

Скоростная делимость мантии под Украинским щитом

© Т. А. Цветкова, И. В. Бугаенко, Л. Н. Заец, 2016

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 17 мая 2016 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

У межах побудованої за методом тейлорового наближення тривимірної P -швидкісної моделі мантиї під Євразією показано, що мантия під Українським щитом за швидкісними характеристиками може бути поділена на три домени: Західний, Центральний та Східний. До Західного домену належать Волинський та Подільський мегаблоки щита, до Центрального домену — Росинський, Бузький, Інгульський мегаблоки та західна частина Середньопридніпровського мегаблока, яка обмежена Дерезоватською системою розрізів, до Східного — східна частина Середньопридніпровського та Приазовський мегаблоки. Такий поділ зберігається для інтервалу глибин 50—500 км верхньої мантиї, її перехідної зони і відновлюється на глибинах 700—800 км зони поділу 1. Такий поділ зумовлений зв'язком на глибинах 100—250 км мантиї під Українським щитом зі швидкісними структурами Сарматського сегменту Східноєвропейської платформи; на глибинах 350—600 км — зв'язком зі швидкісними структурами мантиї під Чорним морем; на глибинах 700—800 км відновлюється зв'язок швидкісних структур Сарматського сегменту Східноєвропейської платформи та західної частини Чорного моря.

Ключові слова: сейсмотомографія, P -швидкісна модель, мантия, Український щит.

Введение. При рассмотрении скоростного строения мантии привлекаются три основных модели. Первая (геодинамическая) предполагает раздел мантии на две части: верхнюю и нижнюю по границе на глубине 660 км [Трубицын, 2010]. Вторая (химико-минералогическая) делит мантию на четыре части: верхнюю до глубины 400 км, переходную зону в интервале глубин 400—700 км, нижнюю в интервале глубин 700—2650 км и слой D'' толщиной приблизительно 250 км [Трубицын, 2010]. Третья (химико-минералогическая модель Ю. М. и Д. Ю. Пушаровских) учитывает данные сейсмотомографии и данные о химическом составе мантии и мантийных границах [Пушаровский, Пушаровский, 2010]. Согласно модели Пушаровских (табл. 1), как для активизированной, так и для стабильной мантии предполагается послойная инверсность скоростей и инверсность скоростных характеристик активизированной и стабильной мантии относительно друг друга.

Следует отметить, что во всех моделях присутствует геодинамическая граница, разделяющая верхнюю мантию и ее переходную зону со средней и нижней мантией, начиная с зоны раздела 1 модели Пушаровских. В настоящее время считается, что верхней мантии и ее переходной зоне соответствует плитовая тектони-

ка, средней и нижней — тектоника плюмов, разделом служит геодинамическая граница [Хаин, Ломидзе, 2005].

Как известно, сейсмические исследования не несут информации о возрасте изучаемых структур. Однако при построении сейсмических разрезов коры и мантии естественно ожидать проявление следов геодинамических процессов. Этим запросам соответствуют результаты решения задач сейсмической томографии (скоростная модель, оптимальная в пределах принятых физико-математических представлений). Последние включают: аксиоматику, теорию метода, принятую параметризацию среды, численные методы решения задачи, аппроксимирующие методы, графические методы и т. д. Хорошо известно, что задача сейсмической томографии (обратная линеаризованная кинематическая задача сейсмоки) является некорректной по Адамару [Мухометов, 1977], что связано с неединственностью решения. В общем случае, указанная проблема неразрешима, поскольку для ее решения требуется континуальность системы наблюдений, а именно, каждая точка границы изучаемой области на поверхности должна излучать и принимать сейсмические лучи. Последнее не достижимо.

Наряду с недостаточной освещенностью сейсмическими данными мантии под конкрет-

Т а б л и ц а 1. Химико-минералогическая модель мантии [Пушаровский, Пушаровский, 2010]

Геосферы	Глубина залегания слоя, км	Скоростная характеристика	
		активизированной мантии	стабильной мантии
Верхняя мантия	Граница Мохо — 410	пониженная	повышенная
Переходная зона	410—670	повышенная	пониженная
Зона раздела 1	670—850	пониженная	повышенная
Средняя мантия	850—1700	повышенная	пониженная
Зона раздела 2	1700—2200	пониженная	повышенная
Нижняя мантия	2200—2900	повышенная	пониженная
----- Зона D	2650—2900		

ными регионами проблематичной остается освещенность коры в целом. Поэтому, как правило, при построении сейсмографических моделей мантии под различными регионами используются либо классические модели коры (Джеффриса—Буллена, АК135), принятые при обработке данных, содержащихся в бюллетенях ISC, либо скоростные характеристики коры, принятые для референтных моделей.

В построенной по методу тейлорового приближения [Геуко, 2004] 3D *P*-скоростной модели мантии под Европой используются данные из бюллетеней ISC за 1964—2006 гг. Плотность системы наблюдений представлена в работе [Гейко и др., 2006]. Учитывая отсутствие трехмерной скоростной модели земной коры территории Украины, при построении трехмерной модели мантии в качестве поправки за кору использовалась модель Джеффриса—Буллена. Распределение скоростей показано на рис. 1—9. Модель мантии под территорией Украины представлена в работах [Гейко и др., 2005, 2006; Шумлянская, 2008].

Наличие скоростных моделей коры, согласно данным ГСЗ для территории Украинского щита (УЩ), позволяет использовать более достоверные сведения о скоростном строении коры и уточнить представления о верхней мантии этого региона. В настоящей статье рассматривается возможность выделения скоростных доменов под УЩ в соответствии с полученной трехмерной *P*-скоростной моделью для верхней мантии, ее переходной зоны и зоны раздела 1 на основе анализа горизонтальных сечений $V(x, y, z)$ мантии до глубины 850 км. Используемые в работе тектоническая схема и системы разломов приведены согласно работе [Гинтов, 2005].

Скоростная делимость мантии УЩ на глубине 50—200 км с учетом поправок за кору по данным ГСЗ. Для территории УЩ отработана достаточно развитая система профилей ГСЗ. Однако существующие данные не позволяют создать трехмерную скоростную модель земной коры для территории этого региона. Поэтому была построена модель средних скоростей коры УЩ, согласно существующей системе ГСЗ [Шумлянская и др., 2014]. Сравнение модели мантии под территорией УЩ, построенной с учетом модели коры Джеффриса—Буллена, с моделью, которая использует среднескоростную модель коры по данным ГСЗ, позволило сделать следующее заключение [Шумлянская и др., 2014].

В среднескоростной модели коры, построенной по данным сейсмических исследований за период, начиная с 1960-х до 2000-х годов, выделены два слоя — до 15 км и от 15 км до границы Мохо. Получены средние скорости для каждого из слоев, а также осредненные значения глубин до границы Мохо, что позволило построить слоисто-блоковую модель земной коры УЩ, которая, в принципе, не противоречит ранее известным данным о строении щита. Обращение годографов-сечений обобщенных полей времен первых вступлений *P*-волн с поправками за кору, полученными на основании данных о средних скоростях и глубинах до границы раздела Мохо, позволило с точностью $\pm 0,015$ км/с получить новую скоростную модель мантии под УЩ.

