ( $\lambda = 90^\circ$  или  $\lambda = 270^\circ$ ).

Было проверено, подтверждаются ли эти выводы для реальных землетрясений.

*Землетрясение 11 апреля 2012 г. у побережья Северной Суматры,  $M_w = 8.6$ .* Для оценки фокального механизма, глубины источника, времени его действия, формы очаговой области и скорости распространения разрыва были использованы спектры основных мод Лява и Рэлея в полосе периодов от 200 до 300 секунд. Землетрясение представляет собой сдвиг по простиранию с небольшим взбросом (P1:  $200^\circ, 80^\circ, 20^\circ$ ; P2:  $106^\circ, 70^\circ, 169^\circ$ ). Полученная величина сейсмического момента  $0.88 \cdot 10^{22}$  н·м соответствует значению магнитуды  $M_w = 8.6$ . Оптимальное значение глубины равно 35-40 км.

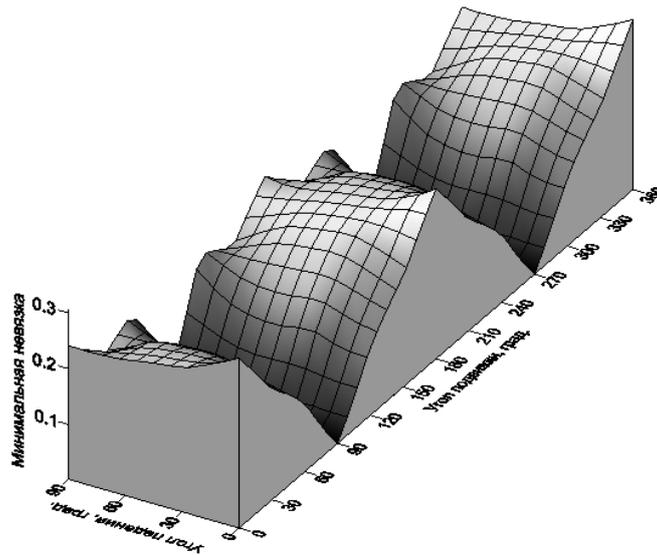


Рисунок 1. Функция минимальной невязки, характеризующая возможность идентификации плоскости разлома для различных фокальных механизмов.

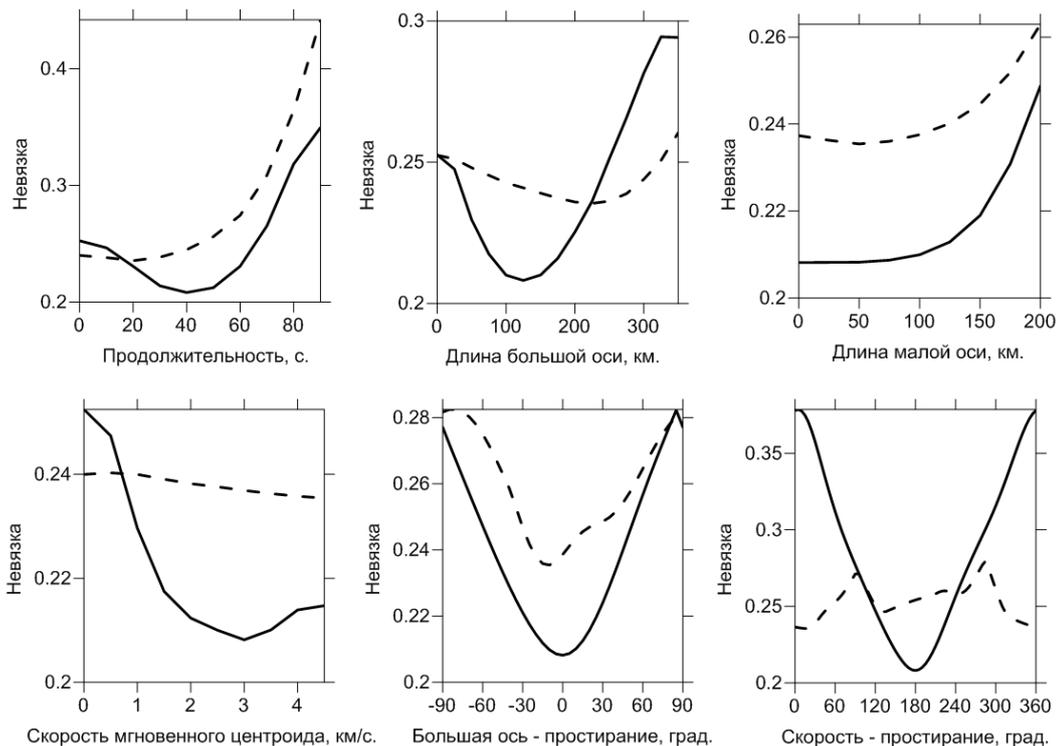


Рисунок 2. Частные функции невязки, характеризующие разрешение параметров землетрясения близ Северной Суматры.

На рис. 2 сплошными линиями представлены частные функции невязки, полученные в предположении, что нодальная плоскость с углом простирания  $106^\circ$  является плоскостью разлома. Пунктирными линиями на том же рисунке представлены результаты аналогичных расчетов, полученные в предположении, что плоскостью разлома является нодальная плоскость с

углом простирания  $200^\circ$ . Как видно из рисунка, минимальная невязка в этом случае оказалась значительно больше, что позволяет нам сделать выбор в пользу разлома с субширотным простиранием. Этот вывод хорошо согласуется с результатами расчетов, приведенными на рис. 1.

