

Сейсмотомография мантии под Днепровско-Донецкой впадиной и ее окружением. Часть I

Т.А. Цветкова, И.В. Бугаенко, Л.Н. Заец, 2020

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 21 октября 2019 г.

У статті розглядається швидкісна будова мантиї під Дніпровсько-Донецької западиною (ДДЗ). Застосовано розв'язок, отриманий методом тейлорового наближення розв'язання тривимірної задачі сейсмічної томографії. Метод не залежить від референтної моделі і дає краще наближення нелінійності відносно класичного розв'язку. Отримана 3D *P*-швидкісна модель мантиї наведена у вигляді горизонтальних і вертикальних перерізів. Горизонтальні перерізи отримано з кроком 25 км у «справжніх швидкостях». Вертикальні перерізи, довготні і широтні, показано з кроком 1° у вигляді нев'язок швидкостей щодо узагальненої середньої швидкості під мантиєю Євразії та її оточенням. У праці наведено горизонтальні перетини. Показано, що ДДЗ пов'язана з розтягуванням земної кори і її підйомом. Останнє може бути пояснено субгоризонтальним поширенням високошвидкісного шару перехідної зони верхньої мантиї з боку Чорного моря в низькошвидкісний шар перехідної зони верхньої мантиї Сарматії. Аналіз розподілу швидкостей за горизонтальними перерізами мантиї під ДДЗ і її оточенням дає змогу виділити розшарування верхньої мантиї та її перехідної зони. Розшарування визначається характерними швидкісними зонами для даної глибини, що обмежені як нульовими ізолініями швидкостей, так і згущенням ізоліній. Усього виділено 5 зон на глибинах: 50—250 км, 300—400 км, 450—550 км, 600—650 км, 650—800 км. На глибинах 300—400 км зона об'єднує Курсько-Белгородський блок Курського мегаблоку Воронежського кристалічного масиву, Чернігівський і Лохвицький сегменти ДДЗ, Інгульський і Придніпровський мегаблоки Українського щита і, ймовірно, є частиною Сарматського щита, пов'язаного з мантиєю під Волго-Уралією, можливої частиною Сарматсько-Уральського макроконтиненту. Виділяються напрямки поширення швидкісних структур, пов'язаних з мантиєю під ДДЗ: південь—північний схід, південь—північний захід, північ—південь, схід—захід. У більш загальному уявленні це північний схід—південний захід, південь—північ, схід—захід.

Ключові слова: тривимірна *P*-швидкісна модель, мантия, Дніпровсько-Донецька западина, горизонтальні перерізи, швидкісні зони.

Введение. Изучению скоростного строения коры, и не только, Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ) Восточно-Европейского кратона (ВЕК) посвящено большое количество работ. Отметим работы С.И. Субботина, А.В. Чекунова [Субботин, 1979; Чекунов, 1972]. Детальный обзор можно найти в работах [Стовба, 2008], А.Е. Лукина и В.М. Шестопалова [Лукин, Шестопалов, 2018; Шестопалов и др., 2018],

[Старостенко и др., 2015, 2017а—в]. Выделяются работы, представляющие исследование геофизических полей (скоростных, гравитационных, магнитных, тепловых и т.д.) областей, связанных с нефтегазовыми месторождениями ДДВ, например [Старостенко и др., 2015], последние работы А.Е. Лукина и В.М. Шестопалова [Лукин, Шестопалов, 2018; Шестопалов и др., 2018]. В то же время, несмотря на нерешенные

проблемы генезиса углеводородов, редко встретишь работы, посвященные скоростному строению мантии под этими регионами, что дало бы возможность более четко определиться с вопросами глубинного происхождения месторождений углеводородов, формирования и развития ДДВ и не только. Настоящая статья посвящена скоростному строению мантии под ДДВ и ее окружением. Использована 3D *P*-скоростная модель мантии Евразии, полученная согласно методу тейлорового приближения, предложенного В.С. Гейко [Гейко, 1997]. Учитывая, что разрешающая способность решения обратной многомерной линеаризированной кинематической задачи сейсмологии определяется использованной системой наблюдений [Мухаметов, 1977], приведем карту плотности использованной системы наблюдений для территории Европы (рис. 1). Как исходные привлечены данные, представленные в бюллетенях ISC за 1964—2006 гг. Отметим, что, начиная с 2006 г., изменилась обработка данных ISC, в то время как система наблюдений мировой сети данных на территории Восточно-Европейской платформы практически осталась прежней. Точность полученных результатов в пределах этой системы наблюдений определяется точностью обращения годографов-сечений обобщенного поля времен. Как пример на рис. 2 показаны соотношения наблюдаемого и расчетного годографов (точность не превышает 0,015 км/с). Следует отметить,

что использованный метод не зависит от начального приближения (референтной модели) и дает лучшее приближение нелинейности [Гейко и др., 2005].

ДДВ сформировалась в пределах ВЕК, трехсегментное строение которого предложено в работе С. В. Богдановой [Shcipansky, Bogdanova, 1996]. На рис. 3, *а* приведена схема строения ВЕК, на рис. 3, *б* показано деление консолидированной коры ДДВ на четыре сегмента [Старостенко и др., 2015, 2017в]: Черниговский, Лохвицкий, Изюмский и Донбасский. В целом, ДДВ относится к Сарматскому сегменту ВЕК.

Как показали ранее наши исследования [Гейко и др., 2005], мантия под Сарматией характеризуется скоростной неоднородностью по латерали и вертикали. ДДВ полностью входит в состав Сарматии, при этом она заложена на неоднородной консолидированной земной коре ВЕК Украинского щита (УЩ) и Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и их склонов, разделенных дорифейской шовной зоной [Старостенко и др., 2017а]. Скоростная неоднородность мантии ДДВ и окружающих регионов в виде трехмерной *P*-скоростной модели позволяет обнаружить их связь с неоднородностью консолидированной коры и формированием Днепровско-Донецкого рифта, а затем и впадины.

Полученная 3D *P*-скоростная модель мантии представляется в виде горизонтальных и вертикальных сечений. Горизонтальные сечения представлены с шагом 25

Рис. 3. Схема трехсегментного строения ВЕК, по [Shcipansky, Bogdanova et al., 1996] (*а*): А — Фенноскандия, Б — Сарматия, В — Волго-Уралия. Сегменты консолидированной коры ДДВ [Старостенко и др., 2017в] (*б*): 1 — граница ДДВ; 2 — границы главных сегментов впадины; девонский рифт: 3 — ось; 4 — границы центрального рифта; 5 — трансрегиональные тектонические швы: Х-См — Херсон—Смоленск, Д-Бр — Донецк—Брянск; 6 — разрезы литосферы (А, В, С, D), рассчитанные (1—4); 7 — изолинии глубины залегания раздела Мохо (км); 8 — государственные границы. Главные сегменты в пределах ДДВ: Чн — Черниговский; Лх — Лохвицкий; Из — Изюмский; Дб — Донбасский.

→

Fig. 3. Scheme of the three-segment structure of the East European Craton, according to [Shcipansky, Bogdanova et al., 1996] (*a*): A — Fennoscandia, B — Sarmatia, B — Volgo-Ural. Segments of the consolidated crust of the DDD [Starostenko et al., 2017c] (*b*): 1 — the border of the DDV; 2 — the boundaries of the main segments of the depression; Devonian rift: 3 — axis; 4 — boundaries of the central rift; 5 — transregional tectonic seams: Kh-Sm — Kherson—Smolensk, D-Br — Donetsk—Bryansk; 6 — sections of the lithosphere (A, B, C, D), calculated (1—4); 7 — contour lines of the depth of the Moho section (km); 8 — state borders. The main segments within the DDD are: Ch — Chernihiv; Lh — Lkhvitsky; Iz — Izyum; Db — Donbass.