Сравнение показало, что разность скоростей на глубине 50—200 км некоторых участков незначительна, но точность определения превышает точность определения скорости по годографу ($\pm 0,015$ км/с). Изменяется и конфи-

гурация аномалий, что позволяет говорить о целесообразности проведения подобной операции.

Приведенные результаты указывают на необходимость увеличения плотности системы наблюдений при освещенности земной коры и использование трехмерных скоростных моделей коры при построении сейсмотомографических моделей мантии.

Будем называть модель коры Джеффриса—Буллена базовой, а среднескоростную модель — уточненной. В обеих моделях при визуализации в качестве референтной использовалась обобщенная средняя скорость, полученная для мантии под территорией Евразии и ее окружения [Гейко и др., 2005] (табл. 2).

Визуализация полученной 3D *P*-скоростной модели мантии Восточно-Европейской платформы (ВЕП) позволяет отчетливо видеть, что в структурном плане как уточненная, так и базовая модели до глубины 200 км показывают деление мантии под территорией УЩ на три домена: Западный, Центральный и Восточный. К Западному домену относятся Волинский и Подольский мегаблоки, к Центральному — Росинский, Бугский и Ингульский, а также

западная половина Среднеприднепровского мегаблока, к Восточному — восточная половина Среднеприднепровского и Приазовский мегаблок. Конфигурация границ указанных доменов может несколько изменяться для горизонтальных сечений 50—200 км. Деление мантии на домены на этих глубинах определяется скоростными характеристиками. Центральному домену соответствуют наиболее высокие скорости, в то время как Западный и Восточный характеризуются более низкими относительно Центрального домена, но более высокими, относительно референтной модели, скоростями. После 200 км начинается перестройка скоростного строения мантии.

Глубина 50 км (рис. 1). На глубине 50 км отмечается наибольшее расхождение между уточненной и базовой моделями, что объясняется непосредственным влиянием полученной модели коры по средним скоростям. Скоростные неоднородности Центрального (высокоскоростного) домена и для уточненной модели, и для базовой ограничены на севере скоростью 8,1 км/с, включая мантию под Днепровско-Донецкой впадиной (ДДВ). Западная граница проходит восточнее границы между Волинским, Подольским и Росинско-Бугским мегаблоками, характеризуется значением скорости 8,05 км/с для уточненной модели и 8,075 для базовой. Восточная граница соответствует восточному ограничению западной половины мантии под Среднеприднепровским мегаблоком УЩ. Ее проекция на земную поверхность определяется Дерезоватской зоной разломов. Для базовой модели южная граница Центрального домена характеризуется значением скорости 8,05 км/с, для уточненной модели пограничная скорость более дифференцирована, в основном 8,025—8,05 км/с.

Область, соответствующая значению скорости 8,05 км/с, делит мантию под Центральным высокоскоростным доменом уточненной модели на две подобласти. Севернее область ограничена значением скорости 8,075 км/с. Деление отражает распространение в коре известного тектонического шва Херсон—Смоленск. Западная подобласть I включает в себя Росинско-Бугский мегаблок, Голованевскую шовную зону, западную часть Ингульского мегаблока. Западное ограничение этой подобласти прослеживается несколько восточнее границы между Волинским, Подольским и Росинско-Бугским мегаблоками на юг, выходя на мантию под юго-западным склоном УЩ, и далее вдоль южной границы Бугского мега-

Т а б л и ц а 2. Референтная модель

Глубина, км	V_{aver} , км/с	Глубина, км	V_{aver} , км/с
50	7,93	600	10,18
75	8,011	625	10,322
100	8,082	650	10,466
125	8,139	675	10,585
150	8,19	700	10,69
175	8,241	725	10,783
200	8,296	750	10,866
225	8,356	775	10,94
250	8,422	800	11,01
275	8,498	825	11,074
300	8,584	850	11,134
325	8,682	875	11,191
350	8,794	900	11,244
375	8,918	925	11,295
400	9,053	950	11,343
425	9,177	975	11,39
450	9,29	1000	11,435
475	9,4	1025	11,478
500	9,522	1050	11,519
525	9,661	1075	11,56
550	9,829	1100	11,599
575	10,007	1125	11,637

