

На правах рукописи



МЕЛЬНИК Елена Александровна

**РАЗНОМАСШТАБНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ
НЕОДНОРОДНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ
И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ СИБИРСКОГО КРАТОНА,
ЕГО ВОСТОЧНОЙ И ЮЖНОЙ ОКРАИН**

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК
2023

Работа выполнена в ФГБУН Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск).

Научный консультант:

Суворов Владимир Дмитриевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ИНГГ СО РАН.

Официальные оппоненты:

Похиленко Николай Петрович, академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, научный руководитель ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск);

Ковалевский Валерий Викторович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геофизической информатики ФГБУН Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск);

Мордвинова Валентина Владимировна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

Ведущая организация:

ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН, г. Москва).

Защита состоится 15 ноября 2023 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: просп. Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, факс: (8-383) 330-28-07, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/melnic2023>

Автореферат разослан 5 сентября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – разномасштабная латерально-неоднородная структура земной коры и верхней мантии Сибирского кратона, его восточной и южной окраин с локализацией верхнемантийных и коровых аномалий под основными региональными структурами фундамента (Тунгусская, Присяяно-Енисейская и Вилюйская синеклизы, Якутская кимберлитовая провинция, Алдано-Становой щит, Верхояно-Колымская и Саяно-Байкальская складчатые области).

Актуальность. Необходимая для решения геодинамических задач связь между разномасштабными структурами земной коры и верхней мантии до сих пор имеет дискуссионный характер. Новые сведения о распределении латеральных сейсмических неоднородностей в литосфере необходимы для глубинного структурно-тектонического районирования в зависимости от уменьшения с глубиной разрешающей способности сейсмических методов. Такие данные важны для развития геодинамических представлений о природе формирования региональных неоднородностей в верхней мантии, земной коре, фундаменте Сибирского кратона и сейсмичности на его южной окраине.

Применение современных вычислительных технологий решения прямых кинематических задач в двумерных постановках по данным первых вступлений и закритических отражений обеспечивают в зависимости от параметров систем наблюдений пространственную разрешенность и детальность интерпретационных моделей, картирование корней приповерхностных структурно-тектонических блоков и связанных с ними генезисом и размещением крупных магматических образований. В частности, современные технологии обработки оцифрованных архивных площадных и профильных наблюдений методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) в Западной Якутии позволяют получить более обоснованные сведения о строении земной коры при обнаружении признаков проявлений кимберлитового магматизма.

Несмотря на большие объемы выполненных региональных сейсмических исследований, остаются «белыми пятнами» слабоизученные сейсмическими методами восточная и южная окраины Сибирского кратона. Новые детальные данные вдоль опорных региональных профилей 3-ДВ и 1-СБ обеспечивают получение обоснованных сведений о строении верхней коры методом первых вступлений (МПВ) и всей ее толщи методом ГСЗ. Внимание к этому обусловлено необходимостью изучения природы формирования зоны сочленения Сибирского кратона с Верхояно-Колымской складчатой областью, структуры докембрийской толщи пород Алдано-Станового

щита (профиль 3-ДВ), Саяно-Байкальской складчатой области (профиль 1-СБ), с локализацией и выявлением их связей с тектоникой и сейсмичностью.

Таким образом, представляется актуальным решение проблемы обнаружения структурно-скоростных неоднородностей в литосфере Сибирского кратона и земной коре его окраин, связанных с глубинными корнями приповерхностных геологических структур, в качестве геофизического обоснования структурно-тектонических моделей и выявления глубинных сейсмических признаков, контролирующих закономерности размещения полезных ископаемых, в том числе и проявлений кимберлитового магматизма.

Цель исследования – выявить разномасштабные структурно-скоростные неоднородности земной коры и верхней мантии Сибирского кратона, его восточной и южной окраин лучевым двумерным численным моделированием кинематики опорных сейсмических волн.

Научные задачи

1. Определить латеральное распределение двумерных структурно-скоростных неоднородностей в литосфере Сибирской платформы по данным сверхдлинных профильных наблюдений от мирных ядерных взрывов (Рифт, Метеорит и Кратон) с учетом сферичности Земли и их связь с региональными структурами земной коры.

2. Уточнить локализацию латеральных структурно-скоростных неоднородностей земной коры в районе эталонного Мирнинского кимберлитового поля по профильным и площадным данным глубинных сейсмических зондирований, которые в качестве поисковых признаков распространить на Мало-Ботубинский район.

3. Выделить в земной коре по сейсмическим данным разномасштабные структурно-скоростные неоднородности в пределах Алдано-Станового щита и восточной окраины Сибирского кратона (профиль 3-ДВ) и их связь с тектоникой.

4. Выявить признаки разломно-складчатой структуры в верхней коре Забайкалья и оценить возможность структурно-тектонического районирования по сейсмическим данным метода первых вступлений (профиль 1-СБ).

Методы исследования и фактический материал

Теоретической основой решения поставленных задач является лучевая теория распространения сейсмических волн в неоднородной изотропной среде. Основной метод исследования – численное решение прямой кинематической задачи сейсмологии в двумерной латерально-неоднородной модели

среды методом прямого лучевого трассирования [Červený et al., 1977]. Численное моделирование выполнялось с использованием широко известных программ Ray84PC [Thybo, Luetgert, 1990] и SeisWide [Zelt, 1999], позволяющих проводить обработку сейсмических записей (частотная фильтрация, выравнивание амплитуд и т.д.), выполнять корреляцию волн и построение годографов, а также рассчитывать времена пробега и лучевые траектории распространения различных типов сейсмических волн в двумерных моделях. Критерием качества и достоверности построения скоростных моделей является величина невязок между наблюдаемыми и рассчитанными временами пробега сейсмических волн. Достоверность сейсмических результатов определяется их разномасштабной корреляцией с результатами структурно-тектонического районирования по геологическим данным.

Фактическим материалом являются: экспериментальные данные вдоль профилей Рифт, Метеорит и Кратон от мирных ядерных взрывов, выполненные Специальной региональной геофизической экспедицией в 1977, 1978 и 1982 гг.; профильные и площадные данные ГСЗ (около 13 000 сейсмических трасс, хранившихся в аналоговой форме на магнитных носителях и оцифрованные в 2000–2005 гг.), полученные в 1982–1988 гг. коллективами организаций: Ботубинской геологоразведочной экспедицией ПГО «Якутскгеология», Якутским институтом геологических наук СО АН СССР, Новосибирской опытно-методической вибросейсмической экспедицией СО АН СССР и Институтом геологии и геофизики СО АН СССР; данные МПВ и ГСЗ опорных региональных профилей Российской Федерации 3-ДВ и 1-СБ, выполненные в 2009–2015 гг. по заказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации и Федерального агентства по недропользованию (Роснедра) коллективами организаций: ФГБУ Всероссийским научно-исследовательским геологическим институтом им. А.П. Карпинского (ФГБУ «ВСЕГЕИ»), Обособленным подразделением «Спецгеофизика» ФГУП Всероссийского научно-исследовательского института геофизических методов разведки, ФГУП Сибирским научно-исследовательским институтом геологии, геофизики и минерального сырья (ФГУП «СНИИГГиМС»).

Основой решения задачи разделения изменений, связанных с влиянием вещественного состава и/или состояния вещества (трещиноватостью) с глубиной, является использование коэффициента петрофизической (химической) неоднородности [Магницкий, 1955; Буллен, 1966] по данным продольных, поперечных волн и плотности на примере Муйской впадины (профили ГСЗ Янчуй–Леприндо и Баунт–Орон) [Мишенькина, Мишенькин, 2004] и лабораторных измерений этих параметров на образцах горных пород (около 750 определений) [Баюк, Лебедев, 1988; Christensen, 1999].

Защищаемые научные результаты

1. В двухслойной модели литосферы Сибирского кратона мощностью 200–250 км латеральные неоднородности верхнего слоя контролируются скоростью 8.0–8.6 км/с на Мохо при более однородном нижнем слое мощностью 0–140 км и скоростью 8.6–8.7 км/с. Подстилающая толща пород мощностью 150–200 км с относительно пониженной до 8.5 км/с скоростью характеризует астеносферу, подстилаемую кровлей переходного слоя «410 км».

2. По данным площадных сейсмических наблюдений определена приуроченность Мирнинского кимберлитового поля к прибортовой части локальной аномалии с повышенной до 6.6 км/с скоростью в толще фундамента мощностью до 6–8 км, подстилаемого протяженным поднятием верхнекоревой границы. Подобная аномалия закартирована в бассейне р. Сюльдюкар, где в 2015 г. открыта Сюльдюкарская кимберлитовая трубка.

3. Земная кора и верхи мантии восточной и южной окраин Сибирского кратона характеризуются контрастными латеральными аномалиями пониженной скорости по сравнению с платформой и различиями в слоисто-блоковой структуре коры и рельефе Мохо, маркирующими Верхояно-Колымскую пассивную континентальную окраину, Алданский, Становой блоки и разделяющую их аномально неоднородную зону.

4. Приповерхностная по геологическим данным складчатая структура верхней коры Забайкалья в сейсмической модели характеризуется разнонаправленными пологонаклонными разломными зонами шириной 7–10 км, прослеженными на глубину 3–5 км, разделяющими блоки с разной структурой, скоростью и вещественным составом. Выявленная связь между геологическими и сейсмическими неоднородностями демонстрирует высокую эффективность метода первых вступлений при решении задач структурно-тектонического районирования складчатых областей.

Научная новизна

1. Развита методический подход к построению априорных двумерно-неоднородных разномасштабных моделей глубинного строения литосферы на основе корреляции регистрирующихся волн, соответствующих увязанной системе прямых и встречных годографов, в зависимости от параметров системы наблюдений (интервал между источниками возбуждения, длина линии наблюдения), определяющих размер и характер распределения локализованных неоднородностей, выраженных в упорядоченных изменениях редуцированных времен пробега волн, кажущейся скорости в зависимости от расстояния источник–приемник и положения на профиле, подлежащих двумерному численному моделированию методом прямого лучевого трассирования.

2. Предложен способ непосредственного учета сферичности Земли при прямом лучевом трассировании, использованный вдоль сверхдлинных сейсмических профилей Рифт, Метеорит и Кратон с учетом разрешающей способности системы наблюдений по данным ядерных взрывов, обеспечивший обоснованное районирование неоднородностей двухслойной литосферы Сибирского кратона и Западно-Сибирской плиты с горизонтальными размерами 300 км и более.

3. Применение комплексного анализа кинематических аномалий волнового поля, выраженных в системе годографов регистрирующихся волн, в связи с результатами численного моделирования структуры земной коры и верхов мантии вдоль профиля 3-ДВ обеспечило обнаружение ряда уникальных региональных неоднородностей, определяющих геодинамические различия в структурно-тектоническом районировании восточной и южной окраин Сибирского кратона, коррелирующихся с приповерхностной региональной геологией.

4. Особая эффективность методического подхода показана при корреляции преломленно-рефрагированных и отраженных волн с последующим двумерным численным моделированием структур верхней коры Мало-Ботуобинского района Якутской кимберлитовой провинции, осадочного чехла восточной пассивной окраины Сибирского кратона и в более мелком масштабе неоднородностей приповерхностной части коры Алдано-Станового щита и Саяно-Байкальской складчатой области для прослеживания результатов структурно-тектонического районирования на глубину 5–7 км и локализации по значениям скорости блоков с различным вещественным составом.

5. Предложен новый подход к интерпретации сейсмоплотностных данных на основе комплексного параметра – коэффициента петрофизической неоднородности для разделения изменений, обусловленных влиянием, связанным с трещиноватостью пород (состоянием вещества) и/или изменениями их вещественного состава с глубиной на примере верхней коры Муйской впадины.

