

Скоростное строение мантии под Днепровско-Донецкой впадиной и ее окружением. Ч. II

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

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

Поступила 13 января 2020 г.

Статья является продолжением анализа скоростного строения мантии под Днепровско-Донецкой впадиной и ее окружением, к которой отнесены север Украинского щита и юг Воронежского кристаллического массива (на основании трехмерной P -скоростной модели мантии). По геологическим данным Днепровско-Донецкая впадина состоит из 4 частей. Согласно P -скоростной модели, мантия под впадиной делится на 2 части: первая часть соответствует Черниговскому и Лохвицкому сегментам, ко второй относятся Изюмский и Донецкий сегменты. Отмечается влияние на первую часть Волыно-Оршанского, на вторую — Северо-Азовского плюма.

Выделены сверхглубинные флюиды, влияющие на характеристику впадины. Изюмскому сегменту соответствуют южное окончание Курско-Белгородского флюида (флюид f_4) и северные окончания флюидов f_3 и f_{12} . К Лохвицкому сегменту относится северо-западная часть флюида f_3 , а также северо-западное окончание флюида f_2 , юго-западное окончание флюида f_4 . Северо-восточное окончание флюида f_2 относится к Черниговскому сегменту, северо-восточная часть флюида f_{12} относится к Донбасскому сегменту. Землетрясения рассматриваемой области дополнительно подтверждают деление ее на Черниговский, Лохвицкий, Изюмский и Донецкий сегмент.

Проведен анализ изменения градиента скорости с глубиной для данной области, который позволяет определить сейсмические границы мантии (точки перегиба градиентов скоростных кривых соответствуют скоростным границам). На их основании выделена глубина залегания главной геодинамической границы мантии (подошвы переходной зоны верхней мантии). Под Лохвицким, Изюмским, Донецким сегментами Днепровско-Донецкой впадины она определена как 625 км. Глубиной залегания 575 км характеризуется большая часть Черниговского сегмента и северо-западная часть — Изюмского, соответствующая Курско-Белгородскому флюиду. Такая глубина залегания главной геодинамической границы мантии соответствует процессам дегазации. Изменение градиентов скорости с глубиной еще раз указывает на разделение исследуемой области на две части. В восточной, к которой относятся Изюмский и Донецкий сегменты, выделяется зона подкорковых волноводов. Для Черниговского и Лохвицкого сегментов подкорковые волноводы не выделяются, за исключением крайнего северо-востока Лохвицкого сегмента, куда распространяется область Курско-Белгородского флюида. Объяснение наблюдаемой структуры в восточной части верхней мантии (Изюмский и Донецкий сегменты) основано на предположении, что формирование в ней волноводов связано с режимом неравномерного подъема к поверхности сверхглубинных флюидов.

Ключевые слова: трехмерная P -скоростная модель, мантия, Днепровско-Донецкая впадина, главная геодинамическая граница, сверхглубинные флюиды.

Введение. Днепровско-Донецкая впадина (ДДВ) — внутриплатформенная структура Восточно-Европейского кратона (ВЕК), и современное состояние ее земной коры и мантии сформированы в неразрывной связи с ее окружением. Как показано на

рис. 1, неоднородность мантии под ДДВ находится в сфере влияния плюмов и флюидов сопредельных регионов.

Сейсмическая визуализация плюмов ассоциируется с проявлением низкоскоростной области, распространяющейся от границы ядро—мантия — главной геодинамической границы (подошвы переходной зоны верхней мантии), вплоть до подошвы литосферы, возможно до коры [Богатилов и др., 2010]. Сейсмическая визуализация флюидов мантии, согласно Н. И. Павленковой [Павленкова, 2001], И. Л. Гуфельду [Гуфельд, 2007], определяется повышенной расслоенностью с чередованием слоев, характеризующихся повышенными и пониженными значениями скорости.

При этом численный эксперимент показывает, что плюм самопроизвольно возникает на горячем дне мантии и флюиды лишь захватываются плюмом [Евсеев, 2012]. Последнее соответствует рассмотрению мантийных доменов, центральная часть которых есть проявление плюма, область растекания низкоскоростного максимума его головки, т. е. область, определяющая домен. В работе [Цветкова и др., 2019] показаны мантийные домены мантии ВЕК, в том числе рассматриваемого региона.

Интерес вызывает проявление в мантии данного региона аномальных (механически ослабленных, флюидонасыщенных и высокопроницаемых) зон. В общем случае, согласно работе [Родкин, Рунквист, 2017], такие зоны выделяются как области пониженных скоростей распространения сейсмических волн, повышенной электропроводности, сейсмической контрастности, высокой концентрации гипоцентров очагов землетрясений. В коре и верхней мантии ослабленных регионов выделяются слои пониженных скоростей и повышенной электропроводности [Каракин и др., 2003]. К указанным свойствам добавляется и повышенная концентрация гипоцентров землетрясений.

В настоящей статье рассматривается мантия под ДДВ и ее окружением, к которому отнесены север Украинского щита

(УЩ), юг Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и его восточный и западный пограничные районы. Уделим основное внимание интервалу 28° в.д.— 43° в.д. \times 48° с.ш.— 53° с.ш. На рис. 1 представлены выделенные, согласно трехмерной P -скоростной модели мантии, мантийные домены (плюмы и области их растекания) и флюиды мантии под ВЕК, в том числе относящиеся к рассматриваемой территории [Цветкова и др., 2019]. В работе [Цветкова и др., 2020] анализировались горизонтальные сечения, в настоящей статье показаны долготные и широтные сечения трехмерной P -скоростной модели мантии данного региона, представлена связь образования ДДВ с мантией пограничной зоны ВЕК и мантией под Черным морем.

Особенности строения мантии под ДДВ, в частности ее дифференциация, учитывая недостаточную детальность системы наблюдений (см. работу [Цветкова и др., 2020]), могут быть установлены только в масштабах сегментации ДДВ (рис. 2).

Анализируя рис. 1 (мантийные домены (плюмы и их растекание) и флюиды мантии под ВЕК), рис. 2, б, рис. 3, 4 (широтные сечения трехмерной P -скоростной модели мантии), рис. 5 (долготные сечения трехмерной P -скоростной модели мантии), следует отметить, что к области широтного растекания мантийного домена Вольно-Оршанского плюма относятся области мантии под Вольно-Оршанским авлакогеном, восточной частью Мазуро-Белорусской антеклизы, Припятской впадиной, Красногорско-Рославльским блоком Курского мегаблока (северо-запад ВКМ), Черниговским и Лохвицким сегментами ДДВ, западной частью Курско-Белгородского флюида (номер 4 на рис. 1), западной частью УЩ (Волынский, Подольский, Росинско-Бугский, Ингульский мегаблоки УЩ (до 34° в.д.). Долготное растекание Вольно-Оршанского мантийного домена на юг, заканчивающееся на 46° с.ш., соответствует мантии под южным окончанием УЩ (Волыно-Подольский и Росинско-Тикичский мегаблоки). Широтное растекание на запад области мантий-