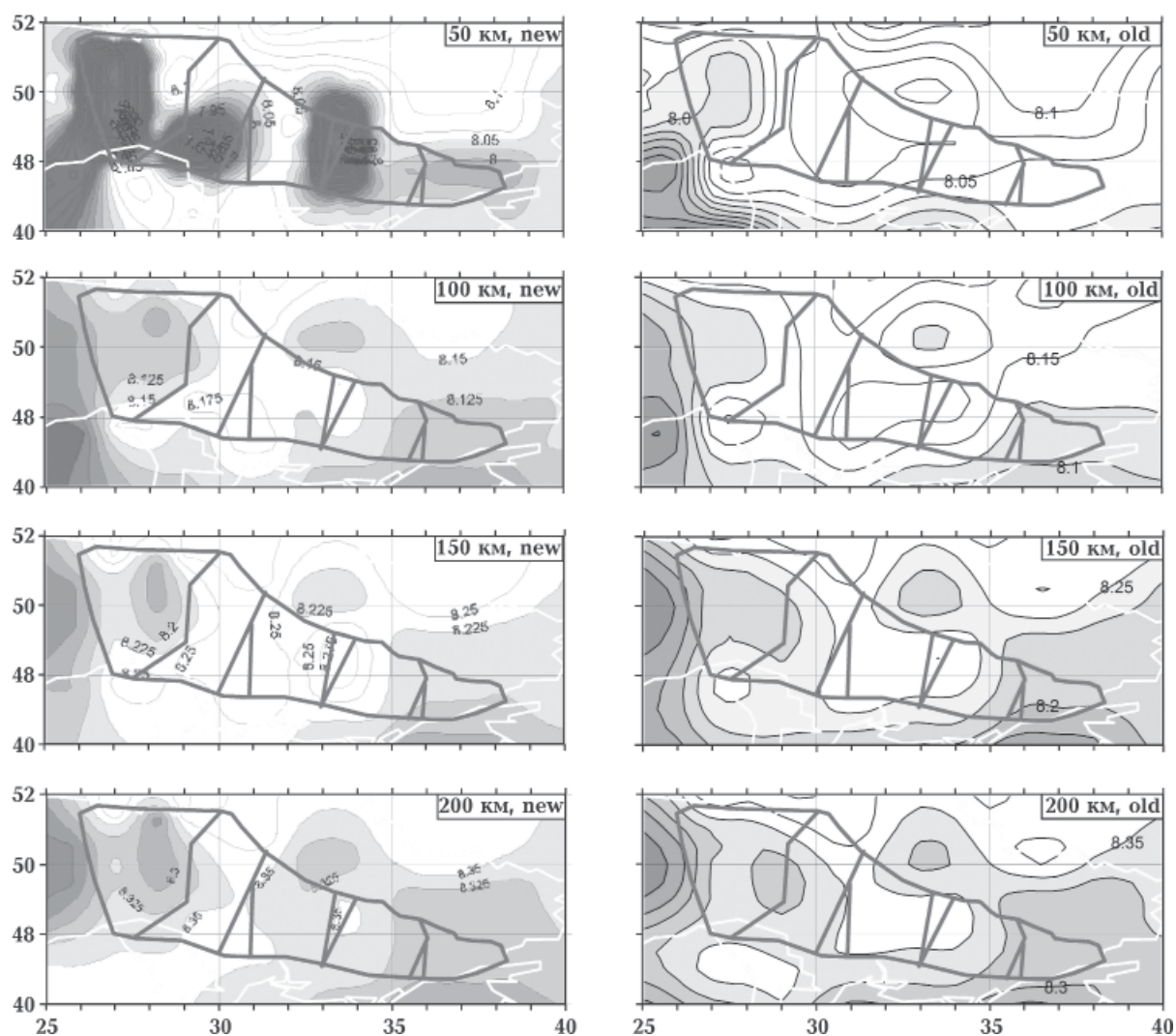


Рис. 1. Базовая (old) и уточненная (new) модель 3D P -скоростной верхней мантии УЩ (50, 100, 150, 200 км).

блока. Мантия под восточной частью Ингульского мегаблока, Ингулецко-Криворожской шовной зоной, западной частью Среднеприднепровского мегаблока соответствует подобласти II. Она включает низкоскоростную аномалию (7,55—8,05 км/с), соответствующую мантии под Ингулецко-Криворожской шовной зоной, западной частью Среднеприднепровского мегаблока, центральной частью ДДВ. Характерная особенность для подобластей I и II Центрального домена — присутствие низкоскоростных аномалий. Для подобласти I низкоскоростная аномалия соответствует Бугскому мегаблоку, скорости изменяются в интервале 7,45—7,85 км/с. Низкоскоростная аномалия подобласти II приведена выше.

В базовой модели на фоне Центрального домена (высокоскоростной области, ограниченной с юга значениями скорости 8,05 км/с,

с севера — 8,10 км/с) выделяются высокоскоростная подобласть I, соответствующая мантии под Голованевской шовной зоной и ее окружением (8,075 км/с), и высокоскоростная подобласть II, характеризующая мантию под Ингулецко-Криворожской шовной зоной и ее окружением (8,075—8,05 км/с). Севернее под Ингулецко-Криворожской шовной зоной для базовой модели в мантии под ДДВ наблюдается более низкоскоростная аномалия скорости (8,075—8,05 км/с). В уточненной модели ей также соответствует выход в мантию под ДДВ низкоскоростной аномалии под Ингулецко-Криворожской шовной зоной, ограниченной скоростью 8,05 км/с, о которой сказано выше.

Западный домен в уточненной модели относительно Центрального домена характеризуется более низкими скоростями 7,5—8,025 км/с. Он включает в себя мантию под Волынским и

Подольским мегаблоками и западную оконечность юго-западного склона УЩ. На западных границах Волинского и Подольского мегаблоков выделяется низкоскоростная аномалия (7,45—7,85 км/с). В базовой модели Западный домен также характеризуется более низкими относительно Центрального домена скоростями: 8,025—8,0 км/с для мантии под Волинским и Подольским мегаблоками и 8,025—7,5 км/с под западной оконечностью юго-западного склона УЩ.

В уточненной модели Восточный домен относительно Центрального определяется более низкими скоростями (8,05—8,00 км/с). Скорость 8,00 км/с соответствует мантии под Приазовским мегаблоком, 8,05 км/с — восточной части мантии под Среднеприднепровским мегаблоком. В базовой модели восточная часть мантии под Среднеприднепровским мегаблоком характеризуется скоростями 8,05—8,075 км/с, под Приазовским мегаблоком — 8,05—8,025 км/с.

Проведенный анализ показывает, что уточненная модель Восточного домена характеризуется более низкими скоростями, чем базовая. Для Западного домена скорости также более низкие. В пределах Центрального домена скорости сохраняются при некотором изменении конфигурации изолиний V_p . Скоростные характеристики мантии под Голованевской шовной зоной и ее окружением в уточненной модели представлены более детально.

На рассматриваемой глубине обращают на себя внимание приведенные выше относительно резкие низкоскоростные аномалии, соответствующие, во-первых, прогибам в поверхности раздела Мохо, во-вторых, зонам глубинных разломов (на рис. 1 показаны только межмегаблоковые зоны разломов, по [Гинтов, 2005]). Так, в западной части УЩ известна меридиональная система зон разломов [Ентин, 2005], в которой главную роль играет Белокаровицкая зона протяженностью до 300 км. Здесь же наблюдается прогиб поверхности раздела Мохо амплитудой около 10 км по геотраверсу II [Гинтов, Пашкевич, 2010]. В центральной части Бугского мегаблока аномалия относительно низких значений V_p соответствует области пересечения Звиздаль-Залесской, Хмельникской и Ободовской зон разломов, а также прогибу поверхности раздела Мохо северо-западного простирания, по [Соллогуб, 1986]. Третья контрастная аномалия низких значений V_p совмещается с Криворожско-Кременчугской зоной разломов и прогибом

поверхности раздела Мохо, соответствующим Ингулеcko-Криворожской шовной зоне [Соллогуб, 1986; Гинтов, Пашкевич, 2010].

Данное явление можно объяснить тем, что на сечении 50 км в отмеченных районах находится либо «базальтовый» слой земной коры, либо коромантийная смесь, в то время как в смежных районах уже фиксируется мантия. Кроме того, отмеченные выше зоны разломов пересекают поверхность раздела Мохо и влияют на понижение скоростных характеристик среды, что всегда хорошо видно в приповерхностных слоях коры.

Глубина 100 км (см. рис. 1). На этой глубине расхождения между уточненной и базовой моделью уменьшаются. В обеих моделях четко прослеживается деление мантии под УЩ на три домена. Мантийные скорости в Центральном домене составляют 8,15—8,175 км/с, в Западном и Восточном — 8,125 км/с.

Как в базовой модели, так и в уточненной Центральный домен состоит из трех частей — юго-западной, находящейся в пределах Бугского мегаблока, центральной и восточной, совмещающимися соответственно с Голованевской и Ингулеcko-Криворожской шовными зонами.

Западная граница Центрального домена проходит восточнее границы между Волинским, Подольским и Росинско-Бугским мегаблоками. Восточная граница определяет деление мантии под Среднеприднепровским мегаблоком на восточную и западную части. Граница Центрального домена на севере в основном соотносится с северной границей УЩ, проходит под западной частью Среднеприднепровского мегаблока, Ингулеcko-Криворожской шовной зоной, северным пограничьем Ингульского мегаблока до мантии, соотносящейся с тектоническим швом Херсон—Смоленск. Под западной частью Центрального домена (восточная часть Росинского мегаблока) в обеих моделях наблюдается распространение высокоскоростной мантии с севера (ДДВ) в область УЩ. Южная граница Центрального домена соотносится с мантией под южным окончанием Ингулеcko-Кременчугской и Голованевской шовных зон.

