

Утверждаю

Директор ИФЗ РАН
чл.-корр. РАН



С.А. Тихоцкий

« 30 » октября 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

на диссертационную работу **Мельник Елены Александровны**
«Разномасштабные сейсмические неоднородности земной коры и верхней
мантии Сибирского кратона, его восточной и южной окраин»,

представленную на соискание ученой степени доктора геолого-
минералогических наук
по специальности 1.6.9 – Геофизика

Диссертационная работа Мельник Елены Александровны посвящена локализации разномасштабных структурно-скоростных неоднородностей верхней мантии Сибирской платформы, земной коры ее южного и восточного обрамлений путем лучевого двумерного численного моделирования кинематики опорных сейсмических волн и их корреляции с результатами приповерхностных структурных и геотектонических неоднородностей.

Актуальность темы исследований обосновывается востребованностью данных о строении коры и мантии Сибирской платформы и ее восточного и южного обрамлений не только в рамках решения фундаментальных проблем тектоники и геодинамики, но и для решения задач поисковой геологии в

связи с проблемами прогноза кимберлитовых полей. Прошло более 30 лет после появления уникальных сверхдлинных сейсмических профилей Сибири. В настоящее время применение современных технологий компьютерной обработки к ранее полученным и оцифрованным сейсмическим данным дает возможность в рамках новых подходов, с позиции нового взгляда на обоснование решения некорректной обратной задачи сейсмологии создать новые версии таких профилей.

Научная значимость исследований опирается на решаемые на базе сейсмических методов задачи, связанные: 1. С определением двумерных скоростных неоднородностей в литосфере Сибирской платформы по данным сверхдлинных профильных ядерных взрывов (Рифт, Метеорит и Кратон) с учетом сферичности Земли и их связь с региональными структурами земной коры. 2. Прогнозом кимберлитового поля для Мало-Ботуобинского района по данным латеральных структурно-скоростных неоднородностей земной коры в сопоставлении с эталонным Мирнинским кимберлитовым полем. 3. Выделением в земной коре в пределах Алдано-Станового щита и восточной окраины Сибирского кратона разномасштабных структурно-скоростных неоднородностей. 4. Выявлении особенностей строения разломно-складчатой структуры в верхней коре Забайкалья.

Новизна исследования и полученных результатов заключатся в изучении природы структурно-скоростных неоднородностей земной коры и верхов мантии, картируемых по данным активной сейсмологии различного масштаба и детальности систем наблюдений, находящихся в соответствии с естественным уменьшением разрешающей способности методов с глубиной. Неотъемлемой частью интерпретации является также изучение связей между приповерхностными разновозрастными, разномасштабными геотектоническими структурами, локализованными неоднородностями и глубинными их аналогами, в виде разнообразных корней, тектонических зон, разломов, магматических образований, глубинного состояния вещества, что

способствует оценке их геодинамической природы, сейсмичности и перспектив поиска месторождений полезных ископаемых в Сибири.

Цель диссертационной работы состояла в исследовании на основе лучевого двумерного численного моделирования кинематики опорных сейсмических волн особенности строения поля скоростных неоднородностей верхней мантии и земной коры Сибирской платформы, ее южной и восточной окраин.

Степень обоснованности и достоверности каждого научного результата и выводов соискателя заключается в многочисленных публикациях, в том числе 15 статьях в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и докладах на всероссийских и международных конференциях, а также совещаниях в крупных научно-производственных компаниях.

Рассматриваемая работа объемом 233 страницы состоит из введения, пяти сбалансированных по объему глав, заключения и списка литературы (232 наименования). Представлено 86 рисунков, иллюстрирующих основные результаты диссертации.

Содержание работы

Во **введении** (стр.4-16) определены ее актуальность, цели и задачи, отмечен личный вклад автора, научная новизна, сформулированы четыре защищаемых положения, приведен список всероссийских и международных конференций с докладами результатов исследований. Дана общая характеристика работы, ее практическая значимость, отмечены проекты, в рамках которых она была выполнена.

В краткой форме охарактеризован используемый в диссертации фактический материал разномасштабных методов активной сейсмики. Он представлен данными от мирных ядерных взрывов по профилям Рифт, Метеорит и Кратон, протяженностью до 3200 км, пересекающих в широтном и меридиональном направлениях Сибирскую платформу, позволяющих охарактеризовать неоднородность верхней мантии архивными

(оцифрованными) профильными и площадными данными глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) в Мало-Ботуобинском и сопредельных районах Якутской кимберлитовой провинции, дающими существенно обновленные представления о строении земной коры и верхов мантии, также и сейсмическими данными вдоль опорных геофизических профилей 1-СБ и 3-ДВ по двум разномасштабным детальным системам наблюдений методами глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и первых вступлений МПВ.