Личный вклад

1. При непосредственном учете сферичности Земли вдоль сверхдлинных сейсмических профилей Рифт, Метеорит и Кратон построены отличающиеся от известных многослойных (многопараметрических) двухслойные латерально-неоднородные модели мантийной литосферы Сибирского кратона и Западно-Сибирской плиты, в которых обнаружена корреляция между региональными структурами земной коры и аномалиями скорости в литосфере.

2. Для эталонного Мирнинского кимберлитового поля построена латерально-неоднородная модель верхней части земной коры до глубины 12–15 км, в которой выявлено его расположение на участке, приуроченном к блоку в верхах фундамента с аномально высокой до 6.6 км/с скоростью, расположенному на склоне локального поднятия верхнекоревой границы. По аналогии со структурно-скоростными критериями проявления кимберлитового магматизма в районе эталонного Мирнинского поля в междуречье Вилюя и Мархи обнаружена подобная аномалия, подтвержденная в 2015 г. открытием Сюдьюкарской кимберлитовой трубки.

3. В земной коре на востоке Сибирского кратона установлены сейсмические признаки пассивной континентальной окраины, подверженной мезозойской складчатости в виде передового Приверхоянского и Тылового прогибов с мощностью осадочного чехла до 20 км, разделенных высокоскоростным Сетте-Дабанским массивом и погружением границы кратона под кору Верхояно-Колымской складчатой области под углом около 15°.

4. Для Алдано-Станового щита приповерхностная слоистость характеризуется изменениями скорости и мощности трех слоев, предположительно связанных со свойствами переотложенных пород в локальных прогибах рельефа, процессами выветривания и дезинтеграции. В подстилающей толще пород скорость составляет 6.0–6.2 км/с в сравнении с 6.3–6.4 км/с в архейском фундаменте Сибирской платформы. Слоисто-блоковая структура земной коры представлена двухслойной моделью в Становом блоке и трехслойной в Алданском при вертикально неоднородной зоне коры под Чульманской впадиной, контролируемой ступенеобразным увеличением глубины Мохо от 40 до 50 км.

5. Приповерхностная структурно-тектоническая модель коры Саяно-Байкальской складчатой области (южный участок профиля 1-СБ) представлена блоковыми структурно-скоростными неоднородностями, выраженными в изменениях скорости 5.2–5.4 и 5.6–5.7 км/с, прослеженных на глубину 3–5 км и разделенных пологонаклонными (15–25°) разломными зонами шириной до 7–10 км с различными направлениями падения осевых линий.

6. Вариациями комплексного параметра – коэффициента петрофизической (химической) неоднородности, описываемого зависимостью модуля сжатия и плотности от глубины, обосновывается разделение эффектов изменения вещественного состава и/или состояния вещества, основанное на общей закономерности уменьшения коэффициента петрофизической неоднородности с глубиной, связанной с закрытием трещин, подтвержденной на образцах горных пород и на сейсмоплотностных характеристиках верхней коры Муйской впадины.

Теоретическая и практическая значимость

Уникальные данные от мирных ядерных взрывов являются эталонными для изучения континентальной литосферы Сибирского кратона, неоднородности которой связаны со структурно-тектоническими аномалиями земной коры и геодинамикой их формирования. Локализация глубинных сейсмических аномалий, коррелируемых с известными проявлениями кимберлитового магматизма, кроме геодинамических аспектов, важна и для обоснования глубинных критериев их прогноза.

Сформулированы локальные структурно-скоростные критерии проявления кимберлитового магматизма, основанные на распределении наиболее контрастных сейсмических аномалий в верхах фундамента, аналогичных району Мирнинского кимберлитового поля, подтвержденные в 2015 г. открытием Сюльдюкарской кимберлитовой трубки.

Обработка детальных данных МПВ с использованием метода прямого лучевого трассирования показывает возможности его применения в складчатых областях для решения задачи структурно-тектонического районирования верхней части разреза на глубину 3–5 км и более в различных геологических условиях. Результаты иллюстрируются примерами, полученными в пределах Алдано-Станового щита, восточной пассивной окраины Сибирского кратона и в Саяно-Байкальской складчатой области.

Апробация работы и публикации

Представленные результаты хорошо известны научной общественности, докладывались и получили одобрение специалистов на международных конференциях и симпозиумах: Новосибирск, 2012, 2013, 2017–2022; Санкт-Петербург, 2007, 2014, 2016; Екатеринбург, 2008; КНР, Пекин, 2011, 2018; Иркутск, 2013; Киргизия, Бишкек, 2014, 2017; Казахстан, Алматы, 2016; на всероссийских конференциях и семинарах: Новосибирск, 2007–2019; 2022; Иркутск, 2009, 2013, 2021; Улан-Удэ, 2013; Якутск, 2013; а также на совещаниях в ведущих научно-исследовательских и производственных организациях: ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО «СНИИГиМС», АК «АЛРОСА» (ПАО).

По теме диссертации опубликовано более 70 научных работ, из них 15 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 5 статей в других рецензируемых научных журналах.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук. Научные исследования проводились в соответствии с Планами научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН: на 2007–2009 гг. (проект

№ 7.11.1.2), на 2010–2012 гг. (проект № VII.64.1.1.), на 2013–2016 гг. (проект № VIII.70.1.3), на 2017–2018 гг. (проект ИСГЗ ФАНО 0331-2016-0025), на 2019–2021 гг. (проект ИСГЗ Минобрнауки 0331-2019-0006), на 2022–2025 гг. (проект FWZZ-2022-0021). Научные исследования поддерживались грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-4054.2008.5).

Благодарности

За формирование научных взглядов, всестороннюю поддержку и постоянное внимание автор выражает глубокую благодарность своему Учителю, доктору геолого-минералогических наук В.Д. Суворову.

За поддержку, сотрудничество и обсуждение различных вопросов автор выражает благодарность коллективу лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности ИНГГ СО РАН: З.Р. Мишенькиной, А.В. Беляшову и Е.В. Павлову – за помощь в обработке и интерпретации сейсмических и гравитационных данных, О.А. Кучай – за постоянный интерес к работам автора, Ю.П. Стефанову – за поддержку проводимых автором сейсмических исследований, Т.Я. Благовидовой – за помощь в оцифровке и подготовке сейсмических данных.

Автор выражает искреннюю признательность В.И. Самойловой за методические рекомендации и консультации при подготовке диссертации.

Результаты получены при участии в совместных исследованиях коллективов Ботубинской ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО «СНИИГиМС», АСФ ФИЦ ЕГС РАН. Автор выражает искреннюю благодарность своим коллегам: С.Н. Кашубину, Е.Д. Мильштейн, Ю.М. Эринчеку, А.С. Сальникову, В.С. Селезневу, В.М. Соловьеву, И.Ю. Винокурову, Т.В. Кашубиной за сотрудничество при изучении земной коры и верхней мантии Сибири.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, объемом – 233 страницы, 86 рисунков. Библиографический список используемых источников содержит 232 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Изученность строения земной коры и верхней мантии Сибирского кратона, его восточной и южной окраин

Исследование глубинного строения земной коры и верхней мантии связано с решением задач структурно-тектонического районирования и геодинамической природы формирования приповерхностных неоднородно-

стей разнообразной природы в виде складчатых областей, прогибов, магматических и метаморфических образований, контролирующих напряженно-деформированное состояние земной коры (сейсмичность) и размещение месторождений полезных ископаемых. Ведущая роль в решении таких задач принадлежит сейсмическим методам, особенно активно развивающимся в настоящее время на основе применения численных методов обработки данных повышенной детальности.

Как известно, региональное строение земной коры и верхней мантии изучалось по разномасштабным системам сейсмических наблюдений в зависимости от глубины и алгоритмов решения обратных задач. Наиболее часто использовались продольные волны, регистрирующиеся в окрестности первых вступлений (преломленно-рефрагированные и закритические отраженные), характеризующиеся повышенной интенсивностью на фоне помех [Пузырев и др., 1978; Зверев, Косминская, 1980; Крылов и др., 1981; Белосусов и др., 1991; Сурков и др., 2008]. Параметрами систем наблюдений являются плотность расположения источников возбуждения, регистрирующих станций и величина удалений источник–приемник. Для определения структуры верхней части коры таковым является метод первых вступлений (МПВ). Метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) обеспечивает картирование региональных неоднородностей в земной коре, положения Мохо и скоростей в верхах мантии. Уникальная возможность изучения структуры всей толщи верхней мантии, вплоть до переходной зоны Земли на глубине 410 км (граница «410 км»), представилась при проведении работ с применением подземных ядерных взрывов на территории СССР в 1968–1988 гг. [Sultanov et al., 1999] при расстояниях между пунктами возбуждения 500–1000 км. Данные таких наблюдений важны для установления возможной корреляции между региональными неоднородностями коры и верхней мантии, свидетельствующей о геодинамической природе их формирования. Отдельное внимание при этом привлекает дискуссионный вопрос о существовании [McKenzie, Priestley, 2008] или отсутствии астеносферы под Сибирским кратоном [Павленкова, 2020].

Сейсмическая структура литосферы Сибирского кратона. Основная часть работ о свойствах литосферы пришлась на 1990-е годы, когда были опубликованы основные данные, полученные по сети сверхдлинных профилей, вдоль которых проведены наблюдения от распределенных по территории Сибири подземных ядерных взрывов [Егоркин и др., 1987, 1996; Pavlenkova et al., 1996, 2002, 2006; Cipar, Priestley, 1997; Mechie, et al., 1997; Thybo, Perchuc, 1997; Nielsen, Thybo, 2002, 2006; Егоркин, 2004; Thybo, 2006]. Из публикаций известны три основные группы скоростных моделей верхней мантии, построенные по данным продольных волн от

ядерных взрывов: одномерные (квазидвумерные), двумерные слоисто-неоднородные и латерально-неоднородные.

Наиболее распространенными являются скоростные модели верхней мантии, построенные по временам пробега продольных волн в первых и последующих вступлениях (оси синфазности отражений) от отдельных ядерных взрывов в одномерном горизонтально-слоисто-однородном (квазидвумерном) приближении [Priestley et al., 1994; Cipar, Priestley, 1997; Mechie, et al., 1997; Ryberg et al., 1998]. Одномерные модели предлагается использовать в качестве стартовых второго порядка (первые приближения получены при априорном применении глобальной модели IASP91). Окончательный результат представляется в виде композитных слоисто-неоднородных моделей, составленных вдоль профилей [Egorкин et al., 1987; Solodilov, 1997; Pavlenkova et al., 2002; Егоркин, 2004; Pavlenkova, Pavlenkova, 2006; Pavlenkova, 2011], основной особенностью которых является близгоризонтальная многослойность с относительно пониженной и повышенной скоростью, построенная по временам пробега адаптивно отфильтрованных отраженных волн [Егоркин и др., 1991], а также по наблюдаемым осям синфазности отраженных волн [Егоркин и др., 1996; Pavlenkova, 1996; Mechie, et al., 1997].

Таким образом видно, что, несмотря на довольно значительное количество публикаций, сейсмические данные о свойствах литосферы под Сибирской платформой и Западно-Сибирской плитой остаются дискуссионными. Этому способствуют два основных момента. Во-первых, при ограниченном объеме данных, вследствие малой плотности источников возбуждения не представляется возможным однозначно разделить вертикальную расслоенность и латеральную неоднородность среды. Во-вторых, обычно составление моделей верхней мантии путем лучевого моделирования проводится в плоской модели при наблюдениях на сферической поверхности. Известно, что при длине профиля более 700–800 км необходимо вводить поправки за кривизну поверхности наблюдений. Во всех публикациях подчеркивается присутствие значительных горизонтальных неоднородностей, выраженных в изменении глубины залегания границ и изолиний скорости, хотя поправки за сферичность Земли рассчитываются в одномерной (радиально симметричной) модели [Muller, 1971].