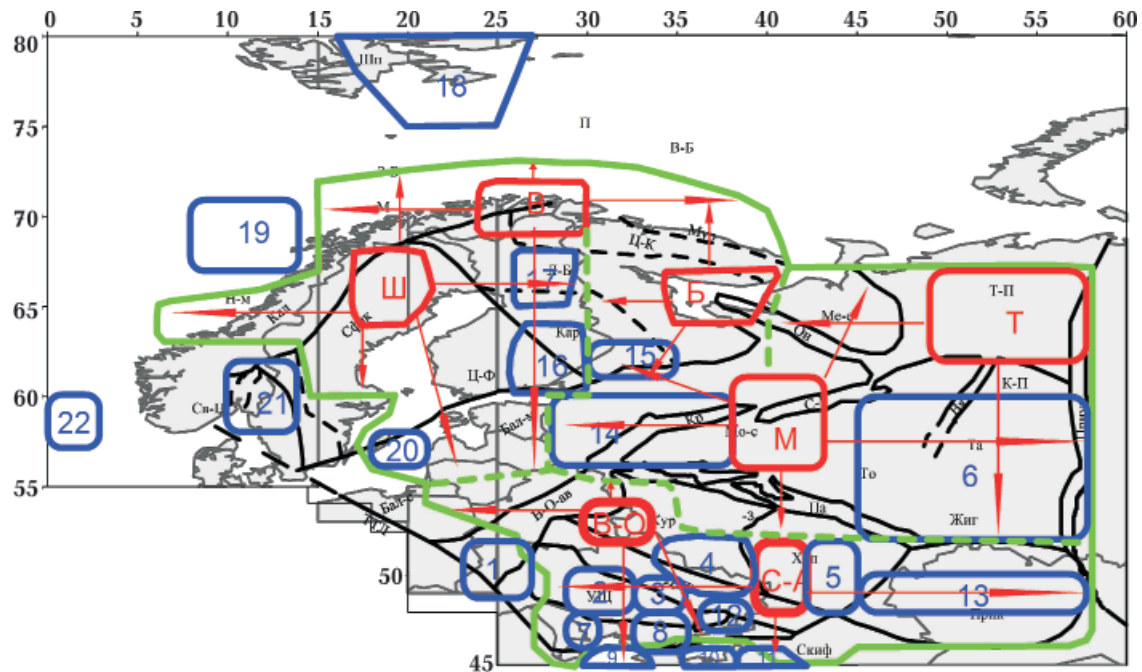


Рис. 1. Мантийные домены ВЕК (плюмы и области их растекания) из работы [Цветкова и др., 2019]. Непрерывная зеленая кривая ограничивает области мантийных доменов ВЕК, зеленая пунктирная линия — растекание выделенных плюмов, красное — плюмы (Б — Беломорский, В — Варангер, В-О — Вольно-Оршанский, М — Московский, С-А — Северо-Азовский, Т — Тиманский, Ш — Шеллефтео), красные стрелки — направления растекания плюмов, синие — сверхглубинные мантийные флюиды.

Fig. 1. Mantle domains of Eastern European craton (plumes and areas of their spreading) from the work [Tsvetkova et al., 2019]. The continuous green curve limits the regions of the mantle domains of the Eastern European craton, the green bar line limits the spread of the selected plumes, the red — the plumes (B — Belomorsky, B — Varanger, V-O — Volyn-Orsha, M — Moscow, N-A — North-Azov, T — Timansky, S — Schellefteo), red arrows — directions of spreading of plumes, blue — superdeep mantle fluids.

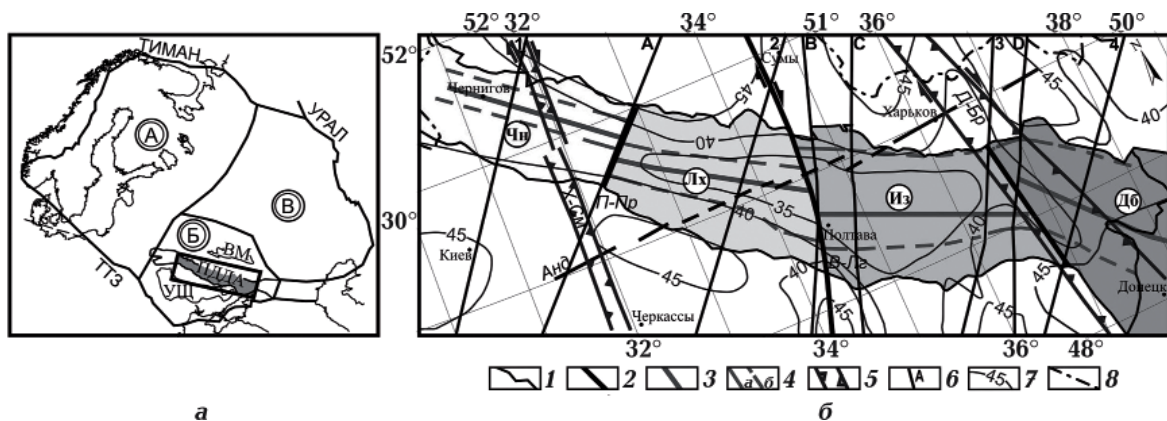


Рис. 2. Раздел ВЕК по С. В. Богдановой [Shcipansky, Bogdanova, 1996]. А — Фенноскандия, Б — Сарматия, В — Волго-Уралия (а). Сегменты ДДВ [Старостенко и др., 2017а] (б): Чн — Черниговский; Лх — Лохвицкий; Из — Изюмский; Дб — Донбасский; тектонические шовные зоны: Х-СМ — Херсон—Смоленск, Д-БР — Донецк—Брянск; разломы кристаллической коры: К-КР — Криворожско-Крупецкая зона разломов, В-Лг — Верховцевско-Львовский разлом, Анд — Андрушевский разлом.

Fig. 2. Section of the Eastern European craton by S.V. Bogdanova [Shcipansky, Bogdanova, 1996]. A — Fennoscandia, B — Sarmatia, C — Volgo-Uralia (a). Segments of DDD [Starostenko et al., 2017a] (b): Ch — Chernigiv; Lh — Lokhvitsky; Iz — Izyumsky; Db — Donbass; tectonic seam zones: Kh-Sm — Kherson—Smolensk, D-Br — Donetsk—Bryansk; faults of the crystalline crust: K-Kr — Kryvyi Rih-Krupetsky fault zone, V-Lg — Verkhovtsevska-Lgovsky fault, And — Andrushevsky fault.