Скорость 8,175 км/с в уточненной модели определяет более высокоскоростную под-область южной части Голованевской шовной зоны с выходом на западное приграничье мантии под Ингульским мегаблоком, ограниченное Звенигородско-Братской зоной разломов. Она показывает, что обе рассматриваемые шовные зоны являются относительно высокоскорост-

ными. Это подтверждается и данными гравитационного моделирования, согласно которым обе шовные зоны сложены относительно высокоплотными породными комплексами как в коре, так и в верхах верхней мантии.

Скоростная область Центрального домена в базовой модели содержит более высокоскоростную подобласть (8,175 км/с), которой соответствует мантия под основной частью Ингульского мегаблока, большей частью Ингулецко-Кременчугской шовной зоны (без северного и южного окончаний), западной половиной Среднеприднепровского мегаблока. В обеих моделях в мантии под юго-западным склоном Бутского мегаблока выделяются более высокоскоростная подобласть (8,15—8,175 км/с) и более низкоскоростная аномалия в мантии под ДДВ в продолжении Ингулецко-Криворожской шовной зоны (8,125—8,15 км/с).

Западный домен остается более низкоскоростным (8,125—8,10 км/с) для обеих моделей. Обращает на себя внимание смещение максимума аномалии относительно низких скоростей на восток в область Коростенского плутона приблизительно на 70 км, что может свидетельствовать о достаточно пологом западном наклоне мантийной структуры, вызывающей аномалию. Этим косвенно подтверждается наличие палеосубдукционного процесса, приведшего к коллизии Фенноскандии и Сарматии в конце раннего протерозоя [Гинтов, Пашкевич, 2010].

Таким образом, наибольшее расхождение по скоростям между базовой и уточненной моделью на глубине 100 км наблюдается в Центральном домене УЩ. Следует отметить связь мантии под Центральным доменом УЩ с расположенными севернее мантийными структурами Сарматии и, прежде всего, с мантией под ДДВ.

Глубина 150 км (см. рис. 1). На данной глубине в базовой и уточненной моделях наблюдается дальнейшее уменьшение расхождения по скоростным характеристикам мантийных структур УЩ. Сохраняется деление на домены и конфигурация, представленная на глубине 100 км.

В обеих моделях для Центрального домена отмечается аналогичное, а для уточненной модели — более контрастное относительно глубины 100 км деление на три части. Мантийные скорости в этих трех частях изменяются в пределах 8,225—8,25 км/с для базовой модели и 8,225—8,75 км/с для уточненной.

Выделяется более низкоскоростная аномалия (8,125 км/с) в мантии под ДДВ, севернее

мантии под Ингулецко-Криворожской шовной зоной.

Восточный домен включает в себя мантию под восточной частью ДДВ, Донбассом, Приазовским мегаблоком и характеризуется изолиниями скорости 8,2—8,25 км/с, что соответствует как базовой, так и уточненной моделям под УЩ.

Западный домен сохраняет свое плановое положение, как и на глубине 100 км. Аномалия относительно более низких скоростей 8,25 км/с наблюдается в пределах мантии под Коростенским плутоном, Подольским мегаблоком и связана с мантией под Волыно-Подольской моноклиналию.

Глубина 200 км (см. рис. 1). Сохраняется деление мантии под УЩ на три домена и их конфигурация. В базовой и уточненной моделях Восточный домен обладает одинаковыми скоростными характеристиками (8,325—8,30 км/с), включает в себя мантию под Донбассом и Приазовским мегаблоком. К Западному более низкоскоростному домену (8,325—8,2 км/с) относится мантия под Волинским и Подольским мегаблоками. В уточненной модели на глубине 150—200 км отмечается ее отделение от низкоскоростной аномалии Волыно-Подольской моноклинали.

Центральный домен в уточненной модели высокоскоростной, связан с высокоскоростными неоднородностями юго-запада и севера. Высокоскоростная подобласть, начинающаяся под Северной Добруджей (8,35 км/с), имеет юго-западно—северо-восточное направление и охватывает южную оконечность щита (юго-восток Бутского мегаблока, южную часть Голованевской шовной зоны и юго-западную оконечность Ингульского мегаблока). В мантии под Голованевской шовной зоной указанная высокоскоростная область сочленяется с высокоскоростной (8,35—8,375 км/с), к которой относится мантия под северо-восточной частью Росинского мегаблока и северо-западной оконечностью Ингульского мегаблока до Корсунь-Новомиргородского плутона. В остальном Центральный домен характеризуется скоростями 8,35—8,325 км/с и включает в себя мантию под центральной частью Росинско-Бутского мегаблока, Ингульским мегаблоком и западной частью Среднеприднепровского мегаблока. Выделяются две более низкоскоростные аномалии (8,325 км/с): в районе Коростенского плутона Волинского мегаблока и под ДДВ севернее Ингулецко-Кременчугской шовной зоны.

Базовая модель Центральной части несколь-

ко отличается конфигурацией изолиний. В ней также выделяются более низкоскоростные аномалии под Коростенским плутоном и севернее Ингулецко-Кременчугской шовной зоны.

Восточный домен соотносится с мантией под Донбассом и Приазовским мегаблоком и характеризуется в базовой и в уточненной моделях скоростью 8,325 км/с.

С глубины 250 км принципиальных различий между моделями не отмечается.

Таким образом, анализ скоростного строения верхней мантии под УЩ на глубине 50—200 км с учетом как скоростной модели коры Джеффриса-Буллена (базовая модель), так и скоростных характеристик коры, соответствующих средним скоростям, полученным при проведении на территории УЩ работ ГСЗ (уточненная модель), указывает на устойчивое деление мантии на три домена:

- Восточный, к которому относится мантия под Приазовским мегаблоком и восточной половиной Среднеприднепровского мегаблока, с запада ограниченной Дерезоватской зоной разломов;

- Центральный, включающий в себя мантию под западной половиной Среднеприднепровского мегаблока, Ингульским, Росинским и Бугским мегаблоками;

- Западный, к которому относится мантия под Волынским и Подольским мегаблоками.

Изменение скоростных характеристик коры отражается в уточненной модели в верхах верхней мантии, проявляется на глубине 50—200 км; максимальное расхождение отмечается на глубине 50 км, далее уменьшаясь и исчезая на глубине 250 км. При этом уточненная модель скоростного строения мантии УЩ для глубины 50—200 км вносит коррективы в модель, построенную с учетом земной коры на основе модели Джеффриса—Буллена. Это относится к делению Центрального домена на три области, отражающему различие в геологическом строении литосферы и в первую очередь земной коры (ее мощности), и влиянии глубинных зон разломов.

Для Западного домена в пределах 200 км важно отметить достаточно пологое погружение на восток относительно низкоскоростной аномальной структуры, что хорошо коррелируется с известным представлением о палеосубдукции Фенноскандии под Сарматией.

Начиная с глубины 50 км (возможно, и меньшей), заметна связь отдельных мантийных структур УЩ со структурами соседних регионов. Так, западная часть Ингульского ме-

габлока, относящаяся к Центральному домену, в которую входят Голованевская шовная зона и трансрегиональная шовная зона Херсон—Смоленск, на глубине 50—200 км прослеживается на север в пределы западной части ДДВ и мегаблока КМА Воронежского кристаллического массива (ВКМ). В земной коре, как известно, отмеченные структуры также продолжают далеко на север. То же относится к структурам, ограничивающим Центральный домен с юго-запада.

