

**ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу **Гоева Андрея Георгиевича «Скоростное строение земной коры и верхней мантии коллизионной зоны центральной части Восточно-Европейской платформы»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Диссертационная работа Гоева Андрея Георгиевича посвящена задаче, относящейся к сложной проблеме изучения глубинного строения центральной части Восточно-Европейской платформы. Центральная часть платформы, являющаяся местом соединения трех архейских мегаблоков в течение долгого времени привлекает внимание геофизиков различных специальностей. Привлечение данных сейсмологии к уже имеющимся геофизическим и геохимическим моделям центральной части Восточно-Европейской платформы дают возможность получить наиболее детальное и реалистичное представление о структуре коры и мантии этого неоднородного по структуре района. Таким образом, представленная диссертация является весьма актуальной работой.

В тексте диссертации детально описаны цели и задачи исследования, и доказательно изложена **научная новизна работы**, состоящая в том, что впервые для коллизионной зоны построены скоростные модели верхней мантии, определена зона пониженной скорости и определены параметры азимутальной анизотропии.

Теоретическая и практическая значимость работы, на мой взгляд, состоит в развитии инструментально методической базы сейсмологических исследований в сложном и малоизученном районе.

Рассматриваемая диссертационная работа основана на большом и уникальном материале, каковым являются цифровые сейсмические записи от землетрясений, зарегистрированные на станциях «Обнинск», «Михнево» и на временно установленных соискателем широкополосных станциях «Воскресенск» и «Шатура». Эти станции образуют профиль в субширотном направлении, пересекающим исследуемый район.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 114 наименований. Общий объем диссертации – 125 страниц, включая 53 рисунка и 4 таблицы.

Введение традиционно посвящено обоснованию актуальности работы, формулировке цели и задач исследования, ее научной новизне. Сформулированы научные положения, выносимые автором на защиту. Во введении приведены данные об апробации работы и о публикациях. По теме диссертации автором опубликовано пять научных работ.

В первой главе автор проводит обзор результатов региональных геофизических работ, посвященных изучению района и приходит к выводу о слабой изученности района. Основным достижением прошлых исследований по мнению автора являются результаты, представленные центром ГЕОН, при осуществлении профилей ГСЗ и МОВЗ. В главе проведен анализ моделей глубинного строения Восточно-Европейской платформы. Однако большая часть территории остается неохваченной измерениями. Именно поэтому на территории района необходимы дополнительные исследования, необходимо формирование базы новых экспериментальных сейсмических данных, которая может быть получена на существующих стационарных станциях регистрации и временно установленных пунктах наблюдений.

Вторая глава посвящена обзору основных сейсмологических методик исследования скоростного глубинного строения коры и мантии. Например, важным инструментом исследования является поверхностно-волновая томография, позволяющая по данным поверхностных волн, посредством измерения дисперсии восстанавливать скоростные модели мантии. Однако метод требует наличия большого количества сейсмических станций.

Обосновывается выбор методологии приемных функций для получения скоростных моделей применительно к исследуемому району.

В основе метода лежит использование обменных волн Ps и Sp на границах в коре и мантии. Преимуществом метода является возможность использования записей одиночных станций от множества источников (землетрясений). Отбор записей проводится с соблюдением ряда требований к качеству сейсмограмм, при эпицентральных расстояниях от 35 до 100 градусов и магнитудах $M_b > 5.5$ при максимальном азимутальном охвате.

Подробно описывается процедура измерения обменных волн Ps и Sp на границах в коре и мантии и получения функций приемника PRF и SRF соответственно. Автор рассматривает технологию вычисления ресивер (приемных) функций поэтапно от поворота исходных (ZNE) осей, на которые спроектирована запись, до стандартизации и суммирования полученных приемных функций. Компоненты Z, N, E – вертикальная, север-юг, восток запад преобразуются в компоненты L, Q, T. В плоскости (LQ) оптимально проявляются колебания в падающей волне (ось L) и в обменных волнах Ps (ось Q) от границ в коре и мантии. Стандартизация необходима перед суммированием для устранения различий в источниках.

Финальная часть второй главы посвящена описанию алгоритма прямой и обратной задач в методе приемных функций. В решении прямой задачи используется матричный метод Томсона – Хаскелла. Для решения обратной задачи был использована программа, созданная в лаборатории И.М. Алешина.

Вторая глава завершается анализом влияния осадочного слоя на точность получаемых оценок амплитуд обменных волн от глубинных границ в коре и мантии. Для более подробного исследования вопроса влияния осадочного слоя автором были проведены теоретические исследования на базе стандартной модели IASP91 .

Вычислялись синтетические сейсмограммы для четырех моделей осадочного слоя. Первая модель соответствовала IASP91, вторая – добавлению к стандартной модели обводненного осадочного слоя в 200 м , третья – добавлению глинистого слоя в 500 м, и четвертая – добавлению

трехслойной осадочной толщи мощностью 1600 м, состоящей из обводненной и глинистой частей и известнякового слоя. Анализ синтетических сейсмограмм показал существенное влияние осадочного слоя на поведение результирующей функции приемника.