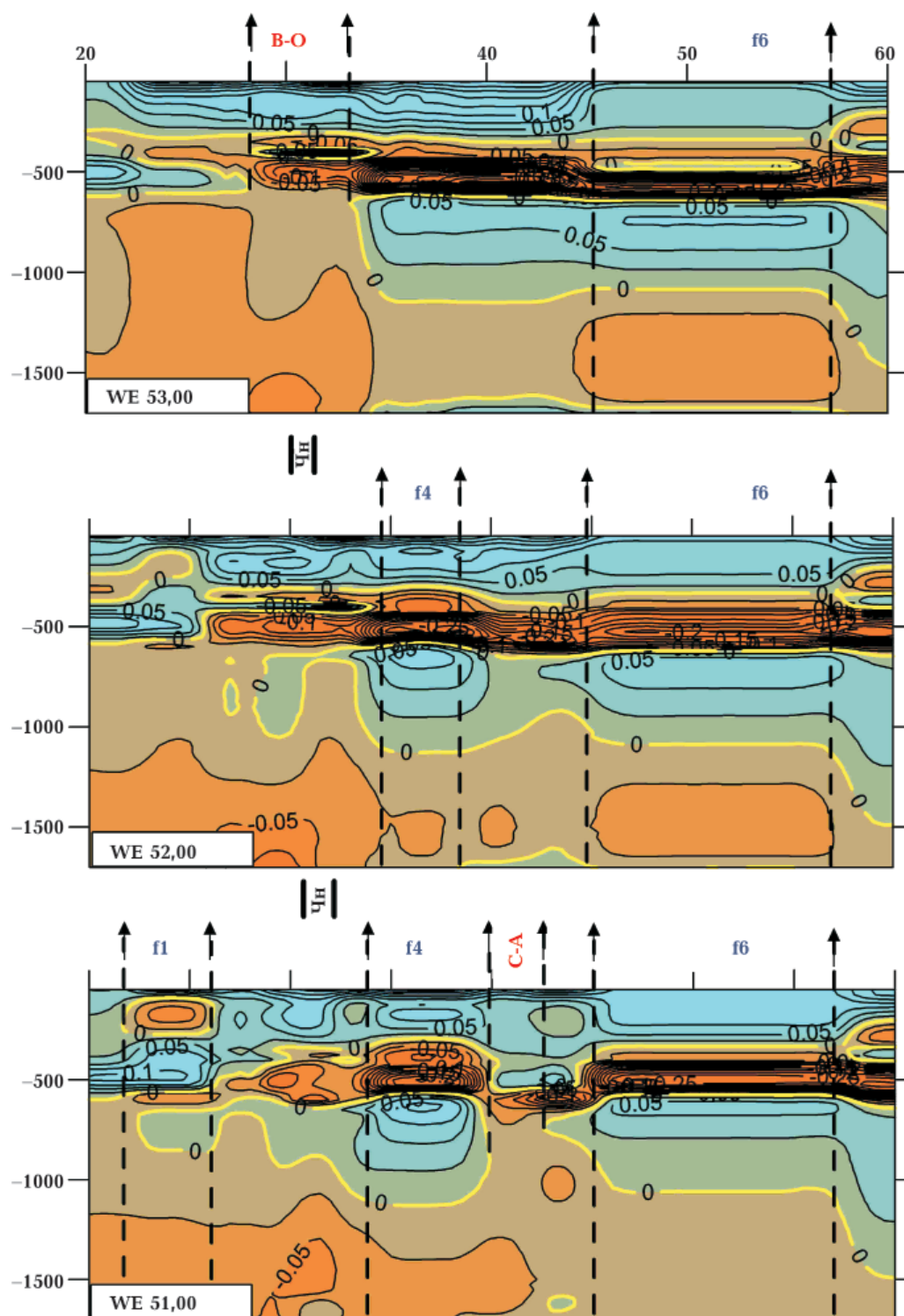


Рис. 3. Широтные вертикальные сечения трехмерной P -скоростной модели верхней мантии 51°, 52° и 53° с.ш. до глубины 1700 км, которые проходят через Черниговский (Чн) сегмент ДДВ. Красным цветом выделены Волыно-Оршанский (В-О) и Северо-Азовский (С-А) плюмы, синим — сверхглубинные мантийные флюиды (см. рис. 1).

Fig. 3. Latitude vertical sections of the three-dimensional P -velocity model of the upper mantle 51, 52 and 53 °NL to the depth of 1700 km, which pass through Chernihiv segment of DDD. Plums (V-O — Volyn-Orsha, N-A — North-Azov) are highlighted in red, and superdeep mantle fluids are highlighted in blue (from Fig. 1).

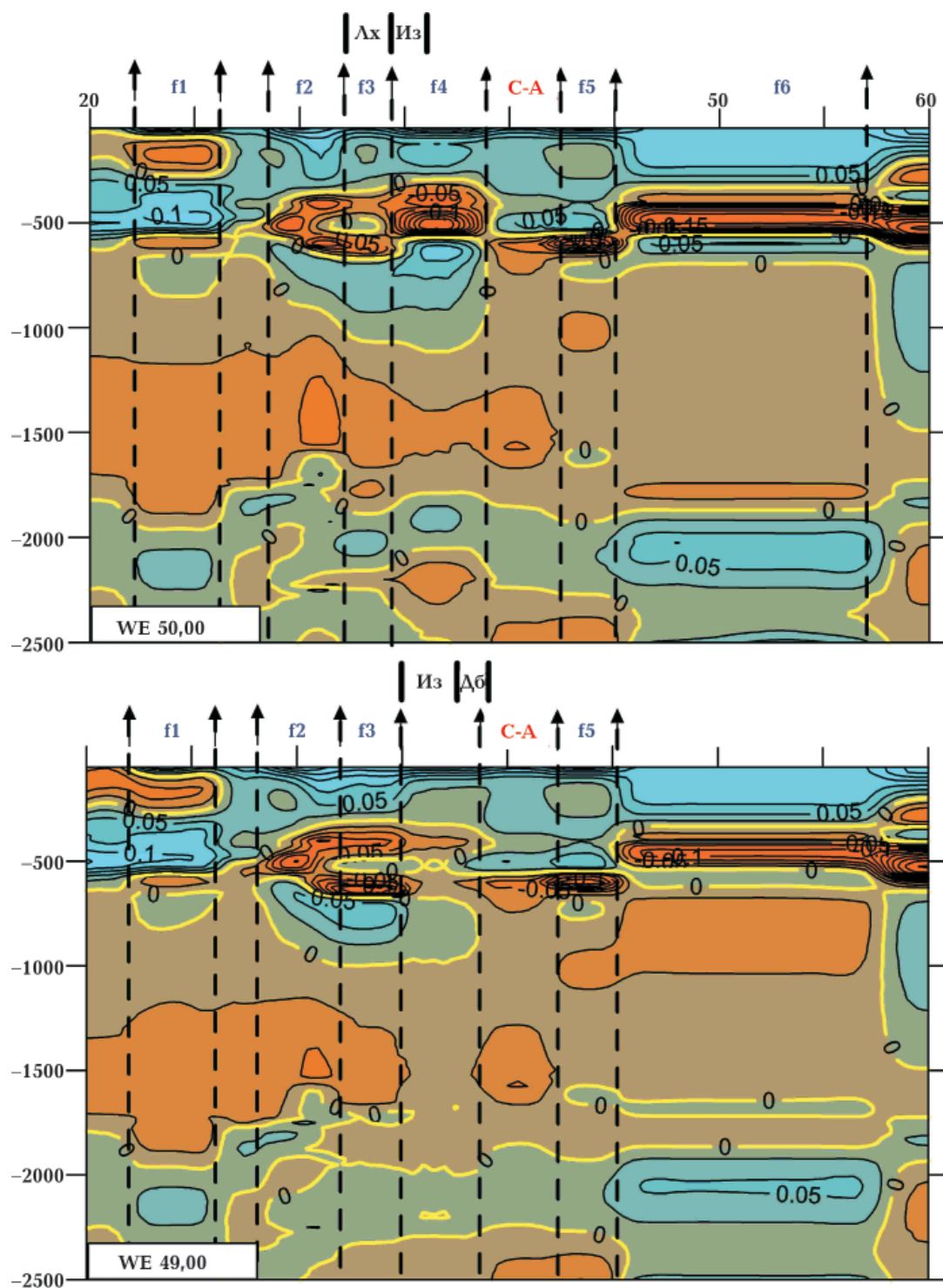


Рис. 4. Широтные вертикальные сечения трехмерной P -скоростной модели верхней мантии 49° и 50° с.ш. до глубины 2500 км, которые проходят через Лохвицкий (Лх), Изюмский (Из) и Донбасский (Дб) сегменты ДДВ. Красным цветом выделен Северо-Азовский плум (С-А), синим — сверхглубинные мантийные флюиды (см. рис. 1).

Fig. 4. Latitude vertical sections of the three-dimensional P -velocity model of the upper mantle 49 and 50° NL to the depth of 2500 km, which pass through Lkhvitsky, Izyumsky and Donbass segments of DDD. The plume (N-A — North-Azov) is highlighted in red, and the super-deep mantle fluids are highlighted in blue (from Fig. 1).

ного домена Северо-Азовского плюма, включая всю мантию под ДДВ, доходит до 28° в.д. (Волыно-Оршанский авлакоген). При этом, как уже отмечалось, восточному окончанию Черниговского сегмента соответствует долготное сечение 32° в.д., Лохвицкому сегменту — интервал 32°—34° в.д., Изюмскому — 35°—37° в.д., Донбасскому — 38°—41° в.д. Растекание на юг области мантийного домена Северо-Азовского плюма включает в себя Приднепровский и Приазовский мегаблоки УЩ, Причерноморскую впадину, север Скифской плиты, Азовское море, север Восточно-Черноморского шельфа. Растекание на восток — мантию под Прикаспием. В областях растекания мантийных доменов Волыно-Оршанского и Северо-Азовского плюмов можно выделить их общую часть (см. рис. 1). Разделу между Черниговским и Лохвицким сегментами соответствует Андрушевский разлом, при том что тектонический шов Херсон—Смоленск относится к Черниговскому сегменту. Разделу между Изюмским и Донецким сегментами — тектонический шов Донецк—Брянск.

