На правах рукописи



## Краснощеков Дмитрий Николаевич

# РАЗНОМАСШТАБНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ГЛУБИННЫХ ОБОЛОЧЕК ЗЕМЛИ КАК ОТРАЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ВНУТРЕННЕЕ – ВНЕШНЕЕ ЯДРО

Специальность 25.00.10 — «геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН)

# Официальные оппоненты:

Главный научный сотрудник Федерального государст-	Бурмин Валерий
венного бюджетного учреждения науки Институт физики	Юрьевич
Земли Российской академии наук (ИФЗ РАН), доктор	
физико-математических наук	
Заместитель директора по научной работе Института	Михайлова Наталья
геофизических исследований Национального ядерного	Николаевна
центра Республики Казахстан, руководитель Казахстан-	
ского Центра сейсмических данных, доктор физико-	
математических наук	
Главный научный сотрудник Федерального государст-	Сасорова Елена
венного бюджетного учреждения науки Институт океа-	Васильевна
нологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук	

## Ведущая организация:

(ИО РАН), доктор физико-математических наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН)

Защита диссертации состоится « 23 » июня 2016 г. В 11:00 на заседании Диссертационного Совета Д002.050.01 в Институте динамики геосфер РАН. Адрес: г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте idg.chph.ras.ru.

Автореферат разослан «

2016 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета канд. физ.-мат. наук

1)~~

Рыбаков В.А.

Институт динамики геосфер РАН, 2016

Москва 2016 г.

#### Введение

Актуальность проблемы. В настоящее время одним из наиболее динамично развивающихся направлений геофизики являются исследования ядра Земли. Результаты этих исследований предлагают всё более сложную картину свойств. структуры и динамики комплексной системы внутреннее – внешнее ядро. Многообразие опубликованных скоростных и структурных разрезов и моделей приводит к возникновению противоречий и концептуальных коллизий. Вместе с тем, сложившиеся представления о структуре и свойствах ядра Земли невозможно рассматривать в отрыве от успехов, достигнутых в смежных областях. Так, возможность формирования и поддержания глобальных неоднородностей во внешнем ядре представляется критически важной в теории самоподдерживающегося магнитного геодинамо. Надёжная оценка физических параметров и размера неоднородностей зоны перехода внутреннее – внешнее ядро Земли может быть конвертирована в более высокую точность оценки производных физических и термодинамических параметров в физике конденсированного состояния вещества. А механизм анизотропии внутреннего ядра неразрывно связан с кристаллографией железа. В этой связи одной из наиболее актуальных задач является выявление, оценка и интерпретация разномасштабных неоднородностей ядра Земли в терминах динамических процессов, протекающих в комплексной системе внутреннее внешнее ядро. Решение этой задачи требует поиска, всестороннего анализа и интерпретации новых данных, способных упростить описание системы или устранить существующие противоречия. Такая возможность обеспечивается повышающейся доступностью цифровых данных мировой сети сейсмологических наблюдений и улучшением качества самих данных. Расширение фактического материала идёт как за счет более богатой географии станций регистрации, так и за счет повышения технических характеристик сейсмологической аппаратуры. Анализ данных новых трехкомпонентных станций и станций группирования позволяет расширять область ядра Земли, просвечиваемую сейсмическими лучами, а современные цифровые каналы позволяют привлекать записи более слабых событий, анализ которых был ранее недоступен вследствие, например, недостаточной чувствительности или динамического диапазона аппаратуры. Новые, расширенные наборы данных по отражённым и рефрагированным волнам плотно зондирующим отдельные регионы ядра Земли дают более высокое разрешение, что позволяет не только выявлять локальные неоднородности, но и отслеживать пространственновременную динамику этой геооболочки. Новый качественный уровень интерпретаций цифровых данных также опирается на применение инновационных методик обработки сейсмограмм. Впервые в сейсмологической практике к анализу временных рядов начали применяться методы обработки многомерных образов и форм из классической и вычислительной геометрии. Таким образом, развитый методологический инструментарий и новое качество цифровых данных позволяют перейти от задачи идентификации неоднородностей ядра Земли к более актуальной проблеме комплексного описания трёхмерных изображений структурных особенностей ядра Земли в терминах его динамических процессов. Кроме того, актуальность работы определяется не только потребностями сейсмологии, но и текущими запросами кристаллографии, минералогии, теории магнитного геодинамо и геохимии, которые активно участвуют в формировании наших представлений о пространственно-временном ходе развития динамических процессов в ядре.

**Целью работы** является оценка размеров и физических свойств неоднородностей в жидком и твёрдом ядре Земли и интерпретация полученных результатов в терминах его структурных элементов и динамических процессов.

#### Направление исследований.

 Обобщение известных экспериментальных результатов и современных представлений о структуре и свойствах комплексной системы внутреннее – внешнее ядро Земли.

 Систематизация различных сценариев развития динамических процессов в ядре Земли и их отражения в характеристиках отражённых и рефрагированных объёмных волн.

 Обзор методов изучения геофизической среды, включая определение её пространственных и физических параметров с использованием объёмных волн.

4. Разработка и реализация алгоритмов для оценки параметров геофизической среды по данным сейсмической коды с использованием методов обработки многомерных образов и форм. Адаптация разработанных алгоритмов для работы со слабой кодой, сформированной на неоднородностях внутреннего ядра Земли.

5. Формирование нереляционной базы данных экспериментальных волновых форм. Выявление экспериментальных закономерностей и особенностей волнового поля сейсмических фаз, связанных с ядром. Исследование возможности использования собранной базы данных для изучения структурных неоднородностей ядра Земли и соответствующих ограничений.

5. Комплексное исследование поля рефрагированных и отражённых волн, включая всесторонний анализ отдельных волновых форм и сейсмической коды. Моделирование в рамках стандартных и модифицированных моделей Земли с учётом различных динамических сценариев геофизических процессов в ядре Земли. План исследований требует выявить пространственные закономерности изменения волнового поля, определить типы структурных моделей, ответственных за обнаруженные изменения, и на основании установленных феноменологических соотношений предложить способ описания зондируемой области ядра Земли в терминах актуальных геофизических процессов, а также изучить возможность обобщения полученных результатов на другие регионы ядра. Анализ цифровых данных в настоящей работе состоит в установлении закономерностей проявления эффектов разномасштабных структурных неоднородностей и сейсмической анизотропии на волновое поле рефрагированных и отраженных волн, выполнении компьютерных расчетов синтетических волновых форм и установлении соответствия расчетных и экспериментальных данных.

Методы исследований, достоверность и обоснованность результатов. Исследование проведено методом отражённых и рефрагированных волн. В ходе исследования измерялись времена пробега, амплитуды и периоды волновых форм, рефрагированных во внутреннем ядре, а также отражённых от границы внутреннее – внешнее ядро Земли. Сейсмическая добротность внутреннего ядра определялась посредством аппроксимации коды отражённых волн модельной функцией. Разработка теоретических положений и создание на их основе алгоритмов стало возможным благодаря комплексному использованию теоретических и экспериментальных подходов. Для проверки разработанных моделей использовалось численное имитационное моделирование. Собранная экспериментальная база данных состоит из волновых форм, зарегистрированных трёхкомпонентными станциями и системами группирования. Кроме того, использовались измерения времен пробега рефрагированных волн, которые были ранее опубликованы в научной печати. Волновые формы базы данных соответствуют записям землетрясений и взрывов на эпицентральных расстояниях от 145° до 155° для волн с точкой поворота в ядре Земли, и от 6° до 95° для отражённых волн. В качестве базовых, были приняты стандартные скоростные модели Земли PREM и ак135. Адаптированные модели среды подбирались с использованием экспериментальных данных из условий минимизации невязки измеренного времени пробега и (или) максимальной корреляции теоретической и экспериментальной волновой формы. Для трассировки лучей и расчета теоретических сейсмограмм использовались известные из научной литературы стандартные алгоритмы, реализованные на языке программирования Фортран. В ходе выполнения работ для задач анализа данные и визуализации результатов использовались следующие программные пакеты: SAC (Seismic Analysis Code), Geotool, TauP, Matlab, Origin, GMT (Generic Mapping Tool). Разработанные теоретические и прикладные методы и модели тестировались с привлечением моделирования, а также проходили экспериментальную апробацию. Полученные результаты сопоставлялись с известными экспериментальными данными независимых исследователей и не противоречат базовым физическим понятиям и законам.

#### Защищаемые положения.

1. Невязки дифференциального времени пробега волн с точкой поворота во внутреннем и внешнем ядре вблизи границы твёрдого ядра проявляют специфическую ковшеобразную форму зависимости от угла между осью вращения Земли и направлением сейсмического луча в точке максимального погружения во внутреннее ядро. Предложен класс моделей Земли с аномалией скорости продольных волн в 0.3 - 0.8% в цилиндрической области радиусом 1375 км во внешнем ядре, для которого теоретические невязки дифференциальных времен пробега хорошо согласуются с экспериментальными. 2. Распространение сейсмических волн во внутреннем ядре Земли под Юго-восточной Азией указывает на неоднородный характер анизотропии в этом регионе с присутствием существенных локальных вариаций. В слабоанизотропном (менее 0.1%) восточном полушарии твёрдого ядра обнаружена локализованная неоднородность, характеризующаяся высоким уровнем анизотропии (более 2%), на глубинах более 170 км под его границей между 18° и 23° с. ш. и 125° и 135° в. д.

3. Кровля внутреннего ядра, прилегающая к имеющему мозаичный характер переходу внутреннее-внешнее ядро Земли, является областью со структурой, формирующей интенсивную коду отражённых волн. Добротность кровли твёрдого ядра по коде отражённых продольных волн составляет порядка 450, а характерный размер структурных неоднородностей не превышает нескольких километров.

