На правах рукописи

## Гоев Андрей Георгиевич

# СКОРОСТНОЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ КОЛЛИЗИОННОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> Москва 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН)

## Научный руководитель:

доктор физико-математических наук	Санина Ирина Альфатовна	
Научный консультант:		
кандидат физико-математических наук	Косарев Григорий Леонидович	
Официальные оппоненты:		
доктор геолого-минералогических наук, ведущий	Мордвинова Валентина	
научный сотрудник Федерального государственного	Владимировна	

научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН)

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) Орешин Сергей Иванович

## Ведущая организация:

Автореферат разослан

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)

Защита состоится «02» апреля 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д002.050.01 Федерального бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте idg.chph.ras.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета Д002.050.01 кандидат физико-математических наук

С.З. Беккер

« » 2020 г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность работы

В связи с активным развитием методов исследования глубинного строения земной коры и мантии, а также расширением возможностей инструментальной исследованию глубинного базы. возрос интерес к строения древних докембрийских платформ. Делаются попытки использования комплекса геотермических, сейсмических И петролого-геохимических ланных лля определения структурной, температурной, вещественной и изотопной (вертикальной и латеральной) верхней мантии неоднородностей Земли. Существующие геохимические и геофизические модели неравнозначны по своей вертикальной и латеральной разрешающей способности, при этом приоритетное значение для всех последующих реконструкций имеют данные глубинных сейсмических исследований.

Центральная часть Русской платформы (коллизионная зона) или, в другой терминологии центральная часть Восточно-Европейской платформы (ВЕП), является местом соединения в единый континент трех архейских прото-кратонов (мегаблоков) – Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии. Ее глубинное строение представляет несомненный интерес для изучения процессов ранней геологической истории Земли. В то же время этот регион в настоящее время является наименее исследованной с точки зрения особенностей глубинного строения верхней мантии и процессов ее формирования. Из-за слабой сейсмической активности на территории ВЕП ранее не ставилась задача установки плотной сети сейсмических станций, что препятствовало использованию современных методов получения знаний о глубинном строении, в том числе наличии на этой территории возможных сейсмогенерирующих структур.

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения надежных и детальных данных сведений о границах в литосфере, мантии и переходной зоне мантии под Русской плитой; распределении скоростей, движениях и деформациях, вызванных пластическими течениями в верхней мантии, поскольку именно эти данные дают возможность полнее и точнее описать структуру мантии, ее динамику и эволюцию Земли в целом.

#### Цели исследования

Целью данного исследования является определение особенностей скоростных характеристик земной коры и верхней мантии коллизионной зоны тройного сочленения мегаблоков центральной части Восточно-Европейской платформы по данным телесейсмических событий. Для достижения поставленной цели в процессе работы над диссертацией необходимо было решить следующие задачи:

- Обеспечить накопление представительного набора сейсмограмм удаленных землетрясений (эпицентральные расстояние 40<sup>0</sup> - 100<sup>0</sup>). С этой целью установить, дополнительные к уже существующим ("Обнинск" и "Михнево"), широкополосные сейсмические станции ("Воскресенск" и "Шатура")
- По записям телесейсмических событий, зарегистрированных на постоянно действующих и вновь установленных сейсмических станциях, провести расчет индивидуальных функций приемника объемных волн Р и S
- По полученным индивидуальным функциям приемника оценить скоростные характеристики верхней мантии исследуемого региона
- 4. На основе решения обратной задачи получить одномерные модели скоростного строения земной коры и верхней мантии до глубины 300 км для каждой из анализируемых станций
- 5. Для постоянно действующих сейсмических станций провести оценки азимутальной анизотропии по данным SKS волн
- Сопоставить полученные сейсмические результаты с известными геофизическими и геологическими данными

#### Научная новизна

Впервые для коллизионной зоны тройного сочленения микроконтинентов Восточно-Европейской платформы построены локальные скоростные модели литосферы и верхней мантии до глубины 250-300 км по данным телесейсмических событий, характеризующиеся рядом сейсмических границ - на всех разрезах выявлена граница верхняя-нижняя кора, кровля и подошва зоны Мохо, сейсмические границы в верхней мантии. <u>Впервые</u> для данного региона надежно выявлено наличие слоя пониженных скоростей в верхней мантии на глубинах 70-140 км.

Определены параметры азимутальной упругой анизотропии верхней мантии коллизионной зоны центральной части ВЕП и <u>впервые</u> осуществлена их привязка к, выявленным при моделировании, особенностям разреза - подкоровому слою и слою пониженной скорости в верхней мантии.

#### Практическая значимость

Практическая значимость приведенных в работе результатов состоит в том, что впервые получены представления о строении коллизионной зоны тройственного сочленения мегаблоков центральной части Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Вместе с известными сведениями о строении Балтийского щита и Северных районов ВЕП они могут служить основой для понимания раннего геологического развития и эволюции платформы.

В процессе выполнения работы были установлены новые широкополосные сейсмические станции, что совместно с данными ГФО "Михнево" позволило существенно улучшить возможности локации слабых сейсмических событий на центральной части Восточно-Европейской платформы.