Мантия под ДДВ делится на две части: к первой части мантии относятся Черниговский и Лохвицкий сегменты (29°—34° в.д.), ко второй части — Изюмский и Донецкий (35°—41° в.д.). Разделу между Лохвицким и Изюмским сегментами соответствует интервал 34°—35° в.д. При этом в интервале 29°—34° в.д. (западная часть раздела мантии под ДДВ) отмечается влияние Волыно-Оршанского плюма и проявление последнего в сечениях 29°—34° в.д. В интервале 35°—41° в.д. — влияние Северо-Азовского плюма и проявление в сечениях 38°—41° в.д. (рис. 3—5). К этой же, восточной, части относится Курско-Белгородский флюид (флюид 4 на рис. 1), находящийся близко к Северо-Азовскому плюму. Будем называть интервал 34°—35° в.д. разделом мантии под ДДВ на восточную и западную части.

Согласно широтным сечениям 50°—52° с.ш. (рис. 3, 4), Изюмскому сегменту соответствуют южное окончание Курско-

Белгородский флюида (флюид f4), а также северные окончания флюидов f3 и f12 (см. рис. 1); Лохвицкому сегменту — северо-западная часть флюида f3, а также северо-западное окончание флюида f2, юго-западное окончание флюида f4; Черниговскому сегменту — северо-восточное окончание флюида f2, Донбасскому сегменту — северо-восточная часть флюида f12. К мантии под УЩ относятся следующие флюиды: f2 к Росинско-Бутскому и Ингульскому мегаблокам, f3 к Ингульскому и Среднеприднепровскому мегаблокам; f12 к Приазовскому мегаблоку. Флюид f4 относится к ВКМ. Учитывая указанное расположение флюидов, подчеркивается связь флюидных процессов УЩ, ВКМ и ДДВ. Мантия под ДДВ является областью их общего выхода.

Приведенные на рис. 6 землетрясения (данные бюллетеней ISC за 1964—2019 гг.) рассматриваемой области дополнительно подтверждают деление ее на Черниговский, Лохвицкий, Изюмский и Донецкий сегменты. Следует отметить, что повышенная сейсмичность рассматриваемого района, связанная с проявлениями флюидов, позволяет предположить и повышенную проницаемость среды. По сейсмологическим данным (о систематическом смещении положения гипоцентров землетрясений (таблица)) оценку проницаемости земной коры и верхов мантии получают косвенным образом [Родкин, Рундквист, 2017]. Такие смещения принято трактовать как отражения перемещения в литосфере зон высокого флюидного давления. При этом наиболее естественно сопоставлять с флюидным режимом случаи всплывания очагов землетрясений — как отражение процесса отжима флюидов низкой плотности в верхние слои литосферы. Приведем пример такого события, относящегося к Курско-Белгородскому флюиду (флюид f4). Согласно приведенным в таблице данным, всплывание очага землетрясения, относящегося к области Волыно-Оршанского плюма, соответствует сдвигу его в область Курско-Белгородского флюида.

На рис. 7 представлена схема располо-

жения и нумерация сечений обобщенного поля времен исследуемой территории, а на рис. 8 на данных сечениях обобщенного поля времен вынесена глубина залегания главной геодинамической границы (подошвы переходной зоны верхней мантии), которая подчеркивает связь рассматриваемой области с процессами дегазации. Главная геодинамическая граница (ГГГ) мантии под ВЕК рассмотрена в работе [Цветкова и др., 2019].

Глубина залегания ГГГ мантии под Лохвицким, Изюмским, Донецким сегментами ДДВ определена как 625 км (рис. 8). Глубиной залегания 575 км характеризуется большая часть Черниговского сегмента и северо-западная часть Изюмского сегмента, соответствующая Курско-Белгородскому флюиду (флюид f4). Такая глубина залегания ГГГ соответствует процессам дегазации [Жарков, 1983; Лобковский и др., 2004]. Наиболее резко выражен квадрат 24, к которому относится Курско-Белгородский блок Курского мегаблока ВКМ. Ему соответствует резкость границы $0,335 \text{ с}^{-1}$, максимальная для рассматриваемого региона (рис. 9, 10). Глубина залегания 575 км позволяет предположить более резкий в настоящее время процесс дегазации.

В работе [Nataf, 2000] указано, что у более древних плюмов отсутствует так называемая «ножка». Анализ скоростной структуры Вольно-Оршанского и Северо-Азовского плюмов (см. рис. 3—5) позволяет предположить разный возраст плюмов (Северо-Азовский более древний). Такой вывод можно сделать, исходя из отсутствия «ножки» Северо-Азовского плюма и распространения его же высокоскоростной верхней мантии до глубин 450 км. Высокоскоростная верхняя мантия определяется для Вольно-Оршанского плюма до глубины 300 км. Область раздела между Вольно-Оршанским и Северо-Азовским плюмами в интервале 34° — 35° в.д. В данной области прекращается непосредственное проявление Вольно-Оршанского плюма.

Рассмотрение долготных сечений показывает пограничную область мантии под ВЕК [Цветкова, Бугаенко, 2012]. Видно вне-

дрение по переходной зоне верхней мантии со стороны переходной зоны верхней мантии под Черным морем до мантии под ДДВ. Разделом мантии под ДДВ служит последнее проявление Вольно-Оршанского плюма (34° в.д.). После 34° в.д. на восток в интервале 35° — 38° в.д. \times 50° — 52° с.ш. проявляется Курско-Белгородский флюид как чередование слоев повышенных и пониженных значений скоростей (см. рис. 3—5). Отметим, что такое чередование слоев Курско-Белгородского флюида в целом согласуется с горизонтальными сечениями [Цветкова и др., 2020]. Южное окончание указанного флюида соответствует северной части Изюмского сегмента. Последующий, Донбасский, сегмент испытывает влияние в основном Северо-Азовского плюма. Чередование значений повышенных и пониженных скоростей в сейсмическом представлении может дать повод предполагать изменение плотности вещества.

Рассмотрение долготных и широтных сечений позволяет выделить в верхней мантии и ее переходной зоне наклонный слой. В пределах рассматриваемой области он относится к интервалу 51° — 49° с.ш. \times 39° — 27° в.д. и соответствует мантии под ДДВ и Припятской впадиной. В то же время необходимо учитывать, что наклонный слой связан с рассмотренным выше растеканием Северо-Азовского плюма и Курско-Белгородским флюидом. На рис. 3, 4 (50° — 52° с.ш.) наклонный слой выделяется в интервале 39° — 27° в.д. Более четко выделяется нижняя граница наклонного слоя на уровне верхней границы переходной зоны верхней мантии. В целом наклонный слой распространяется от мантии под ДДВ и Припятской впадиной до мантии под Прикарпатьем (наклонный слой, расположенный рядом с зоной Вранча).