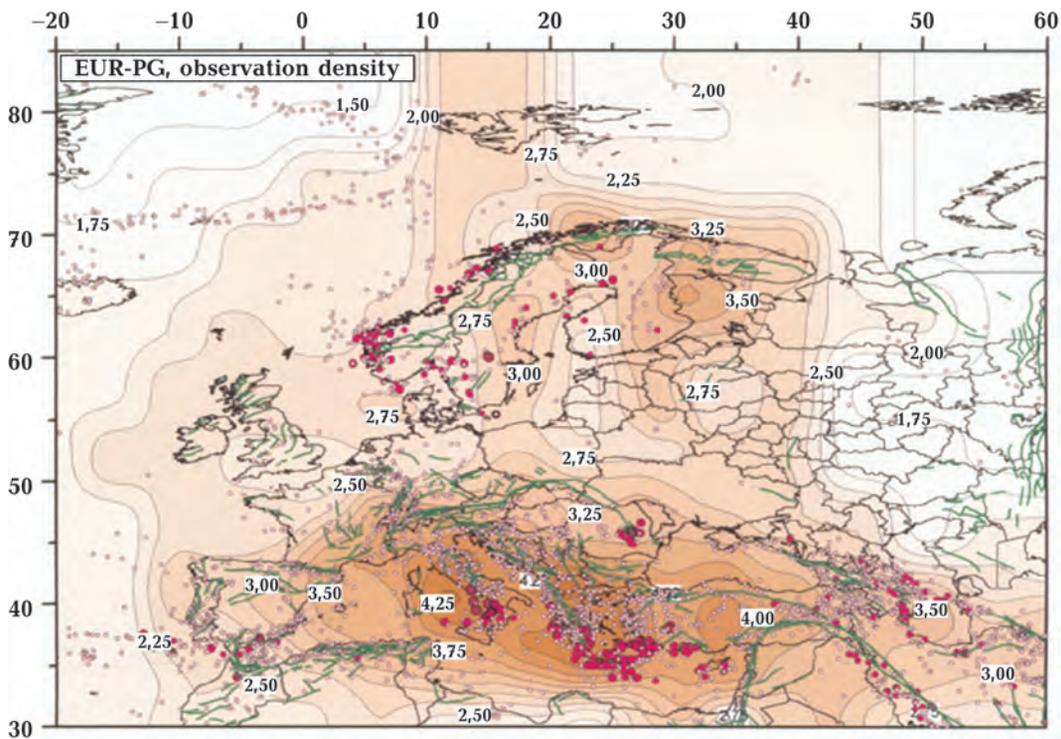


Рис. 1. Плотность наблюдений ($d = \log(100N/S)$, где N — количество лучей, вершины которых расположены под областью с площадью S на поверхности мантии, измеренной в единицах градус на градус.

Fig. 1. Density of observations ($d = \log(100 N/S)$, where N is the number of rays whose vertices are located under a region with area S on the mantle surface, measured in units of degrees per degree.

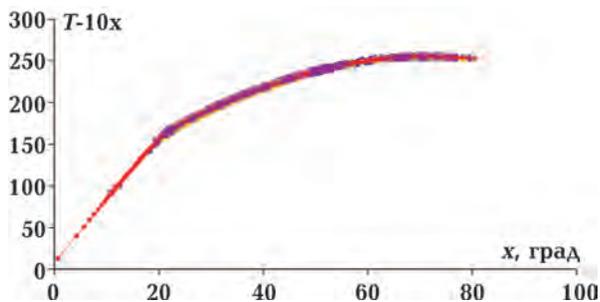
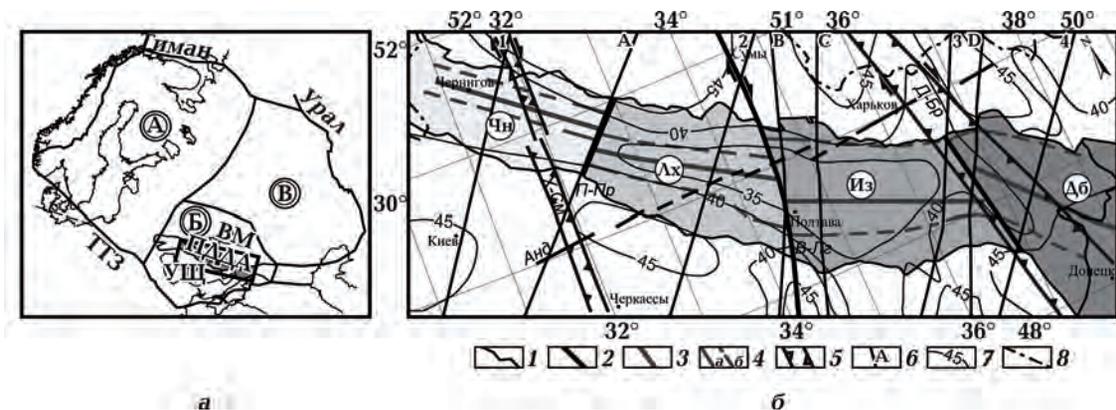


Рис. 2. Соотношение расчетного (красный цвет) и теоретического годографов в области ДДВ (Лохвицкий сегмент, по [Старостенко и др., 2015]).

Fig. 2. The ratio of the calculated (red color) and theoretical hodographs in the field of Dnieper-Donets Depression (Lokhvitsky segment, according to [Starostenko et al., 2015]).



