

## 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

Скорости сейсмических волн линейно связаны с плотностью среды и, являясь таким образом индикатором ее физического состояния и вещественного состава, служат основой представлений о глубинной структуре планеты, о потенциале активности ее недр. Возможно ли в ближайшее время прогнозировать эту активность или она в принципе непредсказуема? Для ответа на эти вопросы необходимы детальные знания о неоднородностях недр планеты, о их подвижности. Плотная заселенность сложной с геолого-геофизической точки зрения территории центральной части Восточно-Европейской платформы (зоны сочленения мегаблоков Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии) затрудняет исследование глубин стандартными полевыми методами. В рассматриваемой диссертации А.Г. Гоева для исследования скоростного строения этого региона к записям цифровых широкополосных сейсмостанций применены альтернативные, к тому же являющиеся экологичными подходы – метод приемных  $P$  и  $S$  функций объемных волн далеких землетрясений и метод азимутальной анизотропии  $SKS$  волн. Тема работы **актуальна** и соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных исследований РАН.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 115 наименований и содержит 125 страниц текста, 53 рисунка, и 4 таблиц.

**Во введении диссертации** сформулированы цели и задачи исследования, актуальность проблемы, отражены научная новизна,

теоретическая и практическая значимость, личный вклад автора. Выдвинуты четыре защищаемых положения, удовлетворяющие требованиям ВАК. Все характеристики работы имеются и соответствуют автореферату.

**В 1-й главе** представлен обзор геофизических исследований, выполненных на большей части Европейской территории. Обзор приводит к выводу о необходимости более детального изучения глубинной структуры Восточно-Европейской платформы (ВЕП), поскольку более ранние сведения о глубинах – во многом результат интерполяции неравномерно расположенных профилей глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и осредненных томографических моделей.

Во **2-й главе** определен выбор методики исследований диссертационной работы, изложены ее теоретические основы. Отметив вклад взрывной сейсмологии в изучение глубинных неоднородностей центральной части ВЕП, а также возможности сейсмотомографии, диссертант делает справедливое заключение, что ни один из этих методов не может быть успешно применен на данной территории по причинам ее плотной заселенности и редкой сети сейсмостанций.

Как наиболее оптимальный рассматривается известный телесеismicкий метод функций приемника (receiver functions) [*Vinnik, 1977; Винник, Косарев, 1981*] ввиду его возможности извлекать из сейсмических колебаний, записанных широкополосными сейсмостанциями, информацию о сейсмических скоростях с хорошим разрешением от поверхности Земли до глубин 600 и более км. Скоростная структура недр определяется подбором теоретических волновых трасс к наблюдаемым. Теоретические трассы рассчитываются многократно апробированным методом Томсона-Хаскелла [*Haskell, 1962*].

Метод приемных функций может быть разделен по типам используемых обменных фаз – на  $P$  функцию приемника (PRF) и  $S$

функцию приемника (SRF). В диссертационной работе задействованы обе функции. Они эффективно дополняют друг друга, что гарантирует более объективный результат при решении задач восстановления глубинного строения в районах с различными геотектоническими условиями [Vinnik et al, 2004].

Моделирование детальной V-структуры на базе выделенных приемных функций выполнено в программном пакете, разработанном группой И.М. Алешина (ИФЗ РАН). Преимущество данного пакета перед более ранними вычислительными программами в максимально возможном учете объективных и в исключении субъективных факторов, влияющих на результирующие скорости. Итоговое решение представляет поле сгущений минимизированного множества сгенерированных случайных начальных моделей, теоретические функции от которых наилучшим образом подобраны к наблюдаемым. Такое объективное представление результата позволяет оценить качество решения, полученного по имеющимся данным.

Одним из достижений диссертационной работы является обнаружение существенного искажающего влияния мощного осадочного слоя на продольную приемную функцию (*Раздел 2.7*). Разработанный на основании этого подход, заключающийся в обработке данных в двух частотных диапазонах и их последующей инверсии, позволил получить не только устойчивый глубинный скоростной разрез коры и верхней мантии, но и более детальные сведения о мощности осадочного чехла [*Kosarev et al., 2013; Oreshin et al., 2008; Гоев и др., 2018*]. Исходя из этого опыта, раздельное по частотному составу моделирование PRF рекомендовано применять к данным тех станций, чей более короткий срок работы не дает возможности привлечь для исследований информацию о SRF.