Следует обратить внимание на то, что выделенные флюиды, в том числе Курско-Белгородский флюид (флюид f4, рис. 8), находятся в непосредственной близости от Северо-Азовского и Вольно-Оршанского плюмов. Последнее, учитывая действия

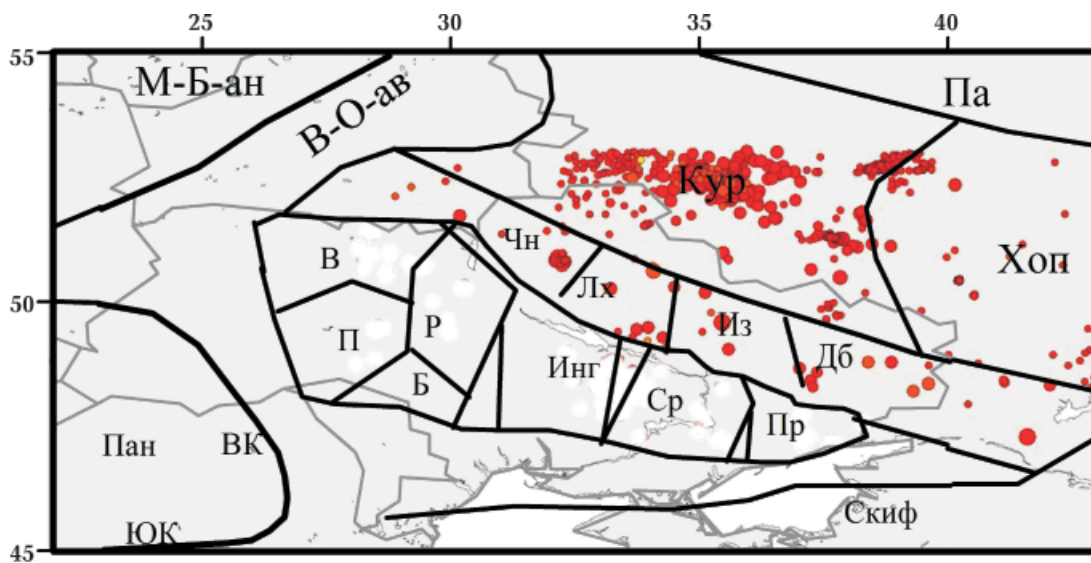


Рис. 6. Землетрясения ДДВ и ближайшего северного окружения за период 01.01.1964—01.01.2019 гг. [International..., 2019]: Б — Бугский мегаблок УЩ, В — Волынский мегаблок УЩ, В-О-ав — Волыно-Оршанский авлакоген, Дб — Донбасский сегмент ДДВ, Из — Изюмский сегмент ДДВ, Инг — Ингульский мегаблок УЩ, Кур — Курский мегаблок ВКМ, Лх — Лохвицкий сегмент ДДВ, М-Б-ан — Мазуро-Белорусская антеклиза, П — Подольский мегаблок УЩ, Па — Пачелмский авлакоген, Пан — Паннонская впадина, Пр — Приазовский мегаблок УЩ, Р — Росинский мегаблок УЩ, Скиф — Скифская плита, Ср — Среднеприднепровский мегаблок УЩ, Чн — Черниговский сегмент ДДВ, Хоп — Хоперский мегаблок ВКМ.

Fig. 6. Earthquakes of DDD and the nearest northern environment for the period 01.01.1964 — 01.01.2019 [International..., 2019]. Symbols: B — Bug megablock of the Ukrainian shield, V — Volyn megablock of the Ukrainian shield, V-O-av — Volyn-Orsha avlakogen, Db — Donbass segment of DDD, Iz — Izyumsky segment of DDD, Ing — Ingul megablock of the Ukrainian shield, Kur — Kursk megablock of the Voronezh crystalline massif, Lh — Lohvitsky segment of DDD, M-B-an — Mazuro-Belarusian anteklisis, P — Podolsk megablock of the Ukrainian shield, Pa — Pachelmsky avlakogen, Pan — Pannonian depression, Pr — Priazovsky megablock of the Ukrainian shield, R — Rosinsky megablock of the Ukrainian Shield, Scyt — Scythian plate, Md — Middle Dnieper megablock of the Ukrainian Shield, Ch — Chernihiv segment of the DDD, Hopper — Hopper megablock of the Voronezh crystalline massif.

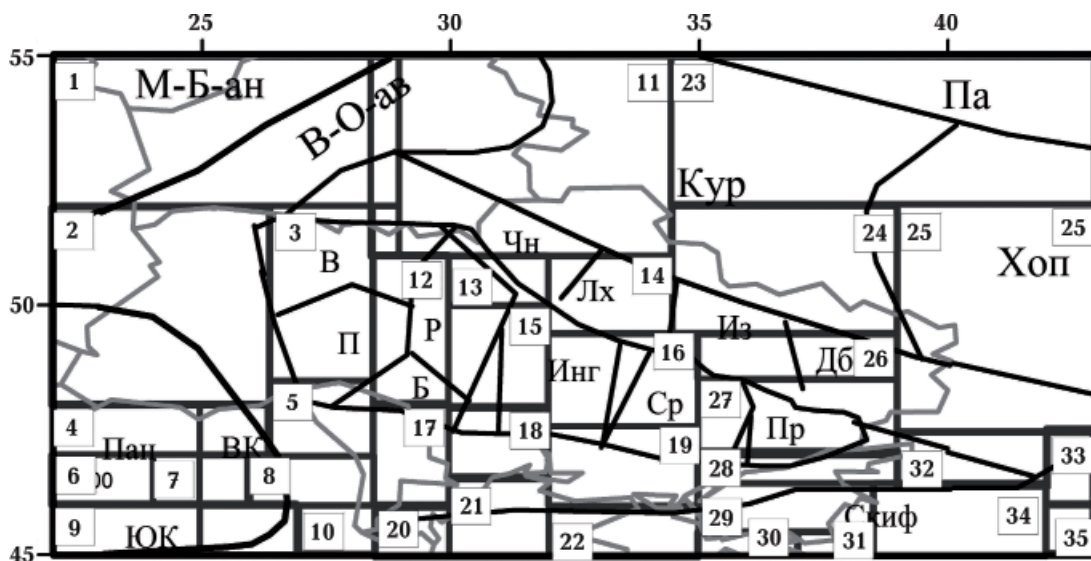


Рис. 7. Схема расположения и нумерация областей-сечений поля времен территории ДДВ и ее окружения.
Fig. 7. Location scheme and numbering of cross-sectional of time fields of the territory DDD and its surroundings.

Т а б л и ц а . Землетрясения в области Волыно-Оршанского плюма [International..., 2019], характеризующие проницаемость земной коры и верхней мантии

Дата	Широта, град	Долгота, град	Глубина гипоцентра, км
23.02.1996	52,8180	33,8428	66,2
18.04.2007	52,5202	35,2307	19,5
30.01.2008	52,3567	35,6391	10
28.03.2008	52,6721	35,1440	0,8
16.04.2008	52,4716	35,3326	0,0

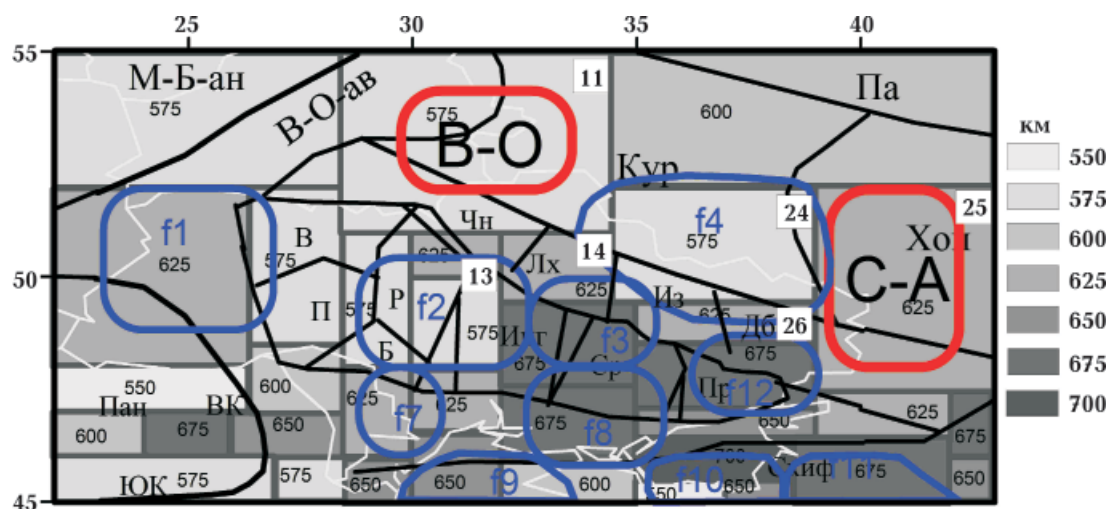


Рис. 8. Глубина залегания главной геодинамической границы. Белым цветом выделены Волыно-Оршанский (В-О) и Северо-Азовский (С-А) плюмы, черным — сверхглубинные мантийные флюиды (см. рис. 1).