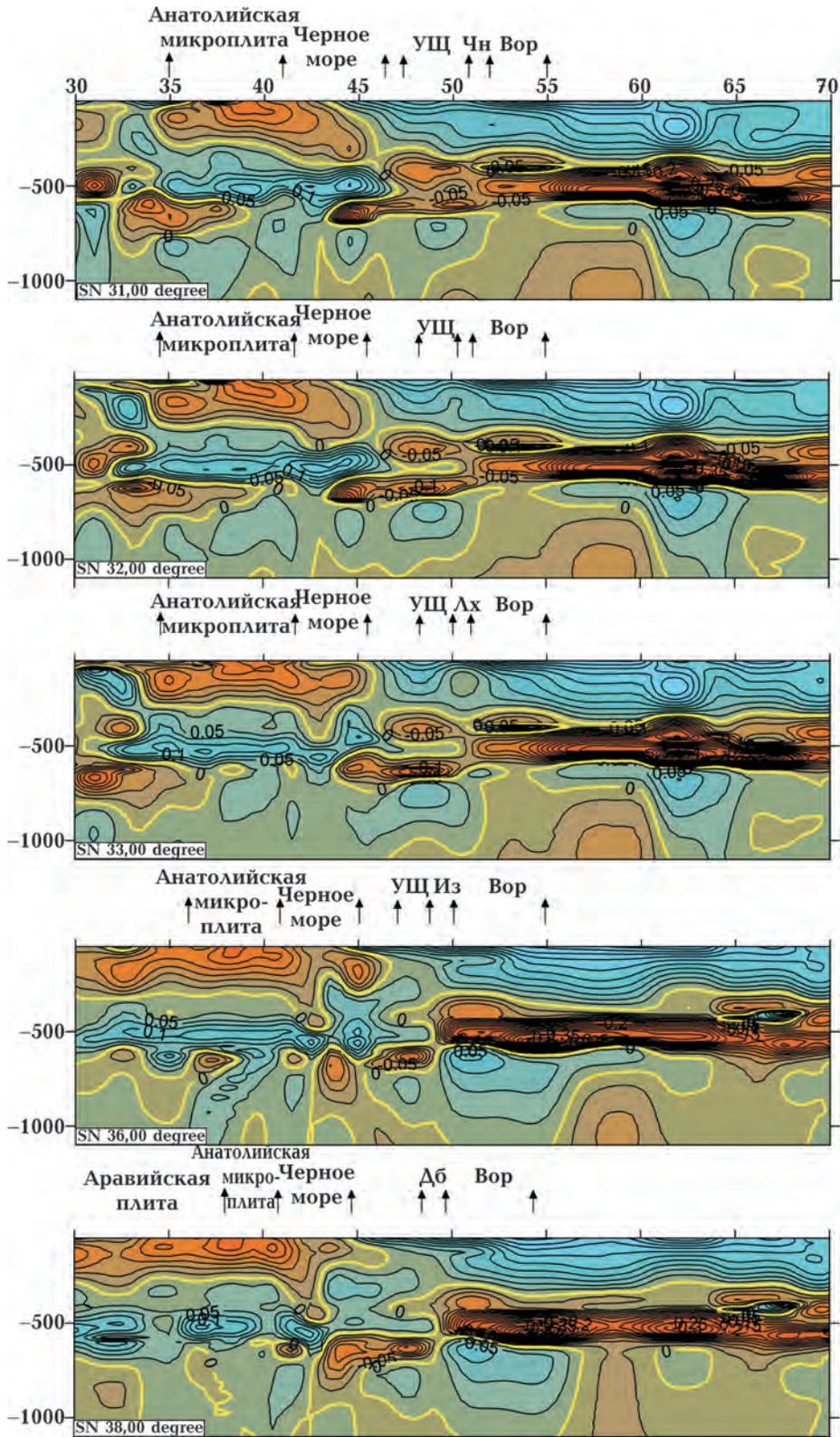


Рис. 4. Долготные вертикальные сечения трехмерной P -скоростной модели верхней мантии до глубины 1100 км по 31, 32, 33, 36 и 38° в. д., которые проходят через Черниговский, Лохвицкий, Изюмский и Донбасский сегменты ДДВ соответственно: Вор — Воронежский кристаллический массив, Дб — Донбасский сегмент ДДВ, Из — Изюмский сегмент ДДВ, Лх — Лохвицкий сегмент ДДВ, УЩ — Украинский щит, Чн — Черниговский сегмент ДДВ.

км в «истинных скоростях». Вертикальные сечения, долготные и широтные, показаны с шагом 1° в виде невязок скоростей относительно обобщенной средней скорости под мантией Евразии и ее окружением [Гейко, 1997]. Скоростное строение Сарматии на глубинах 50—850 км представлено в работе [Гейко и др., 2005]. В настоящей статье нас будет интересовать проявление основных направлений распространения мантийных скоростных структур регионов, окружающих ДДВ, а иногда и ВЕП в целом, связанных с мантией под ДДВ. Последующая часть будет посвящена плюмовым и флюидным процессам в данном регионе и его окружении.

Мантийная пограничная зона ВЕК и мантия под ДДВ. Мантия под УЩ по скоростным характеристикам может быть разделена на три части: к Западному домену относится Волыно-Подольский мегаблок УЩ, к Центральному домену — Росинско-Бугский, Ингульский мегаблоки и западная часть Среднеприднестровского мегаблока, ограниченная Дерезоватской системой разломов, к Восточному — восточная часть Среднеприднепровского и Приазовского мегаблоков [Цветкова, Бугаенко, 2012]. На рис. 3, б представлена сегментация ДДВ. Выделены Черниговский, Лохвицкий, Изюмский, Донбасский сегменты. При этом Черниговский сегмент граничит с Росинско-Бугским мегаблоком и западной окраиной Ингульского мегаблока, Лохвицкий сегмент граничит с Ингульским мегаблоком, Изюмский сегмент — со Среднеприднепровским и западной частью Приазовского мегаблоков, Донбасский — с Приазовским мегаблоком.

В работе [Цветкова, Бугаенко, 2012] были детально проанализированы мантийные скоростные границы пограничной части ВЕК. Следует отметить, что верхняя

мантия докембрийской ВЕК является высокоскоростной, переходная зона верхней мантии — низкоскоростной. Верхняя мантия и переходная зона южного окружения ВЕК обладает инверсными, по отношению к ней, скоростными характеристиками. На рис. 4 представлены вертикальные долготные сечения трехмерной P -скоростной модели мантии под ВЕК, секущие Черниговский, Лохвицкий, Изюмский и Донбасский сегменты ДДВ. На указанных сечениях видно, что высокоскоростная переходная зона верхней мантии на глубинах ~ 300 —600 км, соответствующая структурам мантии под южным окружением ВЕК (мантия под Черным морем), распространяется на север в низкоскоростную переходную зону верхней мантии под ВЕК. Северная граница данного внедрения в переходной зоне соответствует мантии под ДДВ. В западной части ДДВ максимальному распространению соответствует мантия под тектоническим швом Херсон—Смоленск, который проходит по долготному сечению 32° в. д. на рис. 4, на востоке — мантия под Донбасским сегментом ДДВ, примыкающая к Лосевской шовной зоне Воронежского кристаллического массива (рис. 5). Как результат внедрения формируется скоростная вилка (раздвоение низкоскоростной переходной зоны верхней мантии Сарматии), что приводит к увеличению мощности этой зоны под южной частью ВКМ.

Согласно рис. 4, 5, резкое внедрение высокоскоростной переходной зоны верхней мантии южного окружения ВЕК начинается со стороны северо-западного побережья Черного моря и простирается на север вдоль западной части Ингульского мегаблока до границы между Черниговским и Лохвицким сегментами ДДВ, что соответствует положению тектонического

←

Fig. 4. Long-term vertical sections of the three-dimensional P -velocity model of the upper mantle to a depth of 1100 km at 31, 32, 33, 36, and 38° EL, that pass through the Chernihiv, Lohvitsky, Izyum and Donbass segments of the DDD, respectively: Vor — the Voronezh crystalline massif, Db — the Donbass segment of the DDD, Iz — the Izyum segment of the DDD, Lh — the Lohvitsky segment of the DDD, USh — the Ukrainian Shield, Ch — the Chernigov segment of the DDD.