Эти факторы, указывают на необходимость построения новых латерально-неоднородных моделей в непосредственно сферическом приближении с основными наиболее крупными структурными и скоростными особенностями верхней мантии, проявляющимися в контрастных и протяженных изменениях времен распространения сейсмических волн. Вследствие

неоднозначности оценки мощности литосферы представляет интерес поиск сейсмических признаков существования астеносферы.

Геолого-геофизические модели строения земной коры и верхней мантии Якутской кимберлитовой провинции. Выполнен анализ публикаций, посвященных пространственному размещению кимберлитов, их взаимосвязи с генезисом и эволюцией древних платформ. Основываясь на известных концепциях о механизме образования кимберлитов, построенных по геолого-геофизическим данным, полученным преимущественно в Якутской кимберлитовой провинции, рядом авторов разработаны модели кимберлитового поля.

Интересной представляется так называемая мантийная модель [Артюшков и др., 1977; Соболев и др., 1977]. Согласно которой, очаг зарождается в верхах мантии в условиях алмаз-пироповой фации глубинности, откуда кимберлитовая магма с большой скоростью устремляется к поверхности. По современным и более ранним представлениям, проникновение кимберлитового вещества сквозь земную кору происходило по глубинным разломам, неоднократно оживавшим в интервале 400–130 млн. лет от девона до юры включительно, в связи с чем, усилия многих исследователей направлялись на поиск структурно-тектонических критериев локализации кимберлитовых полей [Мокшанцев и др., 1974; Брахфогель, 1984; Варламов, 1989; Дукардт и др., 1996].

Поскольку признаки, выделяемые авторами, часто наблюдаются и за пределами кимберлитовых полей, задача прогнозирования участков поиска кимберлитов разделяется на две части. Одна включает в себя прогнозирование локальных участков поиска кимберлитовых трубок и связана с детальными поисковыми и разведочными работами. Вторая направлена на поиск закономерностей размещения кимберлитовых полей, контролируемых крупными структурами в земной коре и верхах мантии [Милашев и др., 1974; Олейников и др., 1985].

Известные модели глубинного образования кимберлитов, несмотря на их различие, сходятся в том, что для проникновения кимберлитов к поверхности необходимы определенные структурно-тектонические условия в земной коре. В этом аспекте методы глубинной геофизики, в том числе и ГСЗ, приобретают роль поисковых. Одними из первых структурные критерии были сформулированы по результатам интерпретации средне- и мелкомасштабных геофизических полей [Мокшанцев и др., 1976; Трофимов, 1980; Духовский и др., 1986; Романов, 1998]. Методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) в Якутской кимберлитовой провинции выполнялось в основном региональное изучение геоэлектрических характеристик разреза верхней мантии и земной коры [Полтарацкая, 2000; Манаков и др., 2000;

Поспеева, 2008]. Одним из методов высокой детальности изучения коры является метод отраженных волн – метод общей глубинной точки (МОВ-ОГТ). В первой работе, посвященной таким результатам, по профилю, пересекающему Мирнинское кимберлитовое поле, была выявлена повышенная неоднородность (типа яркого пятна) в верхней части земной коры [Суворов и др., 1992]. В последующем обработке данных глубинного ОГТ выполнялась в модификации рассеянных волн [Караев и др., 1998], показывающей повышенную неоднородность всей толщи коры под кимберлитовыми полями.

Применение метода ГСЗ для поиска глубинных критериев проявлений кимберлитового магматизма проходило в два этапа. На первом этапе выполнялись рекогносцировочные работы по серии субширотных профилей и отдельным маршрутам других направлений [Бабаян и др., 1978; Уаров, 1981]. Более детальное изучение глубинного строения кимберлитовой провинции началось в 1980 г. По профильным и площадным наблюдениям определялось распределение граничных скоростей на Мохо и кристаллическом фундаменте, рельеф сейсмических границ в консолидированной коре, выявлялись аномалии волнового поля, соответствующие размерам кимберлитовых полей [Крылов и др., 1983; Суворов и др., 1983, 1985; Селезнев и др., 1987]. Учитывая трудности обнаружения признаков кимберлитовых полей и неоднозначность интерпретации при попытках выделения соответствующих аномалий, были получены лишь сведения о крупномасштабных, региональных характеристиках земной коры [Суворов и др., 1997, 1999], что недостаточно для решения задач локального прогнозирования на уровне кимберлитовых полей.

Таким образом, представляется важным уточнение строения земной коры в районах непосредственного расположения кимберлитовых полей как эталонных объектов. Кроме того, для современных методов обработки принципиальным является цифровое представление наблюдаемых данных ГСЗ, изображаемых в виде монтажей сейсмограмм. Оцифровка аналоговых сейсмограмм ГСЗ помогла сохранить уникальные архивные материалы, а их переинтерпретация дает новые результаты, которые могут оказаться принципиально важны для поиска геофизических критериев прогноза размещения кимберлитовых полей.

Геолого-геофизические модели строения земной коры и верхней мантии южной и восточной окраин Сибирского кратона. Вопрос о структуре земной коры в зонах сочленения Сибирского кратона с восточной мезозойской Верхояно-Колымской складчатой областью и с архейским Алдано-Становым щитом до сих пор является не до конца решенным. В настоящее время доминируют два основных направления во взглядах на

тектоническую эволюцию и строение кристаллического фундамента востока Сибирского кратона. Представителями первого направления тектоническое развитие кратона как единого тектонического объекта рассматривается поступательно от архея до кайнозоя [Гусев и др., 1985; Мишнин и др., 1987; Стогний, Стогний, 2005; и др.], тогда как представители второго Сибирский кратон рассматривают как коллаж террейнов, объединенных в протерозое [Тектоника..., 2001; Розен, 2003; Смелов, Тимофеев, 2003; и др.]. Нет единого мнения и о тектонической эволюции и строении Алдано-Станового щита. О.М. Розеном он представлен Становой и Алданской провинциями [Розен, 2003]. Известен и другой взгляд на природу сочленения Алданского и Станового блоков предложенный Александровым и Авченко [2003], где рассматривается модель, в которой Джугджуро-Становой блок субдуцировал под Алданский щит в протерозое.

В отличие от восточной части Сибирского кратона, где был проведен большой объем сейсмических и электрических зондирований [Бабаян и др., 1973; Егоркин и др., 1988; Суворов, 1993; Эринчек и др., 2000; Полтарацкая, 2001; Поспеева, 2008; и др.], в Верхояно-Колымской области, так же, как и на Алдано-Становом щите, основные геофизические исследования были выполнены методами грави- и магниторазведки. На их основе сделан вывод, что в целом Алдано-Становой щит состоит из блоков, разделенных ортогональной системой разломов различного порядка, выделяемых по полосовым региональным магнитным аномалиям [Павлов, Парфенов, 1973; Малышев, 1977; Алашкин, Карсаков, 1985; Стогний, Стогний, 2021]. По результатам изучения волновых полей близких землетрясений и сейсмических методов МОВЗ, ГСЗ [Булин и др., 1972; Суворов, Корнилова, 1983; Мишенькин и др., 1989] сделана оценка глубины залегания поверхности Мохо при ее резком погружении от 38–42 км в районе Олекмы до 50–60 км в области Алданского блока.

По результатам выполненной на территории Верхояно-Колымской складчатой области гравиметрической съемки масштаба 1:1 000 000 и аэромагнитной съемки масштаба 1:200 000 в 1950–1960-е годы составлены первые схемы разломной тектоники кристаллического фундамента и рельефа Мохо [Мокшанцев и др., 1975]. По этим данным построена ортогональная система глубинных разломов с шагом 150–200 км в связи со складчатыми структурами, а также в северо-западной части Верхояно-Колымской складчатой области по ряду гравитационных минимумов выделены впадины глубиной до 16–18 км [Андрусенко, 1995]. В результате изучения волновых полей близких землетрясений [Суворов, Корнилова, 1986] показано уменьшение мощности земной коры складчатой области до 35–38 км по сравнению с Алданским щитом и Сибирской платформой (40–44 км).

Существенно продвинуться в построении геолого-геофизических моделей коры Алдано-Станового щита и восточной окраины Сибирского кратона стало возможным после проведения работ на региональном опорном профиле 3-ДВ [Эринчек и др., 2014; Кашубин и др., 2016], где по данным ОГТ, ГСЗ и МТЗ были составлены геофизические модели коры [Диденко и др., 2013; Рудницкая и др., 2013; Гошко и др., 2014; Соловьев и др., 2014, 2016; Кашубин и др., 2018, 2021]. Построенная комплексная геолого-геофизическая модель позволила выделить новый тектонический элемент – Пристановую складчато-надвиговую зону, а также обнаружить наклонные структурные элементы, что стало еще одним подтверждением идеи поздне-мезозойских горизонтальных перемещений Станового мегаблока относительно Алданского [Хераскова и др., 2018]. Вместе с тем полученные данные не дают однозначного ответа о природе Становой области. Одни исследователи считают Становой блок частью щита и выделяют Алдано-Становой щит, другие выделяют Становой блок в самостоятельную структуру [Rozen et al., 1994; Башарин и др., 2005].

Различия в оценке глубинного строения земной коры и верхней мантии восточной окраины Сибирской платформы и Верхояно-Колымской складчатой области фиксируются как на плотностных, так и на сейсмических разрезах [Соловьев и др., 2014, 2017; Старосельцев, 2015; Кашубин и др., 2018; Еманов и др., 2021], где по данным ОГТ край Сибирского кратона имеет выраженную каплевидную форму, продолжающуюся под складчато-надвиговой зоной Сетте-Дабана на 180 км, при этом восточный край кратона фиксируется на глубине порядка 15–18 км [Кашубин и др., 2018]. Однако при построении геофизических разрезов земной коры по данным ГСЗ остается не решенной одна из особо важных в складчатых областях задач – это достаточно детальное структурно-тектоническое районирование осадочного чехла по сейсмическим данным. Например, по опубликованным геологическим данным складчатая структура осадочной толщи пород в модели пассивной континентальной окраины Сибирского кратона может достигать 20–24 км [Мокшанцев и др., 1975; Parfenov, 1991; Третьяков, 2017]. С региональной точки зрения, решение такой задачи может быть получено по данным МПВ с применением современных алгоритмов обработки времен пробега преломленно-рефрагированных волн в первых вступлениях и отраженных в последующих в слоисто-неоднородных средах.

Таким образом, для структурно-скоростного районирования земной коры Алдано-Станового щита и детального изучения восточной окраины Сибирского кратона крайне важно выполнять совместную интерпретацию данных МПВ и ГСЗ. Достаточно принципиальные региональные особен-

сти строения коры не могут быть получены этими методами отдельно. Вместе с тем учет структурно-скоростных неоднородностей верхней коры при обработке наблюдений МПВ обеспечивает повышение детальности районирования в 3–4 раза, что особенно необходимо при изучении структуры складчатости, ее тектоники и геодинамической природы формирования, встроения в общую структуру коры и, возможно, в верхи мантии. Особое значение это имеет в том числе для Забайкалья, где по данным МПВ вдоль профиля 1-СБ, пересекающего структуры Монголо-Забайкальской и Саяно-Байкальской складчатых областей, необходимым с точки зрения геодинамики является обнаружение корреляции между приповерхностными структурно-скоростными сейсмическими неоднородностями, прослеженными на глубину 3–5 км и результатами структурно-тектонического районирования. Последующим развитием этого подхода может являться интерпретация полученных данных совместно с согласованными результатами ГСЗ для построения геодинамической модели коры, дополненной локальными аномалиями плотности по гравитационным наблюдениям с оценками ее напряженного состояния и сейсмичностью [Суворов, ..., Мельник и др., 2017].