4. Обнаруженные разномасштабные неоднородности структуры ядра являются следствием и отражают особенности процесса затвердевания внутреннего ядра Земли из расплава жидкого внешнего:

- цилиндрическая аномалия скорости отражает области внешнего ядра с различным динамическим режимом, характеризующиеся своими конвективными движениями,

 ограниченная область внутреннего ядра под Юго-восточной Азией, характеризующаяся повышенным уровнем анизотропии скорости распространения сейсмических волн, соответствует локализованной аномалии затвердевания внутреннего ядра в предыдущие стадии его развития,

- кровля внутреннего ядра Земли с её высоким уровнем рассеяния сейсмических волн является областью с низкой упорядоченностью анизотропных кристаллов железа, характерной для молодого ядра.

5. Разработан и апробирован новый метод аппроксимации формы сейсмической коды с использованием обобщения одного из классических инструментов вычислительной геометрии — альфа-шейп *n*-го порядка. Новый метод позволяет получать устойчивые оценки временн**ы**х и амплитудных параметров сейсмической коды.

Научная новизна. Личный вклад. В рамках проведённого исследования впервые приведены и проанализированы измерения объёмных волн, свидетельствующие о существовании Тэйлоровского цилиндра во внешнем ядре и локализованной анизотропной аномалии в восточном полушарии внутреннего ядра Земли. Сформулирована концепция мозаичной поверхности внутреннего ядра, проведена оценка пространственных и физических характеристик неоднородностей области перехода от твердого внутреннего к жидкому внешнему ядру. Оценка сейсмического затухания во внутреннем ядре впервые проведена с погрешностью менее 10%. Разработан принципиально новый подход к анализу сейсмической коды без использования усреднения, а с привлечением пространственных методов обработки многомерных образов и форм из классической и вычислительной геометрии. Сбор и анализ сейсмических данных проводился соискателем с участием сотрудников Лаборатории «Динамических процессов в земном ядре» ИДГ РАН. Основные расчеты при анализе дифференциальных амплитуд РКР в разделе 3.2.6 выполнены к.ф.-м.н. Каазиком П.Б и д.ф.-м.н. Овчинниковым В.М. Оригинальный алгоритм применения альфа-шейп *n*-го порядка к временным последовательностям был разработан и внедрён соискателем при участии профессора В.В. Полищука из Хельсинкского института информационных технологий Университета Хельсинки.

Практическая значимость работы. Полученные оценки параметров и свойств разномасштабных неоднородностей ядра Земли могут быть использованы для широкого круга фундаментальных и прикладных геофизических исследований. Радиус цилиндрической аномалии во внешнем ядре – для моделирования геодинамо и сопоставления с морфологией магнитного поля Земли: вариации плотности - для изучения реологии расплава железа в жидком состоянии, уточнения минимального температурного градиента в жидком ядре, поддерживающего скоростную дифференциацию, а также для гидродинамического моделирования конвективных течений. Пространственные и скоростные характеристики анизотропной аномалии под Юго-Восточной Азией могут быть использованы в качестве граничных условий при моделировании режимов пластической деформации внутреннего ядра с возникновением плюмов и моделировании его роста, а также в качестве маркеров, указывающих на текстуру и кристаллографию железа при сверхвысоких температурах и давлениях (порядка 5000 – 6000° С и 300 – 400 ГПа, соответственно). Практическая значимость настоящего исследования телесейсмических волн также определяется тем, что измерения дифференциальных времён пробега для малых углов между осью вращения Земли и направлением сейсмического луча в точке максимального погружения во внутреннее ядро достаточно редки. В этой связи собранный банк измерений на полярных трассах под Африкой и Юго-восточной Азией представляет интерес для дальнейших фундаментальных исследований ядра Земли. Он может быть включен в ранее существующие базы данных или дополнен новыми измерениями для выработки комплексной модели пространственного распределения анизотропии, а также развития и уточнения структурных особенностей внутреннего и внешнего ядра. Кроме того, разработанный в диссертации инновационный метод аппроксимации формы сейсмической коды даёт возможность усовершенствовать рутинные процедуры обработки длинных временных рядов (включая сейсмические волновые формы). Предложенный алгоритм позволяет исключить некоторые функции оператора (например, этап измерения длительности сейсмической коды), автоматизировать процедуру обработки данных, повысить робастность результатов и адаптивность при анализе различного экспериментального материала. Для анализа сейсмических данных полученных в Северо-западном регионе России и Фенноскандии были разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие по широкополосным записям сейсмической коды местных землетрясений получать автоматическую оценку локальной магнитуды M<sub>L</sub>. Разработана пробная шкала локальной магнитуды M<sub>L</sub>. Область применения – фундаментальная сейсмология, инженерная сейсмика.

Реализация результатов. Основные результаты диссертации получены в Институте динамики геосфер РАН в ходе выполнения научно-исследовательских работ в рамках Программы «Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН» Фонда содействия отечественной науке (2004–2005). Программы фундаментальных исследований OH3 PAH №7 «Геофизические данные: анализ и интерпретация» (2012), при поддержке Ведушей научной школы акад. Адушкина В.В. «Взаимодействие геодинамических процессов и геофизических полей в природной среде» (грант НШ-3345.2014.5). грантов CRDF (CGP-RG2-222, CGP-RG2-2352, JSFP-RUG1-2675). INTAS (05-1000008-8127 (2005-2008)). РФФИ (14-05-00447. 01-05-06158, 02-05-06386, 03-05-06175, 11-05-00871, 08-05-00434, 05-05-65358, 05-05-65048, 02-05-65002, 02-05-65001, 99-07-90180, 99-05-65464) и МНТЦ (К-063 и 1221), а также в рамках сотрудничества с финскими учёными в ходе совместной Программы РАН и Финской Академии Наук — проектов «POLENET/LAPNET — комплексное исследование в Северной Фенноскандии на базе сейсмической группы в рамках Международного Полярного года 2007–2009» (2010–2012) и «POLENET/LAPNET — проект №2» (2012–2013).

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийских конференциях «Внутреннее ядро Земли» (Москва 2005, 2009), Международных конференциях Европейского геофизического союза (Ницца 2003; Вена 2007, 2008, 2011, 2015), Американского геофизического Союза (Балтимор 2006; Сан-Франциско 2006, 2009, 2015; Канкун 2013), Международного консорциума сейсмологических институтов IRIS (Тусон 2006), 33-ей Генеральной ассамблее Европейской сейсмологической комиссии (Москва 2012), Международной Конференции Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (Вена 2015), Конференциях Проблемы Геокосмоса (Санкт-Петербург 2008, 2010), Международной сейсмологической Школы Геофизической службы РАН (Петергоф 2006, Пермь 2007, Листвянка, оз. Байкал 2009, Геленджик 2013). Международной конференции «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий» (Боровое 1998, 2000), и Международной конференции «Геофизические обсерватории, многофункциональные ГИС и распознавание в информационных массивах» (Калуга 2013), а также на специальных семинарах Российского Научного Центра Курчатовский Институт (3-й Международный семинар по магниторотационной неустойчивости, Москва, октябрь 2006), Колумбийского университета (Нью-Йорк, США, июнь 2006), Бристольского университета (Бристоль, Великобритания, август 2007). Университета Оулу (Финляндия, июнь 2013, март, октябрь 2015), Хельсинкского университета информационных технологий (Финляндия, июнь 2013). Нанкинского университета (Китай, апрель 2013, июнь 2014) и ИДГ РАН (2003–2015). Основное содержание диссертации отражено в 23 печатных работах (без учета тезисов докладов на конференциях), в том числе в 11 статьях российских и зарубежных журналов, включенных в Перечень ВАК и проиндексированных в международных базах данных научных знаний Scopus и Web Of Science (Доклады Академии Наук, Физика Земли, Nature, Geophysical Journal International, Pure and Applied Geophysics, Information Processing Letters).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографии, включающей 279 наименований. Работа изложена на 212 листах, содержит 58 рисунков и 6 таблиц.

#### Содержание работы

Во **введении** дана общая характеристика работы, включая её апробацию в научной печати и на научных конференциях. Обосновывается актуальность и научная новизна темы, определяются направление исследований, цель и решаемые задачи, приводятся методы исследований, формулируются положения, выносимые на защиту и научная новизна, описывается личный вклад автора, отмечается практическая значимость и обосновывается достоверность полученных результатов исследования.

В первой главе приведен аналитический обзор накопленной информации о структуре и свойствах ядра Земли, позволяющий сформулировать задачи диссертации. Глава содержит историю открытия и основные вехи исследования ядра Земли, включая такие особенности как Тэйлоровский цилиндр во внешнем ядре, дифференциальное вращение внутреннего ядра, сейсмическая анизотропия и её дихотомный характер. Особое внимание уделено актуальным интерпретациям обнаруженных структур и неоднородностей в терминах динамических процессов комплексной системы жидкое внешнее – твёрдое внутреннее ядро Земли. Описаны основные динамические и минералогические модели. Основные научные результаты изложены в главах 2–4.