Для всего этого комплекса разномасштабных данных использовался один подход к обработке, основанный на численном решении двумерной прямой кинематической задачи сейсмики в неоднородной изотропной среде. Базисом обработки данных являлись широко известные методы лучевой теории распространения сейсмических волн в неоднородной изотропной среде. При этом использовались программы Ray 84P, (H. Thybo and J. Luetgert), и SeisWide [Zelt, Smith, 1992; Zelt, 1999; Chian et al., 2003].

Особый интерес к полученным результатам вызывает используемая в работе корреляционная по латерали и глубине интерпретация распределения обнаруженных неоднородностей как основа изучения их геодинамической природы.

В главе 1 (стр. 17-36) представлено состояние изученности и обстоятельный анализ результатов изучения регионального строения земной коры и верхней мантии Сибирского кратона, его восточной и южной окраин по разномасштабным системам геофизических наблюдений в зависимости от глубины и подходов к решению обратных задач.

Автором отмечено, что при большом количестве публикаций о структуре литосферы из-за наличия значительных различий в результатах целый ряд методических вопросов остается дискуссионным, что ранее также отмечалось в сборнике [Сейсмические модели..., 1980]. Обращено внимание на особенность подхода к выбору оптимального решения обратной задачи сейсмики. Проблему единственности предлагается решать на основе построения регионально латеральных неоднородных моделей с

минимальным количеством параметров, контролируемых временами пробега волн в первых вступлениях, коррелируемых протяженными их аномалиями в критической области с аномальными амплитудами отражений. [Суворов и др., 2010; Сейсмические неоднородности..., 2013; Seismic and density..., 2015]. Предлагается также использовать ограничения на абсолютные невязки между наблюдаемыми и теоретическими временами пробега отраженных и преломленных волн, которые не должны превышать в отдельных случаях 1с при среднеквадратическом отклонении 0.6-0.8 с, соответствующем видимому периоду колебаний. Обосновывает необходимость построения новых латерально-неоднородных моделей в сферическом приближении. Это дает наилучшие результаты при наличии значительных горизонтальных неоднородностей, выраженных изменениями мощности слоев и скорости. Приведен аналитический обзор геолого-геофизических моделей строения земной коры и верхней мантии южной и восточной окраин Сибирского кратона (Алдан-Становой щит, сочленение Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы, Забайкалья).

В главе 2 (стр. 37-76) рассмотрены крупномасштабные сейсмические наблюдения мирных ядерных взрывов, характеризующие свойства мантийной литосферы и астеносферы Сибирской платформы в сферическом приближении. При этом используются данные сейсмических глубинных исследований на трех профилях длиной до 3500-4000 км: Метеорит, Рифт и Кратон.

Автором в рамках изложенного выше подхода произведено построение скоростных моделей для профилей Метеорит, Рифт и Кратон. Представленное на рисунках этого раздела сопоставление наблюдаемых и рассчитанных годографов показывает хорошее их соответствие.

К существенному интерпретационному результату этого раздела следует отнести корреляцию по латерали изменений скорости в верхах мантии с региональными геологическими структурами фундамента. Так, например, пониженные значения скорости на фундаменте соответствуют вдоль профиля

Рифт Западно-Сибирской плите, Курейской и Присяно-Енисейской синеклизам, в разделяющих их промежутках скорость повышена. Верх мантии Якутской кимберлитовой провинции характеризуются аномально повышенной скоростью.

Кроме того, обнаружена корреляция глубины залегания кровли выделенного высокоскоростного слоя в низах литосферы с проявлениями магматизма на Сибирской платформе. Область минимальной глубины ее залегания (около 100 км) наблюдается под Тунгусской синеклизой с трапповым магматизмом, а максимальной (более 200 км) – на западе Якутской кимберлитовой провинции, с возможным протягиванием на юг в Иркутскую область.

К важному результату этого раздела следует также отнести выявленные контуры контрастных латеральных мантийных неоднородностей в низах литосферы прерывистого по латерали высокоскоростного слоя (8.5-8.7 км/с) в районах проявления траппового магматизма на Сибирской платформе, которые связываются с алмазоносным районом западной части Якутской кимберлитовой провинции и Иркутского амфитеатра. Протяженность последних на юг свидетельствует о перспективах поиска кимберлитов в Иркутской области.

В главе 3 (стр. 77-118) вопрос о пространственном размещении проявлений кимберлитовых полей рассматривается в другом масштабе (соответствующей разрешающей способности площадных сейсмических зондирований с шагом между станциями 7-10 км) для Мало-Ботуобинского района и сопредельных территорий.