Глава 2. Литосфера и признаки астеносферы Сибири по данным мирных ядерных взрывов по региональным профилям Рифт, Метеорит и Кратон

По данным ядерных взрывов построены сейсмические разрезы верхней мантии по профилям Рифт, Метеорит и Кратон, пересекающим Сибирский кратон (Рисунок 1).

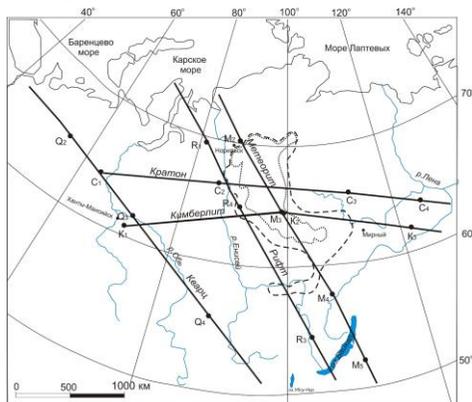


Рисунок 1 – Схема расположения профилей Метеорит, Рифт и Кратон. Обозначены области преобладающего распространения траппов (контур пунктирной линией), туфоженных толщ (штриховой) [Золотухин, Альмухамедов, 1991]. Прямые линии – профили, кружки – положение пунктов взрыва, даны их номера [Sultanov et al., 1999]

В отличие от известных слоистых слабонеоднородных моделей, приоритет отдается моделям с латеральными неоднородностями при минимально возможном количестве сейсмических границ с резкими скачками

скорости [Суворов, Мельник и др., 2010, 2013; Melnik et al., 2015]. Лучевое трассирование и подбор параметров разрезов выполнялись при непосредственном учете сферичности Земли в прямоугольных координатах [Zelt, 1999]. В стартовой модели использованы параметры земной коры, полученные А.В. Егоркиным по более плотно размещенным химическим взрывам с интервалом 35–160 км. Абсолютные невязки между наблюдаемыми и рассчитанными временами пробега продольных волн не превышают в отдельных случаях 1 с при среднеквадратическом значении 0.6–0.8 с, соответствующем видимому периоду колебаний.

Верхняя мантия представлена в виде двух структурных этажей: наиболее неоднородным по латерали двухслойным верхним и подстилающим, практически однородным (астеносферой) нижним до границы «410 км» (Рисунок 2).

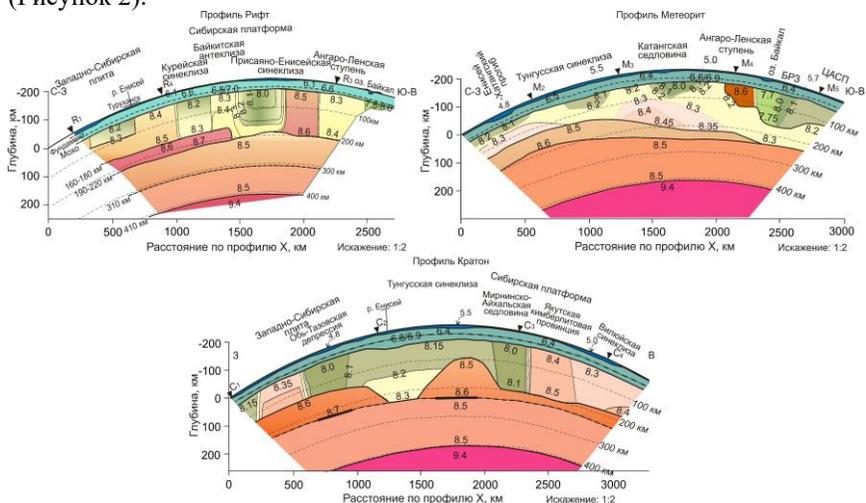


Рисунок 2 – Структура верхней мантии по профилям Рифт, Метеорит и Кратон [Суворов, Мельник и др, 2010, 2013; Melnik et al., 2015]. Тонкими линиями показаны изолинии скорости в км/с, толстыми – сейсмические границы со скачком скорости, треугольники – пункты взрыва. X – хорда сегмента большого круга Земли с длиной дуги $L = 3570$ км. Пунктирными линиями показаны сферические уровни глубин 100–400 км

Для верхнего структурного этажа характерна латеральная неоднородность при изменении скорости продольных волн от 7.7 км/с под Байкальской рифтовой зоной до 8.4–8.6 км/с на локальных участках под Ангаро-Ленской ступенью (профили Рифт, Метеорит), восточной прибортовой частью Вилуйской синеклизы (профиль Кратон) и в центральной части

Западно-Сибирской плиты (Кратон). Для верхнего этажа характерна корреляция между усредненными значениями скорости на Мохо и региональным рельефом фундамента (с тенденцией ее уменьшения под крупными прогибами фундамента (Курейская, Присяяно-Енисейская, Тунгусская и Виллюйская синеклизы, Западно-Сибирская плита). В основании литосферы выделен слой с повышенной до 8.5–8.7 км/с скоростью, мощность которого изменяется от значительного утонения (выклинивания) (Рифт, Метеорит, Кратон) до 100 км под Тунгусской синеклизой (Кратон). Сейсмическая мощность литосферы оценивается 200–250 км при пологом рельефе подошвы, глубина залегания которой уменьшается на северо-западе Сибирского кратона и увеличивается в окрестности его юго-восточного края (профиль Метеорит). Второй структурный этаж, в интервале между подошвой литосферы и границей «410 км» с относительно пониженной до 8.5 км/с скоростью, характеризует астеносферу, подстилаемую кровлей переходного слоя «410 км», где скорость скачком увеличивается до 9.4 км/с [Суворов, Мельник и др, 2010, 2013; Melnik et al., 2015].

В структуре литосферы рельеф кровли слоя с повышенной скоростью резко меняется по площади (Рисунок 3) [Мельник и др., 2017, Мельник, Суворов, 2022].

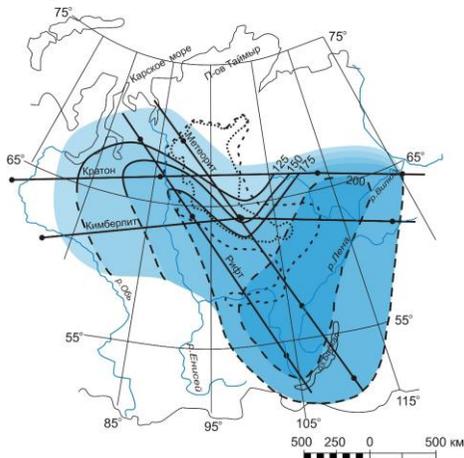


Рисунок 3 – Рельеф кровли слоя с повышенной скоростью в основании литосферы Сибирской платформы и северо-востока Западно-Сибирской плиты по [Суворов, Мельник и др., 2010, 2013; Melnik et al., 2015]. Прямые линии и кружки – профили и пункты взрыва, толстые линии – изогипсы кровли слоя с повышенной скоростью (штриховые – неуверенно) в км, пунктирная и штриховая линии – области распространения сибирских траппов и туфогенных толщ соответственно

Области максимального залегания (более 200 км) тяготеют к стабильным районам, включая алмазоносные области Иркутского амфитеатра и западную часть Якутской кимберлитовой провинции. Протяженность на юг может свидетельствовать о перспективах поиска кимберлитов в Иркутской

области (имеются находки россыпных алмазов). Области минимальной глубины залегания (100–130 км) тяготеют к районам проявления траппового магматизма на Сибирской платформе.

Полученные результаты. Предложена новая латерально-неоднородная структурно-скоростная модель верхов мантии Сибири при непосредственном учете сферичности Земли, представленная двумя структурными этажами: верхним – с контрастными латеральными неоднородностями и нижним – практически однородным астеносферным до границы «410 км». Для верхнего этажа (между Мохо и глубиной 220 км) характерна корреляция латеральных изменений скорости с региональными геологическими структурами фундамента (пониженные значения скорости соответствуют синеклизам, повышенные – выступам фундамента).

Глава 3. Структурно-скоростное строение кимберлитовых районов Якутии по результатам детальной переинтерпретации данных глубинных сейсмических зондирований

По результатам переобработки архивных площадных и профильных данных ГСЗ уточнены латеральные структурно-скоростные характеристики земной коры Мало-Ботуобинского кимберлитового района и выявлены основные закономерности глубинного строения, контролирующие проявления кимберлитового магматизма для эталонного объекта Мирнинского кимберлитового поля (Рисунок 4).

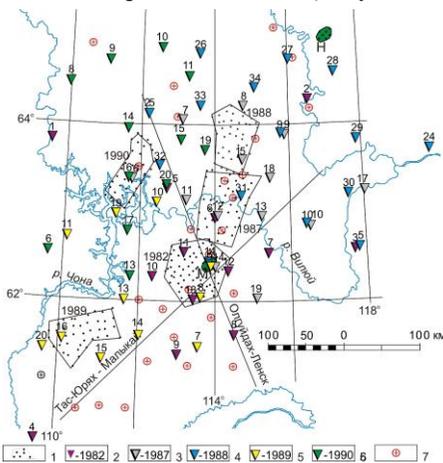


Рисунок 4 – Схема площадных и профильных сейсмических наблюдений в Мало-Ботуобинском районе и сопредельных областях: 1 – расстановки регистраторов (показаны точками) с указанием года проведения полевых работ, 2–6 – пункты взрыва 1982, 1987–1990 гг., 7 – скважины, вскрывшие фундамент. Цифры соответствуют номерам пунктов взрыва 1982, 1987–1990 гг. Контур Мирнинского кимберлитового поля (М) и Накынского (Н) полей закрашены зеленым цветом

Переобработаны данные площадных наблюдений методом ГСЗ 1982, 1987 и 1988 гг., выполненные на трех расстановках 25 (позднее 50) шести-

канальных телеуправляемых регистраторов «Тайга» с аналоговой магнитной записью [Пузырев и др., 1978] с шагом 7–10 км из 22 пунктов возбуждения (ПВ) при расстояниях источник–приемник 20–100 км для верхней коры при изучении рельефа поверхности фундамента и верхнекоревой границы I с соответствующими изменениями скорости в слоях, ограниченных этими границами, и до 200 км для всей ее толщи при изучении рельефа внутрикоревой границы и Мохо.

Построение модели земной коры проводилось двумерным лучевым моделированием с направленным подбором параметров разреза [Zelt, 1999], обеспечивающим минимально достаточное различие между наблюдаемыми и рассчитанными временами пробега продольных волн, не превышающее 0.06–0.1 с. В качестве первого приближения использованы сейсмические модели коры, построенные без проверки результатов лучевым моделированием [Суворов, 1993].

Попытки детализировать схемы граничной скорости и рельефа Мохо, не принесли существенных дополнений. Совсем другую картину можно видеть для рельефа внутрикоревой границы, который по результатам двумерного численного моделирования стал более выразительным, чем было ранее (Рисунок 5А). Центральным элементом рельефа внутрикоревой границы является ее локальное поднятие от 30–34 км до 20–22 км северо-восточного простирания, протягивающееся от Мирнинского поля практически до р. Марха. [Suvorov, Melnik, 2011]. В районе Мирнинского поля амплитуда поднятия уменьшается почти в два раза, до 6–8 км, и оно теряет отчетливое субмеридиональное простирание. Если в районе Ыгыатинской площади ширина апикальной части поднятия около 70 км, то на юге территории она расширяется до 150 км. На западе и востоке поднятие ограничивается опусканием внутрикоревой границы до уровня 30–34 км при довольно крутых углах падения, достигающих 20°. Рисунок 5А иллюстрирует сопоставление рельефа внутрикоревой границы и Виллойско-Мархинского дайкового пояса [Эринчек и др., 1997]. Как видно на Рисунке 5А, на участке от Мирнинского поля до р. Марха они коррелируются вполне отчетливо, и можно предполагать, что поднятие является признаком структуры дайкового пояса [Suvorov, Melnik, 2011].