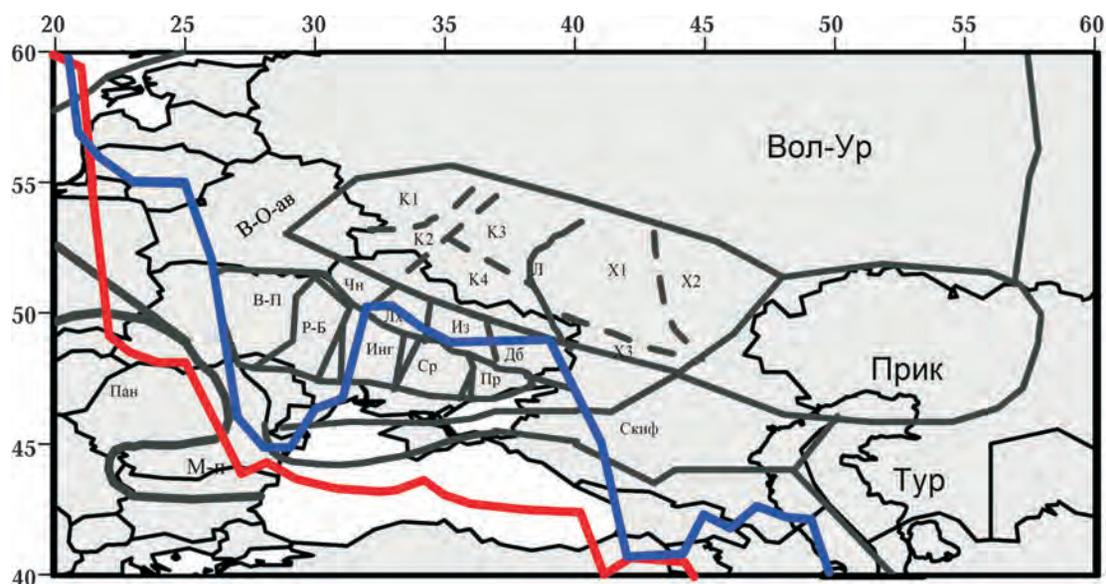


Рис. 5. Границы распространения переходной зоны верхней мантии: синий цвет — граница максимального северо-восточного распространения высокоскоростной переходной зоны верхней мантии юго-западного окружения ВЕК, красный цвет — граница максимального юго-западного распространения низкоскоростной переходной зоны верхней мантии ВЕК: В-П — Вольно-Подольский мегаблок Украинского щита, В-О-ав — Вольно-Оршанский авлакоген, Вол-Ур — Волго-Уралия, Дб — Донбасский сегмент ДДВ, Из — Изюмский сегмент ДДВ, Инг — Ингульский мегаблок Украинского щита, к1 — Красногорско-Рославльский блок Курского мегаблока Воронежского кристаллического массива, к2 — Брянский блок, к3 — Ливенско-Ефременский блок, к4 — Курско-Белгородский блок, Л — Лосевская шовная зона, Лх — Лохвицкий сегмент ДДВ, М-п — Мизийская плита, Пан — Паннонская впадина, Пр — Приазовский мегаблок Украинского щита, Р-Б — Росинско-Бугский мегаблок Украинского щита, Скиф — Скифская плита, Ср — Среднеприднепровский мегаблок Украинского щита, Тур — Туранская плита, Чн — Черниговский сегмент ДДВ, х1 — Калач-Эртильский вулканический пояс Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива, х2 — Камышинский блок Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива, х3 — Варваринский блок Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива.

Fig. 5. Distribution boundaries of the transition zone of the upper mantle: blue — the boundary of the maximum northeast distribution of the high-speed transition zone of the upper mantle of the southwestern environment of the East European Craton, red — the boundary of the maximum southwest distribution of the low-speed transition zone of the upper mantle of the East European Craton: V-P — Volyn-Podolsk megablock of the Ukrainian Shield, V-O-av — Volyn-Orshansky avlacogen, Vol-Ur — Volgo-Uralia, Db — Donbass segment of the DDD, Iz — Izyum segment of the DDD, Ing — Ingul megablock of the Ukrainian Shield, k1 — Krasnogorsk-Roslavl block of the Kurs megablock of the Voronezh crystalline massif, k2 — Bryansk block, k3 — Livensk-Efremen block, k4 — Kursk-Belgorod block, L — Losev suture zone, Lh — Lohvitsky segment DDD, M-p — Mizian plate, Pan — Pannonian Depression, Pr — Priazovsky megablock of the Ukrainian Shield, R-B — Rosinsko-Bug megablock of the Ukrainian Shield, Scythian — Scythian Plate, Wed — Srednepridneprovsky megablock of the Ukrainian Shield, Tur — Turan Plate, Ch — Chernigov segment of DDD, x1 — Kalach-Ertil volcanic belt of the Khopersky megablock of the Voronezh crystalline massif, x2 — Kamyshinsky block of the Khopersky megablock of the Voronezh crystalline massif, x3 — Varvarinsky block of the Khopersky megablock of the Voronezh crystalline massif.

шва Херсон—Смоленск (в районе 32° в. д.). Далее граница распространения высокоскоростного слоя проходит на восток через Лохвицкий сегмент и на юго-восток к южной части Изюмского сегмента (35° в. д.) и далее на восток пересекает Донбасский

сегмент (до 39° в. д.), затем на юг уже до восточного побережья Черного моря.

Согласно мнению А.В. Чекунова [Чекунов, 1972] и результатам моделирования [Гейко и др., 2013; Старостенко и др., 2015], ДДВ может быть связана с растяжением

земной коры и ее подъемом. Последнее может быть обусловлено субгоризонтальным распространением описанного выше высокоскоростного слоя переходной зоны верхней мантии со стороны Черного моря (см. рис. 4) в низкоскоростной слой переходной зоны верхней мантии Сарматии.

Горизонтальные сечения мантии под ДДВ и ее окружением. Анализ распределения скоростей в горизонтальных сечениях мантии под ДДВ и ее окружением (рис. 6—10) позволяет выделить расслоенность верхней мантии и ее переходной зоны. Расслоенность определяется характерными скоростными аномалиями для данной глубины, ограниченных как нулевыми изолиниями скоростей (которые выделены желтым цветом и соответствуют обобщенной средней скорости для мантии под Евразией (таблица)), так и сгущением изолиний (представлены синим цветом). Всего выделяется пять подобластей.

Подобласть 1. Общей характеристикой верхней мантии под всей ВЕК являются повышенные скорости (см. рис. 7—9) относительно обобщенной средней скорости на глубинах 50—300 км с постепен-

ным переходом к пониженным скоростям переходной зоны в интервале 350—600 км [Гейко и др., 2005]. На глубинах 50—250 км выделяется высокоскоростная подобласть 1. Ей соответствуют обобщенные средние скорости (7,93 км/с на 50 км, 8,08 км/с на 100 км, 8,19 км/с на 150 км, 8,3 км/с на 200 км, 8,4 км/с на 250 км, выделенные желтым цветом) и изолинии скорости 8,075 км/с на 50 км, 8,175 км/с на 100 км, 8,25 км/с на 150 км, 8,35 км/с на 200 км, 8,475 км/с на 250 км, выделенные синим цветом. Она объединяет мантию под юго-восточной частью Сарматии (которая включает УЩ, ДДВ и ВМ), Волго-Уралией, Прикаспийской впадиной и Туранской плитой. В данную область входит и мантия под ДДВ. При этом Лохвицкий, Изюмский и Донбасский сегменты ДДВ характеризуются более низкими скоростями относительно более высокоскоростного Черниговского сегмента. Более низкоскоростные аномалии на высокоскоростном фоне выделяются на глубине 50—200 км под Лохвицким сегментом ДДВ, а на глубине 250 км — под Изюмским и Донбасским сегментом ДДВ. На глубинах 50—150 км подобласть 1 рас-

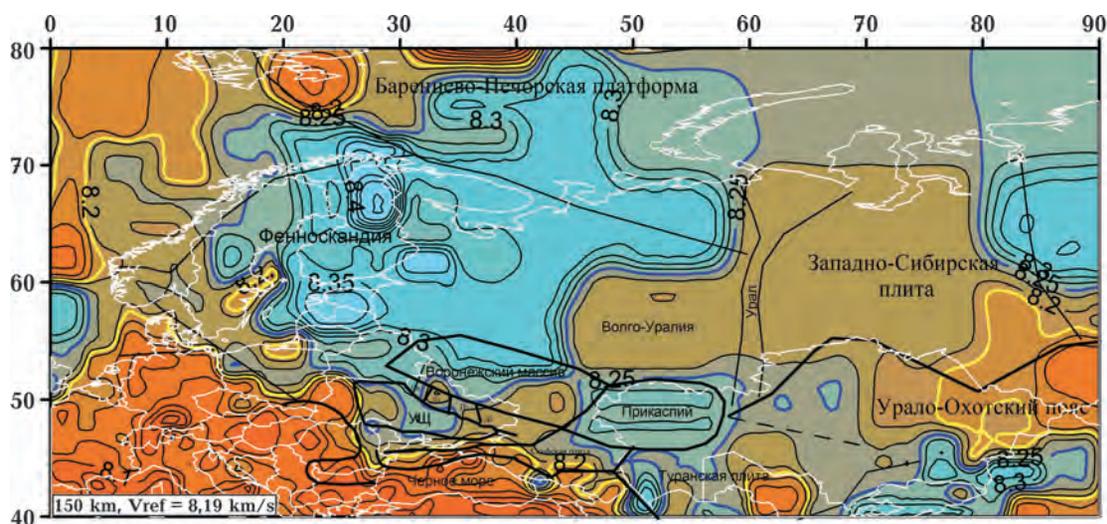


Рис. 6. Горизонтальное сечение 150 км трехмерной P -скоростной модели мантии в пределах $0\text{--}90^\circ$ в. д., $40\text{--}80^\circ$ с. ш. Желтым цветом выделена референтная скорость для данной глубины, синим — изолиния 8,25 км/с.