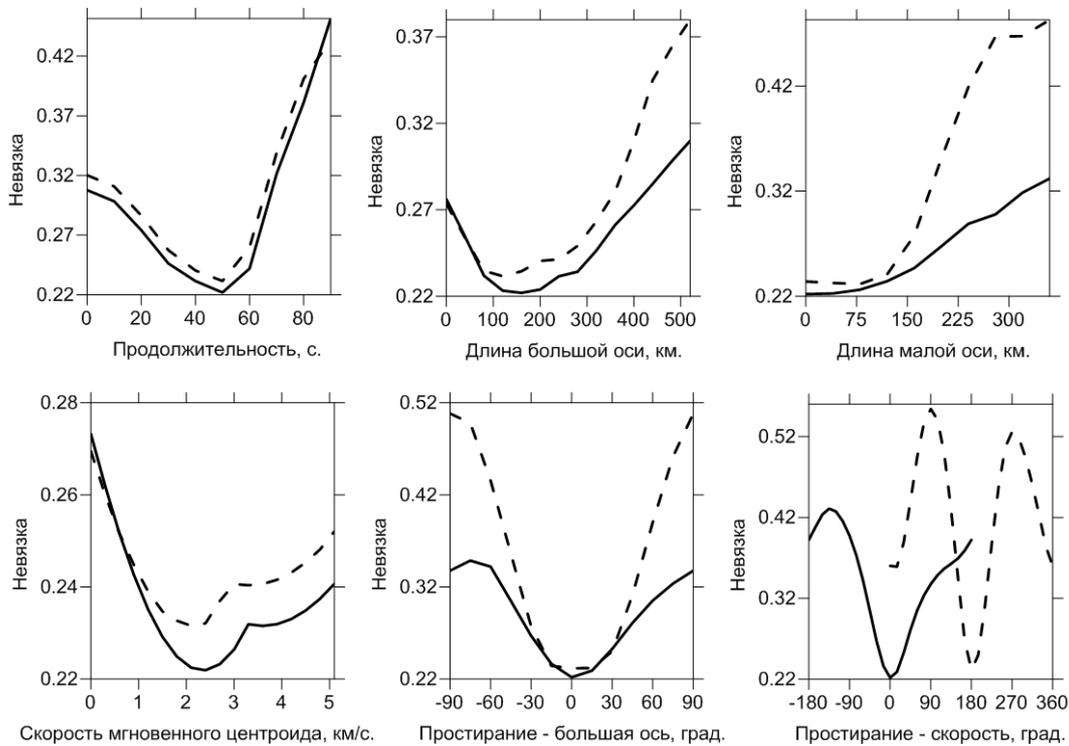


Рисунок 3. Частные функции невязки, характеризующие разрешение параметров Чилийского землетрясения.

*Чилийское землетрясение в Мауле 27 февраля 2010 г.,  $M_w = 8.8$ .* Для оценки фокального механизма и глубины источника он рассматривался как точечный и мгновенный, и были использованы спектры основных мод Лява и Рэлея в полосе периодов от 250 до 500 секунд. Землетрясение представляет собой взброс с небольшим сдвигом ( $P_1: 15^\circ, 15^\circ, 105^\circ$ ;  $P_2: 179^\circ, 76^\circ, 86^\circ$ ). Полученная величина сейсмического момента  $1.8 \cdot 10^{22}$  н·м соответствует значению магнитуды  $M_w = 8.8$ . Оптимальное значение глубины равно 15 км. Для оценки продолжительности землетрясения, формы очаговой области и скорости распространения разрыва использованы спектры основных мод Лява и Рэлея в полосе периодов от 200 до 300 секунд. На рис. 3 сплошными линиями представлены частные функции невязки, полученные в предположении, что полого падающая на восток нодальная плоскость с углом простирания  $15^\circ$  является плоскостью разлома. Пунктирными линиями на том же рисунке представлены результаты аналогичных расчетов, полученные в предположении, что плоскостью разлома является круто падающая на запад нодальная плоскость с углом простирания  $179^\circ$ . Как видно из рисунка, минимальные невязки в этих двух случаях незначительно отличаются друг от друга, что не позволяет сделать выбор в пользу одной из нодальных плоскостей и однозначно идентифицировать плоскость разлома.

Этот результат подтверждает сделанный выше вывод о том, что в рассматриваемом случае плоскость разлома не может быть надежно идентифицирована для сдвигов по падению.

Полученные результаты представлены в докладе [5].

## 2.2. Модификация программ определения фокального механизма землетрясения, направленная на повышение их разрешающей способности

Завершена модификация пакета программ определения очаговых параметров из совместного анализа широкополосных записей поверхностных волн и знаков первых вступлений с использованием пакета параллельного программирования для многоядерных систем OpenMP. Оптимальные значения углов фокального механизма землетрясения определяются прямым перебором всех возможных их значений на сетке с детальностью, которая может достигать значения 1 градус.

## 2.3. Изучение глубокого Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г.

В сотрудничестве с Камчатским филиалом ГС РАН изучены характеристики глубокого Охотоморского землетрясения (24 мая 2013 г.,  $M_w=8.3$ ): тектоническая позиция, очаг и афтершоки. Сформулированы возможные причины макросейсмических проявлений на больших расстояниях от этого землетрясения (по инструментальным данным).