В третьей главе автором представлены модели скоростного строения исследуемой зоны Восточно-Европейской платформы.

В первом разделе дано подробное техническое описание всех четырех пунктов наблюдения, образующих субширотный профиль протяженностью в 350 км. Оценка спектральной плотности шумов на каждой из станций позволяют судить о надежной регистрации сейсмических событий.

Во втором разделе описана методика обработки полевых измерений. Автор вновь обращается к критериям отбора первичного материала по эпицентralным расстояниям, магнитуде, отношению сигнал/помеха, измерению функций приемника и подготовке к инверсии.

Для постоянно действующих станций «Обнинск» и «Михнево» вычислялись функции приемника Ps и Sp. По полученным стекам после суммирования Ps приемных функций вычислялись невязки P и S волн, которые вместе с суммарными волновыми формами Ps и Sp использовались в обратной задаче.

Для временных станций, ввиду отсутствия достаточного количества данных для получения SRF был применен модифицированный подход, разработанный автором, что отражено в соответствующих публикациях.

Сначала в короткопериодном диапазоне моделировался осадочный слой и кора, после чего полученная модель использовалась в качестве начального приближения при моделировании глубинного скоростного разреза в обычном диапазоне частот. В данном случае измеренные невязки также использовались.

В разделах 3,4 и 5 третьей главы автор приводит результаты применения метода приемных функций к данным всех четырех сейсмических станций.

На станциях «Обнинск» и «Михнево» использовался экспериментальный материал за многие годы. На PRF стеках четко выделяются Ps обменные волны от границ 410 км и 660 км. Стандартное время $t(660) - t(410) = 23.9$ сек, позволяет судить о высокоскоростной верхней мантии под станциями. SRF стеки демонстрируют четкое выделение Sp обменной волны от глубины 410 км. Время, вступления Sp волны от границы 410 км приблизительно на 0.5 сек позже стандартного.

Скоростные характеристики разреза, построенного для станции «Шатура», существенно отличаются от остальных полученных моделей.

Полученные скоростные модели демонстрируют ряд особенностей в структуре коры и мантии. В коре обнаружено расслоение, граница Мохо представлена градиентным слоем, в мантии выделяется слой пониженной скорости.

Четвертая глава посвящена исследованию азимутальной анизотропии под станциями «Обнинск» и «Михнево». В главе дается исторический обзор исследования азимутальной анизотропии с использованием разных инструментов, например, Pn волн, поверхностных волн и SKS волн, прошедших через жидкое ядро Земли.

Метод, использующий наблюдения SKS волн, основан на явлении расщепления поперечной волны при прохождении через анизотропный слой. Преимущество этого метода перед другими состоит в возможности оценки анизотропных параметров под одиночными станциями. Автор кратко касается проблемы происхождения анизотропии в мантии и теоретических основ метода измерения параметров анизотропии по наблюдениям волн SKS и сходных фаз (SmKS). Автор приводит схему расщепления поперечной волны на две квазипоперечные волны S1- быстрой волны, поляризованной вдоль оси симметрии и S2- медленной волны, перпендикулярной оси симметрии. Основными параметрами азимутальной анизотропии являются направление оси симметрии и время запаздывания медленной волны относительно быстрой волны.

Главным элементом в измерении параметров азимутальной анизотропии является вычисление теоретической тангенциальной компоненты (T) в интервале наблюдения радиальной компоненты через конволюцию самой радиальной компоненты и некоторой переходной функции, характеризующий анизотропный слой. Эта функция перехода зависит от пробных значений параметров, а именно от пробного направления оси симметрии и времени запаздывания «медленной» волны относительно «быстрой» волны. Минимум отклонения теоретической компоненты T от реальной определяет искомые параметры анизотропии.

Автором был проведен тщательный отбор SKS волн и сходных фаз для измерения азимутальных параметров по известным критериям: отношению сигнал/помеха и магнитуде событий. Для станции «Обнинск» было отобраны 36 событий, для станции «Михнево» - 16 событий.

Основным итогом измерения азимутальной анизотропии под станцией «Обнинск» является выделение двух групп событий. Первая группа событий (с востока) дает направление оси симметрии, равное 90 градусов и время запаздывания, равное 0.4 сек. Вторая группа событий (с запада) также – 90 градусов и 0.4 сек соответственно. Однако для первой группы событий выявляется еще один минимум при направлении оси симметрии в 160 градусов и средним времени запаздывания в 0.7-0.8 секунд.

Основным итогом измерения азимутальной анизотропии под станцией «Михнево» является выделение группы событий, дающие оценки азимутальной анизотропии : направление оси симметрии – 90 градусов, время запаздывания, равное 0.2 сек.

При сопоставлении оценок анизотропии для обеих станций главное направление оси симметрии $\alpha = 90^\circ$. Величина запаздывания одной квазипоперечной волны относительно другой $\delta t = 0.3$ с. Тем самым анизотропия оценивается как слабая. Для обеих станций выделяется также и еще одно направление быстрой волны с азимутом в 160 градусов.