Основой для получения новых результатов явились широко известные вычислительные технологии прямого лучевого моделирования (вдоль различных прямолинейных отрезков профилей ГСЗ, соединяющих отдельные пункты взрыва), определившие необходимость оцифровки и переинтерпретации полученных в 80-х и 90-х годах данных с целью

обнаружения локальных неоднородностей земной коры характерных для эталонного Мирнинского кимберлитового поля.

Выполненные исследования позволили уточнить трехмерную модель земной коры и верхов мантии Мало-Ботуобинского кимберлитового района Якутской кимберлитовой провинции. По результатам моделирования аномалия, аналогичная Мирнинской и приуроченная к уточненному региональному поднятию преломляющей границы в верхах фундамента, была обнаружена в верховьях р. Ыгыатта (междуречье рек Вилюя и Мархи). Кимберлитоносность аномалии была подтверждена в 2015 г. открытием новой кимберлитовой трубки, используемой в компании «АЛРОСА» в качестве признака прогнозного Сюльдюкарского поля.

В главе 4 (стр. 119-166) рассмотрены результаты обработки данных вдоль отрезков опорного геофизического профиля 3-ДВ, пересекающих восточную и южную окраины Сибирского кратона. Ценность таких данных определяется их уникальной для региональных работ детальностью и тем, что сразу реализован комплекс двух разномасштабных методов ГСЗ и МПВ, позволяющих изучить корреляционную связь между аномальными особенностями строения верхней коры и всей ее толщи, с детальностью, соответствующей результатам регионального геотектонического районирования.

Принципиальной новизны результаты получены о структурно-скоростном строении зоны сочленения Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой области. Выявленные по данным МПВ структуры передового Приверхоянского и локального Тылового (совместно с прилегающей частью складчатой области) прогибов, разделенных высокоскоростным массивом Сетте-Дабана, позволили определить изменения мощности осадочного чехла (соответствующие геотектоническим оценкам) и распределения в нем скорости. По данным ГСЗ обнаружена наклонная зона, прослеженная во всей толще земной коры, выраженная в изменениях мощности слоев земной коры и ступени в рельефе Мохо и

ограничивающая Сибирский кратон. Сопредельная Верхояно-Колымская складчатая область с наложенной мезозойской складчатостью характеризуется пониженной скоростью в верхней толще коры по сравнению с Сибирским кратоном.

Новые представления также получены и для Алдано-Станового щита, где предметом сейсмического изучения является обнаженная толща докембрийских пород. Выявлены две главные сейсмические характеристики щита: первая выражена в пониженной по сравнению с кратоном скоростью в верхней коре, вторая – в различиях двухслойной модели земной коры в Становом блоке и трехслойной в Алданском. Дополнительной аномалией по данным обоих методов является вертикально неоднородная зона в земной коре и ступени на Мохо, соответствующая расположению сейсмоактивной Чульманской впадины, вероятно, тектонической природы. Обращает на себя внимание особенность выявленной по результатам исследований неоднородности земной коры и мантийной части литосферы Алдано-Станового щита, которая проявляется и в существенной изостатической неуравновешенности. Эта особенность структуры отражается в повышенной сейсмической активности сейсмоактивной Чульманской впадины. В противоположность зоне Алдано-Станового щита существенно неоднородная земная кора восточной пассивной окраины Сибирского кратона оказалась изостатически уравновешенной.

В главе 5 (стр. 167-206) представлены результаты, которые можно отнести к оценке возможности структурно-тектонического районирования верхней части коры по данным МПВ вдоль профиля 1-СБ на примере Саяно-Байкальской складчатой области. На глубину 5-7 км локализованы структурные и скоростные неоднородности, убедительно коррелируемые с приповерхностными признаками разломов и магматических неоднородностей по данным геотектонического районирования.

Замечания

Имея ввиду прежде всего вторую главу работы, следует отметить практически полное отсутствие сравнения полученных результатов с результатами других работ по сейсмическим структурам этой же территории и сопоставлений с результатами наблюдений потенциальных полей. В первом - обзорном разделе диссертации – не приведено ни одного рисунка скоростных разрезов литосферы, иллюстрирующего состояние проблемы на момент начала подготовки диссертационной работы.

В качестве замечания также следует указать, что в разделе «Методы исследований и фактический материал» перечислено много организаций, которые получали фактический материал, но не упомянута организация НПО «Союзгеофизика» СРГЭ –ГЕОН, которая собственно и проводила работы по регистрации мирных ядерных взрывов и дальнейшую обработку и интерпретацию полученных данных.

