

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Краснощекова Дмитрия Николаевича** «Разномасштабные неоднородности глубинных оболочек Земли как отражение динамических процессов комплексной системы внутреннее - внешнее ядро», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Тема диссертационной работы Краснощекова Д. Н. является достаточно необычной для современных сейсмологических исследований в России, да и на всем «геофизическом» постсоветском пространстве. Например, в странах Центральной Азии такое направление, как изучение ядра Земли, совершенно отсутствует в современных исследованиях сейсмологов, приоритет отдается направлениям, непосредственно связанным с имеющими для этих стран практическое значение исследованиями по оценке сейсмической опасности и снижению сейсмического риска. Факт скромного места исследований ядра Земли в России нашел отражение в списке использованных источников, где работы русскоязычных авторов занимают менее 5 % наименований библиографии. Считаю выбор направления исследований автора очень интересным, важным и перспективным с точки зрения изучения фундаментальных основ межгеофизических связей и использования их в междисциплинарных исследованиях.

Диссертация представляет собой экспериментальную работу, основанную на огромном объеме измерений и интерпретации, произведенным по волновым формам, зарегистрированным отдельными трехкомпонентными сейсмическими станциями и системами группирования. Эти данные служат основой для глубокого теоретического анализа в отношении различных особенностей структуры ядра Земли, а также доказательствами правоты полученных выводов. Для получения данных по отраженным и рефрагированным волнам, связанным с отдельными регионами ядра Земли, потребовались цифровые данные глобальных сетей наблюдения. В последние десятилетия международные системы сейсмических наблюдений получили бурное развитие как за счет ввода в строй новых станций, так и за счет улучшения и унификации аппаратурных характеристик, повышающих чувствительность станций и расширяющих динамический диапазон регистрации. Решающее значение для ученых имеет доступность данных в единых международных форматах, которую обеспечивают международные центры данных. Для зондирования определенных регионов ядра Земли появились возможности целенаправленного выбора необходимой конфигурации станций и источников для выявления локальных неоднородностей структуры, а также мониторинга их проявления в

пространстве и времени. Оппоненту очень приятно отметить, что большой объем использованных данных относится к казахстанским сейсмическим группам и станциям, созданным для задач контроля ядерных испытаний, успешно работающим в составе глобальных сетей. Именно совместное использование цифровых сейсмических данных станций, расположенных в разных странах, позволило расширить изучаемую область ядра Земли, а привлечение к анализу более слабых событий дало возможность изучения процессов в ядре Земли в более широком временном диапазоне.

Для обработки и интерпретации результатов измерений автором применяются как стандартные подходы, так и инновационные методы, ранее не используемые в сейсмологической практике. Например, метод, заимствованный из классической и вычислительной геометрии *альфа-шейп*, позволяющий устранить ряд трудоемких рутинных процедур, что очень важно для создания автоматизированных систем обработки.

Современные высококачественные экспериментальные данные и инновационные методы обработки явились той базой, которая позволила автору получить новые фундаментальные знания, относящиеся к пониманию ключевого процесса в «жизнедеятельности» комплексной системы внутреннее – внешнее ядро Земли. Таким процессом является затвердевание на внутренней границе системы. Следствием этого процесса являются обнаруженные автором разномасштабные неоднородности жидкого и твердого ядра. Актуальность работы по сейсмическим данным заключается в том, что полученные в ней фундаментальные выводы, способствуют развитию знаний и устранению противоречий в смежных областях геофизики, а также физики, геохимии, минералогии и других науках для построения всестороннего описания структуры и динамики ядра Земли. Все это соответствует основному вектору развития современной геофизики, направленному на усиление междисциплинарных исследований и изучение динамики процессов отдельных оболочек.

Диссертация изложена на 212 листах и включает введение, четыре главы, заключение и список используемой литературы. Проиллюстрирована 58 рисунками, содержит 6 таблиц, библиографию из 275 наименований.

Во введении сформулированы цели и направления исследований, представлены методы исследований и защищаемые научные положения. Описана научная новизна и личный вклад автора. Кратко приводятся сведения об апробации работы в научной печати и на конференциях. Все приведенные в автореферате утверждения соответствуют тексту диссертационной работы.