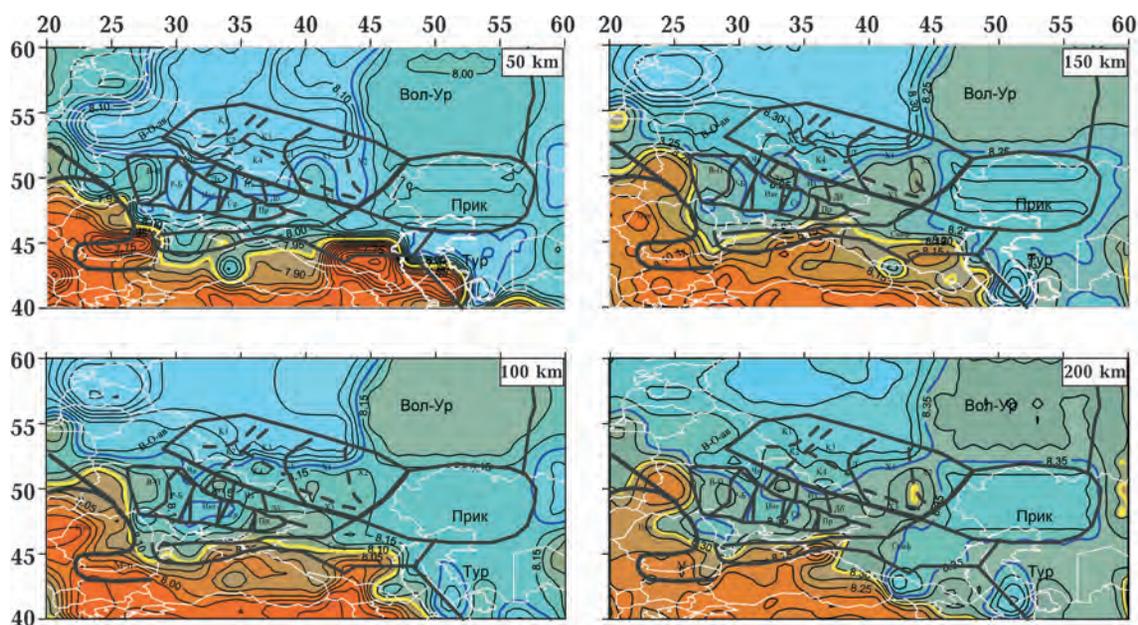
Fig. 6. Horizontal section of 150 km of the three-dimensional P -velocity model of the mantle within $0\text{--}90^\circ$ EL, $40\text{--}80^\circ$ NL. The reference speed is highlighted in yellow, and the isoline of 8,25 km/s in blue.

Обобщенная средняя скорость

Глубина, км	$V_{ср}$	Глубина, км	$V_{ср}$
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

пространяется на северо-восток, включая Западно-Сибирскую плиту и выходя на Урало-Охотский пояс (см. рис. 6). На глубине ниже 150 км подобласть 1 ограничена Уралом, прослеживается до восточной границы ВЕК.

Подобласть 2. На глубинах 300—400 км (см. рис. 8) на фоне высоких скоростей подобласти 1 формируется низкоскоростная переходная зона верхней мантии. На глубине 300 км выделяется низкоскоростная аномалия Курско-Белгородского блока Курского мегаблока ВКМ. На глубине 350 км низкоскоростная подобласть включает в себя практически весь Курский мегаблок ВКМ, Лохвицкий и Изюмский сегменты ДДВ, Ингульский мегаблок и западную часть Среднеприднепровского мегаблока УЩ, доходящую до Дерезоватской зоны разломов. На глубине 400 км сохраняется связь между УЩ и ВКМ. Низкоскоростная часть подобласти 2 включает Ингульский, Среднеприднепровский и Приазовский мегаблоки УЩ, Черниговский, Лохвицкий и Изюмский сегменты ДДВ, Курско-Белгородский и Ливенско-Ефремовский блоки Курского мегаблока ВКМ. Сравнение выделенной подобласти с реконструкциями Сарматского щита [Хаин, 2001] позволяют предположить, что подобласть 2



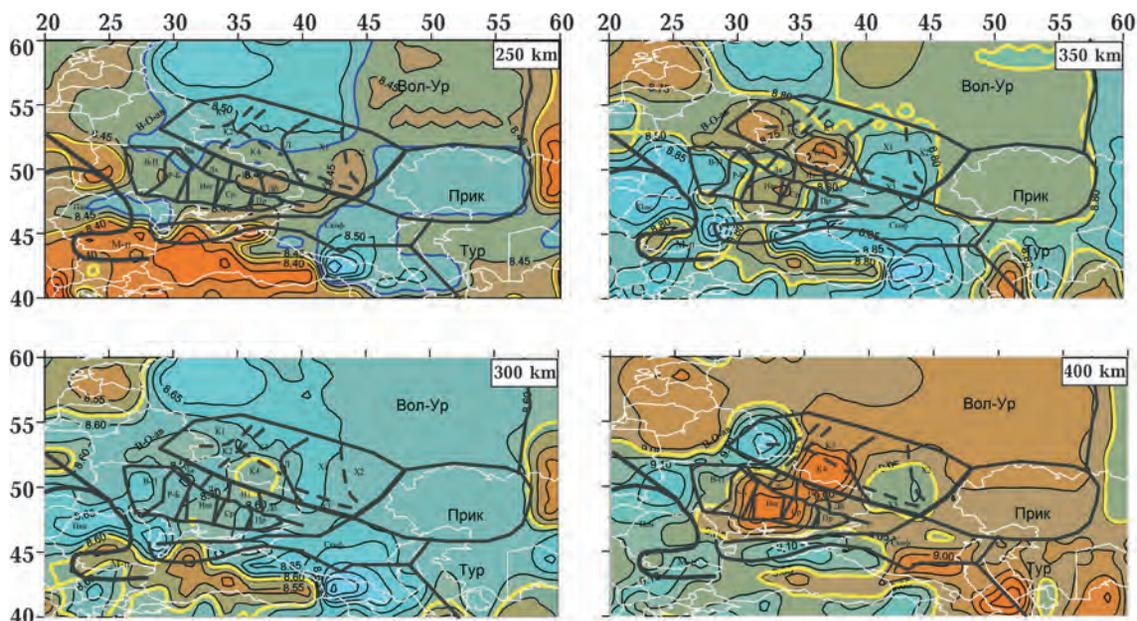


Рис. 8. Горизонтальные сечения 250, 300, 350 и 400 км трехмерной P -скоростной модели мантии исследуемой территории. Желтым цветом выделена референтная скорость для данной глубины. Условные обозначения те же, что и на рис. 5.

Fig. 8. Horizontal sections of 250, 300, 350 and 400 km of the three-dimensional P -velocity model of the mantle of the study area. The reference speed for a given depth is highlighted in yellow. The legend is the same as in Fig. 5.

представляет следы бывшего Сарматского щита, как палеоструктуры, объединявшей в одно целое Украинский щит и Воронежский кристаллический массив.

В подобласти 2 наблюдается низкоскоростная пространственная конфигурация юго-запад — северо-восточного направления. В подобласти 1 присутствовало такое же направление, но только высокоскоростных областей.

Низкоскоростная переходная зона на глубине 350 км сменяется высокоскоростной мантией под Хоперским мегаблоком, восточной частью ДДВ, начиная от мантии под Донбассом, и далее под Скифско-Туранской плитой. На западе от ДДВ высокие скорости характеризуют Вольно-Ор-

шанский авлакоген и западную часть УЩ (Вольно-Подольский и Росинско-Тикичский мегаблоки). На глубине 400 км высокими скоростями характеризуется мантия под Вольно-Оршанским авлакогеном и западной частью Курского мегаблока ВКМ. На указанной глубине высокие скорости характеризуют мантию также под северо-восточным Черноморским шельфом, доходя вплоть до южного ограничения Приазовского мегаблока, и под Хоперским мегаблоком.