Полученные скоростные модели дают возможность внести поправки к региональному годографу для эпицентральных расстояний более 1<sup>0</sup>, что позволит увеличить точность локации региональных событий.

#### Исходный материал и методы исследования

В процессе работы были использованы данные постоянно действующих станций – ЦСО "Обнинск" (55.11°, 36.56°) и ГФО "Михнево" (54.95°, 37.76°); а также установлены временные широкополосные станции – "Воскресенск" (55.33°, 38.88°) и "Шатура" (55.21°, 39.97°). Станции формируют профиль, пересекающий коллизионную зону Восточно-Европейской платформы в субширотном направлении. В общей сложности обработано более 500 записей удаленных землетрясений. В качестве исходного каталога был использован СМТ (Global Centroid Moment Tensor Catalog) [Dziewonski et al., 1981; Ekstrom et al., 2012].

Для получения глубинных сейсмических разрезов применялась методика функций приемника, основанная на выделении и анализе обменных волн P<sub>s</sub> и S<sub>p</sub>, а также кратных волн P<sub>pps</sub>, P<sub>pss</sub> и S<sub>psp</sub>, S<sub>spp</sub>. Определение азимутальной упругой анизотропии верхней мантии осуществлялось на основе анализа расщепления поперечных (использовались SKS фазы) волн при их прохождении через анизотропный слой.

#### Защищаемые положения

- Для всех точек наблюдения выявлено, что скорость волн V<sub>s</sub> в верхней части верхней мантии, в среднем на 3%, повышена относительно стандартной модели IASP91
- Для всех точек наблюдения получены одномерные скоростные модели литосферы и верхней мантии до глубины 300 км. Определены глубины залегания границы между верхней и нижней корой, кровли и подошвы зоны Мохо и границ в верхней мантии
- Показано присутствие слоя относительного понижения скоростей Vs на 1 2% в верхней части верхней мантии на глубинах 70 – 140 км
- Определены параметры азимутальной анизотропии верхней мантии коллизионной зоны центральной части ВЕП. Выявлено наличие двух анизотропных слоев – подкорового и связанного со слоем пониженной скорости. Азимут оси симметрии первого составляет 160°, второго – 90°

#### Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена большим объемом используемых экспериментальных данных, обработанных с использованием многократно апробированных методик и внутренней непротиворечивостью достигнутых результатов. А также их сопоставлением с независимо полученными геолого-геофизическими данными.

#### <u>Личный вклад автора</u>

В соответствии с поставленными в рамках исследования задачами, автором был произведен выбор точек расположения новых пунктов наблюдения, установка и поддержание функционирования двух временных станций "Воскресенск" и "Шатура". Для вновь установленных и постоянных станций "Обнинск" и "Михнево" автором лично был проведен весь цикл работы от сбора и конвертации исходных данных, а также расчёта индивидуальных функций приемника до построения скоростных моделей и интерпретации результатов. Оценки параметров азимутальной упругой анизотропии также выполнены самостоятельно.

#### Апробация результатов и публикации по теме диссертации

Работа была представлена в виде тезисов и докладов на российских и международных конференциях: XVIII Уральской молодежной школе по геофизике (Пермь, 2017); General Assembly EGU 2017, 2018 (Beнa, 2017, 2018); General Assembly ESC 2016, 2018 (Trieste, 2016; Malta, 2018); XIIи XIII Международные сейсмологические школы "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных" (Алматы, 2017; Кишинев, 2019); XXI Научно-практическая Щукинская конференция "Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России" (Москва, 2018); Седьмая научно-техническая конференция "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России" (Петропавловск-Камчатский, 2019); International Multidisciplinary Scientific Conference SGEM 2018, 2019 (Albena, 2018, 2019)

По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК.

## Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 115 наименований. Общий объем диссертации – 125 страниц, включая 53 рисунка и 4 таблицы.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. И.А. Саниной и научному консультанту к.ф.-м.н. Г.Л. Косареву за постановку задачи и постоянное внимание к работе; С.Г. Волосову за помощь в работе и ценные указания при проведении натурного эксперимента; к.ф.-м.н. Г.Н.Иванченко, к.ф.-м.н. Э.М. Горбуновой и В.А. Ракитову за предоставленные геологические данные и помощь в их анализе и интерпретации; к.ф.-м.н. И.М. Алешину за предоставление программного пакета для решения обратной задачи и ценные замечания; академикам В.В. Адушкину и <u>Ф.П. Митрофанову</u> за постановку фундаментальной задачи и внимание к работе

Автор отдельно благодарит весь коллектив лаборатории "Сейсмологических методов исследования литосферы" ИДГ РАН за поддержку и замечания, высказанные в процессе диссертационного исследования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант № 17-05-01099.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и задачи исследования, сформулированы основные защищаемые положения, отражена научная новизна и описаны практическая и теоретическая значимость работы.

