

ОТЗЫВ

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

Диссертационная работа КРАСНОЩЁКОВА Дмитрия Николаевича посвящена оценке размеров и физических свойств неоднородностей в жидком и твёрдом ядре Земли. Диссертация Краснощёкова Д.Н. состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Актуальность работы определяется потребностями сейсмологии и смежными областями наук о Земле, такими как кристаллографии, минералогии, теории магнитного поля Земли, геохимии и другими, которые играют существенную роль в изучении происхождения, физических процессов и строения Земли. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографии, включающей 279 наименований. Работа изложена на 212 листах, содержит 58 рисунков и 6 таблиц.

Во введении диссертант формулирует актуальность рассматриваемой проблемы, цель диссертационной работы, методы исследования, достоверность и обоснованность результатов, защищаемые положения, научную новизну и практическую значимость полученных результатов.

К недостаткам введения следует отнести не четкие формулировки защищаемых положений, которые состоят из пяти пунктов. К сожалению, этот недостаток является типичным при оформлении диссертаций. Например, в пункте 5 вместо: «разработан и апробирован новый метод аппроксимации формы сейсмической коды с использованием обобщения одного из классических инструментов вычислительной геометрии — альфа-шейп n -го порядка», следовало бы написать: «новый метод аппроксимации формы сейсмической коды с использованием обобщения одного из классических инструментов вычислительной геометрии — альфа-шейп n -го порядка». Примерно то же самое относительно других пунктов защищаемых положений.

В **первой главе** дан литературный обзор по структуре и свойствам земного ядра. **Первый** раздел этой главы «Жидкая и твердая оболочки ядра» освещает историю изучения земного ядра сейсмическими методами. В этом разделе диссертант особо обращает внимание на возможность обнаружения поперечных волн проходящих через внутреннее ядро. При этом делает противоречивый вывод. А именно, он пишет: «По-видимому, единичные опубликованные наблюдения волн РКЖР скорее всего являются следствием благоприятных условий (большая глубина очага, очень большая магнитуда) и **не могут рассматриваться** как характерные представители усредненных свойств и структуры внутреннего ядра Земли [Shearer et al. 2011]. С другой стороны, в отличие от первых публикаций, эти наблюдения получили более широкое признание, что **подтверждает** твёрдость внутреннего ядра Земли».

Во **втором** разделе первой главы освещены химический состав и процесс формирования земного ядра. Отмечено, что переход вещества внутреннего ядра из жидкой фазы в твердую фазу объяснено адиабатической моделью сжатия (а не остывания, как сказано в диссертации на стр. 22). Однако при этом остаётся не ясным кристаллизуется вещество или переходит в аморфное состояние при высоких температурах и давлении. Если отталкиваться от значений отношения скоростей продольных и поперечных волн во внутреннем ядре, то следует принять, что состояние вещества во внутреннем ядре скорее аморфное, чем кристаллическое. От решения этого вопроса зависят все последующие выводы сделанные в диссертации.

В **третьем** разделе первой главы дан обзор работ связанных с природой границы внешнее – внутреннее ядро и определению скачка плотности на этой границе. По-видимому, в решении этого вопроса последнее слово остается за интерпретацией собственных колебаний земли. Особый интерес представляют работы по наблюдению докритических отражений в диапазоне 6 - 20 градус.

Четвертый раздел посвящен так называемому Тейлоровскому цилиндру во внешнем ядре. Понятие Тейлоровского цилиндра непосредственно связано с теорией происхождения (с природой) магнитного поля Земли и предполагается, что он не может быть обнаружен сейсмическими методами.

В **пятом** разделе приведен обзор по дифференциальному вращению или «супервращению» внутреннего ядра. Отмечается противоречивый характер данных по этому вопросу.

В **шестом** и **седьмом** разделах обсуждается вопрос сейсмической анизотропии внутреннего ядра. Считается, что в направлении оси вращения Земли скорости сейсмических волн больше, чем в экваториальном направлении. Этот факт подтверждается различными наблюдениями, включая объемные волны и собственные колебания Земли. Отмечается, что наиболее чувствительным инструментом исследования верхних 100 км внутреннего ядра являются **дифференциальные** времена пробега РКiKP–PKiKP. В то же время диссертант пишет, что наиболее наглядно анизотропия объёмных волн проявляется в зависимости **невязок** дифференциальных времен пробега фаз, рефрагированных около границы внутреннего ядра, от угла ξ между сейсмическим лучом в точке поворота во внутреннем ядре и осью вращения Земли. К сожалению, диссертант дает определение понятию **невязок** дифференциальных времен только в третьей главе на стр. 105, что затрудняет понимание сути вопроса. Как альтернатива наклону оси симметрии анизотропии относительно оси вращения Земли в научной литературе рассматривается более высокая скорость сейсмических волн в западном полушарии и пониженная скорость в восточном полушарии (дихотомия сейсмической анизотропии).