Курило-Камчатская зона субдукции разделяется по простиранию на два сегмента: Курило-Южно-Камчатский и Северо-Камчатский. Граница между ними проходит в районе Авачинского залива и далее по падению погружающейся Тихоокеанской плиты. Многочисленные геологические и сейсмологические данные указывают на различие в возрасте возникновения субдукции на этих двух сегментах. Предполагается, что произошло столкновение с островной дугой нескольких террейнов, ныне сохранившихся как крупные полуострова на восточном побережье, которое вызвало отмирание части древней зоны субдукции, а новая образовалась восточнее полуостровов. Ярким проявлением этого факта является существование на Камчатке севернее поперечной Авачинской границы двух вулканических поясов: почти потухшего Западного и активного молодого Восточного. Наблюдаемые сейсмофокальные зоны достигают в южном и северном сегментах принципиально разных глубин, соответственно 650-700 км на юге и только 350-400 км на севере. Скачкообразное изменение на 300 км максимальной глубины зоны происходит на поперечной Авачинской границе. Это объясняется тем, что молодой слэб за время своего существования не успел достигнуть типичных для Земли максимальных глубин сейсмичности. Глубокое землетрясение 24 мая 2013 г. произошло практически на указанной поперечной границе, точнее на северо-восточном торцевом краю Курило-Южно-Камчатского сегмента погружающейся Тихоокеанской плиты, в нижней части сейсмофокальной зоны. Координаты

гипоцентра:  $54.89^{\circ}\text{N}$   $153.22^{\circ}\text{E}$ , глубина 598 км. Севернее гипоцентра на соответствующих землетрясению глубинах современная погружающаяся плита, по-видимому, отсутствует, поскольку проявления сейсмичности здесь заканчиваются значительно ближе к земной поверхности. Судя по расположению главного гипоцентра и облака афтершоков, разрыв, породивший землетрясение, возник на краю погружающейся плиты и распространился внутрь ее на 100 - 150 км (рис. 4). Оценки размеров и механизма очага, полученные по длиннопериодным поверхностным волнам, приведены на рис. 5 (выбрана плоскость разрыва, близкая по положению к облаку афтершоков). В процессе исследования были пересчитаны координаты 80 (включая главное событие) гипоцентров афтершоков Охотоморского землетрясения (рис. 6).

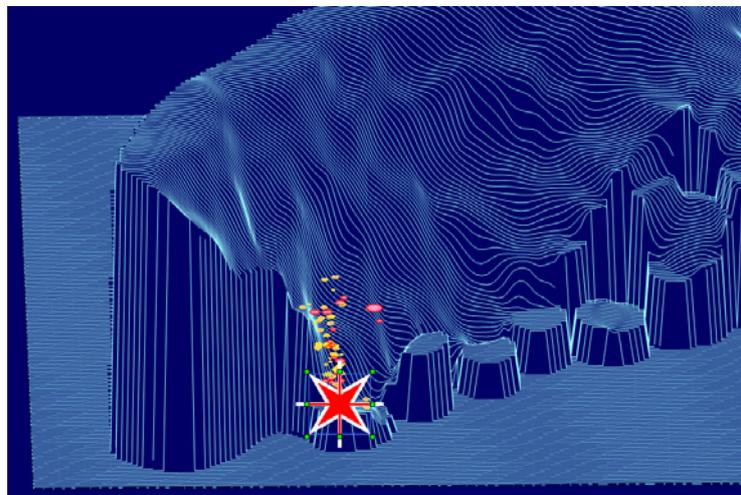


Рисунок 4. Землетрясение 24 мая 2013 г. и его афтершоки (определенные Камчатской региональной сетью) в проекции на медианную поверхность Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны.

При расчете координат гипоцентров использованы те же исходные станционные данные (времена вступления фаз), что и при создании стандартного каталога Камчатской региональной сети. Однако применена ранее разработанная методика совместного расчета координат группы близких землетрясений при одновременном вычислении станционных поправок к региональному годографу времен пробега сейсмических фаз. Почти все афтершоки располагаются южнее гипоцентра главного толчка, то есть в пределах древней погружающейся плиты. В облаке выделяются две почти ортогональные поверхности. Обе протягиваются приблизительно от края плиты (и гипоцентра главного толчка). Полого падающая поверхность неплохо соответствует положению "эллипса разрыва", приведенного на рис. 5. Природа второй, более крутой, падающей на ЮЮВ, поверхности пока не установлена, но вполне вероятно, что она также связана с главным толчком. Эта поверхность проявилась уже в первые часы после основного землетрясения, и не зарегистрирован какой-либо сильный афтершок, который

мог бы ее породить. Сильнейший (он же первый зарегистрированный) афтершок  $M = 5,5$  произошел через 18 минут после главного толчка, но располагался в стороне (юго-западнее) от основной очаговой зоны и от последовавшей серии афтершоков.

