

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Краснощекова Д.Н.

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

Актуальность темы.

Исследование ядра Земли является в настоящее время одним из наиболее динамично развивающихся направлений геофизики. Свойства, структура и динамика комплексной системы внутреннее ядро – переходная зона – внешнее ядро становятся предметом все более пристального внимания исследователей.

И одной из наиболее актуальных задач в этом направлении является выявление, оценка и интерпретация разномасштабных неоднородностей ядра Земли в терминах динамических процессов, протекающих в комплексной системе внутреннее – внешнее ядро.

Постоянно повышающаяся доступность цифровых данных мировой сети сейсмологических наблюдений и улучшение их качества позволяет осуществлять более детальный анализ динамических процессов, протекающих на границах жидкого и твердого ядра, в том числе и за счет расширения области ядра, просвечиваемого сейсмическими лучами. Новое качество цифровых данных и современные методы их обработки позволили автору перейти от задачи идентификации неоднородностей ядра Земли к более актуальной проблеме комплексного описания трёхмерных изображений структурных особенностей ядра Земли в терминах его динамических процессов. Следует отметить, что временные интервалы динамики земного ядра и длительности сейсмических наблюдений

существенно различаются, и наши заключения, построенные на сейсмических данных, всего лишь моментальный снимок глубинных недр Земли. Тем не менее на их основе были открыты, в частности крупномасштабные особенности анизотропии во внутреннем ядре, и развит ряд динамических моделей, например, трансляционная модель, объясняющая обнаруженные структурные особенности. В связи с этим диссертационная работа Краснощекова Д.Н. направленная на исследование физических свойств неоднородностей различного масштаба в земном ядре является актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

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.

Благодаря комплексному использованию теоретических и экспериментальных подходов были созданы алгоритмы обработки данных и разработаны основные теоретические положения. Для проверки разработанных моделей использовалось численное имитационное моделирование. Собрана экспериментальная база данных, состоящая из волновых форм, зарегистрированных трёхкомпонентными станциями. Использовались также ранее опубликованные в научной печати измерения времен пробега рефрагированных волн. 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 *ak135*.

В ходе выполнения работ для задач анализа и визуализации результатов использовались следующие широкоизвестные и многократно опробованные в

мировой научной практике программные системы SAC (Seismic Analysis Code), Geotool, TauP, Matlab, Origin, GMT (Generic Tool). Полученные результаты сопоставлялись с известными экспериментальными данными независимых исследователей и не противоречат базовым понятиям и законам.

Оценка проведенного исследования и полученных результатов (научная новизна, личный вклад).

1. 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.

2. Сформулирована концепция мозаичной поверхности внутреннего ядра, проведена оценка пространственных и физических характеристик неоднородностей области перехода от твёрдого внутреннего к жидкому внешнему ядру.

3. Оценка сейсмического затухания во внутреннем ядре впервые проведена с погрешностью менее 10%.

4. Показано, что 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 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.

5. Обнаруженные разномасштабные неоднородности структуры ядра отражают особенности процесса затвердевания внутреннего ядра Земли из расплава жидкого внешнего.

6. 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.

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на высоком научном уровне, основные научные результаты в достаточной степени опубликованы в 23 статьях. Из них

11 в российских и зарубежных научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ (проиндексированных в Scopus и Web of Science);

14 статей (проиндексированных в РИНЦ).

Отдельно следует отметить публикацию в журнале Nature.

Содержание диссертации и автореферата

Рецензируемая работа состоит из введения, 4-х глав и заключения.

Первая глава «Структура и свойства ядра Земли по литературным данным» содержит современные представления о структуре ядра Земли. В ней описывается история открытия ядра и основные вехи его исследования: открытие твердого внутреннего ядра, описание Тейлоровского цилиндра, во внешнем ядре, дифференциальное вращение твердого ядра, сейсмическая анизотропия, представлены интерпретации обнаруженных структур и неоднородностей.