К сожалению, в обзоре отсутствуют работы, в которых рассматривался бы эффект сплюснутости внутреннего ядра и его влияние на время распространения сейсмических волн.

В **восьмом** заключительном разделе первой главы дается обзор динамическим и минералогическим моделям твёрдого ядра Земли. По сути, в этом разделе обсуждаются только различные механизмы возникновения анизотропии во внутреннем ядре. Все рассмотренные механизмы достаточно противоречивы и не дают четкого представления о природе сейсмической анизотропии.

В **заключение** главы диссертант делает вывод о том, что представления о структуре земного ядра и процессах в нём ещё не полны, и необходимо продолжить поиск, анализ и интерпретацию новых сейсмологических данных, призванных **упростить** сложную картину ядра Земли. Этот вывод представляется странным, поскольку современные представления о строении земного ядра пока ещё весьма упрощенные. По данным объёмных волн диссертант ставит задачу исследовать размеры и физические параметры неоднородностей ядра Земли и провести анализ различных динамических моделей, подтверждающих картину свойств и особенностей.

Сделав достаточно полный и исчерпывающий обзор изученности земного ядра, диссертант, к сожалению, не упомянул о существовании так называемых волн «предвестников», которые являются «камнем преткновения» в изучении строения и свойств земного ядра. Вопрос природы волн «предвестников» является принципиальным вопросом. От решения этого вопроса зависит наше представление о строении земного ядра. Кроме этого, диссертант практически обошел вниманием природу зоны F. Первые представления об этой зоне как о зоне с пониженной скорости сейсмических волн были даны Г. Джеффрисом. Позднее зону F стали представлять как зону с пониженным градиентом скорости, что привело к неоднозначной интерпретации волнового поля в диапазоне $145^\circ - 155^\circ$. В то же время наличие пониженной скорости в зоне F позволяет объяснить природу волн «предвестников» и интенсивность волн отраженных от границы внешнее - внутреннее ядро.

Во **второй** главе диссертации рассмотрены методические основы анализа волновых форм, связанных с ядром Земли. В **первом** разделе второй главы рассматриваются сейсмические фазы, связанные с ядром Земли, как инструмент его исследования. Основное внимание

диссертанта уделено фазам PKP_{BC} и PKP_{DF} . Однако следует заметить, что фаза PKP_{BC} практически неотличима от фазы PKP_{DC} , которая принадлежит волне $PKiKP$ отраженной от внутреннего ядра. Более того, на рис. 2-1-2 показаны три фазы соответствующие ветвям АВ, ВС и DF годографа. На этом рисунке фаза PKP_{BC} имеет амплитуду значительно большую, чем другие фазы, что говорит о природе этой фазы как фазе отраженной волны, т.е. фазе PKP_{DC} . Если бы это была фаза PKP_{BC} , то её амплитуда, из-за малого градиента скорости в слое F, была бы меньше чем амплитуда фазы PKP_{AB} .

Второй раздел главы посвящен обнаружению докритических отраженных волн на эпицентральных расстояниях от 5° до 39° их свойствам и связи с особенностями структуры отражающей границы. Сам по себе факт обнаружения докритических отражений от внутреннего ядра весьма примечателен и говорит об особенностях строения среды над и под границей отражения. В диссертации отмечается, что зарегистрированные амплитуды отраженных волн в десятки и в сотни раз превышают оценки в рамках стандартных моделей с резкой границей. Делается вывод о том, что это свидетельствует о сложном характере границы внутри ядра Земли. При этом почему-то не рассматривается возможность высокого значения коэффициента отражения, которое является следствием существенного различия свойств вещества над и под границей. В частности, пониженные скорости сейсмических волн в зоне F. В этом случае не надо было бы искусственно усложнять рельеф отражающей границы.