Восточный домен в скоростном отношении связан с мантией под Сарматским сегментом ВЕП (восточной частью ДДВ и Хоперским мегаблоком КМА, южным обрамлением УЩ), а Западный домен — с Волыно-Подольской моноклиной. Уточненная скоростная модель также позволяет более отчетливо проследить связь мантийных структур УЩ с окружающими регионами. В частности, становится очевидным, что щит состоит из доменов, в архее и палеопротерозое принадлежавших разным плитным ансамблям, которые во второй половине палеопротерозоя образовали микроконтинент Сарматия.

Следует отметить, что деление мантии под УЩ на три домена подтверждается исследованиями, проведенными на глубине до 120 км геоэлектрическими методами [Бурахович и др., 2015].

Делимость мантии под УЩ по скоростным характеристикам переходной зоны верхней мантии и зоны раздела 1. Полученная 3D *P*-скоростная модель мантии Европы позволила провести анализ горизонтальных сечений $V(x, y, z)$ мантии под УЩ до глубины 850 км (рис. 2—9). Утолщенной черной линией выделена нулевая референтная линия раздела (обобщенная средняя скорость) пониженных и повышенных скоростей. Результатом стала скоростная делимость мантии под УЩ на глубине 50—850 км, т. е. в пределах верхней мантии, переходной зоны, зоны раздела 1.

На глубине 50—200 км, как было показано выше (см. рис. 1), в базовой и уточненной моделях мантия под УЩ разделена на три домена. Дальнейшее рассмотрение на глубине 50—800 км 3D *P*-скоростной модели мантии проводилось на основе базовой модели.

На глубине 100—250 км выделяется высокоскоростная, но относительно прилегающих частей ВЕП низкоскоростная область, объединяющая мантию под Волго-Уралией ВЕП с мантией под Хоперским мегаблоком ВКМ и с мантией под ДДВ и Восточным доменом УЩ,

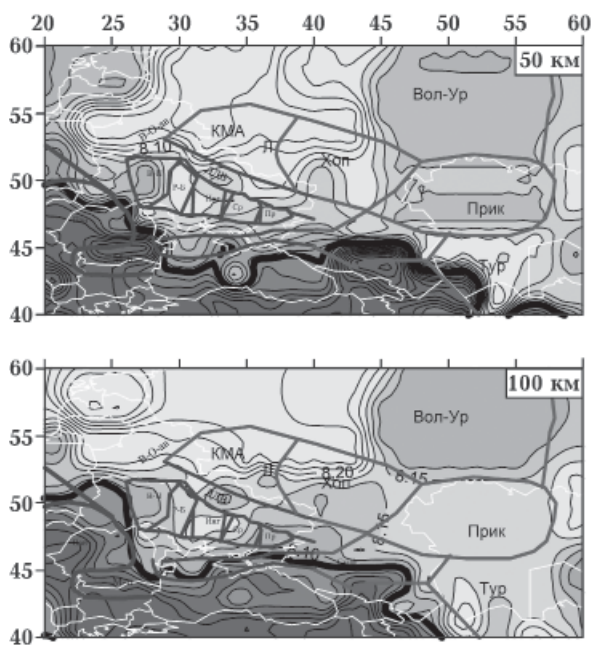


Рис. 2. Горизонтальные сечения 3D P -скоростной модели верхней мантии (50, 100 км). Условные обозначения: Вол-Ур — Волго-Уралья, В-О-ав — Волыно-Аршанский авлакоген, В-П — Волыно-Подольский мегаблок УЩ, ДДВ — Днепровско-Донецкая впадина, Инг — Ингулецкий мегаблок УЩ, КМА — Курская магнитная аномалия ВКМ, Л — Лосевская шовная зона ВКМ, М-п — Мизийская плита, Пан — Паннонская впадина, Пр — Приазовский мегаблок УЩ, Р-Б — Росинко-Бугский мегаблок УЩ, Скиф — Скифская плита, Ср — Среднеприднепровский мегаблок УЩ, Тур — Туранская плита, Хоп — Хоперский блок ВКМ.

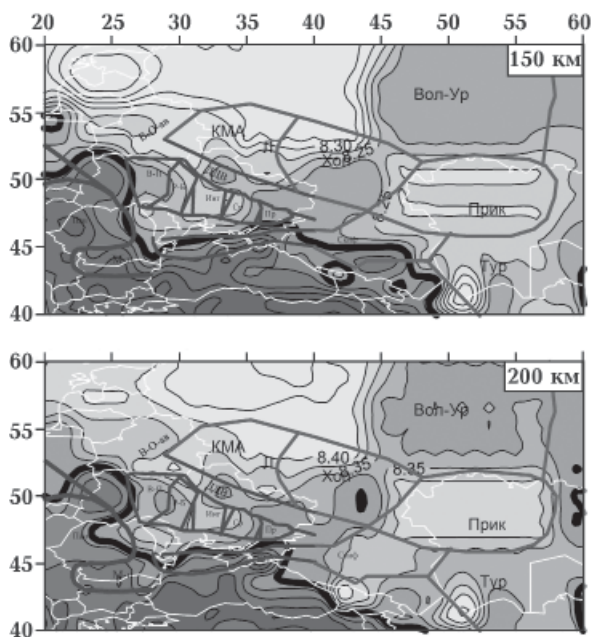


Рис. 3. Горизонтальные сечения 3D P -скоростной модели верхней мантии (150, 200 км). Условные обозначения см. на рис. 2.

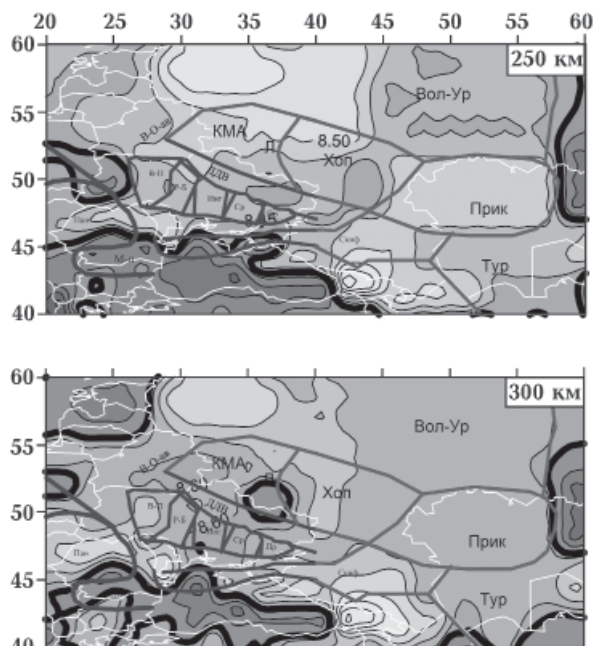


Рис. 4. Горизонтальные сечения 3D P -скоростной модели верхней мантии (250, 300 км). Условные обозначения см. на рис. 2.