Первая глава диссертации «Структура и свойства ядра Земли по литературным данным» является подробным аналитическим обзором исследований по данной тематике. Обзор охватывает период более, чем 100 лет, со времени открытия Олдхэмом ядра Земли в 1906 г. до исследований последних лет (2012-2013 г. г.). Глава читается как интереснейший очерк о развитии представлений о моделях Земли, генерировании новыми экспериментальными данными новых теоретических разработок в разных областях наук о Земле, наличии, несмотря на безусловный прогресс, нерешенных вопросов и противоречий. В конце главы автором ставятся задачи, которые можно решить с использованием новых сейсмических данных, что позволит устранить ряд неопределенностей в смежных геофизических дисциплинах.

Вторая глава «Методические основы анализа волновых форм, связанных с ядром Земли» содержит описание различных методических подходов, которые используются автором для 1) надежного обнаружения слабых волновых форм PKiKP и выделения слабой коды PKiKP, 2) оценки затухания сейсмических волн во внутреннем ядре по коде PKiKP.

В начале главы детально представлена номенклатура используемых волн, а также ожидаемые параметры и зависимости измерений телесеismicкого поля в соответствии со стандартными моделями Земли и моделями с цилиндрической анизотропией скорости распространения сейсмических волн во внутреннем ядре. Главный момент методики – это использование свойств объемных волн на поверхности для оценки скоростей и затухания на глубинах, соответствующих ядру Земли. Ключевыми инструментами исследования являются дифференциальные характеристики волн с нижней точкой рефракции в ядре Земли и коды слабых отражений от границы внутреннее-внешнее ядро. Последовательно описаны используемые инструменты исследования – рефрагированные волны, отраженные волны, коды. Глава преподносится как методические основы анализа волновых форм, но в ней присутствуют и результативные экспериментальные данные концепции мозаичной поверхности внутреннего ядра Земли. Эти результаты вполне могли бы быть описаны более подробно и стать одним из ярких достоинств диссертации и выделены в отдельную главу, тем более, что эти данные получили признание геофизического сообщества в России и за рубежом.

Безусловным достижением автора является раздел 2.3, в котором приводится инновационный метод анализа сейсмической коды. Автор формулирует, обосновывает и реализует предлагаемый метод на синтетических и реальных данных. В основе метода – инструменты вычислительной геометрии для обработки пространственных данных. Применение определенного диссертантом понятия *α -шейп k -ого порядка* позволяет

восстановить форму сейсмической коды из огибающей Гильберта без сглаживания. Краснощеков Д. Н. предлагает устранить процедуру усреднения огибающей, результаты которого существенно зависят от субъективного выбора длительности скользящего окна. Новый подход позволяет восстановить форму коды за счет анализа и устранения быстрых вариаций в пространстве «время – амплитуда», соответствующих предшествующему сейсмическому шуму. Автор демонстрирует практические результаты работы алгоритма при создании локальной шкалы магнитуд для Фенноскандии. В принципе, разработанный и реализованный до уровня автоматизированного определения формы и длительности коды метод может найти практическое использование и в других задачах сейсмологии, требующих многочисленных рутинных операций с цифровыми волновыми формами. В районах Центральной Азии было бы интересно использовать его при анализе поля поглощения по короткопериодной коде S – волн для выделения зон подготовки очагов сильных землетрясений, а также при разработке классификации очагов по магнитудам в новых районах, где неизвестны региональные законы затухания и отсутствуют калибровочные кривые.

Изложенный формализм преобразований использует свойство аддитивности сейсмической коды, справедлив в рамках евклидовой геометрии для линейной метрики пространства любой размерности. Метод прошел апробацию на нескольких конференциях и был опубликован в математическом журнале издательства Elsevier.

Изложенные во 2 главе материалы относятся к **пятому** защищаемому положению, они убедительны, достаточно хорошо подкреплены результатами тестирования на синтетических и реальных данных. Новый метод позволяет получать устойчивые оценки временных и амплитудных параметров сейсмической коды.

Третья глава «Результаты наблюдений волн РКР в экваториальных и полярных плоскостях» содержит данные, позволившие автору сформулировать **два** защищаемых положения. Первое из них базируется на результатах анализа невязок дифференциальных времен пробега и амплитуд волн RKP_{BC} и RKP_{DF} . Такой подход хорошо известен и широко применяется в разных задачах. Автором в разделе 3.1 описаны детали техники измерения дифференциальных времен пробега, обеспечивающей быстрое проведение массовых измерений по записям землетрясений и ядерных взрывов. Все записи приводились к стандартному виду и синхронизировались по волне RKP_{BC} , измерения дифференциальных времен пробега проводились по разнице во времени положения максимальных амплитуд в волнах RKP_{DF} и RKP_{BC} . Также для части записей использовалась техника корреляционного анализа, при которой δT определяется из корреляции формы волн RKP_{DF} и RKP_{BC} . В работе показано, что оба способа дают согласованные величины между собой,

а также соответствуют опубликованным измерениям других авторов. Автор разработал прием внесения поправок в измерения дифференциальных времен пробега за различие расстояний лучей BC и DF в нижней мантии путем использования трехмерных томографических моделей, что повысило точность оценок.