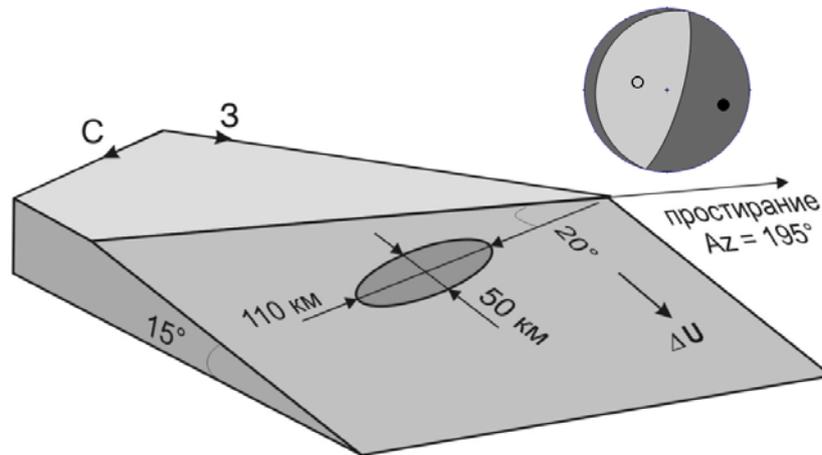


Рисунок 5. Оценки механизма и формы очага по записям длиннопериодных поверхностных волн.

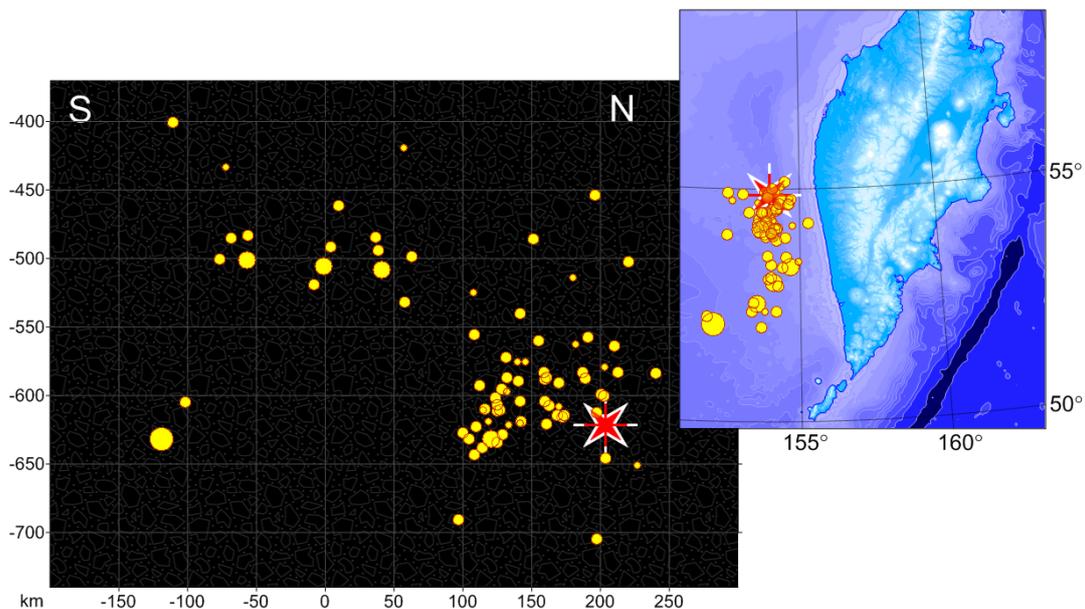


Рисунок 6. Карта и разрез облака афтершоков Охотоморского землетрясения 24 мая 2014 г. Ось разреза имеет меридиональное направление, и он охватывает по ширине все облако. Гипоцентр основного толчка показан звездой.

Параллельно с уточнением положения афтершоков были рассчитаны стационарные поправки к региональным годографам. На рис. 7 приведено распределение по региону поправок к временам пробега продольной волны.

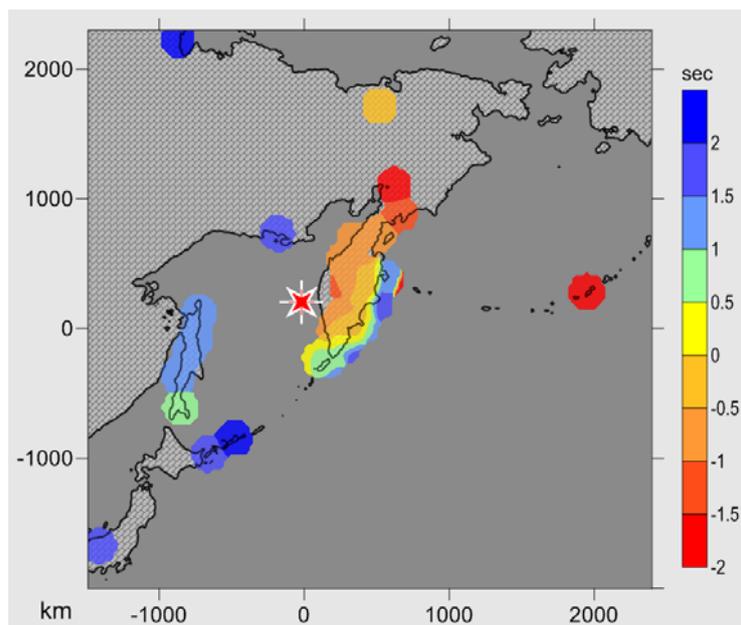


Рисунок 7. Сглаженное распределение по региону поправок к временам пробега фазы  $P$  из очаговой зоны глубокого Охотоморского землетрясения. Положительные (синие) поправки соответствуют более быстрому, по сравнению с используемым стандартным годографом, распространению волн. Звездой показан эпицентр Охотоморского землетрясения.