Поверхность фундамента имеет пологий рельеф и в его региональных характеристиках отсутствуют представляющие интерес локальные аномалии. Наибольшее значение для характеристики верхней части коры имеют изменения граничной скорости в фундаменте (Рисунок 5Б). Изменения скорости продольных волн в верхах фундамента наблюдаются в интервале 6.2–6.6 км/с. Наиболее значимым является локальное увеличение скорости до 6.5 км/с в окрестности Мирнинского кимберлитового поля. Эта аномалия

наиболее надежно установлена по профилю Тас-Юрях–Малькай [Suvorov, Melnik et al., 2006], а численным моделирование по площадным наблюдениям 1982 г. локализована в пространстве с уточнением ее контура [Суворов, Мельник и др., 2010]. Дополнительно в северо-восточной части изученной территории вблизи западного борта Ыгыаттинской впадины на поверхности фундамента выявлена аномалия повышенной до 6.6 км/с скорости, значительно большего размера, чем в районе Мирнинского кимберлитового поля (Рисунок 5Б) [Суворов, Мельник и др., 2010]. Других подобных аномалий не отмечается, хотя следует иметь в виду, что вне расстановок регистраторов скорость определяется на интервале расстояний между пунктами взрыва и ближайшими станциями порядка 40–60 км и аномалии скорости малых размеров могут быть пропущены.

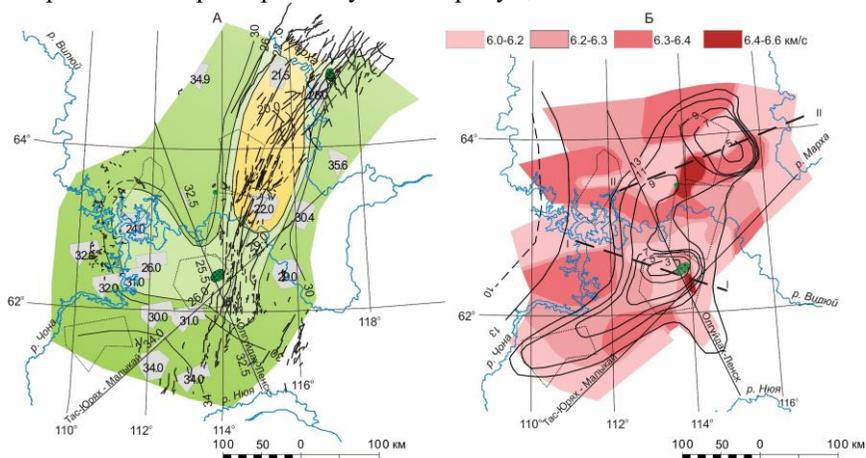


Рисунок 5 – Сопоставление рельефа внутрикоревой границы (изогипсы в км) и Вилейско-Мархинского дайкового пояса (А) и совмещенные схемы рельефа верхнекоревой границы I и распределения граничной скорости на поверхности фундамента (Б) по [Suvorov, Melnik et al., 2006; Суворов, Мельник и др., 2010; Suvorov, Melnik, 2011]. Пунктирными контурами показаны расстановки регистраторов, прямыми линиями – профили ГСЗ, линиями I–I и II–II отмечено положение сводных сейсмических разрезов верхней части коры, построенных по данным площадных наблюдений. Мирнинское и прогнозное Сьюльдокарское [Новое...поле..., 2016] кимберлитовые поля затושеваны темно-зеленым цветом

В пятнистом характере распределения скорости на поверхности фундамента трудно найти какую-либо региональную упорядоченность. Возможно, это объясняется не очень большим размером исследованной территории. Неясна и природа обнаруженных локальных аномалий, можно

только заметить, что столь высокие скорости характерны для основных (типа габбро) или метаморфических пород нижней коры (с учетом компрессионного эффекта), выведенных на поверхность фундамента. Генетически связать такие процессы с кимберлитовым магматизмом едва ли возможно, но важно, что такие участки земной коры могут иметь повышенную проницаемость и способствовать выносу кимберлитовой магмы к поверхности.

В рельефе верхнекоровой границы I, залегающей в верхах консолидированной коры на глубине 10–13 км, отчетливо проявляется протяженное поднятие северо-восточного простирания (Рисунок 5Б). В его пределах наблюдаются разобщенные выступы с амплитудой поднятия до 7–9 км, один из которых расположен в окрестности Мирнинского кимберлитового поля. Другой, Ыгыаттинский, располагается в междуречье Вилюя и Мархи и незначительно смещен на восток от расстановки регистраторов 1988 г. Восточные борта выступов более крутые, чем западные, при этом Ыгыаттинский выступ амплитудой до 5–7 км имеет поперечные размеры около 70 км при минимальной глубине границы I около 5 км. Мирнинский выступ по границе I, располагающийся практически под расстановкой регистраторов 1982 г., имеет примерно такие же размеры при наименьшей ее глубине около 3 км. Аномалия повышенной скорости в районе Мирнинского поля в виде узкого тела, вытянутого в северо-западном направлении, приурочена к юго-восточному склону выступа границы I. На Ыгыаттинском выступе аналогичная аномалия располагается в пределах юго-западного, относительно более пологого склона (Рисунок 5Б). Значение скорости в аномалиях близко к граничной скорости на границе I, что может быть обусловлено ее поднятием до уровня поверхности фундамента [Суворов, Мельник и др., 2010]. Имеющиеся сейсмические данные не позволяют найти однозначное решение этой задачи.

Рассматриваются сводные сейсмические разрезы, пересекающие две выделенные аномальные зоны с повышенными значениями граничной скорости на поверхности фундамента (Рисунок 6). Линия I–I пересекает юго-восточную часть выступа границы I и район Мирнинского поля, расположенного в пределах узкой аномалии повышенной скорости в верхах фундамента (Рисунок 6А). Близкое соотношение между распределением скорости в фундаменте и рельефом границы I наблюдается в разрезе и по линии II–II (Рисунок 6Б), где аномалия повышенной скорости приурочена к юго-западной прибортовой части поднятия. На обоих разрезах аномалии скорости 6.5–6.6 км/с, отмечающиеся на противоположных склонах протяженного поднятия границы I, ограничены участками с пониженными значениями до 6.1 км/с [Суворов, Мельник и др., 2010]. Можно предполагать, что соотношение между Мирнинским полем и обнаруженной локальной аномалией

повышенной скорости на склоне поднятия границы I не является случайным. Соответственно, такие особенности строения верхней части консолидированной коры с характерной аномалией скорости, приуроченной к склону поднятия границы I, можно принять за прогнозные признаки кимберлитового магматизма в Мало-Ботуобинском и сопредельных районах.

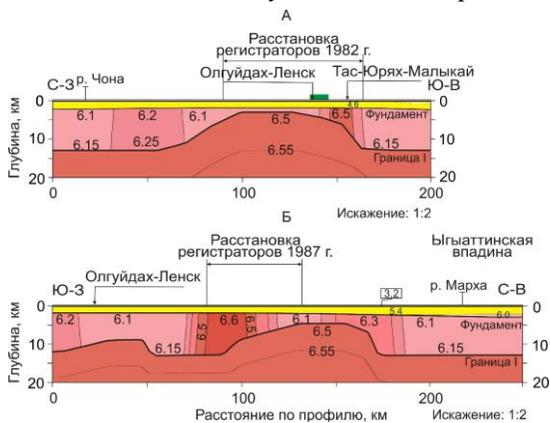


Рисунок 6 – Сейсмические разрезы верхней коры по площадным наблюдениям в сечениях А (I–I) и Б (II–II) (см. Рисунок 5) [Суворов, Мельник и др., 2010]. Толстые линии – сейсмические границы, тонкие – изолинии скорости, цифры – значения скорости на кровле и подошве слоев в км/с. Вертикальными стрелками отмечены пересечения с профилями Олгуйдах–Ленск, Тас–Юрях–Малькай, зеленым прямоугольником – положение Мирнинского кимберлитового поля

Полученные результаты. Для эталонного объекта Мирнинского кимберлитового поля создана латерально-неоднородная сейсмическая модель верхней части земной коры и выявлены структурно-скоростные критерии проявления кимберлитового магматизма. По аналогии с эталонным Мирнинским полем в междуречье Вилюя и Мархи установлены схожие структурно-скоростные критерии, подтвержденные в 2015 г. открытием Слюдянской кимберлитовой трубки.

Глава 4. Сейсмические неоднородности земной коры и верхней мантии южной и восточной окраин Сибирского кратона (профиль 3-ДВ)

Представлены детальные латерально-неоднородные скоростные модели земной коры и верхов мантии восточной, южной окраин Сибирского кратона и локализованные глубинные корни региональных тектонических

структур Алдано-Станового щита и Верхоянской пассивной континентальной окраины по комплексу данных разномасштабных МПВ и ГСЗ опорного профиля 3-ДВ.

Сейсмические модели по профилю представлены в ряде работ [Рудницкая и др., 2013; Гошко и др., 2014; Кашубин и др., 2018, 2021; и др.], где предложены различные комплексные геологические интерпретации структуры всей толщи земной коры и рельефа Мохо, основанные преимущественно на данных ОГТ, без учета неоднородностей, связанных со слоистостью и скоростью по глубине и по латерали.

Сейсмические наблюдения вдоль профиля получены по двум системам наблюдений МПВ и ГСЗ. В качестве источников возбуждения МПВ использовалась группа вибраторов «Русич» (30 т) при длине свипа 30 с в полосе частот 10–36 Гц, длина расстановки станций (input-output) составляла 40 км при шаге между сейсмоприемниками 50 м и пунктами возбуждения 10 км вдоль криволинейной трассы наблюдений (Рисунок 7).

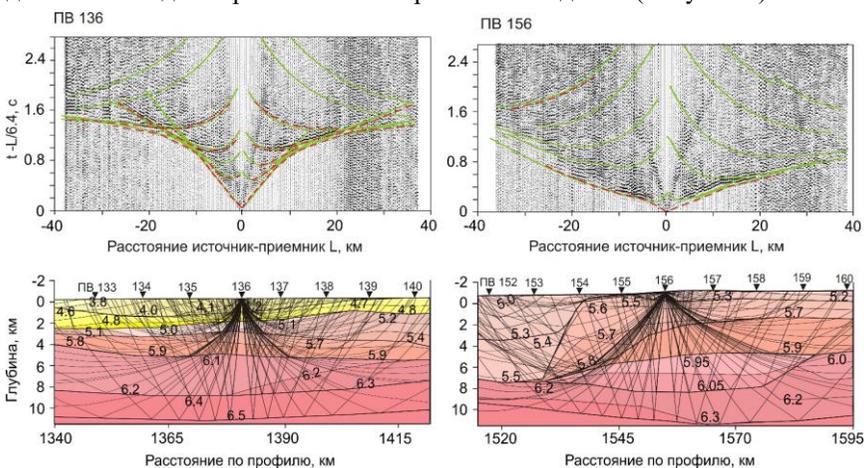


Рисунок 7 – Примеры коррелограмм и лучевых схем распространения преломленно-рефрагированных и отраженных волн на участке Приверхоянского (слева) и Тылового (справа) прогибов восточной окраины Сибирского кратона. Красные линии соответствуют (в редуцированном масштабе времени, L – расстояние источник–приемник) наблюдаемым годографам, зеленые – рассчитанным

Система наблюдений ГСЗ определена средним расстоянием между пунктами возбуждения (взрывы в неглубоких водоемах) 15–30 км, телеметрическими четырехканальными станциями «Роса-А» с шагом между ними 3–6 км и расстоянием источник–приемник до 400–500 км (Рисунок 8).