Далее по полученным данным автор предлагает ряд моделей с аномалией скорости в цилиндрической области, которые успешно объясняют обнаруженные особенности (преимущественно относящиеся к зоне ядра под Африкой). Показано, что для объяснения важную роль играет анизотропия во внутреннем ядре, но возможно и исключительно влияние внешнего ядра. Вместе с тем, реальная модель может сочетать свойства двух предельных моделей, включающих только анизотропию или только тангенциальный цилиндр.

Рассматривая возможные динамические сценарии, соискатель интерпретирует обнаруженную скоростную аномалию в терминах Тейлоровского цилиндра, который был предсказан численными моделями геодинамо.

Далее в этой главе анализируются результаты измерений дифференциальных времен пробега и амплитуд для зоны внутреннего ядра под Юго-Восточной Азией. Обнаружена ограниченная область внутреннего ядра, характеризующаяся повышенной скоростью распространения продольных волн и повышенным поглощением. Такие особенности могут быть обусловлены анизотропными свойствами вещества внутреннего ядра Земли в этой области. Автором проведены оценки уровня анизотропии в пределах аномалии порядка 2% и её верхней границы (≈ 170 км под границей внутреннего ядра). Правильность этих оценок подтверждается расчетом синтетических сейсмограмм в рамках модифицированных моделей ak135 и PREM. Обе аномалии (как во внешнем, так и во внутреннем ядре), по мнению автора, связаны с затвердеванием – ключевым процессом, протекающим в зоне перехода внутреннее - внешнее ядро. Чтобы доказать это важное положение, автор анализирует различные факторы, привлекает результаты других исследований. Большое внимание уделяется анализу погрешностей. Так, прямое сравнение измерений дифференциальных невязок времен пробега на одних и тех же записях с данными японских авторов показало, что они практически неразличимы: имеется только смещение оценок, составившее $(0,072 \pm 0,078$ с.). Обнаруженная аномалия в скорости является ограниченной областью (блоком) восточного полушария внутреннего ядра Земли, в пределах которой анизотропные свойства вещества существенно отличаются от её окружения. Такие быстрые изменения в свойствах железа при температуре и давлении в ядре Земли служат признаком локализованной аномалии затвердевания ядра в предыдущие эры его развития.

На основе приведенных в главе 3 экспериментальных данных, теоретического анализа, сопоставления их с независимыми результатами других исследователей, а также моделирования считаю убедительно доказанными оба защищаемых научных положения.

Четвертая глава посвящена изучению структурных особенностей кровли внутреннего ядра Земли по данным коды РКiKP. Первое, что необходимо было сделать, - это подобрать необходимые сейсмические данные для обнаружения волн РКiKP на расстояниях докритического отражения и изучения её коды. В качестве источников использовались подземные ядерные взрывы на известных полигонах Китая и СССР. В качестве регистрирующих систем использовались системы группирования. Благодаря системам группирования имеется возможность повышения энергии, рассеянной во внутреннем ядре, путем суммирования отдельных трасс с учетом задержек на теоретическую медленность волн РКiKP.

Особый интерес вызывает привлечение к анализу данных двух трехкомпонентных станций Кево (KEV) и Боровое (BRVK). Их данные были использованы автором благодаря приему совместной групповой обработки разных записей подземных ядерных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне, произведенных в разные годы в близких местах. Удалось сформировать уникальный набор данных, дающий возможность анализа и сравнения код РКiKP, которые образовались после отражения в одном и том же регионе внутреннего ядра при различных путях распространения в коре, мантии и внешнем ядре.