Удивляет также то обстоятельство, что диссертант, говоря о ядерных взрывах, ссылается на публикацию [Sultanov et al., 1999] (стр. 19), хотя упомянутые выше работы проводились под руководством А.В. Егоркина, а Султанов к проведению этих работ не имел никакого отношения.

К сожалению, вопросы, связанные с обоснованием оптимальности подобранных моделей в сравнении с ранее известными моделями, в работе не рассматриваются. Остаётся неясным, почему полученные диссертантом результаты лучше, чем полученные ранее А.В. Егоркиным с сотрудниками и Н.И. Павленковой. В своей работе диссертант не приводит никаких формальных критериев, позволяющих сравнивать результаты, полученные диссертантом и полученные ранее другими авторами.

Конечно, было бы желательным при переинтерпретации полученных ранее материалов, произвести пересмотр исходных экспериментальных данных, то есть волновых форм (монтажей сейсмических трасс) и построений по этим монтажам сейсмических годографов. Диссертант же взял готовые точечные годографы, полученные другими авторами, и попытался

получить по ним другие скоростные разрезы, используя практически те же приёмы, что предыдущие авторы.

На первый взгляд, кажется интересным подход к комплексной интерпретации геолого-геофизических данных с использованием коэффициента петрофизической неоднородности, представленный соискателем в последней главе. Однако, как показано в работе [Бурмин В.Ю. Некоторые обратные задачи сейсмологии. Теория, эксперименты, результаты – Москва. «Наука». 2019. С. 103-104], так называемый «коэффициент химической неоднородности» η зависит от отношения

$$\eta = \frac{k_s}{k_T} = \frac{C_p}{C_v} = 1 + \frac{k_s T}{C_p \rho} \beta^2 \geq 1,$$
 где C_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении; C_v – удельная теплоёмкость при постоянном объёме; k_s – адиабатический модуль всестороннего сжатия; k_T – изотермический модуль всестороннего сжатия; β – объёмный коэффициент теплового расширения; T – температура в градусах Кельвина. Это означает, что η не является показателем химической неоднородности среды, а зависит от коэффициента теплового расширения β и температуры T . Поэтому привлечение этого коэффициента для петрофизической интерпретации сейсмоплотностных структур земной коры оказывается сомнительным.

Общее заключение по работе

Выполненную работу следует рассматривать как крупное обобщение существующих сегодня скоростных моделей Сибирской платформы. Сверхдлинные профили ГСЗ по ядерным взрывам собраны вместе в одну комплексную интерпретацию – модель; профили пересчитаны (ранее по ним уже были получены многочисленные результаты, включая значительное количество работ Н.И. Павленковой). Применяемые в диссертации новые подходы и программное обеспечение для решения обратных задач по сейсмическим данным дают возможность повышения

детальности обнаружения по данным мирных ядерных взрывов структурно-тектонических разномасштабных неоднородностей в мантийной литосфере, в частности слабоизученной сейсмическими методами восточной и южной окраин архейского Сибирского кратона. Полученные в работе результаты, несомненно, имеют важное практическое значение и могут быть использованы при решении задач структурно-тектонического районирования и постановке прогнозно-поисковых работ.

В целом, диссертационная работа Мельник Е.А. является завершенным исследованием, оформленным в соответствии с требованием ВАК и выполненным на высоком уровне. Приведенные в работе результаты следует определить как новые, обоснованные и имеющие практическое и научное значение. Диссертация написана грамотно и хорошо изложена, аккуратно оформлена и проиллюстрирована качественным графическим материалом. В автореферате диссертации в достаточной для понимания форме изложено содержание всех глав диссертации. Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её автор Елена Александровна Мельник заслуживает присуждения ей степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.9–Геофизика.

Авторы отзыва согласны на обработку персональных данных.

Отзыв составили:

Доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией фундаментальных и прикладных проблем
тектонофизики (204) ИФЗ РАН



Ю.Л.Ребецкий

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
лаборатория сейсмической опасности (302) ИФЗ РАН



В.Ю.Бурмин

Диссертационная работа и отзыв обсуждены 27.10.2023 на семинаре лаборатории №204 ИФЗ РАН (Протокол №2), на котором была представлена диссертация. Отзыв одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физики Земли
им. О.Ю. Шмидта Российской академии Наук (сокращенное название – ИФЗ
РАН),
Адрес: Российская Федерация. 123242 г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10
строение 1.

Подписи д.ф.-м.н., зав. лаб. 204 ИФЗ РАН Ребецкого Ю.Л. и д.ф.-м.н., гнс
лаб. 302 ИФЗ РАН Бурмина В.Ю. заверяю.

Ученый секретарь ИФЗ РАН



Д.В. Лиходеев