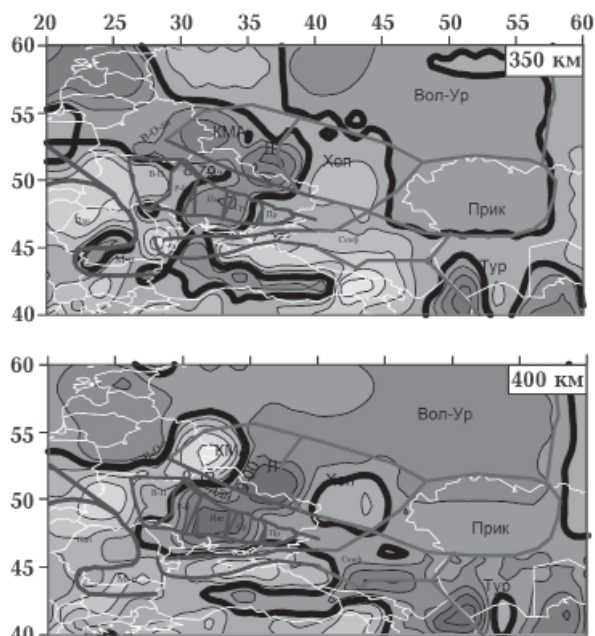


Рис. 5. Горизонтальные сечения 3D P -скоростной модели верхней мантии (350, 400 км). Условные обозначения см. на рис. 2.

представляющими Сарматский сегмент ВЕП [Хаин, 2001].

На глубине 250 км (рис. 4) мантия под УЩ характеризуется высокими скоростями (8,475 км/с при референтной 8,422 км/с), относится к Сарматскому сегменту ВЕП северо-

восточно—юго-западного простирания и не разделена на скоростные домены.

Начиная с глубины 300 км, отмечается « мозаичность » скоростной структуры мантии ВЕП. При этом возобновляется деление мантии УЩ на три домена с инверсией их скоростных характеристик. Основное изменение происходит в Центральном домене, который характеризуется наиболее низкими скоростями относительно Восточного и Западного доменов. С 350 км Центральный домен относится к более низкоскоростной мантийной аномалии юго-западно—северо-восточного простирания, включающей мантию под северо-западным шельфом Черного моря, Центральным доменом УЩ, центральной частью ДДВ и юго-востоком мегаблока КМА (Курско-Белгородский блок) ВКМ.

На глубине 350—400 км (рис. 5) отмечается общая инверсия скоростей, связанная с переходом от высокоскоростных структур стабильной верхней мантии ВЕП к низкоскоростным структурам переходной зоны и инверсным процессам активизированной мантии под Черным морем (переход от низких скоростей к высоким). При этом отмечается распространение высокоскоростных структур мантии под Черным морем на север в мантию под южной окраиной ВЕП и низкоскоростных структур мантии ВЕП на юг в высокоскоростную мантию под

Черным морем. На глубине 350 км Западный и Восточный домены ограничены пограничными нулевыми изолиниями и характеризуются как высокоскоростные. Начинается распад мантийной скоростной области Сарматского сегмента ВЕП, в результате чего Восточный домен объединяется с мантией под восточной частью ДДВ, Хоперским мегаблоком ВКМ.

На глубине 400—500 км (рис. 5, 6) продолжается деление мантии под УЩ на три части. Западный домен относится к области распространения высоких скоростей, на глубине 400 км объединяющей мантию под Волыно-Оршанским авлакогеном, северо-западной частью ВКМ и ДДВ с мантией под Карпатами. Центральный домен относится к низкоскоростной аномалии юго-западно—северо-восточного простирания, в целом по скоростным характеристикам соответствующая мантии под ВЕП. Восточный домен также относится к низкоскоростной мантии под ВЕП, характеризуясь, однако относительно Центрального домена более высокими скоростями. Таким образом, на глубине 400 км выделяется скоростная область северо-восточного простирания, распространяющаяся от Альпийского пояса (Карпаты—Добруджа—Черное море) до осевой линии ВКМ.

На сечениях 400—450 км выделяется граница, отделяющая ВЕП от Альпийского пояса

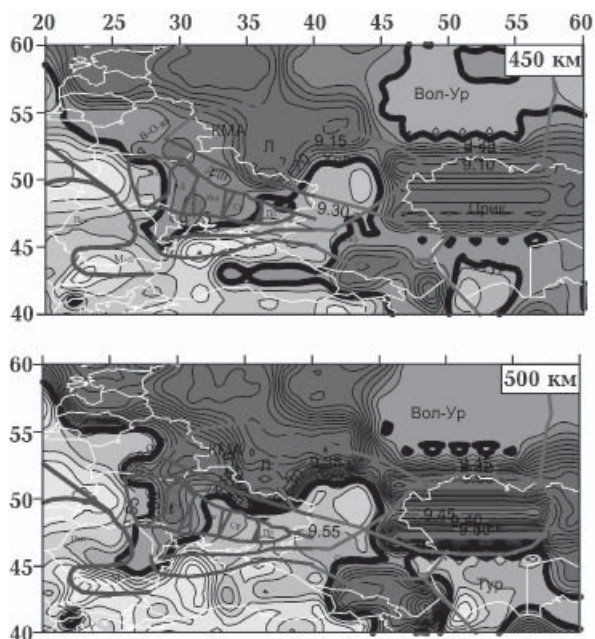


Рис. 6. Горизонтальные сечения 3D *P*-скоростной модели верхней мантии (450, 500 км). Условные обозначения см. на рис. 2.

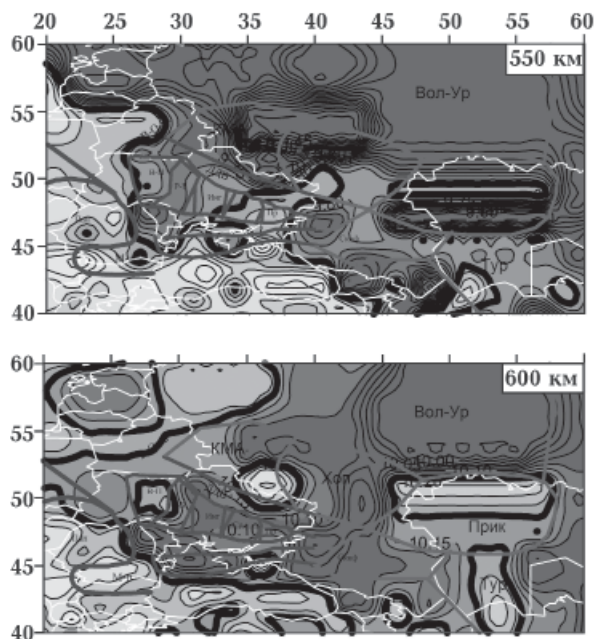


Рис. 7. Горизонтальные сечения 3D *P*-скоростной модели верхней мантии (550, 600 км). Условные обозначения см. на рис. 2.