Подобласть 3. Данная подобласть выделяется на глубинах 450 — 550 км (см. рис. 9). На этих сечениях переходная зона верхней мантии является низкоскоростной, но осложнена присутствием южной

←

Рис. 7. Горизонтальные сечения 50, 100, 150 и 200 км трехмерной P -скоростной модели мантии исследуемой территории. Желтым цветом выделена референтная скорость для данной глубины. Условные обозначения те же, что и на рис. 5.

Fig. 7. Horizontal sections of 50, 100, 150 and 200 km of the three-dimensional P -velocity model of the mantle of the study area. The reference speed for a given depth is highlighted in yellow. The legend is the same as in Fig. 5.

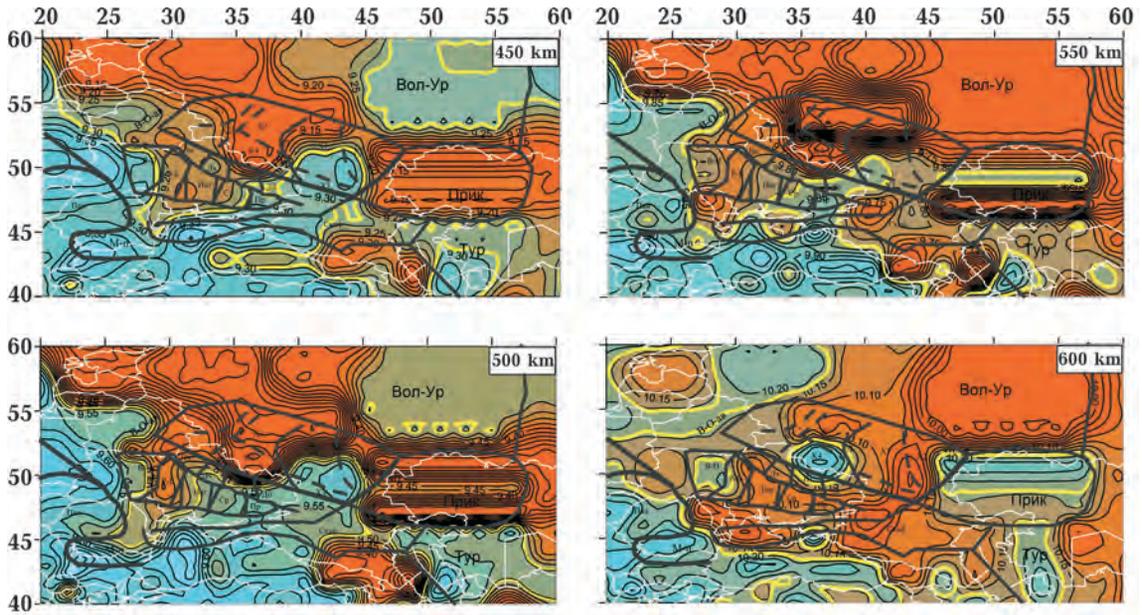


Рис. 9. Горизонтальные сечения 450, 500, 550 и 600 км трехмерной P -скоростной модели мантии исследуемой территории. Желтым цветом выделена референтная скорость для данной глубины. Условные обозначения те же, что и на рис. 5.

Fig. 9. Horizontal sections of 450, 500, 550 and 600 km of the three-dimensional P -velocity model of the mantle of the study area. The reference speed for a given depth is highlighted in yellow. The legend is the same as in Fig. 5.

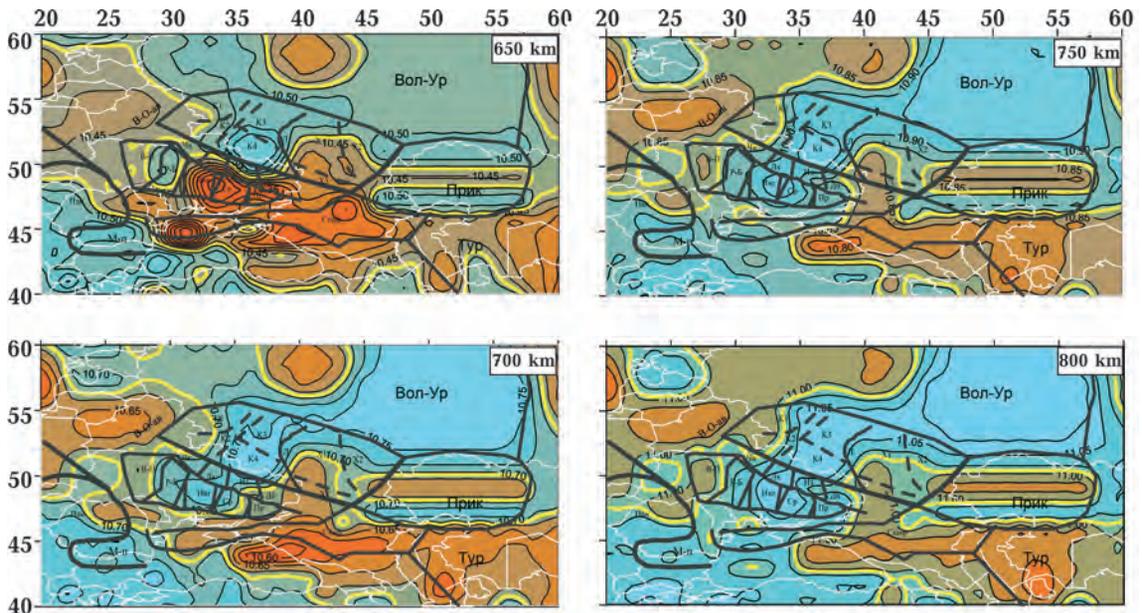


Рис. 10. Горизонтальные сечения 650, 700, 750 и 800 км трехмерной P -скоростной модели мантии исследуемой территории. Желтым цветом выделена референтная скорость для данной глубины. Условные обозначения те же, что и на рис. 5.

Fig. 10. Horizontal sections of 650, 700, 750 and 800 km of the three-dimensional P -velocity model of the mantle of the study area. The reference speed for a given depth is highlighted in yellow. The legend is the same as in Fig. 5.

высокоскоростной области, связанной с распространением в северо-восточном направлении высокоскоростной переходной зоны верхней мантии со стороны Черного моря и Анатолийской микроплиты.

На глубине 450 км высокими скоростями характеризуется мантия Приазовского мегаблока УЩ, восточная часть Изюмского сегмента и Донбасский сегмент ДДВ, а также Варваринский блок и южная часть Калач-Эртильского вулканического пояса Хоперского мегаблока ВКМ. На глубине 500 км как высокоскоростная мантия определена под Среднеприднепровским и восточной частью Ингульского мегаблоков УЩ и южной частью Лохвицкого и Изюмского сегментов ДДВ. На глубине 550 км высокоскоростная мантия фиксируется под Приазовским и Среднеприднепровским мегаблоками УЩ, юго-восточной частью Донбасского сегмента ДДВ и восточным окончанием Варваринского блока Хоперского мегаблока ВКМ. Сохраняется общее направление структур мантии под ДДВ как юго-запада — северо-восток.

Подобласть 4. Данная подобласть выделяется на глубине 600—650 км (см. рис. 9—10). Она является низкоскоростной, за исключением аномалии на глубинах 600—650 км. Данная аномалия была высокоскоростной на глубине 300 км, включая мантию под Курско-Белгородским блоком Курского мегаблока ВКМ и север Изюмского сегмента ДДВ.

На глубине 650 км высокоскоростная подобласть под ВКМ расширяется на северную часть Изюмского, Лохвицкого и значительную часть Черниговского сегментов ДДВ и далее на юго-запад до восточной части Вольно-Подольского и западной части Росинско-Бугского мегаблоков УЩ.