Вторая глава посвящена методическим основам анализа волновых форм, связанных с ядром Земли. В разделе 2.1 представлены инструменты исследования на основе сейсмических фаз, рефрагированных вблизи границы внутреннего ядра Земли – это короткопериодные волновые формы PKP<sub>BC</sub> и PKIKP (или PKP<sub>DE</sub>) с частотой от 0.2 до 2 Гц. Так как путь распространения волн с нижней точкой рефракции в ядре Земли составляет многие тысячи километров в коре, мантии и ядре. то свойства этих волн находятся под сильным воздействием всех этих оболочек и требуют анализа вклада каждой из них. В этой связи наиболее эффективным использованием волн РКІКР является анализ их дифференциальных характеристик с так называемой «референсной фазой», которая имеет существенно сходный или близкий путь распространения в коре и мантии. Это позволяет устранить из рассмотрения целый ряд факторов, оказывающих воздействие на измерения, но локализованных в коре и мантии. В диссертации в качестве такой фазы используется РКР<sub>вс</sub> с её точкой поворота вблизи границы внутреннего ядра. но в отличие от РКІКР (или РКР р. в подошве жидкого ядра. Наиболее доступным и наглядным инструментом является зависимость их дифференциального времени пробега от VГЛА МЕЖДУ ЛУЧОМ РКРо⊨ в точке поворота и осью врашения Земли. приблизительно совпадающей с быстрой осью анизотропии кристаллов железа, слагающих внутреннее ядро Земли. Действительно, трасса фазы РКРвс незначительно отличается от РКР ре. но. в отличие от последней. не пролегает через анизотропную среду, а значит, невязка их дифференциального времени пробега со сферическисимметричной моделью будет зависеть от указанного угла. При оценке силы анизотропии по данным времён пробега используется приближение, в котором малые величины невязок дифференциальных времён пробега связаны со скоростными аномалиями во внутреннем ядре соотношением  $\delta t/t = \delta V/V$ , где t — время пробега сейсмической волны РКР по анизотропной области внутреннего ядра. Чтобы получить относительные значения невязок, необходимо определить к какой части внутреннего ядра относятся наблюденные аномалии дифференциальных времен пробега. При расчетах, часто принимают, что верхняя часть ядра толщиной от 100 до 400 км является изотропной, и относят измеренные невязки ко времени пробега во внутреннем ядре за вычетом верхней его части. Модельная функция, описывающая вариации скорости распространения объёмных волн в среде с цилиндрической анизотропией может быть представлена в виде комбинации тригонометрических функций от угла между быстрым направлением распространения волн в среде и сейсмическим лучом в точке поворота. Обозначив этот угол за {, модельную функцию можно записать в виде:  $\delta V(r,\xi)/V_0(r) = \alpha(r,\phi) + \epsilon(r,\phi)\cos^2\xi + \gamma(r,\phi)\sin^22\xi$ , где  $V_0(r) \approx V(r, \xi = 90^{\circ})$  — скорость распространения продольных волн в референсной модели, а  $\alpha(r,\phi)$ ,  $\epsilon(r,\phi)$  и  $\gamma(r,\phi)$  — параметры, описывающие анизотропию как функцию радиуса r и долготы φ. Эти три независимых параметра полностью характеризуют кривую вариации сейсмической скорости и могут быть связаны с упругими параметрами этой анизотропной среды: скоростями распространения продольных и поперечных волн параллельно и перпендикулярно оси анизотропии.

Раздел 2.2 посвящен обнаружению слабых волновых форм РКіКР, их свойствам и связи с особенностями структуры перехода внутреннее – внешнее ядро Земли, которая определяется мозаичностью поверхности твердого ядра. РКіКР это волна, отраженная от границы между жидким внешним и твердым внутренним ядром Земли. В отличие от рутинных наблюдений закритически отраженных волн, докритические волновые формы РКіКР на расстояниях до 100 градусов наблюдаются значительно реже. Это происходит вследствие малости амплитуд РКіКР, которые «тонут» в интенсивных колебаниях сейсмической коды, сформированной на неоднородностях коры и мантии. Стандартные модели Земли включают границу внутреннее – внешнее ядро в виде скачка первого рода в скоростях распространения продольных и поперечных волн, а также плотности на глубине около 5150 км. Чтобы эффективно повысить соотношение сигнал/шум для вступлений РКіКР, к записям короткопериодных или широкополосных каналов с чувствительностью не менее 0.5 нм на цифровой отсчет применяется полосовая частотная фильтрация с полосой пропускания 1÷5 Гц или 1.3÷5 Гц. При этом идентификация волновой формы РКіКР по трехкомпонентной записи только на основе расчетного времени вступления и видимых изменений в характере записи, как правило, ненадежна. Действительно, учитывая ожидаемый высокочастотный характер вступления, любой импульсный сигнал случайного процесса. отличающийся от доминирующей частоты анализируемого фрагмента записи может быт принят за вступление волн РКіКР. В этой связи предпочтительно использование данных малоапертурных сейсмических групп или региональной группы трехкомпонентных станций. Как видно из рис. 2-2-2, благодаря высокой кажущейся скорости, составляющей на малых расстояниях сотни километров в секунду, волновые формы PKiKP образуют «полосу» синфазных вступлений, которая визуально прослеживается на монтаже отфильтрованных вертикальных составляющих группы. На монтаже трасс для большего диапазона расстояний можно проследить гиперболический годограф отраженных волн РКіКР. Выделенные вступления РКіКР могут характеризоваться различным соотношением сигнал/шум и быть достаточно интенсивными, соответствуя волновым формам с максимальной амплитудой на 40-секундном временном интервале вокруг расчетного времени вступления. Невязки времен пробега с моделью PREM обычно невелики. Так, время пробега по 31 событию на Семипалатинском полигоне, зарегистрированному на расстоянии 6° на станции Боровое, составляет 992.45 ± 0.07 (расчетное время по PREM – 992.42 с). Как видно вертикальный «караван» волновых форм РКіКР с заметным соотношением сигнал/шум отлично прослеживается на всех трёх стэках рисунка 2-2-2. Одной из существенных особенностей вступлений РКіКР является их высокочастотный состав. Так, измеренный средний период по 31 волновой форме РКіКР на станции Боровое составил 0.66 ± 0.06 (левая верхняя панель рис. 2-2-2).

В отличие от первых вступлений продольных волн, спектрограммы РКіКР имеют максимум, сдвинутый в область высоких частот (рис. 2-2-4). Необходимо отметить. что в диапазоне расстояний от 40° до 95° энергетический коэффициент отражения РКіКР, рассчитанный согласно стандартной модели с резкой границей, составляет менее 0.001, что предполагает крайне низкие амплитуды волн РКіКР, особенно в транспарентной зоне — от 70° до 90° (рис. 2-2-6). Тем не менее, полосовая частотная фильтрация групповых записей мощных подземных ядерных взрывов и землетрясений часто позволяет обнаружить волны РКіКР во всем диапазоне докритических отражений. Соответствующие результаты измерений по записям взрывов и глубокофокусного землетрясения Памиро-Гиндукушской зоны представлены на рисунке 2-2-7. Зарегистрированные амплитуды РКіКР в десятки и сотни раз превышают оценки в рамках стандартных моделей с резкой границей. что свидетельствует о более сложном характере границы внутреннего ядра Земли. В результате комплексного анализа измерений и сопоставления с результатами моделирования волновых форм РКіКР в рамках различных моделей тонкой структуры перехода внутреннее – внешнее ядро Земли была установлена изменчивость

условий отражения в зависимости от местоположения точки отражения на поверхности. Такая изменчивость была проинтерпретирована в терминах неоднородности поверхности твердого ядра (рис. 2-2-8). Образ поверхности внутреннего ядра соответствует «мозаике», сложенной из областей с резкой границей и областей, включающих локальный переходный слой толщиной 2 ÷ 4 км в подошве жидкого ядра, или в кровле твердого ядра Земли. Предложенная модель позволяет согласовать все измеренные амплитуды РКіКР, времена пробега, а также высокочастотный состав вступлений РКіКР.



Рис. 2-2-2. Монтажи трасс вертикальных компонент записей подземных ядерных взрывов и расчетные времена вступления. Записи соответствуют: 31 Семипалатинскому взрыву, зарегистрированному станцией Боровое (BRVK), 3 Семипалатинским взрывам, зарегистрированным станцией NWAO в Австралии, и взрывам на Новой Земле, Лобноре и Семипалатинске, зарегистрированным станциями в Казахстане. Теоретический годограф PKiKP рассчитан по PREM. Все трассы отфильтрованы в полосе частот 1–5 Гц нульфазным фильтром Баттерворта.



дольных волн; правая часть – вступлению волн РКіКР.



Рис. 2-2-6. Зависимость коэффициентов отражения/преломления на границе внутреннее – внешнее ядро Земли от эпицентрального расстояния в градусах.



Рис. 2-2-7. Измеренные амплитуды волн РКіКР по записям подземных ядерных взрывов (слева) и Памиро-Гиндукушского землетрясения (справа) и теоретические амплитудные кривые, вычисленные в рамках PREM (красная линия) и ее модификаций с тонким переходным слоем в основании жидкого ядра (зеленая и синяя линии) или кровле твердого ядра (фиолетовая линия). Желтым цветом обозначена область, соответствующая ожидаемым амплитудам РКіКР в рамках моделей с твердым или жидким переходным слоем толщиной в пределах 5 км и скачком скорости продольных волн не более 10 %.

Ниже приведены структура и параметры различных моделей перехода внутреннее-внешнее ядро Земли. *р* – плотность в г/ куб. см., *V<sub>P</sub>* и *V<sub>S</sub>* – скорости распространения продольных и поперечных волн, соответственно, в км/с:



## **Модель с резкой границей** (PREM) требует наличия сильных неоднородно-

стей вне ядра для объяснения высокочастотного состава вступлений РКіКР. Не согласуется с наблюдениями в транспарентной зоне. Позволяет согласовать измеренные времена пробега.

Модель с глобальным переходным слоем (жидким или твердым) позволяет объяснить высокочастотный состав вступлений РКіКР. Плохо согласуется с измеренными амплитудами РКіКР, если параметры слоя фиксированы.

Модель с присутствием неоднородностей в виде тонких локальных переходных слоев — жидких или твердых позволяет объяснить значительные амплитудные вариации волн РКіКР, их частотный состав и время пробега с небольшими отклонениями от стандартной модели с резкой границей.