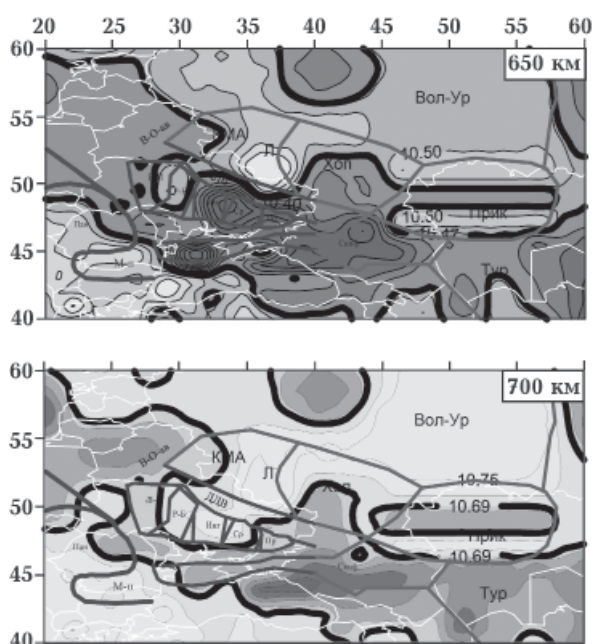


Рис. 8. Горизонтальные сечения 3D P -скоростной модели верхней мантии (650, 700 км). Условные обозначения см. на рис. 2.

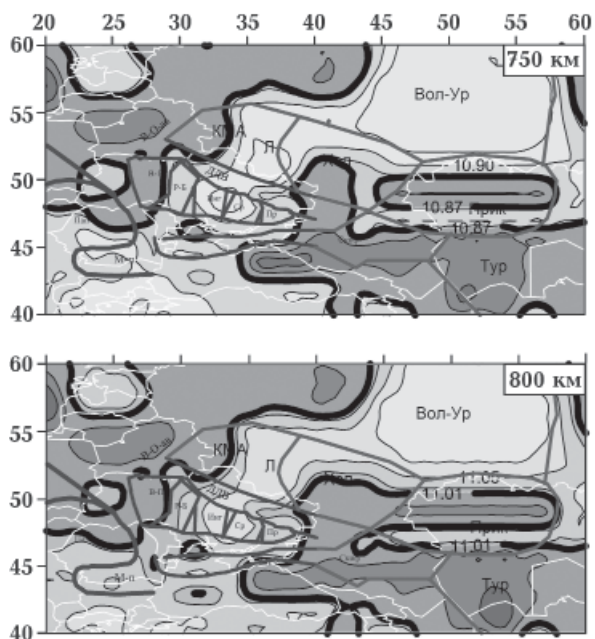


Рис. 9. Горизонтальные сечения 3D P -скоростной модели верхней мантии (750, 800 км). Условные обозначения см. на рис. 2.

(Черноморской впадины). На глубине 450—500 км четко выделяется мантийная скоростная область северо-восточного простираения, включающая северо-западный шельф Черного моря, Крым, Восточный домен, восточную часть ДДВ и Хоперский мегаблок ВКМ.

На глубине 550—650 км (рис. 7, 8) наблюдается перестройка скоростного строения переходной зоны верхней мантии при переходе к зоне раздела 1. Отмечается раздел мантии под УЩ на две части по скоростным характеристикам. На глубине 550 км к низкоскоростной части, объединенной со скоростными структурами мегаблока КМА и западной частью ДДВ, относятся Западный домен и западная часть Центрального домена. Высокоскоростная часть включает Восточный домен и восточную часть Центрального домена мантии под УЩ. На глубине 600—650 км высокими скоростями характеризуется Западный домен, низкими — Центральный и Восточный. Низкоскоростные домены на этих глубинах соответствуют скоростным характеристикам переходной зоны стабильной мантии под ВЕП.

На глубине 700—800 км (рис. 8, 9) происходит изменение окружающих УЩ скоростных структур мантии. Постепенно восстанавливается мантийная высокоскоростная область Сарматского сегмента ВЕП, объединяющая мантию под ВКМ с мантией под ДДВ и Центральным доменом УЩ. Повторяется деление на три скоростных домена, отмечаемое на уровне 50—200 км. При этом мантия под Центральным доменом УЩ со скоростными характеристиками объединена с западной частью мегаблока КМА ВКМ в отличие от глубин 50—200 км, где наблюдается объединение с восточной частью мегаблока КМА ВКМ. С глубины 750 км высокоскоростная область связана с мантией под западной частью Черного моря.

Таким образом, в мантии под УЩ и окружающими его регионами на глубине 50—800 км выделяются следующие основные скоростные области, на определенных глубинных уровнях различно соотносящиеся между собой:

- 50 км — мантия под всеми тремя доменами УЩ объединена с мантией под ДДВ и ВКМ;
- 100—400 км — Восточный скоростной домен мантии УЩ связан со скоростной областью мантии под восточной частью ДДВ и Хоперским мегаблоком ВКМ Сарматского сегмента ВЕП;
- 400—450 км — к югу от УЩ определена четкая граница между низкоскоростными характеристиками стабильной мантии под ВЕП и высокоскоростными активизированной мантии под Черным морем;
- 450—650 км — основные скоростные параметры мантии УЩ связаны со скоростными характеристиками его южного окружения (мантия под Черным морем);

- 700—800 км — в основном возобновляется связь мантии под Волго-Уралией с Сарматским сегментом ВЕП. Связующим звеном служит область ВЕП, распространяющаяся с северо-востока (мантия под Волго-Уралией) на юго-запад через Центральный домен УЩ и соединяющаяся с мантией под Черным морем. В отличие от глубины 50—250 км, соединение с мантией УЩ происходит со стороны западного мегаблока КМА ВКМ и западной части ДДВ.

Выводы. 1. Использование скоростных моделей коры, построенных по данным ГСЗ для территории УЩ, позволяет получить более достоверные сведения о скоростном строении коры и уточнить представления о верхней мантии этого региона.

2. Мантия под УЩ по скоростным характеристикам может быть разделена на три домена: Западный, Центральный и Восточный. К Западному относится Вольнский и Подольский мегаблоки, к Центральной — Росинский, Бугский и Ингульский мегаблоки, западная часть Среднеприднепровского мегаблока, ограниченная Дерезоватской системой разломов, к Восточному — восточная половина Среднеприднепровского и Приазовский мегаблоки. Такое деление сохраняется для верхней мантии (50—500 км) ее переходной зоны и восстанавливается на глубине 700—800 км зоны раздела I. Для интервала глубин 550—650 км по скоростным характеристикам мантия под УЩ делится на две части. На глубине 550 км объединены Западный и Центральный низкоскоростные до-

мены, Восточный домен — высокоскоростной, на глубине 600—650 км Центральный (без западной части) и Восточный домены — низкоскоростные, Западный домен и западная часть Центрального домена — высокоскоростные.

3. Указанное деление обосновывается связью на глубине 100—250 км мантии под Волго-Уралией со скоростными структурами Сарматского сегмента ВЕП (Хоперским мегаблоком ВКМ, восточной частью ДДВ и Восточным доменом УЩ).