Следует отметить повышенные скорости на трассах от очага к станциям восточно-камчатского побережья. Это явление хорошо известно, и обычно связывается с распространением волны по быстрому слэбу. Однако аналогичные повышенные скорости наблюдаются и для всех станций, расположенных западнее эпицентра, лучи к некоторым из которых заведомо минуяют слэб. Поэтому, возможно, правильнее вести речь об общем завышении стандартного регионального годографа для глубоких очагов. Еще одной возможностью может быть неправильное отношение скоростей продольных и поперечных волн, используемое при поиске гипоцентров, к которому весьма чувствительна оценка глубины. Пониженные скорости распространения волн наблюдаются на трассах к станциям, расположенным в северо-восточном квадранте относительно эпицентра. Для станций Центральной Камчатки это вновь известный факт, связанный с низкими мантийными скоростями под вулканической дугой. Однако аналогичные поправки наблюдаются и на удаленных станциях данных румбов. Возможно это связано с отсутствием глубоких участков слэба северо-восточнее эпицентра. Приведенные предположения пока остаются на уровне гипотез и требуют дальнейшего исследования.

Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 г. ощущалось на необычно больших расстояниях от его эпицентра вплоть до Европейской России, Восточной Европы, Северной и Центральной Америки. Подобные проявления обычно не наблюдаются от сходных по магнитуде, или даже более сильных землетрясений Дальнего Востока. Для поиска характеристик,

выделяющих Охотоморское землетрясение в ряду других событий, проведен сравнительный анализ телесеismicических записей, спектров и спектрально-временных карт нескольких сильнейших землетрясений. Помимо Охотоморского использованы записи двух Симуширских землетрясений: 2006 г.  $M_w = 8,4$  и 2007 г.  $M_w = 8,2$ , более сильного землетрясения Тохоку 2011 г.  $M_w = 9,1$  в Японии, а также глубокого Боливийского землетрясения 1994 г.  $M_w = 8,2$ . Три первых, как и Охотоморское, относятся к зонам субдукции Дальневосточного региона, однако в отличие от Охотоморского являются мелкофокусными. И наоборот, Боливийское землетрясение использовано как еще один пример глубокого события. Отличие характеристик записей Охотоморского землетрясения от других дальневосточных отчетливо видно в спектральном представлении (на рис. 8 приведены их спектры ускорений на станции Обнинск).

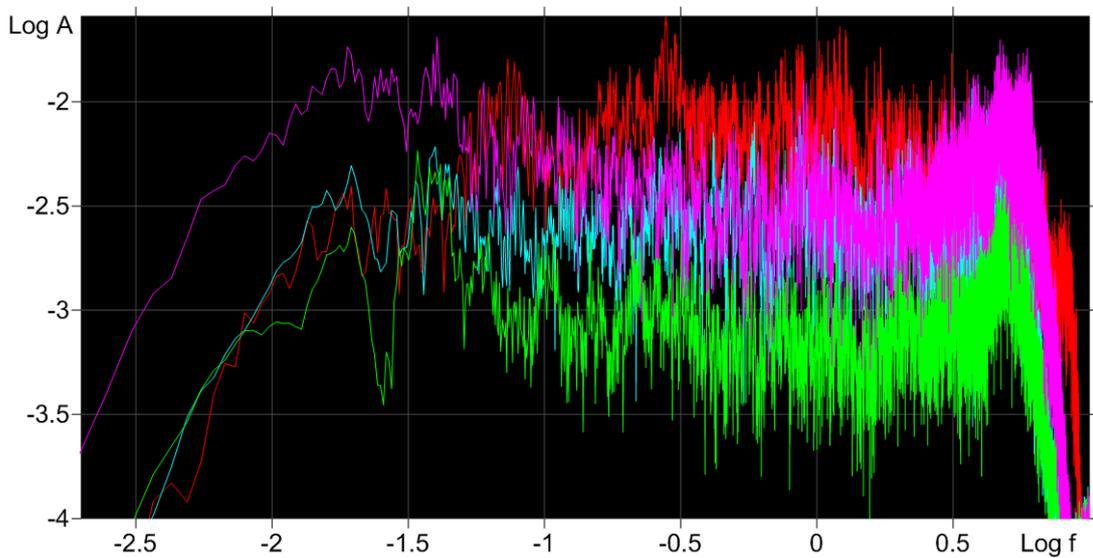


Рисунок 8. Амплитудные спектры ускорения (A) записей сильнейших дальневосточных землетрясений на станции OBN (Обнинск). Цвета соответствующие землетрясениям: зеленый - Симуширскому 2006 г. ( $M_w = 8,4$ ), голубой - Симуширскому 2007 г. ( $M_w = 8,2$ ), сиреневый - Тохоку ( $M_w = 9,1$ ) и красный - Охотоморскому 2013 г. ( $M_w = 8,3$ ).

В приведенных спектрах можно выделить две спектральных полосы, принципиально отличающиеся по соотношению амплитуд Охотоморского и остальных событий. Как можно было ожидать, в длиннопериодной части спектра (полосе периодов 20-100 сек) соотношение амплитуд приблизительно соответствует магнитудам землетрясений. В частности лог-амплитуда землетрясения Тохоку примерно на 0,7 выше остальных. В противоположность этому, в высокочастотной полосе 0,2-3 Гц спектральная амплитуда Охотоморского землетрясения в 2-3 раза превосходит Тохоку, и до 10 раз - Симуширские события. Трассы волн от Охотоморского и Симуширских землетрясений на станции Европейской России достаточно близки (включая глубокие участки лучей). Например, для станции Обнинск

направления на эпицентры трех событий лежат в пределах  $6^\circ$ , а максимальные глубины погружения лучей - в пределах  $\sim 100$  км (1630, 1730, 1760 км). Трасса от гипоцентра землетрясения Тохоку отличается от Охотоморского несколько сильнее ( $18^\circ$  по азимуту, 175 км по погружению луча). Основное отличие определяется глубиной Охотоморского землетрясения. Остальные три трассы дополнительно включают начальный нисходящий участка луча, от поверхности до глубины 600 км.