Пятая глава посвящена обсуждению полученных результатов. В первом разделе автор обсуждает результаты моделирования исследуемой территории

ВЕП. Подробно приводится сравнение полученных в работе результатов оценки глубин фундамента, границы Конрада, границы Мохо с имеющимися данными ГСЗ и других работах (отчеты ИФЗ). Глубина фундамента в 1.5 км, граница Конрада в 19 км, и Мохо, представленная переходом в 39-56 км - это результаты моделирования под станцией Обнинск. В работе автора существенно уточнены аналогичные результаты под станцией Михнево (фундамент – 1.6 км, граница Мохо в диапазоне глубин 40-54 км, слой пониженной скорости) по сравнению с предыдущей работой [Санина и др., 2014]. В целом, по мнению автора, скоростные модели под станциями Обнинск и Михнево согласованы.

Далее автор анализирует результаты моделирования под станциями Воскресенск и Шатура, отметив, что из-за сравнительно небольшого объема данных не удалось получить измерения функций приемника SRF. Тем не менее оценки глубин фундамента и границы Мохо согласованы с результатами для Обнинска и Михнево.

Во втором разделе автор проводит сравнение оценок времен пробега от основных сейсмических границ 410 км и 660 км в диссертационной работе и ранее опубликованной работе [Санина и др., 2014 см. список литературы в работе]. Автор справедливо отмечает, что в силу использования существенно большего по объему материала результаты диссертации являются значительно более точными.

Основной вывод при анализе оценок времен пробега от границ 410 км и 660 км состоит в том, что скорости поперечной волны в верхней мантии повышены в среднем на 3%. Автор отмечает, что этот результат справедлив в целом для всех четырех станций. В этом же разделе автор посредством вычисления точек обмена из S в P на глубине 535 км определяет какой участок Земли ответственен за полученные результаты.

В третьем разделе автор обсуждает результаты измерения параметров азимутальной анизотропии по данным станций «Обнинск» и «Михнево». Автор сравнивает результаты, полученные в диссертационной работе с результатами предыдущих работ. Автор отмечает различие в результатах и

объясняет, что полученное дополнительное субширотное направление оси симметрии в 160 градусов не противоречит результатам других авторов. В разделе автор делает попытку измерения мощности анизотропного слоя, расположенного в мантии и оценивает его в 75-100 км. При сопоставлении полученных результатов автор делает вывод о наличии двухслойной анизотропии с подкоровым слоем с направлением оси симметрии в 160 градусов и мантийным слоем с направлением оси симметрии в 90 градусов и временем запаздывания для обоих слоев в 0.3 секунды.

По тексту диссертации следует сделать некоторые замечания.

1. В целом изложение несколько «тяжеловесно» и с трудом воспринимается неспециалистом. Например, автор справедливо отмечает недостатки метода PRF (стр 31-32) и говорит о риске ложного обнаружения не столь контрастных границ из-за присутствия обменных кратных отражений от контрастных границ в осадочной толще. На самом деле маскировочный эффект отражений от границ на глубинах 100-250 км может возникать из-за кратных волн Ppss и Ppss, образующихся в коре между Мохо и дневной поверхностью. На стр. 42 автор высказывает спорное утверждение, что «с целью получения корректных абсолютных скоростей в модели» нужно «использовать невязки времен прихода обменных волн от стандартных глобальных сейсмических границ».

2. В тексте следовало бы кратко описать физический смысл и способ вычисления весовых коэффициентов в методе SRF.

3. При изложении теоретических основ обнаружения и измерения параметров азимутальной анизотропии ничего не сказано о главном показателе обнаружения анизотропии: фазовом сдвиге колебаний на тангенциальной компоненте относительно радиальной компоненты.

В целом изложенные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на общее положительное впечатление от диссертационной работы.

Общая оценка работы.

Диссертационная работа Гоева А.Г. является актуальной, новой и имеет большое значение для развития сейсмологических исследований вообще и в коллизионной зоне Восточно-Европейской платформы, в частности.

Научная новизна представлена в оригинальных разработках, включенных в тело диссертации, отраженных в списке трудов автора и открывающих перспективы для дальнейших научных исследований.

Работа отличается прекрасной проработкой материала, строгой логикой изложения и четким обоснованием как частных, так и обобщающих выводов.

Работа написана в целом понятным профессиональным языком, достаточно иллюстрирована и содержит необходимые ссылки.

Работа представляет собой законченное научное исследование, результаты которого могут послужить отправными точками дальнейшего развития теории и практики сейсмологических исследований.

Диссертационная работа **Андрея Георгиевича Гоева** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны методические приемы, совокупность которых можно квалифицировать как **научное достижение**, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальность: 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Заведующий кафедрой сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного

университета имени М.В. Ломоносова, доктор физико-математических наук, профессор Владов Михаил Львович тел. (495) 939-33-42, E-mail: vladov@geol.msu.ru, vladov_ml@mail.ru

Адрес учреждения: 119234, Москва г., Ленинские Горы ул., 1, офис 523, Тел. (495) 939-29-70, E-mail: dean@geol.msu.ru

Я, Владов Михаил Львович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

13 марта 2020 года

М.Л. Владов



Подпись Владова М.Л. заверяю:

Декан Геологического факультета Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,

академик