В первой главе приведен обзор изученности центральной части Восточно-Европейской платформы (ВЕП) геофизическими методами, который обосновывает выбор региона исследования.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о слабой изученности верхней мантии центральной части ВЕП. Основным источником информации, на данный момент, являются длинные и сверхдлинные профили ГСЗ и МОВЗ различной протяженности, выполненные, преимущественно, центром ГЕОН (рисунок 1). На изучаемой территории наблюдаются обширные неисследованные регионы, скоростные характеристики которых известны исключительно на основе интерполяции данных (рисунок 1). Получение новых сведений о глубинном строении ВЕП сдерживается отсутствием разветвленной сети сейсмических станций, что делает практически невозможным получение детальной информации о ее структуре на основе сейсмотомографии.

С тектонической точки зрения, несмотря на асейсмичность ВЕП, центральная ее часть представляет особый интерес т.к. она является местом коллизии трех разновозрастных мегаблоков – Сарматии, Волго-Уралии и Фенноскандии [Bogdanova et al., 2008]. Тем самым обосновывается необходимость детального изучения этого региона с целью лучшего понимания процессов ранней геологической истории Земли, а также перспектив возможной сейсмической активизации. В настоящий момент через указанную коллизионную зону проходит единственный профиль МОВЗ, имеющий глубинность до 100 км и выполненный в 1984 году [Линькова и др., 1984]. Иные детальные сведения о регионе отсутствуют.



Рисунок. 1 Схема расположения профилей ГСЗ, МОГТ, МОВЗ в пределах центральной части ВЕП (а) [Геотраверс, 2002; Сулейманов, 2007; Дубянский, 2012; Линькова и др., 1984; Юров, 1980]; тектоническая схема коллизионной части центральной части ВЕП (б) [Минц и др., 2010]. К

2010]. Красным овалом выделен регион исследования

**Во второй главе** обосновывается выбор методики наблюдений и приводится ее подробное описание.

В главе приведен краткий обзор базовых сейсмологических методик, позволяющих восстановить глубинный скоростной разрез. Среди них выделены томография на поверхностных и объемных волнах, а также метод глубинного сейсмического зондирования. Показано, что в рамках исследуемого региона ни один из этих методов не может эффективно применяться ввиду недостаточно плотной сети сейсмических станций и густой населенности территории.

Таким образом в качестве основного метода был выбран метод функций приемника (receiver function) [Vinnik, 1977; Винник, Косарев, 1981]. Его основными преимуществами являются: возможность применения к данным одиночных широкополосных сейсмических станций и высокая вертикальная

разрешающая способность, что позволяет восстановить детальную скоростную структуру вблизи станции до глубин 250-300 км. Еще одним его преимуществом является возможность определить общие скоростные характеристики верхней мантии для достаточно большого региона (порядка 1<sup>0</sup>х1<sup>0</sup>) под станцией.

В основе метода лежит использование обменных и многократных волн, формирующихся на контрастных сейсмических границах при прохождении через среду волн телесейсмических событий. Разделяют две модификации функций приемника, по типу формирующей обменную волну телесейсмической фазы – продольную, или PRF (использующую обменные волны  $P_{S}$  и кратные волны  $P_{pps}$ ,  $P_{pss}$ ) и поперечную, или SRF (использующую обменные волны  $S_P$  и кратные волны  $S_{psp}$  и  $S_{spp}$ ). Модификации эффективно дополняют друг друга и при совместном использовании позволяют получить устойчивый глубинный скоростной разрез [Kosarev et.al., 2013; Oreshin et.al., 2008].

Процедура расчета индивидуальных функций приемника стандартизирована и включает в себя: отбор событий с телесейсмических расстояний (диапазон 40<sup>0</sup> - 100<sup>0</sup>) с высоким соотношением сигнал/шум (более 3), частотную фильтрацию (низкочастотный фильтр с периодом среза 3 сек для PRF и 8 сек для SRF), переход в лучевую систему координат, деконволюцию. Для каждого зарегистрированного события указанные процедуры были произведены, а полученные индивидуальные PRF и SRF сформировали анализируемые в дальнейшем Для временных станций данные. в работе применяется модифицированный подход, состояший в получении и анализе "короткопериодных" PRF (к исходным сейсмограммам применяется полосовой фильтр с полосой пропускания 0.3-2 сек) с целью детального восстановления осадочного слоя [Гоев и др., 2018].

Для решения обратной задачи был использован программный пакет, разработанный в ИФЗ РАН группой И.М. Алешина. В нем реализован алгоритм, позволяющий сформировать множество случайных начальных моделей в заданных оператором ограничениях вариаций мощностей слоев и скоростей объемных волн в них. Каждая из них минимизируется методом Левенберга-Марквардта [Press et. al., 2007]. Итоговое решение представляется как поле сгущений минимизированных случайных начальных моделей, теоретические PRF и SRF от которых наилучшим образом совпадают с наблюденными трассами. Для получения теоретических трасс используется многократно апробированный метод Томсона-Хаскелла [Haskell, 1962].

В **третьей главе** приводятся результаты оценок общих скоростных параметров земной коры и верхней мантии и построения глубинных скоростных разрезов.