Fig. 8. Depth of the main geodynamic boundary. Plums (V-O — Volyn-Orsha, N-A — North-Azov) are highlighted in white, and superdeep mantle fluids are highlighted in black (from Fig. 1).

сжатия—растяжения и происходящие при этом физико-химические процессы, свойственные флюиду, может приводить к формированию нефтегазовых месторождений ДДВ. При этом следует также учитывать влияние Волыно-Оршанского плюма на Черниговский и Лохвицкий сегменты.

Принимая во внимание проявления процессов дегазации, следует отметить, что под влиянием Северо-Азовского плюма и связанных с ним флюидов (прежде всего Курско-Белгородского) наибольшее влияние испытывают Изюмский сегмент и северная часть Донецкого. Влияние Волыно-Оршанского плюма сказывается на Черниговском и Лохвицком сегментах. В то же время, учитывая возможный более

значительный возраст Северо-Азовского плюма, можно ожидать большей энергетической поддержки флюидов Изюмского домена. Кроме того, последнее может осуществляться как от Волыно-Оршанского плюма, так и от Московского (см. рис. 1). Также следует учитывать влияние флюидов мантии под УЩ.

Построенная трехмерная *P*-скоростная модель мантии под Евразией и ее окружением позволяет определить сейсмические границы мантии под ДДВ и ее окружением. Методика построения представлена в работе [Цветкова и др., 2016]. Разделяя исследуемую область обобщенного поля времен на области-сечения, получим сейсмические границы с шагом по глубине

25 км. На рис. 9, 10 представлена графика скоростной расслоенности мантии рассматриваемой области. Точки перегиба градиентов скоростных кривых соответствуют скоростным границам для каждого из областей-сечений обобщенного поля времен (см. рис. 7):

1) область-сечение 11 (Вольно-Оршанский плюм), скоростные границы: 50, 400, 425, 575, 1425, 1475, 1525, 1575, 1650 и 1750 км. Главная геодинамическая граница на глубине 575 км (резкость $0,222 \text{ с}^{-1}$). На глубине 50—75 км присутствует возможный волновод;

2) область-сечение 13 (Черниговский сегмент ДДВ), скоростные границы: 50, 75, 150, 575, 600, 625, 1500 и 1600 км. Главная геодинамическая граница на глубине 625 км (резкость $0,231 \text{ с}^{-1}$);

3) область-сечение 14 (Лохвицкий сегмент ДДВ), скоростные границы: 50, 625, 1725 и 1875 км. Главная геодинамическая граница на глубине 625 км (резкость $0,166 \text{ с}^{-1}$);

4) область-сечение 24 (Курско-Белгородский флюид и северная часть Изюмского сегмента ДДВ), скоростные границы: 50, 150, 225, 425, 450, 575, 1475, 1800 и 2100 км. Главная геодинамическая граница на глубине 575 км (резкость $0,231 \text{ с}^{-1}$). На глубине 50 км присутствует возможный волновод;

5) область-сечение 25 (Северо-Азовский плюм), скоростные границы: 50, 625, 1475 и 1600 км. Главная геодинамическая граница на глубине 625 км (резкость $0,163 \text{ с}^{-1}$). На глубине 50 км присутствует возможный волновод;

6) область-сечение 26 (южная часть Изюмского сегмента ДДВ и Донбасский сегмент ДДВ), скоростные границы: 50, 625, 1450 и 1600 км. Главная геодинамическая граница на глубине 625 км (резкость $0,164 \text{ с}^{-1}$).

На глубинах 50—75 км возможный волновод проявляется в области Вольно-Оршанского плюма (захватывая северную часть Изюмского сегмента и крайнюю северо-восточную часть Лохвицкого сегмента ДДВ), на глубине 50 км — в области Северо-Азовского плюма и Курско-

Белгородского флюида (захватывая северную часть Черниговского сегмента ДДВ).

Изменение градиентов скорости с глубиной еще раз обращает внимание на раздел исследуемой области на две части. В восточной части, к которой относятся Изюмский и Донецкий сегменты, выделяется 50-километровая зона подкорковых волноводов, выделенных согласно 3-мерной скоростной модели, полученной методом тейлорового приближения. Для Черниговского и Лохвицкого сегментов подкорковые волноводы не выделяются, за исключением крайнего северо-востока Лохвицкого сегмента, куда распространяется область Курско-Белгородского флюида. Следует отметить, что мощность слоя пониженных скоростей невелика и не превышает 25 км.

Объяснение наблюдаемой структуры восточной части верхней мантии (Изюмский и Донецкий сегменты) основано на предположении, что формирование в ней волноводов связано с режимом неравномерного подъема к поверхности глубинных флюидов [Каракин и др., 2003; Родкин, Рундквист, 2017].

В верхней мантии (в астеносфере и нижней части литосферы) реологически ослабленные слои создаются восходящим с больших глубин разогретым мантийным веществом и потоками флюидов. Обычно они приурочены к слоям повышенной электропроводности [Ширков и др., 2015; Кушнир, Бурахович, 2016; Кушнир и др., 2017; Бурахович и др., 2018]. Наиболее четко аномальные слои выделены в средней коре на глубинах 10—20 км, в ее низах на уровне границы Мохо и в верхней мантии на глубинах порядка 100 и 200 км. Это подтверждает анализ геофизических полей коры ДДВ [Старостенко и др., 2015, 2017а,б], что, в свою очередь, позволяет утверждать, что для данного региона характерна структурная и реологическая расслоенность.

Выводы. Проведенный анализ мантии под Днепровско-Донецкой впадиной и ее окружением показывает тектоническую активизированность данного региона, преж-

де всего связанную с флюидным режимом.

1. Особенностью скоростного строения мантии ДДВ является присутствие плюмовых и флюидных проявлений: Северо-Азовский плюм, Волыно-Оршанский плюм, Курско-Белгородский флюид (флюид 4), флюиды 2, 3, 4, 5, 12.

2. Глубина залегания главной геодинамической границы соответствует 625—575 км, что свидетельствует о процессах дегазации, соответствующих данному региону. Наибольшая резкость границы присуща Курско-Белгородскому флюиду.

3. Мантийные домены Северо-Азовского и Волыно-Оршанского плюмов полностью включают в себя мантию под ДДВ и ее окружением (интервал 28—43° в.д.×48—53° с.ш.).