В **главе 3** на основании результатов численного моделирования корректно выделенных PRF и SRF (1) сделан вывод о скоростях в верхах мантии коллизионной зоны ВЕП, повышенных в среднем на 3%

относительно стандартной модели IASP91, что *соответствует первому защищаемому положению*. Для всех точек наблюдения рассчитаны одномерные глубинные скоростные разрезы до глубины 300 км, по которым обнаружено, что раздел земная кора – мантия в районе исследования не является резким, а представляет собой переходную зону (*2-е защищаемое положение*). На всех разрезах выявлен ряд сейсмических границ: глубина залегания фундамента разнится от станции к станции; раздел верхней и нижней коры на всех станциях залегает на глубинах 18–20 км; кровля и подошва коромантийного перехода (зона Мохо) для станций “Обнинск”, “Михнево” и “Воскресенск” определены соответственно на 39–40 и 53–56 км. Для станции “Шатура” кровля и подошва зоны Мохо определены как 35 – 47 км. Скоростные характеристики разреза, построенного для станции “Шатура”, существенно отличаются от остальных полученных моделей. На разрезах для станций “Обнинск”, “Михнево” и “Воскресенск” в верхней мантии выделяется слой слабого понижения скорости (порядка 1–2%) на глубинах 70–140 км (*3-е защищаемое положение*).

**В 4-й главе с целью выявления** деформации пластичных слоев мантии исследована азимутальная сейсмическая анизотропия верхней мантии – зависимость скорости распространения упругих волн от азимута прихода сейсмической волны. Определены азимуты оси симметрии ( $\alpha$ ) быстрой волны и время задержки ( $\delta t$ ) между быстрой и медленной волнами хорошо апробированным методом изучения расщепленных квазипоперечных волн от SKS/SKKS фаз. Метод разработан Львом Винником [Vinnik et. al., 1992].

В результате выполненного исследования в верхней мантии коллизионной зоны ВЕП выявлено наличие двух анизотропных слоев – подкорового и связанного со слоем пониженной скорости в интервале глубин 70 – 140 км. Азимут оси симметрии первого слоя составляет 160°,

второго –  $90^\circ$ . Данный результат подтверждает *4-е защищаемое положение*. 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  $\alpha \approx 160^\circ$  может быть объяснен наличием “вмороженного” анизотропного слоя подкорковой мантии и с этим можно согласиться.

В **главе 5** обсуждаются полученные результаты и проводится их сопоставление с ранее известными, для данной территории, сведениями. Сделанный вывод о повышенных скоростях  $V_s$  в верхней мантии, в целом, находится в качественном согласии с оценками, произведенными по данным мировой сети по комплексу томографических оценок и вариаций теплового потока [Artemieva, 2009]. Но рассчитанная оценка (3%) существенно ниже полученной осредненной (6%). За счет сейсмического сноса эта оценка относится к глубине 535 км, т.е. середине слоя фазовых переходов северо-западнее района широкополосных сейсмостанций.

Пространственная локализация участка, для которого справедливы приведенные выводы, выполнена с помощью расчета так называемых, точек обмена. Основные границы, выделенные при моделировании всех разрезов, находятся в согласии между собой.

Существенно отличается от остальных моделей скоростная модель, полученная по данным станции “Шатура”. 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. Можно согласиться с тем, что эти отличия обусловлены расположением станции на границе коллизионной зоны и существенная часть точек обмена, в которых сформировались обменные волны, лежат в мегаблоке – Волго-Уралия. Тем самым, подстанционная структура испытывает сильное влияние давления этого

мегаблока. Т. о., вывод о том, что микроконтиненты различаются вплоть до верхней мантии, имеет основание.