Таким образом записи глубокого Охотоморского землетрясения отличаются от таких же по магнитуде, или даже более сильных землетрясений, существенно большим уровнем высокочастотных колебаний. Заметим, что именно этот диапазон частот (около 1 Гц) типичен для макросейсмических проявлений. Как отмечалось выше, глубокие землетрясения с магнитудой больше 8 весьма редки. Это и объясняет тот факт, что ощущение Охотоморского землетрясения на востоке Европы (расстояния  $\sim 7$  тысяч км) и, в частности, в Москве оказалось достаточно неожиданным. Относительно большие амплитуды высокочастотной части спектра Охотоморского землетрясения объясняются, по-видимому, спецификой распределения очаговой энергии по разным типам излучаемых волн. Глубокие источники возбуждают относительно слабые длиннопериодные поверхностные волны, собственные функции которых спадают с глубиной. Соответственно возрастает относительная часть энергии, излучаемая другими типами волн, в частности наиболее интенсивными объемными в диапазоне частот около 1 гц. Альтернативное объяснение связывает различия в спектрах записей глубоких и мелкофокусных землетрясений со значительным поглощением объемных волн от последних на начальных участках трасс в земной коре и верхних 600 км мантии. Однако изучение спектров записей глубоких землетрясений на близких станциях Камчатской сети (для которых верхняя часть трасс проходит в обратном направлении) не подтвердило эту гипотезу. Как и для удаленных записей спектры близких от глубоких событий оказывались смещенными в сторону высоких частот. Для того, чтобы непосредственно приблизить найденные закономерности к задачам макросейсмологии, записи были пересчитаны в ускорения, и для каждой трехкомпонентной сейсмограммы найдено пиковое значение. Исследованы записи четырех землетрясений близкой магнитуды (8,2-8,4): двух мелкофокусных Симуширских, и двух глубоких Охотоморского и Боливийского. Использованы широкополосные каналы (ВН) на станциях, расположенных на расстояниях до  $90^\circ$  от соответствующего эпицентра. Из близких Камчатских записей использована только станция РЕТ (Петропавловск-Камчатский). Дополнительной фильтрации записей не проводилось. В качестве пикового бралось максимальное по записи значение амплитуды трехкомпонентного комплексного (аналитического) сигнала. Заметим, что определенное таким образом пиковое значение может в 1,2-1,5 раз превосходить величину, посчитанную по вещественной сейсмограмме. Окончательные результаты включают: для Симуширского (2006 г.) землетрясения – 68

трехкомпонентных сейсмограмм, Симуширского (2007 г.) – 61, Охотоморского – 90 и Боливийского – 21. На рис. 9 представлены плотности распределений ("сглаженные гистограммы") на плоскости (эпицентральное расстояние – пиковое ускорение). Плотности получены путем ядерного сглаживания точечных данных, то есть соответствующих каждой сейсмограмме пары: расстояние – ускорение. Тренды распределений на плоскости демонстрируют характерные зависимости пиковых ускорений от эпицентрального расстояния. Данные разделены на две группы, соответствующие мелкофокусным и глубоким землетрясениям. Для каждой группы построено самостоятельное распределение. Из рис. 9 следует, что область пиковых ускорений от глубоких землетрясений смещена вверх относительно аналогичных по магнитуде мелкофокусных приблизительно на 0,7 в логарифмической шкале (то есть амплитуда в 5 раз выше). Это соответствует увеличению интенсивности примерно на 1,75 балла.

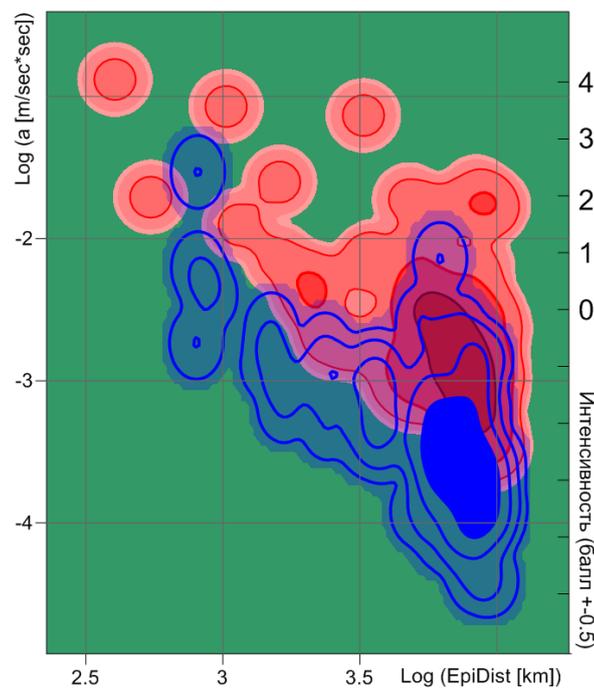


Рисунок 9. Зависимости пиковых ускорений от эпицентрального расстояния для двух мелкофокусных (синяя область) и двух глубоких (красная) землетрясений. Все события имеют близкие магнитуды 8,2-8,4. Сглаженные плотности распределения построены по замерам на 129 (синяя) и 111 (красная) станциях. Правая вертикальная шкала - пиковое ускорение, пересчитанное в баллы по формуле Аптекаева (Национальный стандарт РФ).