С целью получения детальных сведений о строении коллизионной зоны тройного сочленения мегаблоков центральной части ВЕП был построен профиль из четырех широкополосных сейсмических станций, общей протяженностью порядка 400 км в субширотном направлении. Характеристики использованной аппаратуры приведены в таблице 1. Профиль содержит две постоянные сейсмостанции (OBN, MHV), для которых накоплен значительный объем данных и для которых получены как PRF, так и SRF. Станции VOSK и SHAT были установлены специально для получения более детальных сведений о регионе исследования. Количество и качество данных на них существенно уступает постоянным станциям и для них получены только PRF.

Пункты					
регистрации:	Код станции:	координаты:		датчики:	период:
"Обнинск"	OBN	55.11	36.56	STS - 1	360 сек
"Михнево"	MHV	54.95	37.76	STS - 2	120 сек
"Воскресенск"	VOSK	55.33	38.88	RefTek 151-60	60 сек
· ·					
"Шатура"	SHAT	55.21	39.97	RefTek 151-60	60 сек
• 1					

Таблица 1 Расположение станций профиля с указанием установленного оборудования

Для всех станций рассчитаны стеки (т.е. суммирование записей с учетом внесения поправок за различные эпицентральные расстояния и индивидуальные значения параметра луча для наилучшего выделения однократных обменных вон от глубинных границ). Стеки по PRF для постоянных станций представлены на рисунке 2. На стеках отчетливо выделяются обменные воны от границ зоны фазовых переходов 410-660 км. Для станции OBN по 152 индивидуальным PRF запаздывания времен прихода обменных волн от этих границ относительно первой продольной волны составляют 42.8 секунды для 410 км границы и 66.8 секунды для 660 км границы. Их разность составляет 24 секунды. Основываясь на стандартной модели IASP91, времена для значений параметра луча 6.4  $\frac{\text{секу}}{0}$ , к которому приводятся наблюденные трассы, составляют 44 секунды и 67.9 секунд, соответственно. Их разность - 23.9 секунд и эта величина считается "стандартной". Тем самым, основываясь на стандартной наблюденной разности делается вывод о соответствии глубин залегания границ 410 и 660 км ожидаемым значениям, относительно модели IASP91. Однако, с учетом меньших, относительно IASP91, времен пробега каждой из волн скорости в верхней мантии можно оценить как повышенные. Стек, построенный для 150 индивидуальных PRF станции MHV демонстрирует почти те же самые значения времен P<sub>410S</sub> и P<sub>660S</sub>, равные 42.9 и 66.8 секунд соответственно и подтверждает сделанные выводы о повышенных скоростях V<sub>s</sub> в верхней мантии исследуемой территории.

Для временных станций также были построены стеки по PRF. Для станции SHAT в суммировании участвовали 49 индивидуальных PRF, для станции VOSK – 23 трассы. Ввиду того, что станции установлены вне специально подготовленных помещений и осложненности региона исследования мощным осадочным чехлом (порядка 1.5 км.), на стеках не удалось уверенно выделить обменную волну  $P_{410S}$ . Однако уверенно выделяются фазы от границы 660 км и времена их вступлений полностью совпадают с временами, полученными на постоянных станциях. Тем самым, с учетом относительной близости расположения станций, делается заключение об обоснованности обобщения вывода о повышенных скоростях в верхней мантии и на регионы расположения станций SHAT и VOSK.



Рисунок 2. Стеки, рассчитанные по PRF для постоянных станций OBN (a) и MHV (б)

Для постоянных станций по данным индивидуальных SRF были построены стеки (рисунок 3) с учетом внесения поправок за индивидуальные значения параметров луча (так называемый slostack). Обменные волны от границы 410 км хорошо выявляются. Для станции OBN ее амплитуда составляет 0.029 (т.е. порядка 3% от энергии первой S волны), а время прихода составляет – -51.2 сек (за 0 принято время прихода первой поперечной волны). На основе численного моделирования установлено, что для выбранного опорного расстояния (83°), согласно стандартной модели, время прихода интересующей фазы должно составлять -51.8 сек. Для станции MHV, в качестве опорного эпицентрального расстояния было выбрано значение – 790. Средний уровень шума по всему собранному набору записей также мал и составляет – 0.0064. Амплитуда интересующей фазы составляет – 0.023, а время прихода – -54.0 сек. В соответствии со стандартной моделью, время прихода обменной волны от 410 км границы с выбранного опорного эпицентрального расстояний равняется - - 54.5 сек. Наблюденные невязки 0.6 и 0.5 секунд малы для отдельной интерпретации, однако с учетом полученных по PRF значений подтверждают вывод о повышенных, относительно IASP91, скоростях в верхней мантии.



Рисунок 3 Стеки, рассчитанные по SRF для постоянных станций OBN (a) и MHV (б)

С целью количественной оценки этого эффекта, было проведено численное моделирование синтетической PRF на базе модели IASP91 с различными повышающими скоростными коэффициентами по всему разрезу. Было определено что при повышении скоростей  $V_s$  на 3% относительное (относительно времени прихода первой продольной волны) время прихода обменных волн от границы 410 км составляет 42.89 секунды, что практически точно совпадает с наблюдениями. Сделанные выводы доказывают первое защищаемое положение.