Подобласть 5 выделяется на глубинах 700—800 км (см. рис. 10). На глубине 700 км продолжается расширение на юго-запад указанной высокоскоростной подобласти. Высокоскоростной является мантия под центральной частью ВКМ, Черниговским, Лохвицким, Изюмским сегментами ДДВ, УЩ (за исключением восточной части Вольно-Подольского и полностью Приазовского

мегаблоков УЩ). На глубине 750 и 800 км высокоскоростная подобласть отмечается под всеми сегментами ДДВ, низкоскоростным остается Вольно-Подольский мегаблок УЩ. Высокоскоростная область распространяется в юго-западном направлении в сторону мантии под Западно-Черноморской впадиной и Мизийской плитой.

Исходя из полученных горизонтальных сечений на глубинах зоны раздела I (650—800) км, следует отметить связь высокоскоростной мантии под ДДВ с мантией под Волго-Уралией, возможной частью Сарматско-Уральского макроконтинента [Bogdanova et al., 2013].

Выводы. Из представленной трехмерной *P*-скоростной модели мантии следует повышенная расслоенность мантии под ДДВ и ее окружением и связь мантии под ДДВ с мантийными структурами под Черным морем. Выделяется пять подобластей на разных глубинах:

1) на глубинах 50—250 км мантия под ДДВ характеризуется повышенными скоростями, как и основная часть мантии под ВЕК;

2) на глубинах 300—400 км выделяется подобласть, объединяющая Курско-Белгородский блок Курского мегаблока Воронежского кристаллического массива, Черниговский и Лохвицкий сегменты ДДВ, Ингульский и Приднепровский мегаблоки УЩ с мантией под Волго-Уралией, что предположительно является следами Сарматского щита, как возможной частью Сарматско-Уральского макроконтинента;

3) на глубинах 450—550 км проявляются высокоскоростные структуры мантии под Черным морем, распространяющиеся как пограничные для западной и восточной оконечностей мантии под УЩ и ДДВ. В мантии под ДДВ более низкоскоростной либо низкоскоростной остается центральная часть. Повышенными скоростями характеризуются западная и восточная части;

4) глубины 600—650 км характеризуются связью высокоскоростной мантии под центральной и западной частью ДДВ с вы-

сокоскоростной частью мантии ВЕК, прежде всего под Волго-Уралией. Восточная часть ДДВ характеризуется пониженными скоростями и связью с мантией под Прикаспием. Связь мантии под ДДВ с мантией под Прикаспием отмечается на всей рассматриваемой глубине, в основном со стороны мантии Хоперского мегаблока ВКМ;

5) на глубинах 650—800 км низкоскоростная мантия под ДДВ связана с высокоскоростной мантией под Волго-Уралией. Со стороны мантии под Черным морем последнее может быть обусловлено субгоризонтальным распространением описанного высокоскоростного слоя переходной мантии под Черным морем в низкоскоростную переходную зону верхней мантии Сарматии. С глубиной происходит расши-

рение на запад с высокоскоростной мантии под ДДВ с выходом на мантию под Западно-Черноморской впадиной через мантию под УЩ, начиная с Росинско-Тикичского и Волыно-Подольского мегаблоков на глубине 650 км и заканчивая мантией под всем УЩ за исключением Волыно-Подольского мегаблока на глубине 800 км.

Отсюда выделяются основные направления распространения скоростных структур, связанных с мантией под ДДВ: северо-восток—юго-запад, юг—север, восток—запад.

В то же время отмечается распространение высокоскоростной переходной зоны верхней мантии с юга (со стороны Черного моря) в переходную зону верхней мантии Сарматии.

Список литературы

- Гейко В.С. Тейлорово приближение волнового уравнения и уравнения эйконала в обратных сейсмических задачах. *Геофиз. журн.* 1997. Т.19. № 3. С. 48—68.
- Гейко В.С., Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Региональная 3D P-скоростная модель мантии Сарматии (юго-запад Восточно-Европейской платформы). *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 6. С. 927—939.
- Гейко Т.С., Лукин А.Е., Омельченко В.В., Цюха О.Г. Тектонико-геологические критерии нефтегазоносности кристаллического фундамента северного борта Днепровско-Донецкого авлакогена. *Геолог. журн.* 2013. № 4. С. 7—23. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2013.4.139306>.
- Лукин А.Е., Шестопапов В.М. О новой геологической парадигме к задачам региональных геолого-геофизических исследований. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 4. С. 3—72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140610>.
- Мухаметов Р.Г. Задача обращения двумерной римановой метрики интегральная геометрия. *Докл. АН СССР.* 1977. Т. 232. С. 32—45.
- Старостенко В.И., Русаков О.М., Пашкевич И.К., Кутас Р.И., Орлюк М.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Максимчук П.Я., Козленко Ю.В., Козленко М.В., Легостаева О.В., Лебедь Т.В., Савченко А.С. Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Галактика, 2015. 211 с.
- Старостенко В.И., Пашкевич И.К., Макаренко И.Б., Куприенко П.Я., Савченко А.С. Геодинамическая интерпретация геолого-геофизической неоднородности литосферы Днепровско-Донецкой впадины. *Доп. НАН України.* 2017а. № 9. С. 84—94. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.09.084>.
- Старостенко В.И., Пашкевич И.К., Макаренко И.Б., Куприенко П.Я., Савченко А.С. Неоднородность литосферы Днепровско-Донецкой впадины и ее геодинамические следствия. Часть II. Геодинамическая интерпретация. *Геодинаміка.* 2017б. № 2(23). С. 83—103. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.02.083>.

- Старостенко В.И., Пашкевич И.К., Макаренко И.Б., Куприенко П.Я., Савченко А.С. Неоднородность литосферы Днепровско-Донецкой впадины и ее геодинамические следствия. Часть I. Глубинное строение. *Геодинамика*. 2017в. № 1(22). С. 125—138. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.125>.
- Стовба С.Н. Геодинамическая эволюция Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса: дис. ... д-ра геол. наук. Киев: Науч.-исслед. ин-т нефтяной и газовой промышленности, 2008. 495 с.
- Субботин С.И. Вопросы гравиметрии, исследования земной коры и мантии. Теория тектогенеза. Киев: Наук. думка, 1979. 474 с.
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. Москва: Научный мир, 2001. 604 с.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В. Сейсмотомография мантии под Восточно-Европейской платформой: мантийные скоростные границы. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 5. С. 161—170. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116672>.
- Чекунов А.В. Структура земной коры и тектоника юга Европейской части СССР. Киев: Наук. думка, 1972. 176 с.
- Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. Очерки дегазации Земли. Киев: ИГН НАН Украины; Науч.-инж. центр радиогидрогеоэкол. полигон. исслед. НАН Украины, 2018. 632 с.
- Bogdanova, S., Lubnina, N.V., & Pisarevsky, S.A. (2013). Proterozoic Baltica: major stages of block reorganization and supercontinent reconstruction. *Rodinia 2013: Supercontinental Cycles and Geodynamics Symposium, 20—24 May 2013 Moscow* (P. 10).
- Shchipansky, A., & Bogdanova, S.V. (1996). The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dnieper-Donets aulocogen. *Tectonophysics*, 268(1-4), 109—125. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00227-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00227-2).