Что касается сейсмической анизотропии, не вызывает возражения, 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  $\alpha \approx 160^\circ$  объяснен наличием “вмороженного” анизотропного слоя подкоровой мантии. И по-видимому, это глобальное явление, так как для Евразии по данным международных телесеизмических профилей PASSCAL\_1992 и MOBAL\_2003, определяется подобное направление ( $\alpha \approx 155^\circ$ ).

Несмотря в целом на высокую оценку диссертационной работы, следует отметить ее **недостатки**. Замечания в основном относятся к оформлению работы. Часто встречаются опечатки, несогласованность окончаний, тавтология («в *верхней части верхней мантии*»), что свидетельствует о некоторой спешке. Больше всего она сказалась на формулировках Защищаемых положений. Вырванные из контекста, Защищаемые положения не несут необходимой для них конкретики. А именно: три первых защищаемых положения не привязаны к району исследований; в 4-ом, касающемся слоев азимутальной анизотропии, не указана глубина 2-го выделенного слоя (видимо, показалось достаточным соседства с 3-м защищаемым положением).

В Защищаемых положениях отразились и проблемы с терминологией (во 2-м защищаемом положении: «*модели литосферы и верхней мантии до глубины 300 км*»). Хотя литосфера и верхняя мантия не одно и то же, но и не совсем независимые объекты. Литосфера состоит из земной коры и

части мантии, которая расположена выше кровли астеносферы. Нередко астеносфера вовсе не проявляется. Так что вышеприведенная формулировка не вполне корректна. Было бы верно «*модели земной коры и верхней мантии до глубины 300 км*».

Возражение вызывает и часто встречающиеся в тексте сочетания *зона Мохо, переходная зона Мохо* (случаи, когда не выявляется резкая граница между корой и мантией). Но открытие Мохоровичича, связано именно с резкой коромантийной границей. В коллизионных зонах все гораздо сложнее, тем они и проявляются на глубинных скоростных разрезах. В таких случаях принят термин *коромантийный переход* и этот термин вполне исчерпывающий.

Теперь, не в качестве выявления недостатков, а как пожелание к продолжению исследования коллизионной зоны ВЕП (тем более, что дальнейшие наблюдения планируются): представляется целесообразным выполнение азимутального анализа распределения сейсмических скоростей, что в комплексе с параметрами анизотропии позволит не в среднем, а в разных направлениях выявить глубинные неоднородности и их связь с возможными течениями.

Сделанные замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертации А.Г. Гоева, выполненной на актуальную тему исследования глубинного строения коллизионной зоны в центре ВЕП. Автореферат правильно отражает ее содержание. Вынесенные на защиту положения опубликованы в ведущих научных журналах и известны специалистам по геофизике. Результаты работы Гоева А.Г. могут быть использованы во всех научных организациях страны, проводящих геофизические и геологические исследования.

Подводя итог вышесказанному, сделано заключение о том, что диссертационная работа А.Г. Гоева «Скоростное строение земной коры и

верхней мантии коллизионной зоны центральной части Восточно-Европейской платформы» представляет собой законченное исследование, которое следует квалифицировать как **научное достижение**, важное для геофизики. Диссертация удовлетворяет требованиям п.9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Гоев Андрей Георгиевич, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» (пункт 8 паспорта специальности 25.00.10 – “Изучение Земли и ее частей по таким свойствам, как плотность, теплопроводность, электропроводность, намагниченность, сейсмические скорости или упругие модули, естественная радиоактивность (если последняя играет роль в энергетическом балансе изучаемых геодинамических процессов) и т.п.”).

*Я, Мордвинова Валентина Владимировна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также на их дальнейшую обработку.*

Ведущий научный сотрудник ИЗК СО РАН,  
доктор геолого-минералогических наук

В.В. Мордвинова

Подпись В.В. Мордвиновой заверяю  
Ученый секретарь ИЗК СО РАН

Р.П. Дорофеева



Валентина Владимировна Мордвинова

В.н.с. ИЗК СО РАН, специальность: 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

e-mail: mordv@crust.irk.ru

телефон: (3952) 422-761

12 марта 2020 г.