Для всех станций профиля было проведено моделирование одномерных скоростных разрезов. Для постоянных станций в совместной инверсии участвовали PRF, SRF и невязки времен прихода продольных и поперечных волн, рассчитанные по невязкам обменных волн от опорных границ зоны фазовых переходов. Для временных станций моделировались совместно PRF и невязки, рассчитанные по стекам постоянных станций. Полученные скоростные разрезы приведены на Для получения решения поле Vs-глубина разбивалось рисунке 4. на прямоугольники 0.1 км/с – 1 км, и рассчитывалось количество моделей, прошедших через каждый участок. Чем больше моделей попало в данный участок, тем более красным цветом он показан. По всем отобранным моделям рассчитывалась медиана (на рисунке 4 показана пунктирной линией), от которой строились синтетические функции приемника. Для итогового решения, из всей совокупности пробных случайных моделей, отбирались лучшие. А именно те, теоретические функции приемника от медианы по которым демонстрируют

наилучшее совпадение с наблюденными трассами в смысле наименьших квадратов. *Тем самым, доказано второе защищаемое положение.* 

<u>Станция "Обнинск"</u>. В модели выделяются несколько основных особенностей. Кровля консолидированной коры выделяется в модели на глубине 1.4 км и характеризуется скачкообразным изменением скорости V<sub>s</sub> с 1.65 до 3.32 км/с. Земная кора имеет общую мощность порядка 37.4 км и характеризуется скоростями 3.32 - 4.04 км/с. Ниже фундамента в коре отмечается градиентное повышение скорости от 3.32 до 3.73 км/с до глубины 19.7 км. Ниже по модели следует слой мощностью 15.3 км с практически постоянной скоростью, равной 3.73 км/с. Начиная с глубины 35 км следует скачкообразное повышение скорости до 4.04 км/с. С глубины 39 до глубины 56 км. выделяется переходная зона Мохо, характеризующаяся градиентным повышением скорости до 4.77 км/с.

В верхней мантии четко выделяется слой на глубинах 70 – 145 км, характеризующийся скоростями  $V_s$  4.46 – 4.51 км/с. Такие значения скорости, в целом, соответствуют модели IASP91 на данных глубинах. С учетом установленных по стекам повышенных скоростей в верхней мантии для данного региона, такие скорости можно считать пониженными, в среднем на 1-2%.

<u>Станция "Михнево"</u>. Фундамент залегает на глубине 1.6 км и характеризуется скачкообразным повышением скорости  $V_s$  с 1.66 до 3.74 км/с. В коре на глубинах 18 – 31 км выделяется слой повышенных скоростей. Вероятно, кровля этого слоя соответствует границе, отвечающей переходу от верхней к нижней коре. Граница раздела кора - мантия представляет собой сложно построенную зону мощностью порядка 13 км., залегающую в диапазоне глубин 40 – 53 км и характеризующуюся увеличением скоростей от 3.9 до 4.46 км/с.

Как и для станции "Обнинск", с учетом установленных, в рамках исследования, повышенных скоростей в верхней мантии, наблюденные значения скоростей, соответствующие модели IASP91 можно интерпретировать как пониженные. Тем самым, выявлен слой относительно пониженных скоростей (на 1-2%), в диапазоне глубин 105 – 150 км.



Рисунок 4 Одномерные скоростные разрезы, построенные в результате совместного моделирования функций приемника по данным станций профиля. (a) – OBN, (б) – MHV, (в) – VOSK, (г) – SHAT. Цветами показаны области сгущения отобранных индивидуальных решений; пунктирными линиями показаны медианные значения, тонкой линией модель IASP91.

<u>Станция "Вокресенск"</u>. В коре на глубине 18 км выделяется граница, характеризующаяся повышением скорости 3.74 – 3.82 км/с. Прослеживается отчетливо выраженная зона границы Мохо в диапазоне глубин 40 – 54 км, характеризующаяся повышением скоростей Vs 3.98 – 4.42 км/с. В мантии в диапазоне глубин порядка 90 – 140 км наблюдается ярко выраженная практическая неоднозначность обратной задачи. Наблюдаются два сгущения решений с существенно различными значениями скоростей. Одно соответствует сильно пониженной скорости, второе средним установленным скоростям в мантии для данного региона. С учетом наблюдаемого на данных глубинах слоя понижения скорости, зарегистрированного на постоянных станциях и подтверждённого SRF, более вероятным является решение, соответствующие пониженной скорости.

<u>Станция "Шатура"</u>. В полученной модели выделяется особенность на глубине 18 км, где градиентный рост скорости от 2.7 до 3.4 км/с сменяется постоянной скоростью вплоть до зоны Мохо, лежащей в диапазоне глубин от 35 – 47 км и характеризующейся градиентным повышением скорости от 3.7 до 4.2 км/с.

Полученная для станции "Шатура" скоростная модель существенно отличается от моделей, построенных для станций "Обнинск", "Михнево" и "Воскресенск". В первую очередь, в модели не выявляется слой пониженной скорости в мантии. Кроме того, глубина залегания зоны Мохо и скоростные характеристики всего разреза существенно отличаются от остальных моделей.