4. Широтные и долготные сечения показывают раздел мантии под ДДВ на сегменты и далее на две части. К первой, западной, части (29—34° в.д.) относятся Черниговский и Лохвицкий сегменты, ко второй — Изюмский и Донецкий в интервале 35—41° в.д. Разделом между частями служит окончание проявления Волыно-

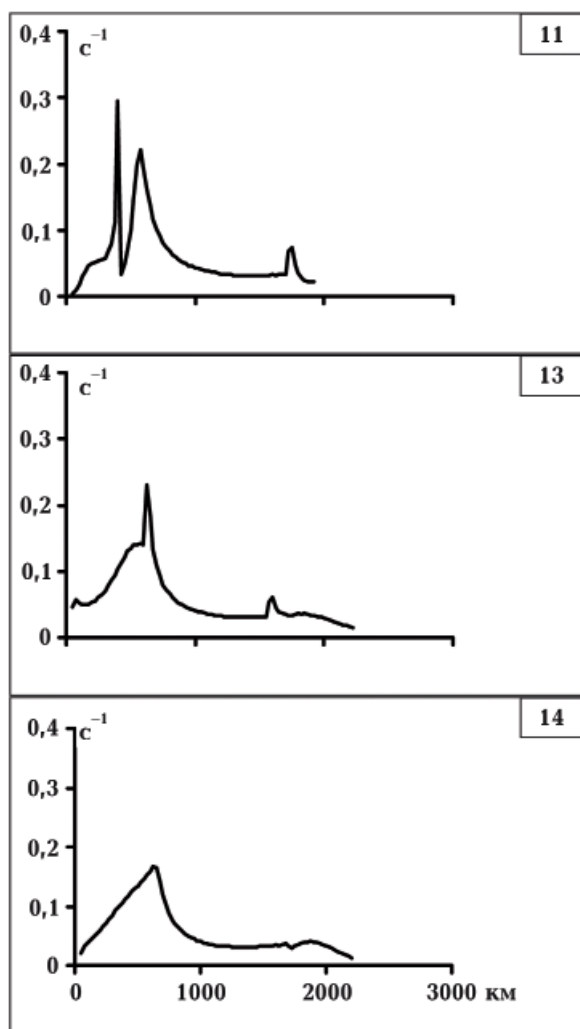


Рис. 9. Изменения градиента скорости с глубиной для трех сечений поля времен: 11, 13 и 14 (см. рис. 7, 8).

Fig. 9. Changes in the velocity gradient with depth for three cross-sections of the time field: 11, 13 and 14 (from Fig. 7, 8).

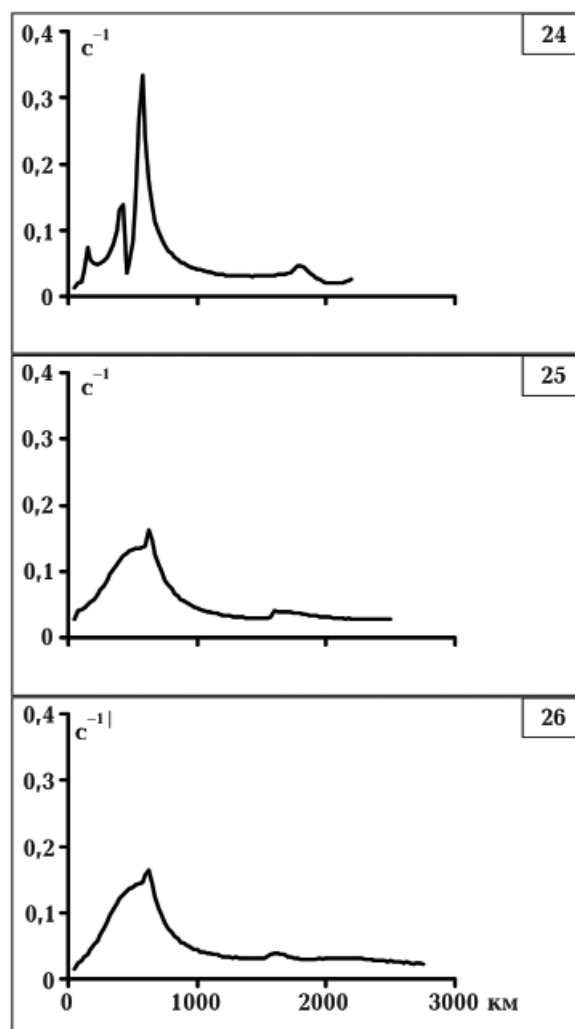


Рис. 10. Изменения градиента скорости с глубиной для трех сечений поля времен: 24, 25 и 26 (см. рис. 7, 8).

Fig. 10. Changes in the velocity gradient with depth for three cross-sections of the time field: 24, 25 and 26 (from Fig. 7, 8).

Оршанского плюма. Раздел на сегменты соответствует геометрии расположения гипоцентров землетрясений, проявляющихся на данной территории.

5. Изюмскому, Донецкому сегментам и

северо-востоку Лохвицкого соответствует зона подкорового волновода на глубине 50 км, что учитывая процессы дегазации данного региона, может приводить к накоплению мантийных флюидов.

Список литературы

- Богатиков О. А., Коваленко В. И., Шарков Е. В. Магматизм. Тектоника. Геодинамика Земли. Москва: Наука, 2010. 607 с.
- Бурахович Т. К., Кушнир А. Н., Ильенко В. А. Геоэлектрические исследования нефтегазоносного района южного борта центральной части Днепровско-Донецкой впадины. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 5. С. 172—190. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147479>.
- Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Научное издание. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Евсеев М. Н. Взаимодействие мантийных плюмов с литосферой [Электронный ресурс] 2012. Режим доступа: http://tph_2012.ifz.ru/Tez/050_Evseev.pdf.
- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. Москва: Наука, 1983. 416 с.
- Каракин А. В., Курьянов Ю. А., Павленкова Н. И. Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. Москва: Изд. Государственного научного центра Российской Федерации — ВНИИ-геосистем, 2003. 222 с.
- Кушнир А. Н., Бурахович Т. К. Результаты электромагнитных исследований Брагинско-Лоевского выступа и Черниговского блока ДДВ. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 3. С. 128—137. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107785>.
- Кушнир А. Н., Бурахович Т. К., Ширков Б. И., Джаошвили В. Б. Электромагнитные исследования северного склона центральной части Украинского щита. *Доп. НАН України.* 2017. № 10. С. 60—69. <https://doi.org/10.15407/dopovid2017.10.060>.
- Лобковский Л. И., Никишин А. М., Хаин В. Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. Москва: Научный мир, 2004. 612 с.
- Павленкова Н. И. Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества. *Вестник ОГГГН РАН.* 2001. Т. 19. № 4. С. 1—18.
- Родкин М. В., Рундквист Д. В. Геофлюидо-геодинамика, приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо и нефтегенеза. Долгопрудный: Интеллект, 2017. 287 с.
- 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/dopovid2017.09.084>.
- 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 I. Глубинное строение. *Геодинаміка.* 2017б. Т. 22. № 1. С. 125—138. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.125>.
- Ширков Б. И., Гищук О. В., Кушнир А. М. Геоэлектричні дослідження Белгородсько-Сумського мегаблоку північного борту Дніпровско-Донецької западини. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 5. С. 176—182. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111163>.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В. Сейсмотомо-

- графия мантии под Восточно-Европейской платформой: мантийные скоростные границы. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 5. С. 161—179. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116672>.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В. Структура скоростной этажности мантии под Фенноскандией по данным сейсмотомографии. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 1. С. 57—77. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107723>.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Главная геодинамическая граница и сейсмическая визуализация плюмов Восточно-Европейской платформы. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 1. С. 108—136. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158868>.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Сейсмическая визуализация плюмов и сверхглубинных флюидов в мантии под территорией Украины. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 4. С. 42—54. <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506>.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Скоростное строение мантии под Днепровско-Донецкой впадиной и ее окружением. Ч. I. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 2. С. 71—85.
- Shcipansky, A., & Bogdanova, S. V. (1996). The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets aulocogen. *Tectonophysics*, 268, 109—125. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00227-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00227-2).
- International Seismological Centre. (2019). Retrieved from <http://www.isc.ac.uk>.
- Nataf, H.-C. (2000). Seismic imaging of mantle plumes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, (28), 391—417. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.391>.