Третий раздел с названием «Инновационный метод анализа сейсмической коды с помощью методики обработки пространственных данных альфа-шейп и его применение к выделению слабой коды $PKiKP$ ». В этом разделе представлен новый алгоритм восстановления формы сейсмической коды. Алгоритм основан на понятии α -шейп — одном из инструментов восстановления формы любого набора данных, состоящего из сигнала и шума, заданных в виде временных последовательностей. Одним из полезных свойств алгоритма является то, что он не ориентирован на какой-либо 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 другим сейсмологическим задачам, таким как оценка локальной магнитуды или сейсмического затухания по данным коды, а также для исследований возможных временных вариаций.

Четвертый раздел посвящен методике оценке затухания сейсмических волн во внутреннем ядре по коде волны $PKiKP$. По этому разделу мало что можно сказать, поскольку собственно оценки не приведены. Сами оценки приводятся в главе 4. Более того, на странице 96 диссертант пишет: « Q — это величина затухания или добротность среды», что, конечно же, совершенно не верно. Как известно, чем больше добротность среды, тем меньше затухание. Более того, совершенно не понятно как можно определить добротность внутреннего ядра по волне не прошедшей через него, отразившейся от него. Кажется совершенно очевидным, что кода в этом случае должна сформироваться в вышележащих оболочках Земли и, прежде всего, в земной коре.

В **третьей** главе представлены новые данные о невязках дифференциальных времен пробега PKP_{BC} и PKP_{DF} и проведен анализ невязок для сейсмических лучей, зондирующих внутреннее ядро в экваториальных и полярных плоскостях.

В **первом** разделе этой главы представлены результаты зондирования ядра под Африкой и Австралией. Большая часть раздела посвящена анализу невязок дифференциальных времен. На основе этих данных построена модель внешнего ядра Земли с аномалией скорости продольных волн в цилиндрической области радиусом 1375 км, теоретические невязки дифференциальных пробега в которой согласуются с экспериментальными данными для сейсмических лучей, зондирующих область земного ядра под Африкой. Данные станции в Антарктиде подтверждают возможность обобщения модели внешнего ядра под Африкой. Из этих данных следует, что 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.

Второй раздел третьей главы посвящен результатам зондирования области ядра под Юго-Восточной Азией и Австралией.

В самом начале раздела диссертант описывает экспериментальные данные, которые он использовал для анализа дифференциальных времен пробега волн РКР. При этом он ограничивается диапазоном эпицентральных расстояний $145^{\circ} - 155^{\circ}$. В этом разделе диссертант приводит, правда в довольно узком диапазоне эпицентральных расстояний, монтажи сейсмограмм, в отличие от первого раздела этой же главы, где записи колебаний вообще не приведены. Много бы прояснилось, если бы монтажи были приведены не в диапазоне $151^{\circ} - 153.5^{\circ}$ (рис. 3-2-3) и $145^{\circ} - 154^{\circ}$ (рис. 3-2-4), а в диапазоне $138^{\circ} - 154^{\circ}$. Тем не менее, даже на этих монтажах на эпицентральной расстоянии 148° , в соответствии с годографом сейсмической волны, приведенном на рис. 2-1-1 должны просматриваться не три, а четыре волны. Однако мы видим только три волны, причем, на рис. 3-2-4 волна ВС отстоит от волны DF на 5 секунд, а на годографе на рис. 2-1-1 на 3 с, а на 5 с на том же рисунке на 148° находится ветвь DC, которая диссертантом вообще не упоминается. На самом деле ветвь DC представляет собой годограф отраженной от внутреннего ядра волны, а ветви ВС вообще **не существует**, что хорошо видно из рис. 3-2-3 и 3-2-4 и было бы ещё лучше видно, если бы диссертант привел монтажи сейсмограмм, начиная хотя бы от 138° . Справедливости ради следует сказать, что это обстоятельство не влияет на конечный результат, поскольку диссертант исследует невязки дифференциальных времен.

Далее рассматриваются внесение поправок в невязки дифференциальных времен связанные с неоднородностями в мантии и внешнем ядре Земли. Для этого строятся зависимости дифференциальных времен от эпицентральных расстояний, углов между сейсмическими лучами и осью вращения Земли и от глубины проникновения сейсмических лучей.

Затем обсуждаются две возможные причины, приводящие к специфическому поведению невязок дифференциальных времен. Одна из них, это слоистость верхней части внутреннего ядра; другая - локальные неоднородности внутри ядра.