По данным трех станций – "Обнинск", "Михнево" и "Воскресенск" выявлено наличие слоев пониженных скоростей в верхней мантии на глубинах: 70 – 145 км, 105 – 150 км, 90 – 140 км соответственно. Что позволяет обосновать *третье защищаемое положение* о присутствии в регионе исследования слоя относительного понижения скоростей Vs (на 1 – 2%) в верхней части верхней мантии на глубинах 70 – 140 км.

Глава 4 посвящена вопросам определения азимутальной анизотропии верхней мантии по данным станций "Обнинск" и "Михнево".

Сейсмической анизотропией называется явление зависимости скорости распространения упругих волн от азимута прихода сейсмической волны. Одним из важнейших и широко распространённых подходов к определению азимутальной анизотропии является использование расщепления поперечной волны на две квазипоперечные при прохождении через анизотропный слой. Это явление является сейсмологическим аналогом оптического двойного лучепреломления. Экспериментальные данные дают возможность выявить и оценить анизотропные

свойства среды по двум параметрам - азимуту оси симметрии ( $\alpha$ ) и времени задержки ( $\delta$ t) между быстрой и медленной волнами. Будем в дальнейшем называть эту пару значений "анизотропными параметрами среды". Считается, что анизотропия мантии является результатом деформации пластичных слоев и, как следствие, предпочтительной ориентации мантийных минералов (главным образом оливина, как основного из слагающих верхнюю мантию). Таким образом, измерения расщепления поперечной волны могут характеризовать их ориентацию и давать некоторые оценки мощности распространения полей деформации мантии. При анализе экспериментальных данных, в данной работе используется широко распространенный и хорошо апробированный метод изучения расщепленных квазипоперечных волн от SKS/SKKS фаз [Vinnik et. al., 1992]. Решение ищется в виде нахождения параметров  $\alpha$  и  $\delta$ t, отвечающим минимальному значению целевой функции (1).

$$E(\alpha, \delta t) = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} \frac{\int (T_{obs}(t) - T_{synt}(t, \alpha, \delta t))^2 dt}{\int R_{obs}^2(t) dt}}$$
(1)

Здесь  $R_{obs}$  и  $T_{obs}$  – наблюденные радиальная и тангенциальная компоненты,  $T_{synt}$  – теоретическая тангенциальная компонента. Пробный угол  $\alpha$  варьируется в значениях от 0<sup>0</sup> до 180<sup>0</sup>, с шагом 10<sup>0</sup>. Величина запаздывания δt варьируется в значениях от 0.1 до 3, с шагом 0.1. Шаги по вариациям по обоим параметрам обусловлены точностью метода, а именно необходимостью принимать во внимание не абсолютно нормальное падение SKS/SKKS волн и эффекты рассеяния.

При анализе экспериментальных данных для получения итогового решения из всего набора записей отбирались трассы, отвечающие критериям : 1) визуальное определение SKS/SKKS фаз и низкий уровень шума 2) низкие (близкие к нулевым) амплитуды на вертикальной ("Z") компоненте сейсмограммы, 3) эллиптическая траектория движения частиц на дневной поверхности с большой осью эллипсоида, направленной параллельно радиальной ("R", от станции на эпицентр) компоненте в координатах ZRT (Т компонента перпендикулярна R) Для станции OBN из всего имеющегося массива данных из 1266 событий были отобраны 36 записей SKS/SKKS фаз; для станции MHV – 16 из 417. Целевая функция рассчитывалась для каждого индивидуального события, а также для всего имеющегося набора данных совместно. В результате, минимум целевой функции для набора данных станции OBN соответствует  $\alpha \approx 90^{\circ}$ ,  $\delta t \approx 0.4$  с., станции MHV –  $\alpha \approx 90^{\circ}$  и  $\delta t \approx 0.2$  (рисунок 5). Отметим также, что на станции MHV выявляется второй выраженный локальный экстремум, соответствующий  $\alpha \approx 160^{\circ}$  и  $\delta t \approx 0.2$ .



Рисунок 5. Изолинии значений целевой функции по данным станций (a) OBN, (б) MHV

При более детальном рассмотрении индивидуальных решений, полученных на станции OBN, выделяются две группы по азимутам оси симметрии – первая, с индивидуальными значениями  $\alpha \approx 160^{\circ}$  представляет собой группу из 21 события; вторая, оставшиеся 15 событий с доминирующими значениями  $\alpha \approx 100^{\circ}$ . В дальнейшем, эти группы событий были обработаны отдельно. Необходимо заметить, что события первой группы (индивидуальные  $\alpha \approx 100^{\circ}$ ) имеют, в основном, восточные азимуты, тогда как практически все события второй группы имеют северо-западные азимуты. На схемах распределения целевых функция для обеих групп событий отчетливо выделяются минимумы, соответствующие азимутам осей симметрии  $\alpha \approx 90^{\circ}$  и  $\delta t \approx 0.4$  секунд. Однако, для первой группы событий выявляется побочный локальный минимум для  $\alpha \approx 160^{\circ}$  и dt  $\approx 0.5 - 1$  секунда [Адушкин и др., 2019].