Раздел 2.3 раскрывает метод анализа сейсмической коды с помощью методики обработки пространственных данных альфа-шейп и его применение к выделению слабой коды РКіКР. Новый метод использует α-шейп *k-ого* порядка инновационный инструмент, применяемый в вычислительной геометрии для целей восстановления формы из облака точек. Он позволяет восстановить форму сейсмической коды без сглаживания. Применение α-шейп k-ого порядка к огибающей даёт робастные оценки амплитудной изменчивости коды во времени и производных величин. В более широком смысле предложенный алгоритм дает практический инструмент восстановления формы любого набора данных, состоящего из сигнала и шума, и заданного в виде временной последовательности. Определение α-шейп множества точек звучит следующим образом: Определение [α-шейп множества точек *P*]. Пусть  $P \in R^2$  — множество точек на плоскости.  $\alpha$ -шейп от *P* соединяет все пары точек *р.*  $q \in P$ . для которых существует диск радиуса  $\alpha$ . имеющий *р.* q на своей границе и ни одной из точек *P* внутри. Например, при  $\alpha = 0$  ни одна из пар точек не может быть соединена в α-шейп. В другом экстремальном случае при  $\alpha \to \infty$ ,  $\alpha$ -шейп есть суть выпуклая оболочка множества точек *P*.  $\alpha$ -шейп формализует интуитивное понятие «формы множества точек» (рис. 2-3-2, левая панель). Значение α управляет уровнем детализации, с которым восстанавливается форма.



Рис. 2-3-2. Облако точек и его α-шейп (слева). Несколько отскакивающих значений (изображены звёздочками) искажают восстановленную форму (середина). Применение α-шейп *к-ого* порядка (*k* = 1) позволяет восстановить форму без искажений (справа).

Реальные данные часто содержат шум и отскакивающие (экстремальные) значения, которые искажают α-шейп (рис. 2-3-2, средняя панель). Чтобы устранить искажения, автор диссертации совместно д-ром Полищуком из Хельсинкского университета информационных технологий дал определение α-шейп k-ого порядка. Это расширенное понятие α-шейп, которое позволяет игнорировать определенное количество отскакивающих данных и получать более робастные результаты. На рис. 2-3-2 (левая панель) представлен α-шейп множества точек, который отлично восстанавливает форму облака точек. На средней панели добавлены два отстающих значения. Как видно теперь α-шейп не может восстановить одну из ключевых черт множества — его внутреннюю полость. Идея α-шейп k-ого порядка сформировалась в результате стремления снизить влияние отскакивающих значений посредством предоставления возможности некоторым точкам анализируемого множества находиться внутри α-дисков, определяющих форму. На рис. 2-3-2 (правая панель) изображен α-шейп первого порядка. Как видно, оценка α-шейп к-ого порядка с k > 0 позволяет достичь более устойчивых результатов за счет пониженной чувствительности к отскакивающим значениям. Формально, α-шейп k-ого порядка определяется аналогично α-шейп посредством дисков радиуса α. В отличие от стандартного определения α-шейп через пустые диски, диски, определяющие αшейп *k-ого* порядка, содержат *k* точек множества *P*. В частности, диск радиуса а называется полным порядка k. если ровно k точек P находятся внутри диска. Точки множества *P*. содержащиеся в полных дисках уровня *k*, называются «внешние». Все точки множества P, не являющиеся внешними, называются «внутренними». Таким образом, определение [а-шейп k-ого порядка множества точек Р] звучит как: α-шейп *k-ого* порядка — это α-шейп внутренних точек. В рамках такого определения α-шейп является α-шейп *k-ого* порядка с k = 0. Алгоритмические и комбинаторные свойства α-шейп k-ого порядка приведены в публикациях, указанных в полном списке работ по диссертации. Демонстрационной опцией обобщения является интерактивное веб-приложение по адресу http://www.cs.helsinki.fi/group/ compgeom/kapplet/, с помощью которого можно создавать различные множества точек и оценивать α-шейп *k-ого* порядка и другие пространственные построения. Далее на изобразительных примерах показано, что α-шейп k-ого порядка эффективно восстанавливает структуру облака точек. Причем, необходимо отметить, что α-шейп (как и α-шейп *k-ого* порядка) относятся к непараметрическим методам, так как при восстановлении формы не делается каких-либо априорных предположений о ее типе или структуре. То есть, не предполагается, является ли форма графиком линейной, экспоненциальной, логарифмической или какой-либо другой функции. Напротив, при параметрической регрессии функциональная зависимость предполагается известной и постулируется, что эта зависимость принадлежит определенному семейству функций. В задачу регрессии входит поиск оптимальных параметров, описывающих заданную функцию (т. е. поиск также осуществляется в пространстве параметров).



Рис. 2-3-5. Блок-схема алгоритма обработки. Сейсмическая запись разбивается на шум и коду. Шум используется для выбора α and k (например, с помощью RMSD). Выбранные α и k используются при обработке коды для восстановления её формы. Курсив – средний уровень сейсмического шума (также изображены 4 диска в случайных местоположениях); восстановленная форма – чёрная кривая.

Подраздел 2.3.2 содержит описание алгоритма (рис. 2-3-5) и всех аспектов обработки временных последовательностей с помощью *а*-шейп *k-ого* порядка. Основной целью является восстановление уникальной гладкой кривой, представляющей форму сейсмической коды, из дискретного представления этой формы, данного в виде огибающей Гильберта. То есть в терминах пространственного восстановления этот дискретный набор данных рассматривается как результат зондирования оригинальной формы коды. Основываясь на фундаментальных предположениях о распространении объемных волн, предполагается, что частота зондирования достаточна и обеспечивает восстановление искомой формы с приемлемой неопределенностью. В отличие от скользящего среднего, которое сглаживает огибающие посредством усреднения определенного количества близлежащих точек, представленный алгоритм анализирует локальные закономерности взаимного расположения точек в пространстве. При этом процедура восстановления состоит в оценке локального распределения и взаимосвязей точек множества для оценки позиции локального элемента искомой формы. α и *k* for могут выбираться на основе различных критериев, и один из практических методов выбора предложен в диссертации.

Для выбора α и k для любой из сейсмограмм используется часть записи, которая содержит только сейсмический шум (рис. 2-3-5). а устанавливается равным одному стандартному отклонению сейсмического шума. Чтобы задать k случайным образом выбирается 1000 моментов записи, и в каждый момент времени располагается два α-диска. Один с центром в 2α над средним уровнем шума, а другой с центром 2a под уровнем шума. k устанавливается равным среднему количеству точек в дисках по получившимся 2000 дискам. Затем алгоритм α-шейп *k-ого* порядка применяется к записи сейсмического шума и с помощью среднеквадратичного отклонения (RMSD) оценивается, на сколько выходная форма отличается от прямой на уровне среднего уровня шума. Интуитивно α-диски удаляют шум, что должно обеспечить прямую линию в качестве выходной формы. Если вариабельность выходной формы слишком высока, шкала времени масштабируется и для новой шкалы оценивается величина k с помощью вышеописанной процедуры (усреднение по 2000 дисков в случайные моменты времени). При увеличении масштабного коэффициента возрастает k, что соответствует меньшим вариациям выходной формы или меньшему RMSD. Процедура останавливается в тот момент, когда RMSD становится менее заранее установленного уровня. RMSD обычно устанавливают равным 0.05а–0.005а. Меньшие значения RMSD обычно приводят к избыточному сглаживанию выходной формы.

Программный код MATLAB описанного алгоритма можно загрузить по ссылке: http://www.cs. helsinki.fi/group/compgeom/seism.zip. Тестирование эффективности ашейп *k-ого* порядка было осуществлено на синтетической задаче, в которой данные состояли из двух частей: прямая линия, соответствующая константе, за которой следовало трехмерное решение уравнения Больцмана, взятого в качестве реального примера синтетической формы коды. Сконструированная форма подлежащая восстановлению суть состоит из первоначального пика, за которым следует хвост, характеризующий волны, сформированные однократным рассеянием, и диффузная часть коды. Затем на весь набор данных были наложены случайные флуктуации, определяемые Релеевским распределением. Результаты обработки представлены на рис. 2-3-6. Как видно, выходная форма практически совпадает с истинной формой без существенных систематических сдвигов или отклонений, как на сейсмическом шуме, так и на временных интервалах коды, соответствующих региону однократного рассеяния и диффузному хвосту (рис. 2-3-6, левая панель).



Рис. 2-3-6. Применение α-шейп k-ого порядка к синтетическим данным: результат обработки всей записи длиной 45 минут (слева), а также увеличенный 5-минутный фрагмент, соответствующий первому вступлению продольных волн (справа). Истинная форма (чёрная кривая) и восстановленная кривая (белая) изображены поверх синтетического набора данных (серая кривая).

Дополнительное тестирование было проведено на реальных данных. Для оценки стандартной ошибки и устойчивости восстановленной формы коды, был привлечен метод «опорной выборки». За исключением временного периода, соответствующего первому вступлению, ошибка не превышала 1%, причем общее количество моментов времени, в которых ошибка восстановления формы превышала 5% равно 0.5% общей длины записи. Результаты применения α-шейп *k-ого* порядка к измерению общей длительности сейсмической коды локального события изложены в подразделе 2.3.3. Пример выходных кривых и измеренных длительностей коды приведен на рис. 2-3-10. 14 восстановленных форм сейсмической коды на эпицентральных расстояниях от 5 до 308 км от события с локальной магнитудой 2.4 изображены в режиме наложения и выровнены на время в очаге. Представленные формы соответствуют теоретическим представлениям о постоянном градиенте спада сейсмической коды и общем времени, необходимом для поглощения сейсмической энергии, излученной из источника. Согласно рис. 2-3-10, разброс измеренной длительности коды не превышает 25 с, что невелико для слабого события.



Рис. 2-3-10. Восстановленные формы коды по 14 огибающим записи локального события № 1 из таблицы 2-3.

Чтобы сопоставить полученные измерения с опубликованными данными, было использовано понятие «магнитуда по длительности». Линейная регрессия результатов измерения длительности сейсмической коды от эпицентрального расстояния отражает ожидаемую нисходящую зависимость. Полученные значения линейного коэффициента связи проявляют небольшой разброс, хотя среднее значение хорошо согласуется с предыдущими оценками для Фенноскандии. В **разделе 2.4** описана методика оценки затухания по данным сейсмической коды в разрезе её применения к затуханию во внутреннем ядре Земли. Она основывается на классическом методе, представленном Аки в 1969 году, с учетом особенностей, накладываемых слабой кодой РКіКР, сформированной на неоднородностях кровли твёрдого ядра.