4. На глубине 350—600 км основное влияние на деление мантии под УЩ оказывается со стороны скоростных структур мантии под Черным морем. Указанное деление подтверждается поведением пограничной области ВЕП на данных глубинах [Цветкова, Бугаенко, 2012].

5. На глубине 700—800 км возвращается связь скоростных структур Сарматского сегмента ВЕП, УЩ и западной части Черного моря.

6. Важно отметить, что на глубине зоны раздела 1 средней мантии полностью изменяется геометрия скоростных структур исследуемого региона. Если до глубины 650 км на горизонтальных сечениях сохраняется различие в скоростных характеристиках ВЕП и Альпийско-Гималайского пояса, на глубине 650—700 км четко проявляются скоростные особенности и субширотное северо-восточное простираение переходной зоны между ними, то в сечениях 700—800 км ярко проявляется юго-западно—северо-восточная ориентация мантийных структур, секущих ВЕП и Альпийско-Гималайский пояс.

Список литературы

- Бурахович Т. К., Николаев И. Ю., Шеремет Е. М., Ширков Б. И. Геоэлектрические аномалии Украинского щита и их связь с рудопроявлениями полезных ископаемых. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 6. С. 42—63.
- Гейко В. С., Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Региональная 3-D P-скоростная модель мантии Сарматии (юго-запад Восточно-Европейской платформы). *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 6. С. 927—939.
- Гейко В. С., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. Трехмерная модель верхней мантии Украины по временам прихода P-волн. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 1. С. 3—16.
- Гинтов О. Б. Полевая геофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.
- Гинтов О. Б., Пашкевич И. К. Тектонофизический анализ и геодинамическая интерпретация трехмерной модели Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 2. С. 3—27.
- Ентин В. А. Геофизическая основа Тектонической карты Украины масштаба 1:1 000 000. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 1. С. 74—84.
- Мухометов Р. Г. Задача обращения двумерной римановой метрики интегральная геометрия. *Докл. АН СССР.* 1977. Т. 32. С. 32—45.
- Пуцаровский Ю. М., Пуцаровский Д. Ю. Геология мантии Земли. Москва: Геос, 2010. 138 с.
- Соллогуб В. Б. Литосфера Украины. Киев: Наук. думка, 1986. 183 с.
- Трубицын В. П. Природа границы между верхней и нижней мантией и ее влияние на конвекцию. *Физика Земли.* 2010. Т. 19. № 6. С. 2—18.

- Хаин В. Е. Тектоника континентов и океанов. Москва: Научный мир, 2001. 606 с.
- Хаин В. Е., Ломигзе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. Москва: КДУ, 2005. 560 с.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В. Сейсмотомография мантии под Восточно-Европейской платформой: мантийные скоростные границы. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 5. С. 161—172.
- Шумлянская Л. А. Мантийные блоки и зоны повышенной проницаемости Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 2. С. 135—144.
- Шумлянская Л. А., Трипольский А. А., Цветкова Т. А. Влияние скоростной структуры коры на результаты сейсмической томографии Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 4. С. 95—117.
- Geyko V. S., 2004. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geofizicheskiy zhurnal* 26(1), 3—32.

Velocity divisibility of the mantle beneath the Ukrainian Shield

© Т. А. Tsvetkova, I. V. Bugaenko, L. N. Zaets, 2016

Within the limits of three-dimensional Taylor approximation P-velocity model of the mantle under the Ukrainian shield it has been shown that the mantle under it, according to its velocity characteristics, can be subdivided into 3 domains: the Western, the Central and the Eastern ones. The Volynian and Podolian mega-blocks belong to the Western domain, the Central domain includes the Ross, the Bug, the Ingul mega-blocks and the western part of the Middle-Dnieper mega-block limited by the Derezhovata fault system and the Eastern domain includes the eastern part of Middle-Dnieper mega-block and the Peri-Azovian mega-block. This division remains for the interval 50—500 km of the upper mantle, its transitional zone, and restores at the depths 700—800 km of the splitting zone 1. The mentioned division is substantiated by the connection at the depth of 100—250 km of the mantle under the Ukrainian Shield with velocity structures of the Sarmatian segment of East European Platform; at the depths of 350—600 km by the connection with velocity structures of the mantle under the Black Sea; at the depths of 700—800 km the connection of velocity structures of the Sarmatian segment of East European Platform and the western part of the Black Sea restores.

Key words: seismotomography, P-velocity model, the mantle, the Ukrainian shield.

References

- Burakhovich T. K., Nikolaev I. Yu., Sheremet E. M., Shirkov B. I., 2015. Geoelectric anomalies of the Ukrainian shield and their relation to mineral deposits. *Geofizicheskiy zhurnal* 37(6), 42—63 (in Russian).
- Geyko V. S., Tsvetkova T. A., Shumlyanskaya L. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N., 2005. Regional 3D P-velocity model of the mantle of Sarmatia (south-west of the East European Platform). *Geofizicheskiy zhurnal* 27(6), 927—939 (in Russian).
- Geyko V. S., Shumlyanskaya L. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N., Tsvetkova T. A., 2006. Three-dimensional model of the upper mantle of Ukraine at times P-wave. *Geofizicheskiy zhurnal* 28(1), 3—16 (in Russian).
- Gintov O. B., 2005. Field Tectonophysics and its Application in the Crustal Deformation Study of Ukraine. Kiev: Feniks, 572 p. (in Russian).
- Gintov O. B., Pashkevich I. K. 2010. Tectonophysical analysis and geodynamic interpretation of three-dimensional geophysical model of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal* 32(2), 3—27 (in Russian).
- Yentyn V. A. 2005. Geophysical base of the Tectonic map of Ukraine at the scale 1:1 000 000. *Geofizicheskiy zhurnal* 27(1), 74—84 (in Russian).
- Mukhametov R. G., 1977. Task of handing two-dimensional Riemannian metric integral geometry. *Doklady AN SSSR* 32, 32—45 (in Russian).
- Pushcharovskiy Yu. M., Pushcharovskiy D. Yu., 2010. Geology Earth's mantle. Moscow: Geos, 138 p. (in Russian).
- Sollogub V. B., 1986. Lithosphere of the Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 184 p. (in Russian).
- Trubitsin V. P., 2010. Nature border between the upper and lower mantle and its influence on convection. *Fizika Zemli* 19(6), 2—18 (in Russian).
- Khain V. E., 2001. Tectonics continents and oceans. Moscow: Nauchnyy Mir, 604 p. (in Russian).

- Khain V. E., Lomidze M. G.*, 2005. Geotectonics with the Fundamental of Geodynamics. Moscow: KDU, 560 p. (in Russian).
- Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V.*, 2012. Seismic tomography of mantle beneath the East European Platform: mantle velocity boundaries. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(5), 161—172 (in Russian).
- Shumlanskaya L. A.*, 2008. Mantle blocks and zones of increased permeability of the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy zhurnal* 30(2), 135—144.
- Shumlyanskaya L. A., Tripolskiy A. A., Tsvetkova T. A.*, 2014. Crustal velocity structure effects on the results of seismic tomography of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(4), 95—117 (in Russian).
- Geyko V. S.*, 2004. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geofizicheskiy zhurnal* 26(1), 3—32 (in Russian).