В главе 5 обсуждаются полученные результаты и проводится их сопоставление с ранее известными, для данной территории, сведениями.

Сделанный вывод о повышенных скоростях Vs в верхней мантии, в целом, находится в качественном согласии с оценками, произведенными по данным мировой сети по комплексу сейсмотомографичеких данных и вариаций теплового потока [Artemieva, 2009]. Рассчитанная в диссертационной работе оценка (3%) существенно уточняет полученный по мировой сети осредненный результат (6%).

Пространственная локализация участка, для которого справедливы приведенные выводы, может быть выполнена с помощью расчета так называемых, точек обмена. Обменные волны, на основании времен прихода которых произведены оценки, несут в себе информацию о границе, на которой произошел обмен (410 и 660 км). Для каждого использованного события, зная параметр луча и азимут, можно вычислить координаты точки обмена для любой заданной глубины. В данном случае, с учетом стандартной мощности и скоростей объемных волн зоны фазовых переходов, отнесем эту оценку к середине слоя – 535 км. Тем самым, вывод о повышенных скоростях в верхней мантии можно отнести к региону, указанному на рисунке 6.

Основные границы, выделенные при моделировании всех разрезов, находятся в согласии между собой. Сейсмическая граница на глубине 19-20 км выявлена для всех станций и, вероятно, характеризует границу верхней и нижней коры. Для станций OBN, MHV и VOSK, расположенных в центральной части коллизионной зоны, кровля зоны Мохо прослежена на глубинах 39-40 км, подошва – 53-56 км. Для постоянных станций OBN и MHV уверенно выделяется слой пониженной скорости в верхней мантии на глубинах порядка 70-150 км. На станции VOSK на этих глубинах выявлена практическая неоднозначность инверсии, однако одна из ветвей решения также соответствует слою пониженной скорости.

Аналогичные работы по восстановлению скоростного строения методом функций приемника проводятся в различных регионах мира. В тектоническом смысле, наиболее близкая к Восточно-Европейской платформе, Северо-Американская платформа изучается в рамках проекта USArray [Kumar et. al, 2012]. Проект длится с 2013 года и задействует сотни временных и постоянных широкополосных сейсмических станций. В его рамках для Северо-Американской платформы на глубинах порядка 40-50 определена граница раздела кора-мантия. Она определена не единым разделом, а переходной зоной Мохо. Кровля и подошва ее имеет рельеф, который сложно проследить в рамках предложенного исследования в связи с малым количеством регистраторов. Граница раздела литосфера-мантия также имеет рельеф, и ее глубина меняется от 70-80 до 150 км. Тем самым, результаты не противоречат полученным в рамках диссертационного исследования выводам.

Скоростная модель, полученная по данным станции SHAT, существенно отличается от остальных. В модели не выявляется слой пониженных скоростей в мантии. Кроме того, глубина залегания зоны Мохо (35-47 км) и скоростные характеристики всего разреза отличаются от полученных для других станций. Различие моделей может быть обусловлено тем, что станция "Шатура" расположена на границе коллизионной зоны и существенная часть точек обмена, в которых сформировались обменные волны, лежат в мегаблоке – Волго-Уралия (рисунок 1б). Тем самым, полученный разрез испытывает сильное влияние структуры этого мегаблока. На этой основе может быть сделан вывод о том, что микроконтиненты различаются вплоть до верхней мантии [Goev et. al., 2019].



Рисунок 6 Карта точек обмена, отнесенных к глубине 535 км. Для каждой из станций точки обмена рассчитывались отдельно и выделены цветом. Красным показаны точки обмена событий, зарегистрированные станцией "Обнинск"; без цвета – "Михнево"; синие – "Воскресенск"; зеленые – "Шатура". Оранжевый прямоугольник обозначает территорию, для которой справедлив вывод о повышенных скоростях в верхней мантии

В качестве основного направления оси симметрии, выявленной в результате анализа SKS/SKKS фаз, для коллизионной зоны центральной части Восточно-Европейской платформы выбрано субширотное направление ( $\alpha \approx 90^{\circ}$ ). Выбор обусловлен тем, что для любой выборки событий для обеих станций "Обнинск" и "Михнево" присутствует экстремум, соответствующий этому направлению оси симметрии.

Причины, вызывающие ориентацию больших объемов мантийного вещества сложны и до конца не изучены. Наиболее распространённым процессом, вызывающим ориентацию мантийных ксенолитов, в литературе называют астеносферный поток (или иной поток подплавленного мантийного вещества) [Vinnik et. al., 1995; Savage, 1999]. При этом разделяют современные геодинамические процессы и, так называемую, "вмороженную" анизотропию. Последний тип связывают с подкорковой литосферой, сохраняющей ориентацию вещества с последнего времени тектонической активности.