Во второй главе «Методические основы анализа волновых форм, связанных с ядром Земли» рассмотрены методические основы анализа сейсмических волн РК_{IKP}, РК_{P_{BC}} и РК_{iKP}. Измеряемые характеристики этих волн такие как амплитуды, частотный состав, времена пробега находятся под влиянием не только свойств среды во внутреннем и внешнем ядре, но и неоднородностей в мантии и земной коре. Чтобы максимально ослабить влияние верхних оболочек Земли автор использует общепринятый в этой области подход, опирающийся на дифференциальные амплитуды и времена пробега. При этом также значительно уменьшается влияние на измеряемые параметры ошибок в определении координат гипоцентра и времени в очаге

землетрясений. Однако, следует отметить, что использование только волн P_{KiKP} и $P_{K_{BC}}$ ограничивает область исследования внутреннего ядра в основном его верхней частью, до глубины порядка 350 км.

Относительно изучения свойств докритически отраженных от поверхности внутреннего ядра волн P_{KiKP} , амплитуда которых составляет единицы нанометров, использованы группирование сейсмических источников и сейсмических станций. Приведенные на рис. 2-2-2 уникальные примеры доставляют эстетическое удовлетворение. В зоне транспарентности были обнаружены волны P_{KiKP} с аномально большими амплитудами, что не согласуется со стандартными моделями Земли (PREM, IASPE91, ak135). Выявленные особенности позволили автору предложить ряд моделей, в основе которых лежит мозаичность отражающей поверхности внутреннего ядра с характерным латеральным масштабом 1-10 км.

Значительная часть второй главы связана с развитым автором новым методом анализа огибающих сейсмических волн на основе компьютерной графики – метода альфа-шейп восстановления формы объекта. Детально исследована эффективность метода путем статистического моделирования, а также на натуральных данных локальных землетрясений. Результаты его использования для изучения свойств (Q -фактора) самой верхней части внутреннего ядра выделены в отдельную 4-ую главу.

В третьей главе «Результаты наблюдений волн P_{KP} в экваториальных и полярных плоскостях» представлены данные о невязках дифференциальных времен пробега $P_{K_{BC}}$ и $P_{K_{DF}}$ и проведен анализ для сейсмических лучей, зондирующих внутреннее ядро под Африкой и Юго-Восточной Азией.

Для области внутреннего ядра под Африкой полученные особенности дифференциальных времен пробега от угла между направлением сейсмического луча во внутреннем ядре и осью вращения Земли в целом не противоречат гипотезе об анизотропии скорости продольных волн. Однако

в экспериментальных дифференциальных временах присутствует специфическая особенность в виде «ковша», которая не может быть связана ни с внутренним ядром, ни с корой и верхней мантией. Автор полагает, что эта особенность определяется динамикой во внешнем ядре, порождающей тейлоровский цилиндр, в котором в цилиндрической области внешнего ядра механические характеристики среды отличаются от свойств среды вне цилиндра. Получена оценка радиуса цилиндра, составившая 1375 км и аномалия скорости 0.3-0.8%. При таких значениях аномалии скорости предложенная модель может рассматриваться как альтернатива анизотропии скорости во внутреннем ядре. Такая точка зрения, по-видимому, имеет право на существование, поскольку некоторые исследователи считают, что большая величина анизотропии в западном полушарии связана с мантийными особенностями трасс от землетрясений на Южных Сандвичевых островах.

Исследования дифференциальных времен пробега волн РККР и РКРВС под Юго-Восточной Азией на данных, представляющих редкий случай, когда небольшая область внутреннего ядра зондируется в двух направлениях – полярном и экваториальном. Из анализа этих данных автор приходит к заключению о существовании в этой области локального блока, в котором, как дифференциальные времена пробега, так и дифференциальные амплитуды, зависят от направления прихода сейсмических волн, что является характерными признаками анизотропной среды. При этом величина анизотропии в блоке составляет около 2%, в то время как вне этого блока среда практически изотропна. Опираясь на эти данные, автором предложены две модели верхней части внутреннего ядра, которые включают увеличивающийся от 170 км на северо-западе до 300 км на юго-востоке исследованной области изотропный слой и локальное анизотропное включение. Рассчитанные для такой модели теоретические сейсмограммы находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