Из приведенных распределений пиковых ускорений также следует, что для сильнейших глубоких землетрясений ( $M_w \sim 8.3$ ) интенсивность  $\sim 3$  баллов может наблюдаться на расстояниях  $\sim 7000$  км, в то время как для таких же по силе мелкофокусных землетрясений предельное расстояние для подобной интенсивности  $\sim 1000$  км. Таким образом заметные макросейсмические проявления могут наблюдаться на больших расстояниях

в первую очередь от сильнейших глубоких землетрясений, которые весьма редки. Это объясняет и редкость заметных удаленных проявлений.

Полученные результаты представлены в докладе [6].

#### 2.4. Сравнение точности различных алгоритмов локации микросейсмических событий, зарегистрированных поверхностной сейсмической группой в процессе гидроразрыва

Выполнено сравнение точности различных алгоритмов локации микросейсмических событий, зарегистрированных поверхностной сейсмической группой в процессе гидроразрыва. Полученные результаты опубликованы в статьях [1, 2].

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

Разработаны и отлажены программы для ЭВМ, реализующие адаптивные алгоритмы с использованием техники вейвлет-преобразований для автоматизированного выделения в реальном масштабе времени основных параметров сейсмических волновых фаз при наличии повышенного уровня сейсмических шумов. Получено свидетельство о государственной регистрации одной программы и подана заявка на государственную регистрацию еще двух программ. Вейвлет-преобразование позволяет одновременно проводить необходимую фильтрацию и выделять моменты изменения волновой структуры сигнала. Преимуществами предложенного метода вейвлет-фильтрации являются хорошая частотно-временная локализация, наглядность получаемых результатов и возможность исследования не только стационарных сигналов, но и нерегулярных, фрактальных рядов, имеющих иерархическую структуру. В отличие от техники фильтрации с помощью преобразования Фурье, вейвлет-преобразование, во-первых, лучше представляет вступления сейсмических волн (что можно считать задачей анализа нестационарных сигналов), а во-вторых, требует в несколько раз меньше времени на обработку сигнала и, таким образом возможна его реализация в виде алгоритмов, работающих в реальном масштабе времени. Шумовые компоненты, и особенно большие случайные выбросы значений сигналов, рассматривались в виде множеств локальных особенностей сигналов. Задавая некоторый порог для их уровня и, срезая по нему детализирующие коэффициенты, можно не только уменьшать уровень шумов, но и устанавливать пороговые ограничения на нескольких уровнях разложения с учетом конкретных характеристик шумов и сигналов для различных типов вейвлетов. Выбор используемого вейвлета и глубины разложения позволяет изменить параметры обработки входного сигнала. Так, более гладкие вейвлеты создают более гладкую аппроксимацию сигнала, и наоборот, «короткие» вейвлеты лучше отслеживают пики аппроксимируемой

функции. Глубина разложения влияет на масштаб отсеиваемых деталей. При увеличении глубины разложения модель будет вычитать шум все большего уровня, при этом возможно сглаживание не только шума, но и некоторых локальных особенностей сигнала. Шумовая компонента сигнала в большинстве случаев отражается в детализирующих коэффициентах, вследствие чего именно они и подвергаются обработке.

Результаты исследований представлены в докладах [7-12] и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## 2.6. Изучение геодинамических процессов

Совместно с Камчатским филиалом ГС РАН и ИВиС ДВО РАН показано, что созданная КФ ГС РАН региональная сеть наблюдений позволила решать задачи изучения геодинамических процессов, происходящих в области сочленения трех крупнейших плит: Евразийской, Северо-Американской, Тихоокеанской, и плит среднего размера: Охотии и Берингии. Дана интерпретация примеров регистрации СДЗК. Намечены перспективы развития изучения геодинамики Корякско-Камчатского региона. Полученные результаты опубликованы в статье [3].

## 2.7. Исследование условий образования пероксильных радикалов

Совместно с ИБХФ РАН исследованы условия фотосенсибилизированного ближним УФ образования пероксильных радикалов в замороженных водных растворах аденина, содержащих 0.1 М NaCl, pH 4.7. На основании анализа спектров ЭПР установлено присутствие в исследуемых системах двух типов пероксильных радикалов, предположительно, отнесенных ранее к радикалам  $OR_2^{\cdot-}$  и  $HO_2^{\cdot}$ . Показано влияние способов замораживания на продукцию данных радикалов. Сделан вывод, что сигнал  $OR_2^{\cdot-}$  наблюдается преимущественно в спектрах образцов с открытой поверхностью и обусловлен, по-видимому, восстановлением фотоэжектированными электронами адсорбированных молекул  $O_2$ ; сигнал  $HO_2^{\cdot}$  может быть обусловлен фотоиндуцированным взаимодействием сенсибилизатора с растворителем. Рассмотрены возможные механизмы процессов. Полученные результаты опубликованы в статье [4].