По комплексу геофизических данных и данных GPS установлено, что Евразийская плита движется в субширотном направлении [В.Хаин, М.Ломидзе 1995]. Вместе с выявленным при моделировании слоем пониженной скорости в верхней мантии, это дает основание связать основное направление оси симметрии мантийного вещества ( $\alpha \approx 90^{\circ}$ ) именно с ним. Второй локальный экстремум, отвечающий направлению оси симметрии α ≈ 1600 может быть объяснен наличием "вмороженного" анизотропного слоя подкоровой мантии. Тем более, что по результатам единственного исследования анизотропных свойств под станцией "Обнинск", проведенных на базе Pn волн (т.е. фокусируясь на подкоровой части разреза), азимут оси симметрии определен равным 1900 [Бугаевский, 1988; Краснова, Чесноков, 1986]. Такое значение, с учетом точности измерения, практически совпадает с результатами, полученными в диссертационной работе. Эти выводы подтверждаются и результатами скоростного моделирования, проведенного для станций "Обнинск" и "Михнево". В моделях (рисунок 4 (а), (б)) граница кора – мантия представляется достаточно мощным переходным слоем. Причем, для станции "Обнинск" этот слой характеризуется резким повышением скоростей Vs от 4.04 до 4.77 км/с и является ярко выраженной особенностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы сформулированы в конце каждой главы диссертации. Ниже кратко представлены полученные результаты и сделанные на их основании выводы по диссертации в целом.

- 1. Впервые определено глубинное скоростное строение коллизионной зоны тройного сочленения мегаблоков центральной части ВЕП.
- Совместное моделирование продольных и поперечных функций приемника, а также невязок времен пробега обменных волн зоны фазовых переходов по данным станций "Обнинск" и "Михнево" позволило впервые получить одномерные скоростные модели коллизионной зоны тройного сочленения мегаблоков до глубины 300 км.
- По данным временных станций "Шатура" и "Воскресенск" было проведено моделирование продольных функций приемника, а также невязок времен пробега обменных волн зоны фазовых переходов до глубины 250 км.

- 4. По результатам анализа индивидуальных продольных функций приемника основные параметры зоны фазовых переходов оцениваются как стандартные относительно модели IASP91. В исследуемом регионе по данным как продольных, так и поперечных функций приемника скорости Vs в верхней мантии оцениваются как повышенные, в среднем, на 3%.
- 5. По всем полученным моделям определены глубины контрастных сейсмических границ. Глубина залегания границы между верхней и нижней кора, для данного региона, определена на глубине порядка 18 км. Раздел кора/мантия определён не единой границей, а зоной Мохо. Для станций "Обнинск", "Михнево" и "Воскресенск" ее кровля и подошва залегают на глубинах 39-40 53-56 км. Для станции "Шатура" кровля и подошва зоны Мохо определены как 35 47 км.
- 6. В разрезах, построенных для станций "Обнинск", "Михнево" и "Воскресенск" в верхней мантии выделяются слои слабого понижения скорости (1-2%) на глубинах 70-140 км. Данный слой не прослеживается в модели, полученной для станции "Шатура".
- Скоростные характеристики разреза, построенного для станции "Шатура", существенно отличаются от остальных полученных моделей. Вероятно, это связано с тем, что станция установлена на границе раздела коллизионная зона – мегаблок Волго-Уралия и полученная модель может испытывать влияние структуры этого мегаблока.
- Определенные в работе параметры анизотропии находят свое подтверждение в скоростных моделях, построенных для станций "Обнинск" и "Михнево". По результатам сопоставления всех имеющихся данных сделан вывод о наличии двуслойной анизотропии, с первым (подкоровым слоем), характеризующимся α ≈ 160° и δt ≈ 0.3-0.4 с; и вторым (мантийным) слоем с α = 90 и δt = 0.3 с.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- Адушкин В.В., Гоев А.Г., Косарев Г.Л., Санина И.А. Оценка параметров сейсмической азимутальной анизотропии верхней мантии центральной части Восточно-Европейской платформы по данным станций "Обнинск" и "Михнево" // Геофизические исследования. - 2019. - Т.20. - №3. - С.23-35.
- Гоев А.Г., Косарев Г.Л., Ризниченко О.Ю., Санина И.А. Скоростная модель западной части Волго-Уралии методом функции приемника // Физика Земли. - 2018. - №6. - с.154-169

#### Основные публикации в других научных изданиях

- Гоев А.Г., Косарев Г.Л., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. Об устойчивости моделирования скоростного разреза методом функции приемника // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. [Электронный ресурс]: Труды Седьмой научно-технической конференции. - 2019. - С.422-426. ISBN 978-5-903258-40-6
- Goev A., Gorbunova E., Ivanchenko G., Kosarev G., Sanina I. Features of the structure of collision zones of the central part of the East European Craton // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM - 2019. -P.187-194. ISBN 978-619-7408-76-8 / ISSN 1314-2704, DOI: 10.5593/sgem2019/1.1
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M., Kosarev G.L., Riznichenko O.Yu, Goev A.G. Lithospheric architecture of European craton // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM - 2018. - P.205-212. ISBN 978-619-7408-35-5 / ISSN 1314-2704 DOI: 10.5593/sgem2018/1.1.