В главе 3 представлены новые данные о невязках дифференциальных времен пробега PKP<sub>BC</sub> и PKP<sub>DF</sub> и проведен анализ невязок для сейсмических лучей, зондирующих внутреннее ядро под различными регионами Земного шара. Показано, что особенности экспериментальных данных могут быть объяснены различными особенностями свойств и структуры ядра Земли, включая анизотропию скорости распространения продольных волн во внутреннем ядре, а также введением цилиндрической аномалии скорости объёмных волн во внешнем ядре. Большая часть данных раздела 3.1 относится к измерениям на трассах распространения сейсмических волн в ядре, расположенных под африканским континентом. Карта взаимного расположения источников и станций приведена на рис. 3-1-1. Общее число полученных измерений составило 212, причем ¾ из них для полярных трасс (угол между направлением сейсмического луча во внутреннем ядре и

осью вращения Земли менее 35°). Для экваториальных трасс были использованы дифференциальные времена, ранее опубликованные в научной печати.





Учитывая малые значения измеряемых величин, в работе проведен сравнительный анализ полученных измерений (двумя методами: вручную и корреляционным) и аналогичных данных из открытой печати. Показано, что оба подхода дают согласованные величины: в среднем измерения с использованием корреляционного анализа больше на (0.035±0.072) секунды, т. е. отличия не превышают одного дискретного отсчета времени (частота дискретизации данных составляла 20 Гц). Сопоставление с опубликованными измерениями других авторов показывают, что они статистически неразличимы: имеется только смещение оценок, составившее (0.072 ± 0.078) с. Затем, в измеренные значения невязок с помощью 3-D модели МІТР08 была введена поправка, позволяющая учесть влияние мантии. В результате в соотношении для суммы особенностей невязок по всем оболочкам Земли остаются только влияние особенностей скоростного строения внешнего и внутреннего ядра. Относительные невязки дифференциальных времен *δт/t* показанные на рисунке 3-1-2. описываются моделью вида *δт/t* = (0.223±0.162) + (-4.345±0.650)cos<sup>2</sup>ξ + (8.679 ± 0.581)cos<sup>4</sup>ξ.



Рис. 3-1-2. Зависимость относительной невязки дифференциального времени от угла ξ между направлением сейсмического луча во внутреннем ядре и осью вращения Земли. Открытые кружки – экспериментальные данные; сплошная кривая – модель анизотропии, полученная по экспериментальным данным. На врезке в увеличенном масштабе показаны экспериментальные данные (черные кружки), создающие форму «ковша», группы станций NNET из области углов ξ, обозначенной овалом.

Таким образом, приведенные данные не противоречат сложившимся представлениям об анизотропии внутреннего ядра Земли, одним из свойств которой является зависимость невязок от угла между направлением сейсмического луча в ядре и осью вращения Земли. Область под Африкой имеет высокий уровень анизотропии, составляющий 4.33%. Особенностью экспериментальных данных на рис. 3-1-2 являются большие вариации относительных дифференциальных времен при ξ ≈ 24° (врезка на рис. 3-1-2), измеренных на станциях NNET. Модель внешнего ядра, объясняющая эту особенность, рассмотрена в следующем подразделе. Дру-

гой особенностью является быстрый переход к малым значениям дифференциальных невязок при *٤* ≈ 35°. Все последующие построения, касающиеся аномалии скорости во внешнем ядре, опираются на данные NNET, включающие 82 значения дифференциальных времен пробега, что позволяет провести более детальное рассмотрение очень небольшой области внутреннего ядра. На врезке рис. 3-1-2 показан фрагмент данных из области, обозначенной овалом, для 21° < ξ < 25°. Для выбранного диапазона ξ экспериментальные данные имеют форму «ковша», ручка которого расположена слева при 21.5° <  $\xi$  < 23.5° и емкость ковша справа при 23.5° < ξ < 24°. Как видно с помощью модели анизотропии трудно описать специфическую форму экспериментальных данных в этом диапазоне углов ξ. Анализ зависимости относительных невязок от глубины и долготы точки поворота обнаруживают очень быстрые и разнонаправленные изменения дифференциальных невязок времен пробега, которые имеют пространственный масштаб меньше размера первой зоны Френеля для внутреннего ядра при наблюдениях на эпицентральном расстоянии 150°. С этой точки зрения зондируемую область следует считать однородной и искать другие причины для объяснения наблюдаемой аномалии. Количественная оценка вклада мантийных неоднородностей представлена в подразделе 3.1.5. На рис. 3-1-4 показана рассчитанная по этой модели зависимость мантийной поправки  $\delta T_m = T_{MITOB} - T_{ak135}$  от угла  $\xi$  для землетрясений на Ю. Сандвичевых о-вах, зарегистрированных на станциях NNET, а также невязки, измеренные и скорректированные на влияние неоднородностей в мантии на станциях NNET. На рис. 3-1-4 видна качественная согласованность формы мантийных поправок, которая наблюдается в экспериментальных невязках станций NNET, а именно, вид ковша. Наблюдаемая особенность  $\delta t_m$  связана с расположенной почти вертикально неоднородностью в мантии на стороне источника. При этом лучи РКР<sub>DE</sub> и РКР<sub>BC</sub> лежат в разных частях неоднородности, но ряд лучей РКР вс могут на некоторой глубине погружаться в более высокоскоростную область распространения луча РКР<sub>DF</sub>. Однако учет влияния мантийных неоднородностей не приводит к существенному изменению ковшеобразной формы экспериментальных данных. Измеренные и скорректированные данные (рис. 3-1-4) на станциях NNET не имеют существенных различий, кроме незначительного уменьшения уровня невязок. Таким образом, из всех факторов, представленных в формуле суммы вкладов различных оболочек Земли, не рассмотренным остался только фактор, связанный с внешним ядром.

В качестве объяснения полученных особенностей невязок была рассмотрена аномалия скорости в цилиндрической области, ось которой совпадает с осью вращения Земли. На рис. 3-1-5 приведены результаты расчетов для аномалии скорости в 0.5%, которые показывают, как меняется форма зависимости дифференциальных невязок от угла ξ при различных значениях радиуса цилиндрической области.



Рис. 3-1-4. Вклад мантийных неоднородностей δτ<sub>m</sub> в дифференциальные времена пробега (кружки с горизонтальной чертой). Показаны также измеренные дифференциальные времена (светлые кружки) и скорректированные на неоднородности в мантии (кружки с крестиками). Ось ординат имеет разрыв, чтобы представить данные в нижней и верхней частях рисунка в разном масштабе.



Рис. 3-1-5. Сравнение теоретически рассчитанных дифференциальных невязок при величине аномалии скорости 0.5% для различных значений радиуса цилиндрической области. На оси абсцисс сделан разрыв, чтобы представить левую и правую части рисунка в разном масштабе.

На рис. 3-1-5 видно, что при R<sub>c</sub> = 1350 км рассчитанные невязки линейно растут для  $\xi < 23.5^{\circ}$ , а для  $\xi > 23.5^{\circ}$  близки к постоянной величине. При увеличении R<sub>c</sub> в области  $\xi > 23.5^{\circ}$  появляется характерная ковшеобразная форма, наблюдаемая в экспериментальных данных. При дальнейшем увеличении R<sub>c</sub> глубина емкости ковша начинает уменьшаться. Наилучшее согласование в смысле минимума суммы квадратов отклонений экспериментальных данных от рассчитанных невязок при шаге по R<sub>c</sub> в 25 км и 0.1% по скорости достигается при R<sub>c</sub> = 1375 км и *ду/у* = 0.5%. Параметры R<sub>c</sub> и *ду/у* модели цилиндрической области определены на основе данных только группы близко расположенных станций NNET и землетрясений на Ю. Сандвичевых о-вах. Моделирование экспериментальных данных на других станциях с различными величинами силы скоростной аномалии в диапазоне 0.3-0.8% позволяет сделать вывод об её универсальном характере, так как она позволяет удовлетворительно согласовать измеренные невязки дифференциальных времен пробега как под Африкой, так и под Австралией. Таким образом, введенная цилиндрическая аномалия скорости носит глобальный характер и может рассматриваться как альтернатива анизотропии внутреннего ядра. Вместе с тем, реальная модель. по-видимому, представляет собой комбинацию рассмотренных предельных моделей, включающих только анизотропию или только тангенциальный цилиндр.

Раздел 3.2 представляет результаты анализа уникальных сейсмических данных, которые зондируют ограниченную область внутреннего ядра Земли под Юго-Восточной Азией и Австралией в квази-полярной и квази-экваториальной плоскостях посредством плотного пучка сейсмических трасс. Проводится анализ дифференциальных времен пробега РКР<sub>ВС</sub> и РКР<sub>DF</sub> в диапазоне эпицентральных расстояний от 145° до 155°. Карта 292 полярных (углы 26° < ٤ < 33° и 2° < ٤ < 15°) и 133 экваториальных (44° <  $\xi$  < 65°) трасс во внутреннем ядре приведена на рис. 3-2-1. Точки входа и выхода во внутреннее ядро для пересекающихся полярных и экваториальных лучей РКР<sub>DF</sub> распределены по площади порядка 800 × 1200 км (рис. 3-2-2). Соответствующие точки поворота РКР<sub>DF</sub> простираются преимущественно в северо-восточном направлении, причем существенная их часть (как полярных, так и экваториальных) локализована в небольшом объеме 200 × 400 × 200 км. Максимальное перекрытие полярных и экваториальных трасс наблюдается для данных ЛАПНЕТ. Дифференциальные времена пробега измерялись между пиками максимальных амплитуд волновых форм BC и DF (см. пример на рис. 3-2-3). Необходимо заметить, что использование кросс-корреляции на таких высококачественных данных представляется излишним, так как максимальная ошибка вследствие частотной зависимости измеряемых волновых форм не превышает 0.1 сек, что представляется реалистичной оценкой ошибки измерений.