Построение сейсмического разреза проводилось методом прямого лучевого трассирования при направленном подборе параметров [Zelt, 1999] с невязками между наблюдаемыми и рассчитанными временами пробега продольных волн, не превышающими в среднем 0.05–0.07 с по данным МПВ для верхней коры и 0.1–0.15 с по данным ГСЗ для всей ее толщи [Суворов, Мельник, 2021].

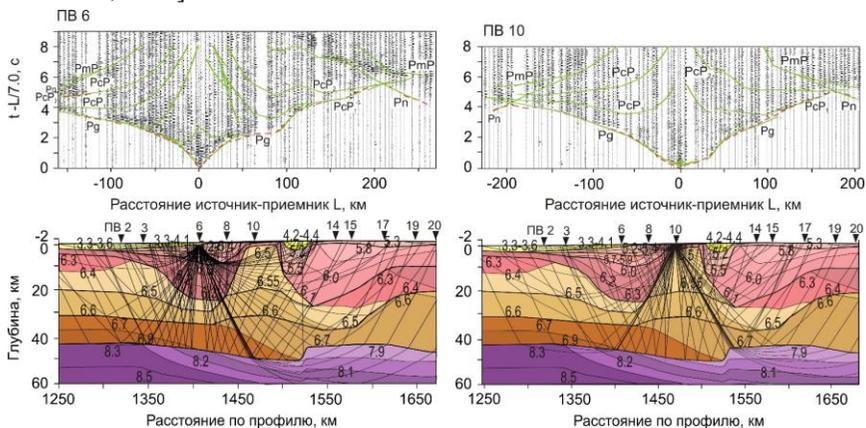


Рисунок 8 – Примеры редуцированных (нормированных) сейсмограмм ГСЗ (скорость редуции 7.0 км/с) и результаты моделирования структуры коры восточной окраины Сибирского кратона совместно с лучевыми траекториями распространения волн. На сейсмограммах отмечены преломленно-рефрагированные волны (P_g в коре, P_n в мантии) и отраженные от границ в коре (PcP_1 , PcP_2) и Мохо (PmP)

Примеры коррелограмм и результаты моделирования иллюстрируют волновую картину на восточной окраине Сибирского кратона на участках Приверхоянского и Тылового прогибов с наиболее отчетливыми фазами отраженных волн, определяющими возможность обнаружения слоистости в пределах впадин (Рисунок 7). Особенности моделирования структуры земной коры связаны, как и в ее верхней части, с повышенной ролью закритических отраженных волн, прослеживаемых в последующих и в видимых первых вступлениях (Рисунок 8). В прямом направлении из ПВ 6 волны, проходящие через высокоскоростную аномалию (выражена участком повышенной кажущейся скорости), характеризуются пониженной интенсивностью. Также хорошо видно различие значений времен пробега волны P_n (ПВ 10) в Верхояно-Колымской складчатой области в сравнении с Сибирским кратоном (ПВ 6), достигающее 1 с и связанное с утолщением слоя верхней коры со скоростью 5.9–6.2 км/с.

Сейсмическая модель земной коры восточной окраины Сибирского кратона. В верхней коре закартированы прогибы: передовой Приверхоянский, локальный Тыловой с прилегающей к нему частью Верхояно-Колымской складчатой области (Рисунок. 9). Прогибы разделены Сетте-Дабанской тектонической зоной в виде блока (предположительно, магматической природы) шириной около 50 км с аномально повышенной до 6.5–6.6 км/с скоростью [Суворов, Мельник, 2019, 2021].

За границу кратона можно принять наклонную разломную зону (с углом наклона $\sim 15^\circ$), в соответствии с выклиниванием Приверхоянского прогиба, согласными изменениями мощности слоев в нижней части коры и ступенеобразным рельефом Мохо [Суворов, Мельник 2019, 2021]. Принципиальных различий в региональной структуре верхней коры между Приверхоянским передовым прогибом и складчатой областью восточнее Сетте-Дабанской тектонической зоны не выявлено. Дискуссионной остается оценка мощности осадочного чехла в прогибах, которая может значительно увеличиться за счет слоя со скоростью 6.0–6.2 км/с, что ближе к оценке мощности чехла, по геологическим данным (20–24 км) [Тектоника..., 2001].

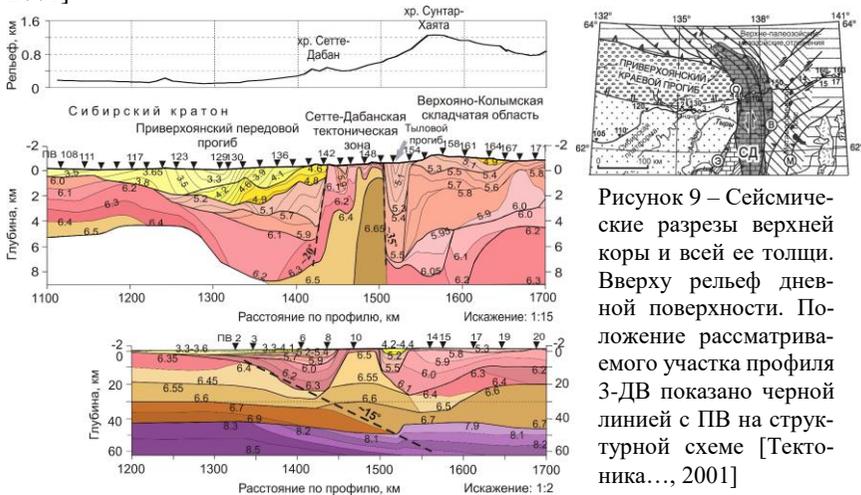


Рисунок 9 – Сейсмические разрезы верхней коры и всей ее толщи. Вверху рельеф дневной поверхности. Положение рассматриваемого участка профиля 3-ДВ показано черной линией с ПВ на структурной схеме [Тектоника..., 2001]

По геологическим представлениям, Верхояно-Колымская складчатая область относится к пассивной континентальной окраине Сибирского кратона, подверженной мезозойской складчатости [Тектоника..., 2001]. Пониженный рельеф в начальной части профиля соответствует передовому прогибу, что нехарактерно для Тылового, расположенного на склоне хр. Сунтар-Хаята. Возможно, что его формирование (предположительно,

одновозрастное с передовым), как и магматического массива, предшествовало мезозойской складчатости, что является геофизическим аргументом в пользу пассивной континентальной окраины [Суворов, Мельник, 2021; Суворов, ..., Мельник, 2022].

Строение земной коры Алдано-Станового щита (южной окраины Сибирского кратона) в приповерхностной ее части представлено тремя латерально неоднородными слоями, структура которых контролируется сейсмоактивной Чульманской впадиной (Рисунок 10).

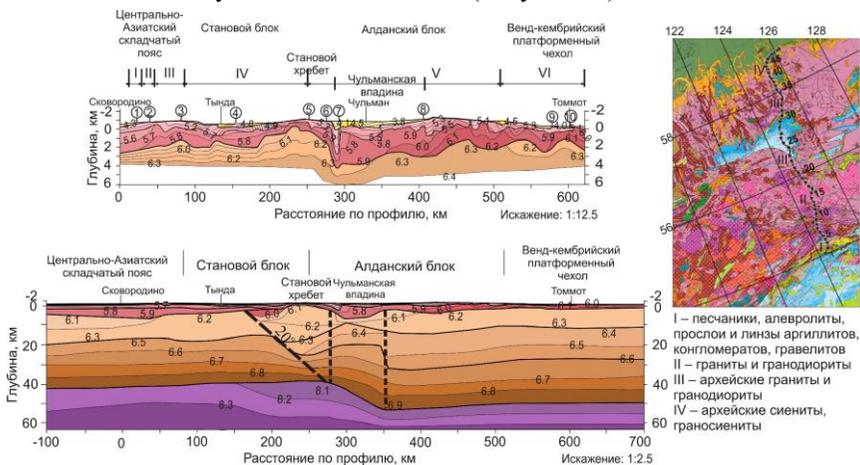


Рисунок 10 – Сейсмические модели верхней коры (вверху) и всей ее толщи (внизу). На геологической карте вещественного состава пород [Атлас..., 2008], показано положение профиля (крестики с номерами соответствуют положению пунктов возбуждения), на разрезах римскими цифрами указаны тектонические блоки, цифрами в кружках – разломы по [Диденко и др., 2013]

Первый, прерывистый, слой (скорость 3.8–4.5 км/с) соответствует мезо-кайнозойским впадинам. Второй, с исключительно контрастным рельефом подошвы (скорость 4.9–5.4 км/с), можно отнести к коре выветривания разновозрастных кристаллических пород, третий – к вариациям вещественного состава и их дезинтеграции. Мощность третьего слоя уменьшается вдоль профиля вплоть до его выклинивания в области Станового хребта и далее утоняется к северу от Чульманской впадины до окончания участка профиля [Суворов, Мельник и др., 2016]. Если в пределах Станового блока (IV) соотношение рельефов кровли и подошвы этого слоя является инверсионным, то в Алданском блоке (V) их залегание согласное.

Подошва третьего слоя (скорость 6.1–6.2 км/с) отнесена, по аналогии с Сибирским кратоном [Суворов, Мельник и др., 2023], к поверхности раннедокембрийского фундамента [Смелов, Тимофеев, 2003].

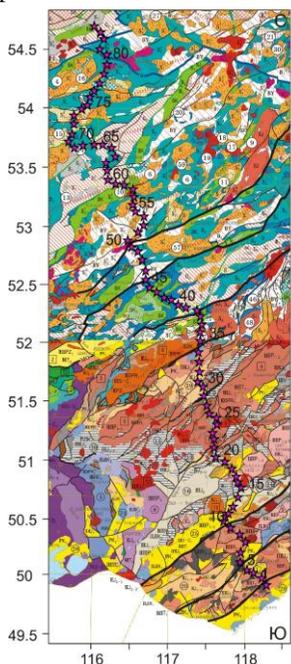
В Становом блоке кора представлена двухслойной моделью, в Алданском блоке – трехслойной, разделенные ступенчатым увеличением мощности коры под южной частью сейсмоактивной Чульманской впадины (Рисунок 10) [Суворов, Мельник и др., 2023]. В центральной части профиля выделяется наклонная под углом 20° зона вероятного разлома, объединяющая ступень на Мохо с унаследованными погружениями кровли нижнего слоя коры и рельефа преломляющей границы, маркирующей положение раннедокембрийского кристаллического фундамента [Смелов, Тимофеев, 2003]. Здесь же под Чульманской впадиной в средней коре формируется промежуточный слой (отсутствует в Становом блоке) и утолщается приповерхностный. При этом возникает сложность не единственности определения зоны сочленения блоков в треугольной приповерхностной области, выклинивающейся на подошве коры, ограниченной на юге наклонным разломом и на севере вертикальной неоднородной зоной в окрестности южного борта Чульманской впадины [Суворов, Мельник и др., 2023]. Столь нетипичная для Сибирского кратона структура земной коры Алдано-Станового щита выделяет его в отдельный объект для изучения природы выявленных неоднородностей в связи с мантийной частью литосферы и сейсмичностью Чульманской впадины.

Полученные результаты. Получено новое представление о сейсмической структуре земной коры южной и восточной окраин Сибирского кратона, где восточное его ограничение является пассивной континентальной окраиной, подверженной мезозойской складчатости. Выявлено главное структурно-скоростное отличие Алдано-Станового щита от Сибирского кратона, выраженное в пониженной по сравнению с кратоном скорости в верхней коре. Обнаружено существенное различие в слоисто-блоковой структуре земной коры и верхов мантии щита, представленное в Становом блоке двухслойной моделью, в Алданском блоке – трехслойной.