В заключении ко второму разделу третьей главы диссертант делает вывод: «Анализ показывает, что обнаруженная аномалия 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 температурах и давлениях в ядре Земли наиболее вероятно указывают на локальную смену кристаллографической структуры железа и служат признаком локализованной аномалии затвердевания внутреннего ядра в предыдущие эры его развития». **Этот вывод об ограниченности области скоростной аномалии представляется странным, если учесть размеры внутреннего ядра и условия его формирования.** Более естественным кажется предположение о равномерном распределении свойств земного ядра вдоль радиуса.

Четвертая заключительная глава диссертации посвящена изучению структурных особенностей кровли внутреннего ядра Земли по данным коды РКiКР. В **первом** разделе главы обсуждаются сейсмические данные, использованные для исследования. Отмечается, что кода РКiКР имеет низкую интенсивность, и не наблюдается на огибающей единичного канала. Она наблюдается на огибающих (среднеквадратичных или Гильберта) суммарных трасс, полученных в результате суммирования каналов сейсмической группы. Как я уже отмечал выше, возникает вопрос. А в ядре ли сформирована кода, если учесть, что по пути сейсмической волны до приемника на поверхности Земли она встречает достаточное количество неоднородностей, как в мантии, так и в коре Земли? Более того, почему используется кода волны РКiКР, а не кода волны РКiКР, которая как раз и проникает во внутреннее ядро, в отличие от волны РКiКР?

Второй раздел четвертой главы посвящен собственно результатам обработки коды волны РКiКР. Рассмотрены вопросы формы и места формирования коды, а также даны оценки добротности внутреннего ядра. Здесь, как и ранее, диссертант смешивает понятия затухания и добротности среды. Так, на стр. 176, подраздел 4.2.2 читаем: «Как видно, вели-

чина **добротности** варьирует в диапазоне от 398 до 516. Это меньше, чем в аналогичных исследованиях. Например, в [Leyton & Koper 2007b] были получены величины **затухания** в диапазоне от нескольких десятков до 50000, причем основная масса оценок была заключена между 200 и 5000».

В разделах **три** и **четыре** этой главы рассматриваются структурные модели и механизмы, приводящие к рассеянию волн и динамические процессы в кровле внутреннего ядра Земли. Содержание этих разделов сводится к обзору работ различных авторов, и не затрагивают собственные результаты диссертанта.

В **выводах к главе 4** диссертант пишет: «В настоящей главе приведены новые данные по волнам, рассеянным в кровле внутреннего ядра Земли — области мощностью несколько сотен километров под переходом внутреннее - внешнее ядро. Рассеянные волны с низкой медленностью порядка медленности PKiKP составляют коду' последней, причем форма обнаруженных код имеет веретенообразный характер, что подтверждает её происхождение во внутреннем ядре. Оценка добротности в этой области ядра по коду PKiKP составляет порядка 450, а соответствующий характерный масштаб неоднородностей --- 1–4 км». Здесь возникает вопрос. Область мощностью несколько сотен километров, это по меньше мере четверть радиуса внутреннего ядра. Отражение идет от границы внешнее - внутреннее ядро. О какой коле сформированной в кровле может идти речь?

В **заключение** диссертационной работы сформулированы новые результаты, полученные диссертантом. Из всех перечисленных результатов без сомнения следует принять первые два и новый метод аппроксимации формы сейсмической коды с использованием обобщения одного из классических инструментов вычислительной геометрии - α -шейп n -го порядка. Все остальные достижения по большей части основаны на обобщении результатов других авторов и к тому же не являются бесспорными.

По диссертационной работе, кроме отмеченных замечаний, имеются и общие замечания.

Так при исследованиях в качестве стандартной модели в разных разделах диссертационной работы использовались модели PREM и AK135. Непонятно, почему нельзя было использовать одну какую-нибудь модель.

Структурно диссертационная работа очень неоднородна. Где-то выводы делаются ко всей главе где-то только к отдельным разделам.

Понятия «сила анизотропии» нет в отечественной литературе. Обычно говорят о величине анизотропии или о величине коэффициента анизотропии. Понятия анизотропной скорости (стр. 145) вообще не существует.

Термин «медленность» не характеризует физический параметр. В оптике это коэффициент преломления, в сейсмологии величина обратная скорости. Лучше придерживаться норм русского языка, а не зарубежного жаргона.

При обсуждении вопросов связанных с кодой сейсмических волн нет ни одной ссылки на очень известные работы Ю. Копничева и других отечественных авторов..

Не все ссылки отражены в списке литературы, например, работа Young et al., 2013.