Рис. 3-2-1. Карта с проекциями на дневную поверхность полярных (слева) и экваториальных (справа) сегментов лучей PKP<sub>DF</sub> во внутреннем ядре Земли. Треугольники обозначают расположение сейсмических станций и групп, звёзды – эпицентры проанализированных событий. Треугольники в местах точного расположения Антарктических станций LONW и P061 на широтах -81.3° и -84.5°, соответственно, выходят за южную географическую границу карты. Кружки обозначают абсолютные невязки дифференциальных времён пробега PKP<sub>BC</sub>–PKP<sub>DF</sub> и нанесены в эпицентрах соответствующих точек поворота PKP<sub>DF</sub> во внутреннем ядре. Радиусы кружков на полярных трассах пропорциональны абсолютному значению невязки согласно шкале в верхнем правом углу левой панели.

Результат применения мантийных поправок для двух моделей к данным ЛАПНЕТ изображен на рис. 3-2-5. Как видно, обе модели не обеспечивают снижение разброса данных. Также видно, что основной эффект первой модели (авторы Янг и Ткальчич) состоит в добавлении константы к каждому значению невязки, в то время как поправки МІТР08 в основном незначительны. Это подтверждается статистикой полученных поправок (см. табл. 3-2). Например, средние значения поправок составили (0.56 ± 0.16) с и (0.009 ± 0.010) с соответственно для первой и второй модели. При этом, общая картина распределения невязках около эпицентральных расстояний 151° и 153.5°. Первый скачко был сглажен мантийными поправками МІТР08, а второй — поправками, рассчитанными для первой модели.



Рис. 3-2-2. Карта с дугами большого круга, соответствующими проанализированным трассам PKP<sub>DF</sub> во внутреннем ядре. Экваториальные трассы нанесены зелёным, полярные – рыжим (данные сети LAPNET) и желтым (SYO, SNAA). Треугольники соответствуют эпицентрам экваториальных точек поворота PKP<sub>DF</sub> во внутреннем ядре. Кружки обозначают абсолютные невязки дифференциальных времён пробега PKP<sub>DF</sub> и нанесены в эпицентрах соответствующих точек поворота PKP<sub>DF</sub> во внутреннем ядре. Радиусы кружков на полярных трассах пропорциональны абсолютному значению невязки.

Проведенные оценки показывают, что применение мантийных поправок ведет к существенно сходному эффекту, за исключением систематического полусекундного сдвига, обусловленного применением первой модели. Такой сдвиг может быть обусловлен более низкой сейсмической скоростью в нижних трехстах километрах первой модели. Такая более медленная мантия замедляет обе ветви РКР и соответственно увеличивает дифференциальную невязку BC – DF по сравнению с более быстрой нижней мантией модели MITP08. Вследствие вышеизложенного дальнейший анализ невязок осуществлялся с применением модели MITP08, в рамках которой были рассчитаны все мантийные поправки и получена база данных абсолютных невязок дифференциальных времен пробега PKP<sub>BC</sub> – PKP<sub>DF</sub>.



Рис. 3-2-3. Монтаж вертикальных составляющих записи события на Оклендских о-вах от 30/09/2007 в 09:47:53.41 (параметры очага: 49.1704 ю.ш., 164.4230 в.д., глубина 18 км). Исходные записи широкополосных вертикальных каналов получены со станций группы ЛАПНЕТ (LAPNET). Код каждой станции – справа.



Рис. 3-2-5. Зависимость абсолютных дифференциальных времён пробега PKP<sub>BC</sub>–PKP<sub>DF</sub> (*т*<sub>mea</sub> – *τ*<sub>ak135</sub> + *т*<sub>man</sub>) в секундах от эпицентрального расстояния в градусах (Δ). Черные кружки – невязки PKP до учёта мантийных поправок, белые кружки – с учетом поправок по модели MITP08, крестики – по модели (Young et al. 2013).

Таблица 3-2. Сравнительная статистика мантийных поправок (*т*<sub>man</sub>) для 81 трассы сети LAPNET для двух томографических моделей Young Et Al. И MITP08.

	Young Et Al.	MITP08
Среднее	0.5617	0.0095
Стандартное отклонение	0.1563	0.0902
Стандартная ошибка среднего	0.0179	0.0100
Нижн. 95% довер. интервал среднего	0.5259	-0.0103
Верхн. 95% довер. интервал среднего	0.5974	0.0296
Дисперсия	0.0244	0.0081
Смещенная сумма квадратов	25.8068	0.6588
Несмещенная сумма квадратов	1.8319	0.6513
Коэффициент вариации	0.2783	9.3458
Среднее абсолютное отклонение	0.1275	0.0670
Минимум	0.239	-0.177
Медиана	0.5895	-0.009
Максимум	0.879	0.273

Получившийся банк относительных дифференциальных времен пробега учитывает эффекты распространения через все оболочки Земли за пределами его ядра и таким образом отражает только его влияние. В то же время ядро Земли является двухкомпонентной системой жидкого и твердого ядра, каждое из которых может оказывать влияние на измеряемые времена пробега. В разделе 3-1 было показано теоретически и были представлены экспериментальные измерения, свидетельствующие о том, что невязки РКР могут быть объяснены как посредством введения анизотропии во внутреннем ядре, так и Тэйлоровского цилиндра во внешнем ядре. Там же было показано, что влияние этих двух факторов различимо только в узком диапазоне углов ξ, предопределенных взаимным расположением источника и очага относительно цилиндра. Только в этом диапазоне углов  $\xi$  эффекты воздействия на РКР<sub>DF</sub> и РКР<sub>BC</sub> существенно различны, что приводит к очень специфическому характеру зависимости невязок от 5. Анализируемый в данном разделе набор данных не соответствует такому узкому диапазону углов и не позволяет провести дискриминацию эффектов внешнего и внутреннего ядра. В связи с чем собранные данные проинтерпретированы в терминах скоростных вариаций внутреннего ядра Земли. Зависимость т от  $\xi$  изображена на рис. 3-2-6. Невязки дифференциальных времен пробега РКР в экваториальной плоскости варьируют от слабоотрицательных до 0.8%. Основная их часть располагается не выше уровня 0.5% при среднем значении 0.31% (+0.4 с от прогноза по ak135 по абсолютному значению). Разброс полярных данных больше при максимальном значении свыше 1.2%. Обнаруженные существенные вариации не могут являться следствием выраженного латерального градиента скоростей, так как анализируемый набор данных включает измерения параметров волновых форм, рефрагированных в двух различных направлениях в одной и той же области внутреннего ядра под Юго-Восточной Азией. При этом обнаруженный разброс в полярных данных (перпендикулярно предполагаемому градиенту) оказался в несколько раз больше, чем для экваториальных данных (вдоль градиента).



Рис. 3-2-6. Набор данных по дифференциальным невязкам времени пробега PKP<sub>BC</sub>–PKP<sub>DF</sub> (т) нанесённый против угла между лучом PKP<sub>DF</sub> во внутреннем ядре с осью вращения Земли (ξ). Различные составляющие набора данных и легенда их обозначений – в верхнем правом углу рисунка.

Наконец, как видно из рис. 3-2-6, представленные данные не согласуются с простой моделью цилиндрической анизотропии. Анализ пространственного распределения невязок позволяет выделить область повышенных значений на глубинах свыше 225 км в диапазоне 18° – 23° с. ш. и 125° – 135° в. д. (рис. 3-2-12). Полярные невязки без увеличенных данных на ЛАПНЕТ варьируют от практически нулевых значений до +0.8% со средним (0.4 ± 0.2)% по 174 точкам. Компактный объем более высоких значений анизотропии зондируется 33 полярными лучами с соответствующими невязками от 0.88% до 1.24% со средним (1.10 ± 0.09)%. Измерения в этом объеме соответствуют нескольким событиям, что устраняет из рассмотрения фактор сейсмического источника. Хотя на рис. 3-2-12 невязки дифференциального времени пробега привязаны к соответствующим точкам поворота РКР<sub>DF</sub>, анизотропный эффект складывается в течение всего времени пробега по внутреннему ядру или, по крайней мере, его анизотропной части. Чтобы провести

прямое сравнение данных в обеих квазиплоскостях. были выбраны 20 экваториальных трасс, которые пролегают в том же самом регионе внутреннего ядра, что и 33 полярные трассы, а также имеют близкие к полярным точки поворота. Среднее значение по 20-ти выбранным экваториальным трассам составило (0.20 ± 0.15) %. Таким образом, полярные и экваториальные невязки, измеренные в одном и том же регионе внутреннего ядра различаются в 5.5 раз. Этот факт указывает на то. что скорость распространения продольных сейсмических волн в зондируемом объеме внутреннего ядра зависит от направления, что является необходимым условием присутствия анизотропии. Кроме того, если наблюдаемый эффект обусловлен анизотропией, то ее сила в анализируемом объеме внутреннего ядра существенно больше. Оценка силы анизотропной аномалии проводилась при допущении, что быстрая ось анизотропии совпадает с осью вращения Земли и составила порядка 2%. Субширотное сечение аномалии представлено на рис. 3-2-15. Для повышения надёжности полученная модель была верифицирована с помощью оценки синтетических волновых форм PKP<sub>BC</sub> и PKP<sub>DF</sub> (рис. 3-2-17), которые позволяют согласовать измеренные времена пробега.



Рис. 3-2-12. Полярные невязки, измеренные на LAPNET (зелёные шары) и все экваториальные невязки (красные шары) совместно изображённые в соответствующих точках поворота PKP<sub>DF</sub> во внутреннем ядре Земли. Зелёные и красные точки на нижней плоскости – проекции шаров на сферу радиуса 420 км под границей внутреннего ядра.



Рис. 3-2-15. Вертикальное субширотное сечение анизотропной структуры в верхней части твёрдого ядра Земли вдоль профиля, зондируемого данным сети LAPNET.