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные по теме исследования показали возможность идентификации плоскости разлома при построении модели землетрясения в случае описании очага в приближении вторых моментов. Выяснена зависимость такой идентификации от фокального механизма землетрясения. Полученные выводы были сделаны на основании прямых расчетов и подтверждены примерами реальных землетрясений. Изучены характеристики глубокого Охотоморского землетрясения (24 мая 2013 г.,  $M_w=8.3$ ): тектоническая позиция, очаг и афтершоки. Сформулированы возможные причины макросейсмических проявлений на больших расстояниях от этого землетрясения (по инструментальным данным). Завершена модификация пакета программ определения очаговых параметров из совместного анализа широкополосных записей поверхностных волн и знаков первых вступлений с использованием пакета параллельного программирования для многоядерных систем OpenMP. Выполнено сравнение точности различных алгоритмов локации микросейсмических событий, зарегистрированных поверхностной сейсмической группой в процессе гидроразрыва. Разработаны и отлажены программы для ЭВМ, реализующие адаптивные алгоритмы с использованием техники вейвлет-преобразований для автоматизированного выделения в реальном масштабе времени основных параметров сейсмических волновых фаз при наличии повышенного уровня сейсмических шумов.

По результатам выполненных исследований опубликовано 4 статьи в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах, сделано 8 докладов на международных научных конференциях и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## 4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

1. Kushnir, A., A. Varypaev, I. Dricker, M. Rozhkov, and N. Rozhkov, Passive surface microseismic monitoring as a statistical problem: location of weak microseismic signals in the presence of strongly correlated noise. *Geophysical Prospecting*, 2014, **62**, 4: 819-833, doi:10.1111/1365-2478.12124.
2. Kushnir, A. F., A. V. Varypaev, M. V. Rozhkov, A. G. Epihansky, and I. Dricker, Determining the microseismic event source parameters from the surface seismic array data with strong correlated noise and complex focal mechanisms of the source. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2014, **50**, 3: 334-354, DOI:10.1134/S1069351314030033.
3. Levin, V. E., V. F. Bakhtiarov, N. N. Titkov, S. S. Serovetnikov, M. A. Magus'kin, A. V. Lander, Contemporary crustal movements (CCMs) in Kamchatka. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2014, **50**, 6: 732-751, DOI:10.1134/S1069351314060044.
4. Lozinova, T. A., and A. V. Lander, Photosensitized formation of peroxy radicals in aqueous solutions of adenine at 77 K. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2014, **88**, 1: 163-169, DOI:10.1134/S0036024414010178.

*Доклады на международных научных конференциях*

5. Букчин Б. Г. О возможности идентификации плоскости разлома для различных фокальных механизмов землетрясения // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 74-78.
6. Chebrova, Y. A., V. N. Chebrov, A. A. Gusev, A. V. Lander, E. M. Guseva, S. V. Mityushkina, and A. A. Rayevskaya, Macroscopic and peak ground acceleration data of the May 24, 2013 (Mw8.3) Sea of Okhotsk deep earthquake. In *JKASP8 Sapporo 2014. 8-th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes: Finding clues for science and disaster mitigation from international collaboration. 3rd Circular and Program. Venue: Hokkaido University, Sapporo, Japan. Date: 22-26 September 2014*: 5.
7. Gravirov, V. V., and K. V. Kislov, The seismic data preparation program for training of an artificial neural network for ultrashort earthquake warning system. In *10th International Conference "Problems of Geocosmos". Book of Abstracts*, St. Petersburg, October 6-10, 2014. St. Petersburg, 2014: 86-87.
8. Gravirov, V. V., K. V. Kislov, and F. E. Vinberg, Wavelet transform as a tool for processing and analysis of Seismograms. In V. N. Troyan, N. Yu. Bobrov, A. A. Kosterov, A. A. Samsonov, N. A. Smirnova, and T. B. Yanovskaya (eds) *Proceedings of the 10th International Conference "Problems of Geocosmos" (Oct. 6-10, 2014, St. Petersburg, Russia)*, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2014: 168-172.

9. Kislov, K.V., and V.V. Gravurov, Magnitude threshold reducing for a network of close located mobile stations. In V.N. Troyan, N.Yu. Bobrov, A.A. Kosterov, A.A. Samsonov, N.A. Smirnova, and T.B. Yanovskaya (eds) *Proceedings of the 10th International Conference "Problems of Geocosmos" (Oct. 6-10, 2014, St. Petersburg, Russia)*, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2014: 178-183.
10. Kislov, K.V., and V.V. Gravurov, On the metrological support of the long-period seismology. In V.N. Troyan, N.Yu. Bobrov, A.A. Kosterov, A.A. Samsonov, N.A. Smirnova, and T.B. Yanovskaya (eds) *Proceedings of the 10th International Conference "Problems of Geocosmos" (Oct. 6-10, 2014, St. Petersburg, Russia)*, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2014: 183-189.
11. Kislov, K.V., and V.V. Gravurov, Seismic monitoring and protection of extended objects. In V.N. Troyan, N.Yu. Bobrov, A.A. Kosterov, A.A. Samsonov, N.A. Smirnova, and T.B. Yanovskaya (eds) *Proceedings of the 10th International Conference "Problems of Geocosmos" (Oct. 6-10, 2014, St. Petersburg, Russia)*, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2014: 189-194.
12. Kislov, K.V., V.V. Gravurov, and O.V. Novikova, Seismic early warning for Russia. In V.N. Troyan, N.Yu. Bobrov, A.A. Kosterov, A.A. Samsonov, N.A. Smirnova, and T.B. Yanovskaya (eds) *Proceedings of the 10th International Conference "Problems of Geocosmos" (Oct. 6-10, 2014, St. Petersburg, Russia)*, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2014: 194-199.