Глава 5. Разномасштабная латерально-неоднородная структура верхней коры Саяно-Байкальской складчатой области

По данным МПВ вдоль опорного профиля 1-СБ определена разломно-складчатая структура верхней коры методом прямого лучевого трассирования и выявлена корреляция между приповерхностными геологическими и прослеженными на глубину 3–5 км сейсмическими неоднородностями, с оценкой возможности структурно-тектонического районирования. Профилем пересечены Монголо-Забайкальская и Саяно-Байкальская складчатые

области (Рисунок 11), представленные разнообразными и разновозрастными тектоническими структурами, разделенными разломными зонами [Парфенов и др., 2003; Гордиенко, 2006; Диденко и др., 2010]. Принципиальная новизна решения задачи заключается в применении системы наблюдений МПВ при изучении складчатых структур, тогда как традиционно он применяется в условиях пологозалегающих слоев [Беляшов, ..., Мельник, 2013, 2015, 2020а, 2020б]. Детальная изученность геологическими методами района расположения профиля делает его эталонным для оценки эффективности сейсмического метода.



Сейсмические данные вдоль криволинейного профиля получены по системе наблюдений МПВ, аналогичной системе на профиле 3-ДВ. Сейсмический разрез построен методом прямого лучевого трассирования с использованием технологии направленного подбора [Zelt, 1999] при невязках между наблюдаемыми и рассчитанными временами пробега продольных волн, не превышающих в среднем 0.05–0.07 с [Суворов, Мельник и др., 2018].

Рисунок 11 – Положение профиля на фрагменте тектонической карты [Цифровой каталог..., 2010]. Звездочками показаны пункты возбуждения, даны их номера, толстыми линиями показаны наиболее контрастные разломы, выделенные по геологическим данным

Структурно-скоростные характеристики верхней коры до глубины 3–5 км отличаются значительными изменениями скорости и мощности выделенных слоев (Рисунок 12). Наиболее контрастно проявлены зоны разломов, сопряженные с локальными прогибами, заполненными осадками мезокайнозойского возраста с пониженной до 2.8–4.5 км/с скоростью. В подстилающих породах скорость скачком увеличивается до 5.0–5.8 км/с и возрастает до 6.0–6.2 км/с на глубине до 3–5 км. Углы падения разломов, прослеженных на глубину 3–5 км, оцениваются по наклону осевых линий, изменяющихся в интервале 15–30°. При этом в южной части профиля вплоть

до Монголо-Охотского разлома включительно осевые линии таких зон падают на юг, тогда как в северной части, начиная с Могоча-Бушулейского разлома, направление падения изменяется на северное. Таким образом, Монголо-Забайкальская и Саяно-Байкальская складчатые области различаются направлениями падения зон разломов [Мельник, Суворов, 2018; Суворов, Мельник и др., 2018; Мельник, Суворов, 2018a].

Интенсивность складчатости, проявляющаяся в изменениях скорости, мощности слоев и амплитуды складок, значительно меняется вдоль профиля. По наибольшей контрастности таких изменений можно выделить участок профиля 220–380 км, тогда как для северного участка профиля интенсивность складчатости уменьшается в более протяженных блоках, разделенных узкими зонами разломов [Суворов, Мельник и др., 2018; Мельник, Суворов, 2018b; Суворов, ..., Мельник, 2019].

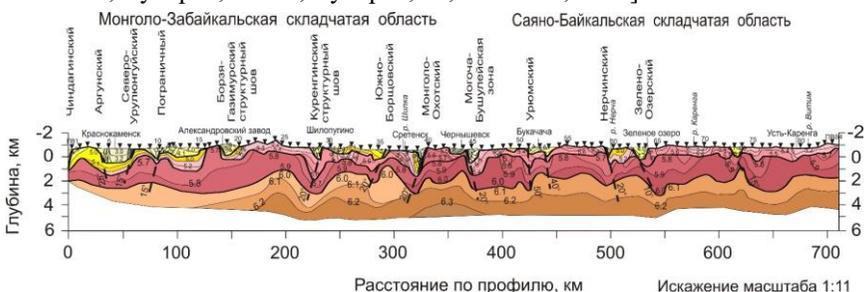


Рисунок 12 – Сейсмический разрез верхней коры по профилю 1-СБ (южный участок). Тонкими линиями показаны изолинии скорости в км/с, толстыми – сейсмические границы, штриховые линии соответствуют осевым линиям разломных зон по [Цифровой каталог..., 2010]

Детальная корреляция между сейсмическими и геологическими неоднородностями показана на Рисунке 13 в более крупном масштабе для начальной части профиля 0–220 км, пересекающей западный борт Газимурского синклиниория шириной около 30 км (ПВ 4–7) и северо-восточное ограничение Западно-Урулюнгульской грабен-синклинали шириной около 100 км (ПВ 9–16) [Суворов, Мельник и др., 2018]. Двухслойный чехол синклиниория общей мощностью около 2 км заполнен в верхнем слое породами со скоростью 3.0–3.2 км/с и 5.0–5.3 км/с – в нижнем, тогда как в Западно-Урулюнгульской грабен-синклинали в верхнем слое мощностью до 0.5–0.7 км скорость повышена и по латерали изменяется от 3.5 до 4.2 км/с. Эти различия в скорости объясняются изменениями в возрасте пород от плейстоценового в первой структуре до юрско-мелового – во второй. Мощность подстилающего слоя достигает 1 км при такой же скорости

5.0–5.2 км/с, как в Газимурском синклинии. К фундаменту этих впадин можно отнести кровлю слоя пород на глубине 1.5–2 км со скоростью 5.6–5.8 км/с.

Эти впадины разделены Тусуркайской и Кутомарской гранитогнейсовыми близповерхностными купольными структурами пермо-триасового возраста, где скорость, характерная для гранитоидов, повышена до 5.6–5.7 км/с. В расположенном севернее узком Борзя-Газимурском синклинии осадочные породы раннесреднеюрского возраста (ПВ 18–20, 140–160 км) мощностью до 1 км характеризуются скоростью 3.9–4.1 км/с. Мощность подстилающего слоя со скоростью 5.0–5.2 км/с также минимальна, и на глубине около 1 км скорость резко увеличивается до 5.7–5.9 км/с. Далее вдоль профиля, на участке между ПВ 20–27 на поверхности обнажаются породы со скоростью 5.2–5.4 км/с, относящиеся к раннепермскому Верхне-Удинскому интрузивному массиву. В его пределах на глубине около 0.3–0.5 км скорость возрастает до 5.8–5.9 км/с и до 6.0–6.1 км/с на глубине 1.5–2 км.

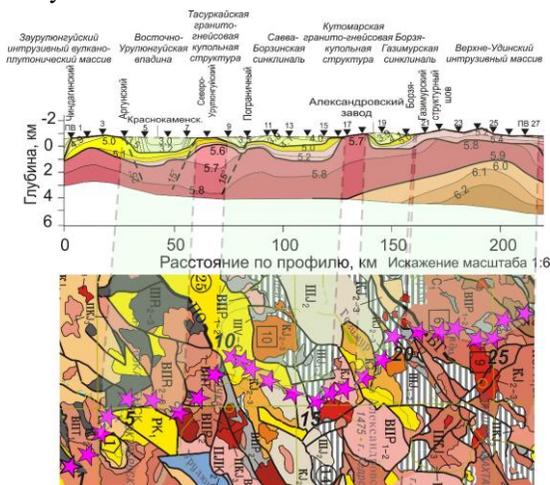


Рисунок 13 – Пример корреляции сейсмических неоднородностей разреза с геологическими характеристиками на фрагменте тектонической карты (см. Рисунок 11) для участка профиля 0–220 км. Звездочками на карте показаны пункты возбуждения с номерами, прозрачные трапеции – области соответствия структур в разрезе и на карте. Штриховыми линиями на разрезе показаны оси падения зон разломов с углами в градусах

Расширение возможности интерпретации сейсмических разрезов реализуется через комплексирование сейсмических параметров и результатов

плотностного моделирования (выполненного Е.В. Павловым и В.Д. Суворовым) путем использования корреляционных характеристик между сейсмоплотностным (произведение плотности на мощность слоя и на гравитационную постоянную) и сейсмическим (отношение квадрата средней скорости к мощности слоя) ускорениями, согласованными с сейсмоплотностной моделью [Суворов, Мельник и др., 2018]. Их изменения вдоль профиля дают дополнительную характеристику структурно-тектонических блоков верхней коры.

В целом полученные результаты указывают на высокую эффективность сейсмических данных по системе наблюдений МПВ при решении задачи структурно-тектонического районирования складчатых областей, существенно дополняющего глубинными корнями приповерхностные геологические структуры и создающего основу для более обоснованного прогнозирования магматических неоднородностей.

Петрофизическая неоднородность. Совместное использование сейсмических и гравитационных наблюдений способствует формированию нового подхода к комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, в том числе для разделения изменений, обусловленных влиянием, связанным с трещиноватостью пород и/или изменением их вещественного состава с глубиной. Он заключается в использовании параметра петрофизической (химической) неоднородности (η) [Магницкий, 1955; Буллен, 1966], описываемого зависимостью модуля сжатия и плотности от глубины. Теоретически величина η равна единице для однородных областей при изменениях скорости и плотности только за счет литостатического давления и отличается от нее при вещественных неоднородностях и фазовых переходах.

По данным лабораторных измерений на образцах различных типов горных пород, подвергнутых всестороннему сжатию [Баюк, Лебедев, 1988], общий тренд уменьшения коэффициента петрофизической неоднородности может быть обусловлен главным образом закрытием трещин, а отклонения от него связаны с изменениями вещественного состава [Суворов, Мельник, 2008; Melnik et al., 2016]. Это подтверждается результатами теоретического моделирования скоростей продольных, поперечных волн и плотности в зависимости от давления и температуры в сухих магматических породах, где фактор трещиноватости не учитывался [Sobolev, Babeiko, 1994]. Для них величина η близка к единице во всем диапазоне изменений скоростей, минерального состава, давления (глубины) и температуры [Мельник и др., 2014, 2016]. Аналогичные расчеты были сделаны и для земной коры северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны по данным профилями ГСЗ через Муйскую впадину [Мишенькина, Мишенькин, 2004]. Значения коэффициента петрофизической неоднородности в целом для этого района

уменьшается с глубиной от 20–30 до 2–3, стабилизируясь в интервале глубин 10–20 км. Вместе с тем на фоне общего уменьшения наблюдаются значительные локальные положительные и отрицательные аномалии в пределах узких протяженных и наклонных зон, достигающих глубины 20–25 км [Мельник и др., 2016; Melnik et al., 2016]. При удалении трендовой компоненты, которая, как предполагается, связана с трещиноватостью пород, остаются петрофизические аномалии, обусловленные только вещественным составом. Сопоставление с геологическими данными [Государственная...карта РФ, 2010] показывает их возможную приуроченность к зонам сочленения блоков архейских и протерозойских пород, представленных зонами динамометаморфитов и диафторитов. Комплексный параметр петрофизической неоднородности свидетельствует о возможности разделения эффектов влияния на сейсмическую скорость и плотность связанных как с трещиноватостью, уменьшающейся под действием давления, так и с изменениями вещественного состава. Это представляет интерес при выделении в земной коре структур, контролирующих размещение месторождений полезных ископаемых.