Рис. 3-2-17. Монтаж трасс синтетических сейсмограмм, наложенный на исходные записи станций LAPNET (пунктир) рисунка 3-2-3. Чёрные сейсмограммы соответствуют синтетическим волновым формам РКР для полярной ориентации трассы, включающей предполагаемую аномалию анизотропии во внутреннем ядре Земли при ξ ≈ 30°. Серые сейсмограммы соответствуют синтетическим РКР<sub>DF</sub>, рассчитанным для стандартной модели ak135.

Анализ дифференциальных амплитуд внутри и вне локализованной аномалии также подтверждает анизотропный характер обнаруженной аномалии. В качестве

референсной модели была использована модель, опирающаяся на результаты анализа времен пробега. На экваториальных трассах дифференциальные времена пробега хорошо согласуются с модифицированной скоростной моделью внутреннего ядра E1 IYu & Wen 2006b]. Отклонение экспериментальных дифференциальных времен пробега от рассчитанных по модели E1 составляет -0.13 ± 0.21 с. Однако, как видно из рис. 3-2-18, отношения амплитуд волн РКР рс/РКР с. рассчитанные по синтетическим сейсмограммам для этой модели (штриховая линия). плохо согласуются с экспериментальными данными. Вместе с тем показанные на рис. 3-2-18 сплошными линиями зависимости отношения амплитуд в пределах погрешности экспериментальных данных дают хорошее согласие с ними. Эти зависимости были получены по синтетическим сейсмограммам для измененных параметров одномерной модели Е1 — радиуса внутреннего ядра и коэффициента поглощения в нем. По сравнению с Е1 радиус уменьшен на 2 км и составляет 1219.5 км, а значения добротности продольных волн Q = 100 для h < 350 км и Q = 400 для 350 < h < 450 км, где h — глубина под границей внутреннее-внешнее ядро Земли. Из рис. 3-2-18 следует, что отношение амплитуд (светлые кружки) в области аномальных значений скорости на экваториальных трассах превосходит в 1.5-2 раза соответствующие значения для полярных трасс (серые кружки).



Рис. 3-2-18. Зависимость амплитудного отношения PKP<sub>DF</sub>/PKP<sub>BC</sub> от эпицентрального расстояния. Штриховая линия – отношение амплитуд из синтетических сейсмограмм, рассчитанных для скоростной модели E1 с Q = 400 для всех глубин проникновения луча во внутреннее ядро. Сплошная черная – E1 с Q = 100 для фокальной глубины 550 км (соответствует землетрясениям на Фиджи). Серая – E1 с Q = 100 для фокальной глубины 14 км (соответствует землетрясениям на Оклендах). Светлые кружки – измеренные отношения для землетрясений на Фиджи, серые – на Оклендских о-вах.

Таким образом, два признака — различие в дифференциальных временах пробега и дифференциальных отношениях амплитуд, указывают на то, что обна-

руженная аномалия скорости является областью анизотропии. При этом более высокой скорости распространения волн соответствует большее поглощение. Более того, прилегающие к этой области соседние участки такими различиями не обладают, что позволяет говорить о наличии выделяющегося анизотропного блока в восточном полушарии внутреннего ядра Земли.

Глава 4 посвящена исследованию структурных особенностей кровли внутреннего ядра Земли по данным коды PKiKP. В ходе исследования были обработаны записи систем группирования KURK, FINES, YKA, ASAR и PDAR, которые зарегистрировали китайские взрывы, а также сейсмические данные, интегрированные в группу источников (близко проведённые в течение нескольких лет взрывы на Семипалатинском полигоне, зарегистрированные трехкомпонентными станциями BRVK, KEV, COL и LON). Карта — на рис. 4-1. Кода PKiKP имеет низкую интенсивность, не наблюдается на огибающей единичного вертикального канала и видна только на огибающих (среднеквадратичных или Гильберта) суммарных трасс, полученных в результате суммирования каналов сейсмической группы. Обработка записей систем группирования предназначена для накопления энергии, рассеянной во внутреннем ядре. Накопление осуществляется посредством линейного или



Рис. 4-1. Карта взаимного расположения взрывов и мест регистрации с дугами большого круга. STS – Семипалатинский полигон, LNTS – полигон Лобнор, трёхкомпонентные станции BRVK, KEV, COL, LON. Сейсмические группы: ASAR, FINES, KURK, PDAR, YKA. Белые точки соответствуют проекциям точек отражения PKiKP от внутреннего ядра Земли на дневную поверхность.

фазо-взвешенного суммирования отдельных каналов с внесением задержек на теоретическую медленность PKiKP, рассчитанную в рамках стандартной модели Земли. В данном исследовании в качестве стандартной модели использовалась модель PREM. Теоретическая медленность сигналов, рассеянных на неоднородностях кровли внутреннего ядра, невысока и близка к медленности PKiKP. В связи с этим выравнивание каналов группы на вступление PKiKP и последующее суммирование позволяет накапливать энергию колебаний, сформировавшихся в кровле внутреннего ядра. Использование линейного суммирования позволяет избежать внесения искажений в волновые формы, которые могут быть затем использованы для оценки амплитуд. Работы по обнаружению и изучению коды PKiKP указывают на ее высокочастотный состав. В этой связи групповая обработка применялась к вертикальным составляющим каналов группы, отфильтрованных в полосе частот 2–4 Гц нульфазным фильтром Баттерворта 4-го порядка. Анализируемые огибающие были получены посредством применения преобразований Гильберта к суммарным трассам.



Рис. 4-4. Огибающие Гильберта и восстановленные формы коды. Название станции (группы) указано в правом верхнем углу. Пунктир соответствует уровню предшествующего сейсмического шума.

Восстановление формы коды РКіКР из огибающей Гильберта суммарной трассы проводилось с помощью  $\alpha$ -шейп *k-ого* порядка. Девять восстановленных форм и исходные огибающие изображены на рис. 4-4. Результаты оценки Q<sub>C</sub> посредством аппроксимации восстановленных код приведены в таблице 4-2. Средняя оценка Q<sub>C</sub> по приведённым данным составляет 447±43. Это немного отличается в меньшую сторону от ранее опубликованных оценок, составивших от 500 до 600. Вместе с тем, как указывалось ранее, базовый механизм формирования коды РКіКР является предметом научной дискуссии, особенно в части вкладов рассеяния и диссипации. В этой связи величина Q по коде РКіКР, как правило, используется для получения производных оценок физических параметров твердого ядра Земли. При этом, в терминах вариации этих параметров, добротность в пределах от 300 до 600 позволяет согласовать достаточно широкий спектр моделей рассеивающей среды в кровле внутреннего ядра. Так, полученная в данной работе величина Q<sub>c</sub> ~ 450 может соответствовать неоднородной среде с вариациями скорости порядка 1–3% и характерным размером рассеивающей неоднородности 1–4 км. Данный диапазон параметров неоднородностей на базе уточнённой величины добротности согласуется с другими исследованиями.

Полигон	Станция	Расстояние (°)	Q <sub>c</sub>
STS	BRVK	6.2	514
LNTS	KURK	11.5	516
STS	KEV	31.3	449
LNTS	FINES	41.8	407
STS	COL	59.9	448
LNTS	YKA	73.8	455
LNTS	ASAR	77.2	413
STS	LON	82.1	423
LNTS	PDAR	94.2	398

Таблица 4-2. Результаты оценки добротности в кровле внутреннего ядра Земли.

Раздел 4.3 содержит описание структурных моделей и механизмов, приводящих к рассеянию волн в кровле внутреннего ядра Земли, а раздел 4.4 — его динамических процессов. Совместный анализ информации этих разделов показывает, что наиболее универсальным объяснением присутствия структурных неоднородностей в кровле внутреннего ядра может служить разупорядоченность анизотропных кристаллов железа с гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой, слагающих эту область. Такая структура, характерная для молодого ядра, позволяет объяснить обнаруженные особенности волнового поля в рамках целого ряда актуальных механизмов его роста, предложенных в минералогии и геофизике.

#### Заключение

В диссертационной работе представлены следующие новые результаты: > невязки дифференциального времени пробега волн с точкой поворота во внутреннем и внешнем ядре вблизи границы твёрдого ядра проявляют специфическую ковшеобразную форму зависимости от угла между осью вращения Земли и направлением сейсмического луча в точке максимального погружения во внутреннее ядро; предложен класс моделей Земли с аномалией скорости продольных волн порядка 0.3 – 0.8% в цилиндрической области радиусом 1375 км во внешнем ядре, для которого теоретические невязки дифференциальных времен пробега хорошо согласуются с экспериментальными;

> распространение сейсмических волн во внутреннем ядре Земли под Юговосточной Азией указывает на неоднородный характер анизотропии в этом регионе с присутствием существенных локальных вариаций; в слабоанизотропном (менее 0.1%) восточном полушарии твёрдого ядра обнаружена локализованная неоднородность, характеризующаяся высоким уровнем анизотропии (более 2%), на глубинах более 170 км под его границей между 18° и 23° с. ш. и 125° в. д.;

≻ кровля внутреннего ядра, прилегающая к имеющему мозаичный характер переходу внутреннее-внешнее ядро Земли, является областью со структурой, формирующей интенсивную коду отражённых волн. Добротность кровли твёрдого ядра по коде отражённых продольных волн составляет порядка 450, а характерный размер структурных неоднородностей не превышает нескольких километров.