Для обнаружения коды РКiKP на расстояниях докритического отражения применялась разработанная автором и подробно описанная в главе 2 методика аппроксимации формы коды с помощью *α -шейп k -ого порядка*. Следует заметить, что автор не анализирует весьма важный вопрос о применимости этого инструмента в условиях слабой коды РКiKP. От себя могу сказать, что в качестве аргументов за такую возможность можно привести выводы об определенных минимальных магнитудах по восстановленной коде локального события в главе 2, а также о практическом совпадении фаз спада код РКiKP, сформировавшихся в сходных геофизических условиях отражения на границе внутреннего ядра (рисунок 4-5 главы 4).

По созданной представительной выборке с помощью стандартной методики Аки автором определены значения добротности кровли внутреннего ядра. Средняя оценка Q_c составляет 447 ± 43 . Это значение относится к области мощностью несколько сотен километров под переходом внутреннее-внешнее ядро. Характерный размер выявленных неоднородностей 1-4 км. Для объяснения присутствия структурных неоднородностей

автор апеллирует к поликристаллическим структурам железа, характерным для более молодого ядра.

Результаты, приведенные в главе 4, убедительно подтверждают **третье** защищаемое положение, заключающиеся в том, что кровля внутреннего ядра является областью со структурой, формирующей интенсивную коду отраженных волн. Получены значения добротности и характерных размеров неоднородностей.

В заключении автор подчеркивает те новые результаты, которые получены в работе, дает их интерпретацию в рамках динамических процессов кристаллического ядра и крупномасштабной конвекции расплава жидкого внешнего ядра. Обосновывается и доказывается, что совокупность обнаруженных латеральных неоднородностей связана с процессом затвердевания, являющимся источником последних. Кроме того, в заключении автор намечает направление дальнейших исследований. При этом подчеркивается необходимость привлечения информации смежных областей для построения комплексных моделей ядра Земли.

К работе имеются некоторые замечания :

- возможно, в структуре работы можно было бы выделить еще одну главу по результатам, которые представлены в «методической» главе 2, подтверждающие концепцию мозаичной поверхности внутреннего ядра;

- рисунок 2-2-3, являющийся монтажом сейсмических трасс, чаще всего строится в координатах «время пробега – расстояние», а не наоборот «расстояние – время», как это приведено в диссертации. Не указан годограф, по которому рассчитано время пробега волн PKiKP и полоса частот используемого фильтра;

- на рисунке 2.2.6 фигурирует волна PKJKP (PS), не описанная в номенклатуре волн, связанных с ядром Земли;

- на некоторых рисунках (3.1.6, 3.1.7, 3.2.9) условные обозначения внутри рисунка даны на английском языке, хотя эти же обозначения на других рисунках приведены по-русски.

Все высказанные замечания не умаляют достоинств диссертационной работы. Это наукоёмкий, глубокий и интересный труд, имеющий большое значение как в области фундаментальной, так и практической сейсмологии. В нем ярко демонстрируются возможности использования данных международных систем, представляемых Международными Центрами данных для открытого пользования при решения задач, имеющих глобальное значение. Отдельные методические результаты и разработки имеют важное значение для аналитиков волновых форм и могут быть внедрены в практику рутинной обработки в центрах данных. Особо отмечу разработанный соискателем

инновационный метод для анализа коды сейсмических волн. Он может быть применен в самых разных задачах в организациях геофизического профиля, в том числе в казахстанском национальном центре данных. Результаты, полученные в диссертации, прошли широкую апробацию в печати и научных конференциях в России и за рубежом. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация Краснощекова Дмитрия Николаевича «Разномасштабные неоднородности глубинных оболочек Земли как отражение динамических процессов комплексной системы внутреннее-внешнее ядро» выполнена на высоком научном уровне. Все выводы основываются на глубоком теоретическом анализе, базирующемся на представленных экспериментальных сейсмических данных по волновым формам, зондирующим ядро Земли в несколько его регионах, а также на синтетических и модельных временных последовательностях.

Считаю, что диссертационная работа отвечает всем положениям раздела 2 «Критерии, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней» Положения «О порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г., а её автор Краснощек Дмтрий Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Согласна на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук,
заместитель ген. директора по научной работе

РГП «Институт геофизических
исследований» Министерства энергетики
Республики Казахстан,

директор Центра сбора и обработки
специальной сейсмической информации.

005020 Казахстан, Алматы, ул.Лизы Чайкиной 4

mikhailova@kndc.kz, mob. +77772231715

Михайлова

Наталья Николаевна

Подпись официального оппонента заверяю.

ученый секретарь, кандидат геолого-

минералогических наук



Н. Н. Полешко