В четвертой главе «Структурные особенности кровли внутреннего ядра Земли по данным коды PKiKP» приведены результаты применения развитого автором метода анализа огибающей сейсмических волн на основе методологии альфа-шейп и оценки Q-фактора, важного параметра, характеризующего поглощающие свойства верхней части внутреннего ядра. Полученная оценка $Q=450$ и более высокочастотный состав коды, чем в порождающей ее волне PKiKP, позволили автору сделать вывод о борновском механизме формирования коды за счет рассеяния на неоднородностях с характерным размером 1- 4 км.

В заключении перечислены основные экспериментальные результаты, полученные автором, и их интерпретация с позиций динамики процессов в ядре – росте внутреннего ядра и крупномасштабной конвекции во внешнем ядре.

Автореферат диссертации соответствует содержанию рецензируемой диссертационной работы

Замечания по диссертации.

Рецензируемая работа не свободна от отдельных недостатков, в частности:

1. Чтобы отделить в результатах измеряемых характеристик сейсмических волн эффектов, связанных с неоднородностями в мантии, автор использует трехмерную модель MITP08. На наш взгляд следовало бы более тщательно отнестись к этому, так как существуют ряд альтернативных моделей.
2. Разделение изложения метода анализа огибающих (глава 2) и результатов его применения для оценки Q-фактора в верхней части внутреннего ядра (глава 4) несколько нарушает логическую связанность материала.
3. В разных разделах автор в качестве референсной модели использует то модель PREM, то модель ak135. Такой подход затрудняет понимание полученных автором экспериментальных закономерностей, так как эти

модели имеют существенное различие градиента скорости в основании жидкого и размера внутреннего ядра (1221.5 км и 1217 км, соответственно).

4. В автореферате при изложении содержания следовало бы указывать название глав диссертации.

Общий вывод

Указанные недостатки не снижают ценность работы, тем более, что основные результаты работы имеют значимость для более глубокого понимания внутреннего строения земного ядра и закладывают основу для построения трехмерных моделей.

Хотелось бы обратить внимание на огромную работу, которую пришлось провести автору по сбору данных для исследования. Специфика области изучения диктовала тщательный подбор сейсмических данных по магнитуде, глубине очага, расположению эпицентров сейсмических записей, и локализации принимающих станций.

Следует также отметить наличие в работе Интернет-ссылок на используемые методы обработки данных, позволяющие протестировать предлагаемые и используемые автором методы.

В целом, считаю, что работа Краснощекова Д.Н. выполнена на высоком научном уровне, и представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение важной научной проблемы.

Соответствие диссертации требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней

Критический анализ диссертации Краснощекова Д.Н. позволяет сделать заключение о высоком научном уровне и значимости полученных в ней результатов, сделанных выводов и рекомендаций. Работа обладает четкой структурой, материал подается автором в целом в логической последовательности, продиктованной поставленной целью и направленными на ее достижение задачами. Диссертация содержит уникальный, хорошо проиллюстрированный фактологический материал, и ввиду ограниченного количества отечественных работ по рассматриваемой тематике основной упор сделан на зарубежные публикации.

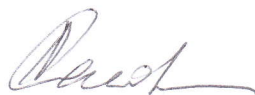
Таким образом, диссертация Краснощекова Д.Н. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в изучении структурных особенностей земного ядра и их внутренней динамической взаимосвязи, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Краснощеков Дмитрий Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН,

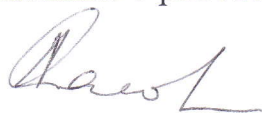
д.ф.-м.н.



/Сасорова Елена Васильевна/

Адрес: 117997, Москва, Нахимовский пр., д. 36, e-mail: satorova_lena@mail.ru

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



31.05.2016

Евгения Сасорова Е.В. Евдокимова
Ученый секретарь ИО