Анализ динамических сценариев формирования и развития обнаруженных разномасштабных неоднородностей структуры ядра показывает, что они являются следствием и отражают особенности процесса затвердевания внутреннего ядра Земли из расплава жидкого внешнего: (i) цилиндрическая аномалия скорости отражает области внешнего ядра с различным динамическим режимом, характеризующиеся своими конвективными движениями, (іі) ограниченная область внутреннего ядра под Юго-восточной Азией, характеризующаяся повышенным уровнем анизотропии скорости распространения сейсмических волн, указывает на локальную смену кристаллографической структуры железа, соответствующую локализованной аномалии затвердевания внутреннего ядра в предыдущие эры его развития, (iii) кровля внутреннего ядра Земли с её высоким уровнем рассеяния сейсмических волн является областью с низкой упорядоченностью анизотропных кристаллов железа, характерной для молодого ядра. Интерпретация в терминах процесса затвердевания позволяет проследить взаимосвязь неоднородностей различных оболочек Земли и получить взаимосогласованные оценки их параметров. Сформулированный в настоящей диссертации подход к анализу разномасштабных неоднородностей ядра Земли на базе единого процесса формирования текстуры внутреннего ядра и конвективной картины внешнего подразумевает использование единой модели и ограничений на макро-параметры состояния вещества в, как минимум. 600-километровой зоне. прилегающей к границе твёрдого ядра. Таким образом, представленная диссертация предлагает решение крупной научной задачи связи в единое целое неоднородностей различного масштаба с динамическими процессами комплексной системы внутреннее – внешнее ядро Земли и даёт новые количественные оценки соответствующих параметров.

Важный методический результат работы состоит в том, что разработан и апробирован новый метод аппроксимации формы сейсмической коды с использованием инновационного обобщения одного из классических инструментов вычислительной геометрии — *а*-шейп *n*-го порядка. Новый метод позволяет получать устойчивые оценки временных и амплитудных параметров сейсмической коды. Было продемонстрировано успешное применение алгоритма к измерению общей длительности коды слабых локальных событий. Новый алгоритм основан на понятии α-шейп — одном из хорошо зарекомендовавшем себя в различных областях инструменте восстановлении формы. В ходе испытаний на теоретических и практических наборах данных было продемонстрировано, каким образом новый инструмент обеспечивает робастную непараметрическую оценку формы облака точек. представленного в виде линейной последовательности. Была установлена количественная связь погрешности оценок формы с основными параметрами волнового поля. что необходимо для оценки статистической достоверности результатов. Одним из полезных свойств алгоритма является то, что он не ориентирован на какойлибо специфический критерий качества, и при использовании в каком-либо конкретном приложении пользователь может выбирать любую меру качества по своему усмотрению. α-шейп *k-ого* порядка может применяться к широкому спектру сейсмологических задач, таких как оценка локальной магнитуды или сейсмического затухания по данным коды, а также для исследований возможных временных вариаций.

Совокупность направлений, в которых могут вестись дальнейшие исследования, связана как с расширением возможностей экспериментальных данных, так и построением комплексных моделей с привлечением информации из смежных областей. Для продвижения в деле расширения возможностей экспериментальной базы прежде всего необходимо привлекать данные высокоширотных станций, регистрирующих события с квази-полярными трассами распространения. Именно такие данные наиболее чувствительны к эффектам, связанным с текстурой внутреннего ядра Земли. Отдельной задачей является обнаружение волновых форм РКіКР на расстояниях докритического отражения в различных регионах Земного шара. Эти новые данные позволят существенно повысить доверие к вновь созданным моделям ядра Земли, которые, предпочтительно, также будут учитывать ограничения на ключевые физические параметры, полученные, например, из прямых измерений свойств железа при сверхвысоких температурах и давлениях или расчетных квантово-механических и квантово-химических моделей, построенных на фундаментальных законах физики ab initio («первых принципах»). Именно такой подход, как показывают результаты, полученные в настоящей диссертации, может обеспечить непротиворечивое и достоверное описание динамических процессов и структуры комплексной системы внутреннее – внешнее ядро Земли.

# Полный список научных работ, опубликованных по теме диссертации (в алфавитном порядке, без тезисов докладов на конференциях)

1. Адушкин В. В., Ан В. В., Овчинников В. М., Краснощеков Д. Н. О скачке плотности на внутренней границе земного ядра по наблюдениям волн РКіКР на расстояниях около 6°. *Доклады Академии Наук*, т. 354, № 3, 382–385, 1997.

- Каазик П.Б., Краснощеков Д.Н., Овчинников В.М. О коде волны РКіКР на докритических расстояниях. Динамические процессы во взаимодействующих геосферах. Сборник научных трудов ИДГ РАН, 152–160, М: ГЕОС, 435 с., 2006.
- Каазик П.Б., Краснощеков Д.Н., Овчинников В.М. Локальная аномалия скорости во внутреннем ядре под Юго-Восточной Азией: неоднородность или анизотропия. Динамические процессы в геосферах, Сборник научных трудов ИДГ РАН, Выпуск № 6, 144–154, М: ГЕОС, 168 с., 2014.
- Каазик П.Б., Краснощеков Д. Н., В. М. Овчинников В.М. Анизотропный блок во внутреннем ядре под Юго-Восточной Азией. *Доклады Академии Наук*, т. 465, № 1, 91–95, 2015.
- Краснощеков Д.Н., Каазик П.Б., Овчинников В.М., Структура внешней части твердого ядра Земли по данным коды волны РКіКР. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. ISBN 5-9900216-5-8. С. 84-88, Обнинск. ГС РАН: 2006.
- Краснощеков Д.Н., Овчинников В.М., Каазик П.Б. Свойства волн, докритически отраженных от границы внутреннего ядра Земли. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных, с. 121–125, ISBN 978-5-9900216-8-6, Обнинск: ГС РАН, 2007.
- Краснощеков Д.Н., Овчинников В.М. Тонкая структура внешней части твердого ядра Земли по наблюдениям коды волны РКіКР. Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы. Сборник научных трудов ИДГ РАН, 133–144, М: ГЕОС, 272 с., 2008.
- Краснощеков Д.Н., Овчинников В.М. Отражение динамических процессов ядра Земли в сейсмологических данных. Геофизика межгеосферных взаимодействий, 129–141, М: ГЕОС, 372 с., 2008.
- Краснощеков Д.Н., Овчинников В.М. О скачке плотности на границе внутреннее – внешнее ядро Земли и локации очага по динамическим характеристикам волн РКіКР. Проблемы взаимодействующих геосфер, Сборник научных трудов ИДГ РАН, 21–28, М: ГЕОС, 368 с., 2009.
- 10. Краснощеков Д.Н., Овчинников В.М. О применении динамических характеристик волн РКіКР к изучению глубинного строения Земли и определению параметров сейсмического источника. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. ISBN 978-5-903258-07-9, с. 86–92. Обнинск: ГС РАН, 2009.
- 11. Овчинников В.М., Краснощеков Д.Н., Каазик П.Б. Новое представление о границе между внешним и внутренним ядром Земли. *Доклады Академии Наук*, т. 417, № 3, с. 289–292, 2007.
- 12. Овчинников В.М., Каазик П.Б., Краснощеков Д.Н. Особенности скоростного строения земного ядра под Африкой. Проблемы взаимодействующих геосфер, Сборник научных трудов ИДГ РАН, 29–41, М: ГЕОС, 368 с., 2009.

- 13. Овчинников В.М., Каазик П.Б., Краснощеков Д.Н., О возможной аномалии скорости во внешнем ядре Земли. *Доклады Академии Наук*, т. 433, № 6, с. 813– 816, 2010.
- Овчинников В.М., Каазик П.Б., Краснощеков Д.Н. О возможной альтернативе анизотропии скорости во внутреннем ядре Земли. Динамические процессы в геосферах, Сборник научных трудов ИДГ РАН, 45–54, М: ГЕОС, 318 с., 2010.
- 15. Овчинников В.М., Каазик П.Б., Краснощеков Д.Н. Слабая аномалия скорости во внешнем ядре из сейсмических данных. *Физика Земли*, № 3, с. 34–45, 2012.
- Krasnoshchekov D.N., Kaazik P.B., Ovtchinnikov V.M. Seismological evidence for mosaic structure of the surface of the Earth's inner core. *Nature* vol. 435, p. 483– 487, 2005.
- Krasnoshchekov D., Kaazik P., Kozlovskaya E., Ovtchinnikov V. Seismic structures in the Earth's inner core below Southeastern Asia, *Pure and Applied Geophysics*, (*в печати*), доступна онлайн на сайте журнала и издательства Шпрингер по ссылке: <u>http://link.springer.com/article/10.1007/s00024-015-1207-6</u>, 2016.
- Krasnoshchekov D.N., Ovtchinnikov V.M. Upper Solid Core's Fabric Constrained by PKiKP Coda Observations. *Problems of Geocosmos*, ed. V.N. Troyan, M. Hayakawa. ISBN 978-5-9651-0303-4. p. 421–428, 2008.
- Krasnoshchekov D., Polishchuk V. Robust curve reconstruction with *k*-order *α*-shapes. *IEEE Shape modeling*, vol. 4, p. 279–280, doi: 10.1109/SMI.2008. 4548006, 2008.
- Krasnoshchekov D. N., Polishchuk V., Vihavainen A. Shape approximation using k-order alpha-hulls. SoCG '10 Proceedings of the 2010 annual symposium on Computational geometry. p. 109 – 110, DOI: 10.1145/1810959.1810978, 2010.
- 21. Krasnoshchekov D., Polishchuk V. k-Order alpha-hulls and alpha-shapes. *Information Processing Letters*, vol. 114, № 1–2, p. 76-83, 2014.
- 22. Nikkilä M., Valentin Polishchuk and Dmitry Krasnoshchekov. Robust estimation of seismic coda shape, *Geophysical Journal International*, vol. 197, № 1, p. 557–565, 2014.
- 23. Ovtchinnikov V.M., Kaazik P.B., Krasnoshchekov D.N. On velocity anomaly in the Earth's outer core. *Problems of Geocosmos*, ed. V.S. Semenov, ISBN 978-5-9651-0504-5, 471 р. УПЛ 61.75, vol. 8, p. 381–387, SPb: 2010.
- В том числе:

- 11 статей из Перечня ВАК (*выделены жирным курсивом*) согласно Письму Департамента аттестации научных и научно-педагогических работников от 01.12.2015 № 13-6518 «О Перечне рецензируемых научных изданий»

- 14 статей, проиндексированных в РИНЦ: пп. 1, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 13, 15, 16, 19, 20, 21, 22.