Полученные результаты. Численным методом обработки сейсмических данных показаны новые возможности изучения разломно-складчатых структур верхней коры по системе наблюдений МПВ, ранее применявшейся только в платформенных условиях. Для эталонного объекта Забайкалья по профилю 1-СБ установлена связь между сейсмическими структурно-тектоническими и магматическими неоднородностями. Предложен также подход к комплексной интерпретации сейсмоплотностных данных на основе коэффициента петрофизической неоднородности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена развитию интерпретационной базы результатов применения активной сейсмики при изучении разномасштабной структуры земной коры и верхней мантии Сибирского кратона, его восточной и южной окраин, представленных сейсмическими неоднородностями, их связью с геотектоническими приповерхностными характеристиками и глубинными корнями. Особенность исследования заключается в обработке и интерпретации архивных и современных данных профильных и площадных сейсмических наблюдений с применением численных алгоритмов решения прямой кинематической задачи сейсмики в классе двумерно-неоднородной модели среды при обоснованной оценке разрешающей способности в зависимости от плотности систем полевых наблюдений.

Предложенная в работе латерально-неоднородная трехслойная модель верхней мантии (двухслойная литосфера и подстилающая астеносфера) с

учетом сферичности Земли вдоль профилей Рифт, Метеорит и Кратон принципиально отличается от известных восьми-, девятислойных (многопараметрических) структур, ранее полученных в квазидвумерном приближении, что обеспечивает, за счет уменьшения количества неизвестных параметров, построение более обоснованных моделей мантийной литосферы с горизонтальными неоднородностями размерами более 300 км.

Интерес представляет корреляция между региональными структурами земной коры и неоднородностями литосферы в виде изменений мощности высокоскоростного слоя в ее нижней части от 170 км в области трапповой Тунгусской синеклизы, до 100 км под Западно-Сибирской плитой и 30–50 км под Якутской кимберлитовой провинцией и Вилюйской синеклизой. Полное его выклинивание приурочено к зоне сочленения Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы (профиль Кратон). Можно предполагать, что эти неоднородности обусловлены их геодинамической природой.

Численным моделированием волнового поля по оцифрованным данным площадных наблюдений ГСЗ уточнены ранее полученные структурно-скоростные характеристики земной коры в Мало-Ботуобинском кимберлитовом районе и сопредельных территориях, а именно рельеф внутрикоровой границы, залегающей на глубине 20–34 км в виде регионального поднятия северо-восточного простирания, соответствующего Вилюйско-Мархинскому дайковому поясу, высокоамплитудные поднятия верхнекоревой границы I, залегающей на глубине 3–10 км, и локальные аномалии скорости до 6.5–6.6 км/с в верхах фундамента, к одной из которых приурочено эталонное Мирнинское кимберлитовое поле. В районе другой подобной аномалии, расположенной в междуречье Вилюя и Мархи, в 2015 г. обнаружена Стюльдюкарская кимберлитовая трубка.

Повышению степени достоверности результатов моделирования структуры земной коры и верхов мантии по данным ГСЗ способствует учет сейсмических характеристик верхней части разреза по наблюдениям МПВ. По опорному региональному профилю 3-ДВ получено новое (в сравнении с данными ОГТ) представление о сейсмической структуре зоны сочленения Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой области в виде сейсмических признаков пассивной континентальной окраины, проявляющихся в передовом Приверхоанском и Тыловом прогибах с глубиной залегания фундамента до 20 км, что подтверждает существующие геодинамические представления.

Отличительной особенностью строения земной коры Алдано-Станового щита является значительно пониженная скорость в ее приповерхност-

ной части, представленной корой выветривания и дезинтегрированной толщей пород общей мощностью, изменяющейся от 1 до 3–5 км. Подстилающий же кристаллический фундамент характеризуется скоростью около 6.2 км/с, что значительно меньше, чем на Сибирской платформе (6.3–6.4 км/с). Существенная неоднородность наблюдается в земной коре под Чульманской впадиной, подстилаемой ступенеобразным погружением Мохо от 40 км под двухслойным Становым блоком до 50 км под трехслойным Алданским. Однако отчетливо представленной зоны в земной коре, разделяющей эти блоки, не выявлено.

Численным моделированием разломно-складчатой структуры верхней коры Саяно-Байкальской складчатой области по данным МПВ (опорный профиль 1-СБ), ранее применявшегося только в платформенных условиях, установлена высокая корреляция между распределением структурно-скоростных параметров, прослеженных на глубину 3–5 км, и структурно-тектоническим районированием по геологическим данным.

Расширение возможностей интерпретации сейсмических данных реализуется совместно с результатами гравитационных наблюдений путем комплексирования сейсмоплотностных параметров через коэффициент петрофизической неоднородности. Районирование его изменений в земной коре позволяет получить сведения о ее трещиноватости (зоны разломов) и вещественных неоднородностях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

1. Suvorov V.D. Seismic velocity model of the crust and uppermost mantle around the Mirnyi kimberlite field / V.D. Suvorov, **Е.А. Melnik** [et al.] // *Tectonophysics*. – 2006. – Vol. 420, No 1-2. – P. 49–73.

2. Суворов В.Д. О петрофизической неоднородности земной коры и верхов мантии в двух районах Сибири по сейсмогравитационным данным и измерениям на образцах горных пород / В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** // *Физическая мезомеханика*. – 2008. – № 1. – С. 101–109.

3. Суворов В.Д. Региональная 3D структура фундамента Мало-Ботуобинского алмазоносного района по данным первых вступлений сейсмических волн / В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** // *Технологии сейсморазведки*. – 2010. – № 3. – С. 85–95.

4. Суворов В.Д. Сейсмические верхнемантийные корни структур фундамента Сибирской платформы по профилю Рифт / В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник**, З.Р. Мишенькина // *Геология и геофизика*. – 2010. – Т. 51, № 8. – С. 1134–1150.

5. Беляшов А.В. Сейсмическое изучение верхней части разреза на участке Семипалатинского ядерного испытательного полигона / А.В. Беляшов, В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 3. – С. 64–75.
6. Суворов В.Д. Сейсмические неоднородности верхней мантии под Сибирским кратоном (профиль Метеорит) / В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** [и др.] // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 9. – С. 1411–1426.
7. **Melnik E.A.** Seismic and density heterogeneities of lithosphere beneath Siberia: Evidence from the Craton long-range seismic profile / E.A. Melnik [et al.] // Polar Science. – 2015. – Vol. 9, No 1. – P. 119–129.
8. Беляшов А.В. Техногенно-измененные приповерхностные породы на участке Семипалатинского испытательного полигона: характеристика по сейсмическим данным / А.В. Беляшов, В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 106–110.
9. Суворов В.Д. Глубинное строение Чульманской впадины по временам пробега волн в первых вступлениях / В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник**, З.Р. Мишенькина // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 2. – С. 109–117.
10. **Мельник Е.А.** Петрофизическая интерпретация сейсмоплотностных данных (на примере Муйской впадины) / Е.А. Мельник, В.Д. Суворов, З.Р. Мишенькина // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 4. – С. 84–91.
11. Суворов В.Д. Геомеханические условия роста Тянь-Шаня и Алтая / В.Д. Суворов, ..., **Е.А. Мельник** [и др.] // Докл. РАН. – 2017. – Т. 476, № 5. – С. 562–566.
12. Суворов В.Д. Региональное структурно-тектоническое районирование верхней коры Забайкалья по сейсмогравитационным данным вдоль опорного профиля 1-СБ [Электронный ресурс] / В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** [и др.] // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 439–459.
13. Беляшов А.В. Приповерхностные техногенные сейсмические неоднородности в местах проведения подземных ядерных взрывов (Семипалатинский полигон) / А.В. Беляшов, В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** // Геофизические исследования. – 2020а. – Т. 21, № 2. – С. 29–47.
14. Суворов В.Д. Сейсмическая модель зоны сочленения Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы (опорный профиль 3-ДВ) / В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** // Физика Земли. – 2021. – № 6. – С. 52–67.
15. Суворов В.Д. Структура земной коры Алдано-Станового щита по данным МПВ и ГСЗ (южная часть профиля 3-ДВ) [Электронный ресурс] / В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник**, Е.В. Павлов // Геодинамика и тектонофизика. – 2023 – Т. 14, № 1. – С. 1–14.

Публикации в других рецензируемых научных изданиях

16. Suvorov V.D. 3D structure of the crust and uppermost mantle beneath Yakutian kimberlite province (Siberia) from DSS data / V.D. Suvorov, **Е.А. Melnik** // International Conference on Craton Formation and Destruction Schedule and Abstracts (Beijing, China, April 25-29, 2011). – Beijing, 2011. – P. 152.

17. **Мельник Е.А.** Петрофизическая интерпретация сейсмогравитационных данных (на примере Муйской впадины) / Е.А. Мельник, В.Д. Суворов, З.Р. Мишенькина // Геофизические методы исследования земной коры: Мат. Всерос. конф., посвященной 100-летию со дня рожд. акад. Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8-13 декабря 2014 г.). – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014. – С. 222–227.

18. **Melnik E.A.** Petrophysical interpretation of seismic and gravity data (the example of the Muya depression) / E.A. Melnik, V.D. Suvorov, Z.R. Mishenkina // 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition. Understanding the Harmony of the Earth's Resources through Integration of Geosciences (Saint Petersburg, Russia, 11-14 April). – Saint Petersburg, 2016. – P. 1–4.

19. **Мельник Е.А.** Латеральные сейсмические неоднородности верхней мантии под Сибирским кратоном / Е.А. Мельник, В.Д. Суворов, Е.В. Павлов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр.: сб. мат. междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. – Т. 4. – С. 3–7.

20. **Melnik E.A.** Regional tectonic structure of the Transbaikalia crust from seismic data (Profile 1-SB) / E.A. Melnik, V.D. Suvorov // First workshop of IGCP-662 project. Orogenic architecture and crustal growth from accretion to collision: Abstract Volume (Dunhuang and Beijing, China, 15-22 September). – Beijing, 2018. – P. 57–59.

21. **Мельник Е.А.** Структурно-тектоническое районирование земной коры в Забайкалье по сейсмическим данным (профиль 1-СБ) / Е.А. Мельник, В.Д. Суворов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018. XIV Междунар. науч. конгр.: сб. мат. междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск: СГУГиТ, 2018а. – Т. 3. – С. 303–311.

22. **Мельник Е.А.** Восстановление структуры земной коры Забайкалья по данным глубинных сейсмических исследований / Е.А. Мельник, В.Д. Суворов // Международный научно-исследовательский журнал. – 20186. – № 12-2 (78). – С. 92–97.

23. Суворов В.Д. Сейсмическая структура верхов земной коры в коллизийной зоне Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы (профиль 3-ДВ) / В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** // Естественные и технические науки. – 2019. – № 11. – С. 244–248.

24. Суворов В.Д. Сейсмоплотностная структура верхней коры Забайкалья (профиль 1-СБ, южный участок) / В.Д. Суворов, Е.В. Павлов, **Е.А. Мельник** // Естественные и технические науки. – 2019. – № 12. – С. 157–159.

25. Беяшов А.В. Выявление приповерхностных следов от подземных ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне с помощью активного сейсмического метода / А.В. Беяшов, В.Д. Суворов, **Е.А. Мельник** // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. – 20206. – № 3 (83). – С. 105–112.

26. Суворов В.Д. Сейсмоплотностные признаки мезозойской складчатости в земной коре восточной пассивной окраины Сибирского кратона (профиль 3ДВ) / В.Д. Суворов, Е.В. Павлов, **Е.А. Мельник** // Геофизические технологии. – 2022. – № 1. – С. 110–117.

27. **Мельник Е.А.** Структура литосферы и признаки астеносферы Сибири по данным от ядерных взрывов / Е.А. Мельник, В.Д. Суворов // Добрецовские чтения: Наука из первых рук: Мат. Первой Всерос. науч. конф. (Новосибирск, 1-5 августа 2022 г.). – Новосибирск: СО РАН, 2022. – С. 192–195.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано к печати 26.07.2023

Бумага 60x84/16. Бумага офсет № 1. Гарнитура «Таймс».

Печ. л. 2,5. Тираж 120. Заказ № 222

ИНГГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3.