Сейсмотомография мантии под Днепровско-Донецкой впадиной и ее окружением. Часть I

Т.А. Цветкова, И.В. Бугаенко, Л.Н. Заец, 2020

В статье рассматривается скоростное строение мантии под Днепровско-Донецкой впадиной (ДДВ). Привлечено решение, полученное методом тейлорового приближения решения трехмерной задачи сейсмической томографии. Метод не зависит от референтной модели и дает лучшее приближение нелинейности по отношению к классическому решению. Полученная 3D P-скоростная модель мантии представляется в виде горизонтальных и вертикальных сечений. Горизонтальные сечения получены с шагом 25 км в «истинных скоростях». Вертикальные сечения, долготные и широтные, показаны с шагом 1° в виде невязок скоростей относительно обобщенной средней скорости под мантией Евразии и ее окружением. В настоящей работе представлены горизонтальные сечения. Показано, что ДДВ связана с растяжением земной коры и ее подъемом. Последнее может быть объяснено субгоризонтальным внедрением высокоскоростного слоя переходной зоны верхней мантии со стороны Черного моря в низкоскоростной слой переходной зоны верхней мантии Сарматии. Анализ распределения скоростей по горизонтальным сечениям мантии под ДДВ и ее окружением позволяет выделить расслоенность верхней мантии и ее переходной зоны. Расслоенность определяется характерными скоростными об-ластями для данной глубины, ограниченных как нулевыми изолиниями скоростей,

так и сгущением изолиний. Всего выделено пять областей: на глубинах 50—250 км, 300—400 км, 450—550 км, 600—650 км, 650—800 км. На глубинах 300—400 км область объединяет Курско-Белгородский блок Курского мегаблока Воронежского кристаллического массива, Черниговский и Лохвицкий сегменты ДДВ, Ингульский и Приднепровский мегаблоки Украинского щита, и предположительно является частью Сарматского щита, связанного с мантией под Волго-Уралией, возможной частью Сарматско-Уральского макроконтинента. Выделяются направления распространения скоростных структур, связанных с мантией под ДДВ: юг—северо-восток, юг—северо-запад, север—юг, восток—запад. В более общем представлении это северо-восток—юго-запад, юг—север, восток—запад.

Ключевые слова: трехмерная P -скоростная модель, мантия, Днепровско-Донецкая впадина, горизонтальные сечения, скоростные области.

Seismic tomography of the mantle under the Dnieper-Donets Depression and its surroundings. Part I

T.A. Tsvetkova, I.V. Bugaenko, L.N. Zaets, 2020

The article discusses the high-speed structure of the mantle under the Dnieper-Donets Depression (DDD). The solution obtained by the Taylor approximation of the solution of the three-dimensional seismic tomography problem is used. The method is independent of the reference model and gives a better approximation of nonlinearity with respect to the classical solution. The resulting 3D P -velocity model of the mantle is presented in the form of horizontal and vertical sections. Horizontal sections were obtained with a step of 25 km at «true speeds». Vertical sections, longitude and latitude, are shown with a step of 1° in the form of residuals of velocities relative to the generalized average velocity under the mantle of Eurasia and its environment. This paper presents horizontal sections. It is shown that the occurrence of DDD can be associated with the extension of the Earth's crust and its rise under the influence of tangential stresses. The latter can be explained by the subhorizontal penetration of the high-speed layer of the transition zone of the upper mantle from the Black Sea into the low-speed layer of the transition zone of the upper mantle of Sarmatia. An analysis of the distribution of velocities over horizontal sections of the mantle beneath the DDD and its surroundings makes it possible to single out the layering of the upper mantle and its transition zone. Stratification is determined by characteristic velocity regions for a given depth, limited both by zero velocity isolines and by thickening of isolines. A total of 5 areas are allocated: at depths of 50—250 km, 300—400 km, 450—550 km, 600—650 km, 650—800 km. At depths of 300—400 km, the region combines the Kursk-Belgorod block of the Kursk megablock of the Voronezh crystalline massif, the Chernigov and Lohvitsky segments of the DDV, the Ingul and Pri-dneprovsky megablocks of the Ukrainian Shield, and is supposedly part of the Sarmatian Shield associated with the mantle beneath the Volga-Uralia-Ural-Ural macrocontinent. The propagation directions of velocity structures associated with the mantle under the DDW are distinguished: south—northeast, south—northwest, north—south, east—west. More generally, it is northeast—southwest, south—north, east—west.

Key words: three-dimensional P -velocity model, mantle, Dnieper-Donets Depression, horizontal sections, velocity regions.

References

- Geyko, V.S. (1997). Taylor approximation of the wave equation and the eikonal equation in inverse seismic problems. *Geofizicheskiy zhurnal*, 19(3), 48—68 (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 Sarmatian mantle (south-west of the East European platform). *Geofizicheskiy zhurnal*, 27(6), 927—939 (in Russian).
- Geyko, T.S., Lukin, A.E., Omelchenko, V.V., & Tsoha, O.G. (2013). Tectonic-geodynamic criteria of petroleum potential of Dnieper-Donets aulacogen northern flank crystalline basement. *Geological zhurnal*, (4), 7—23. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2013.4.139306> (in Russian).
- Lukin, A.E., Shestopalov, V.M. (2018) From new geological paradigm to the problems of regional geological-geophysical survey. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(4), 3—72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140610> (in Russian).
- Mukhametov, R.G. (1977). The inversion problem of a two-dimensional Riemannian metric is integral geometry. *Doklady AN SSSR*, 232, 32—45 (in Russian).
- Starostenko, V.I., Rusakov, O.M., Pashkevich, I.K., Kutas, R.I., Orlyuk, M.I., Kuprienko, P.Ya., Makarenko, I.B., Maksimchuk, P.Ya., Kozlenko, Yu.V., Kozlenko, M.V., Legostaeva, O.V., Lebed, T.V. & Savchenko, A.S. (2015). *Tectonics and hydrocarbon potential of the crystalline basement of the Dnieper-Donets depression*. Kiev: Galaktika, 211 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Pashkevich, I.K., Makarenko, I.B., Kuprienko, P.Ya., & Savchenko, A.S. (2017a). Geodynamical interpretation of the geological and geophysical heterogeneity of the Dnieper-Donets basin lithosphere. *Dopovidi NAN Ukrayiny*, (9), 84—94. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.09.084>. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Pashkevich, I.K., Makarenko, I.B., Kuprienko, P.Ya., & Savchenko, A.S. (2017b). Lithosphere heterogeneity of the Dnieper-Donets basin and its geodynamical consequences. I. Geodynamics interpretation. *Geodinamika*, (2), 125—138. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.02.083> (in Russian).
- Starostenko, V.I., Pashkevich, I.K., Makarenko, I.B., Kuprienko, P.Ya., & Savchenko, A.S. (2017c). Lithosphere heterogeneity of the Dnieper-Donets basin and its geodynamical consequences. I. Deep structure. *Geodinamika*, (1), 125—138. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.125> (in Russian).
- Stovba, S.N. (2008). The geodynamic evolution of the Dnieper-Donetsk depression and the Donbass: *Doctor's thesis*. Kiev: Research Institute of Oil and Gas Industry. 495 p. (in Russian).
- Subbotin, S.I. (1979). *Issues of gravimetry, studies of the Earth's crust and mantle. Theory of tectogenesis*. Kiev: Naukova Dumka, 474 p. (in Russian).
- Khain, V.E. (2001). *Tectonics of continents and oceans*. Moscow: Nauchnyy Mir, 604 p. (in Russian).
- Tsvetkova, T.A., & Bugayenko, I.V. (2012). Seismotomography of the mantle under the East European Platform: mantle velocity boundaries. *Geofizicheskiy zhurnal*, 34(5), 161—172. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116672> (in Russian).
- Chekunov, A.V. (1972). *The structure of the Earth's crust and tectonics of the south of the European part of the USSR*. Kiev: Naukova Dumka, 176 p. (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Lukin, A.E., Zgonnik, V.A., Makarenko, A.N., Larin, N.V., & Boguslavsky, A.S. (2018). *Essays on Earth's degassing*. Kiev: Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine; Scientific-Ing. Center for Radio-Hydrogeoecological Ground Research of the NAS of Sciences of Ukraine, 632 p. (in Russian).
- Bogdanova, S., Lubnina, N.V., & Pisarevsky, S.A. (2013). Proterozoic Baltica: major stages of block reorganization and supercontinent reconstruction. *Rodinia 2013: Supercontinental Cycles and Geodynamics Symposium, 20—24 May 2013 Moscow* (P. 10).
- Shchipansky, A., & Bogdanova, S.V. (1996). The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dnieper-Donets aulacogen. *Tectonophysics*, 268(1-4), 109—125. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00227-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00227-2).