Speed structure of the mantle under the Dnieper-Donets depression and its surroundings. Pt. II

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

S. I. Subbotin Institute of Geophysics National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

This work is a continuation of the analysis of the velocity structure of the mantle beneath the Dnieper-Donets Basin and its environment, which includes the north of the Ukrainian Shield and the south of the Voronezh crystalline massif (based on the three-dimensional *P*-velocity model of the mantle). According to geological data, the Dnieper-Donets Basin consists of 4 parts. According to the *P*-speed model, the mantle beneath the Dnieper-Donets Basin is divided into 2 parts: the first part corresponds to the Chernihiv and Lokhvitsa segments, the second one includes the Izyum and Donets segments. Influence is noted on the first part of Volyn-Orsha, on the second one of the North-Azovian plume.

Super deep fluids are identified that affect the characteristics of the Dnieper-Donets depression. The Izyum segment corresponds to the southern end of the Kursk-Belgorod fluid (fluid f4) and the northern end of the fluids f3 and f12. The Lokhvitsa segment includes the northwestern part of the fluid f3, as well as the northwestern end of the fluid f2, and the southwestern end of the fluid f4. The northeastern end of fluid f2 refers to the Chernigov segment, the northeastern end of fluid f12 refers to the Donbas segment. The earthquakes of the region in question additionally confirm its division into the Chernigov, Lokhvitsa, Izyum and Donets segments.

An analysis is made of the change in the velocity gradient with depth for a given region, which allows to determine the seismic boundaries of the mantle (the inflection points of the gradients of the velocity curves correspond to the velocity boundaries). Based on them, the depth of the main geodynamic boundary of the mantle (the bottom of the transition zone of the upper mantle) is identified. Under the Lokhvitsa, Izyum and Donets

segments of the Dnieper-Donets Depression, it is defined as 625 km. A depth of 575 km is characterized by a large part of the Chernigov segment and the northwestern part of the Izyum segment, corresponding to the Kursk-Belgorod fluid. Such a depth of the main geodynamic boundary of the mantle corresponds to degassing processes. Changing the velocity gradients with depth once again draws attention to the division of the studied area into two parts. In the eastern part, to which the Izyum and Donets segments belong, a zone of subcrustal waveguides stands out. For the Chernigov and Lohvitsa segments, subcrustal waveguides are not distinguished, with the exception of the extreme northeast of the Lohvitsa segment, where the Kursk-Belgorod fluid region extends. The explanation of the observed structure of the eastern part of the upper mantle (Izyum and Donets segments) is based on the assumption that the formation of waveguides in it is associated with an uneven rise to the surface of super deep fluids.

Key words: three-dimensional *P*-velocity model, mantle, Dnieper-Donets depression, main geodynamic boundary, super deep fluids.

References

- Bogatikov, O. A., Kovalenko, V. I., & Sharkov, E. V. (2010). *Magmatism. Tectonics. Geodynamics of the Earth*. Moscow: Nauka, 607 p. (in Russian).
- Burakhovich, T. K., Kushnir, A. N., & Ilyenko, V. A. (2018). Geoelectric studies of the oil and gas bearing area on the southern slope of the central Dnieper-Donets Basin part. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(5), 172—190. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147479> (in Russian).
- Gufeld, I. L. (2007). *Seismic process. Physico-chemical aspects. Scientific publication*. Korolev: TS-NIIMash, 160 p. (in Russian).
- Evseev, M. N. (2012). *Interaction of mantle plumes with the lithosphere*. Retrieved from http://tph_2012.ifz.ru/Tez/050_Evseev.pdf (in Russian).
- Zharkov, V. N. (1983). *Internal structure of the Earth and planets*. Moscow: Nauka, 416 p. (in Russian).
- Karakin, A. V., Kuryanov, Yu. A., & Pavlenkova, N. I. (2003). *Faults, fractured zones and waveguides in the upper layers of the earth's shell*. Moscow: State Scientific Center of the Russian Federation - VNIIGeosystem, 222 p. (in Russian).
- Kushnir, A. N., & Burakhovich, T. K. (2016). The results of electromagnetic studies of the Bragin-Loev ledge and the Chernihiv block of the DDD. *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(3), 128—137. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107785> (in Russian).
- Kushnir, A. N., Burakhovich, T. K., Shyrkov, B. I., & Dzhaoshvili, V. B. (2017). Electromagnetic studies of the northern slope of the central part of the Ukrainian Shield. *Dopovidi NAN Ukrainy*, (10), 60—69. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.10.060> (in Russian).
- Lobkovsky, L. I., Nikishin, A. M., Khain, V. E. (2004). *Current problems of geotectonics and geodynamics*. Moscow: Nauchnyy Mir, 612 p. (in Russian).
- Pavlenkova, N. I. (2001). The structure of the earth's crust and upper mantle and the mechanism of the movement of deep matter. *Vestnik OGGGN RAN*, 19(4), 1—18 (in Russian).
- Rodkin, M. V., & Rundkvist, D. V. (2017). *Geofluidogeodynamics, application to seismology, tectonics, ore and oil processes*. Dolgoprudny: Intellect, 287 p. (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 Dniepr-Donets basin lithosphere. *Dopovidi NAN Ukrainy*, (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. Deep structure. *Geodynamika*, 22(1), 125—138. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.125> (in Russian).
- Shirkov, B. I., Hischyuk, O. V., & Kushnir, A. M. (2015). Geoelectric studies of the Belgorod-Sumy megablock of the northern slope of the Dnieper-Donets Trough. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(5), 176—182. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111163> (in Ukrainian).
- Tsvetkova, T. A., & Bugaenko, I. V. (2012). Seismotomography of the mantle under the East European platform: mantle velocity boundaries. *Geofizicheskiy zhurnal*, 34(5), 161—179. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116672> (in Russian).
- Tsvetkova, T. A., & Bugaenko, I. V. (2016). The structure of velocity mantle number of horizons under Phennoscandia according to seismic-tomography data. *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(1), 57—77. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107723> (in Russian).
- Tsvetkova, T. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2019). The main geodynamic border and seismic visualization of plumes under the East European Platform. *Geofizicheskiy zhurnal*, 41(1), 108—136. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158868> (in Russian).
- Tsvetkova, T. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2017). Seismic visualization of plumes and super-deep fluids in mantle under Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal*, 39(4), 42—54. <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506> (in Russian).
- Tsvetkova, T. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2020). Speed structure of the mantle under the Dnieper-Donets depression and its surrounding. Part I. *Geofizicheskiy zhurnal*, 42(2), 71—85 (in Russian).
- Shcipansky, A., & Bogdanova, S. V. (1996). The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets aulocogen. *Tectonophysics*, 268, 109—125. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00227-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00227-2).
- International Seismological Centre. (2019). Retrieved from <http://www.isc.ac.uk>.
- Nataf, H.-C. (2000). Seismic imaging of mantle plumes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, (28), 391—417. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.391>.

Швидкісна будова мантії під Дніпровсько-Донецькою западиною та її оточенням. Ч. II

Т. О. Цветкова, І. В. Бугаєнко, Л. М. Заєць, 2020

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Стаття є продовженням аналізу швидкісної будови мантії під Дніпровсько-Донецькою западиною та її оточенням, до якої віднесено північ Українського щита та південь Воронезького кристалічного масиву (на підставі тривимірної P -швидкісної моделі мантії). Дніпровсько-Донецька западина за геологічними даними складається з 4 сегментів. Згідно із P -швидкісною моделлю, мантія під западиною ділиться на 2 частини: перша відповідає Чернігівському та Лохвицькому сегментам, до другої належать Ізюмський і Донецький сегменти. Виявлено вплив на першу частину Волино-Оршанського, на другу — Північноазовського плюмів.

Виділено надглибинні флюїди, що впливають на характеристику Дніпровсько-Донецької западини. Ізюмському сегменту відповідають південне закінчення Курсько-Білгородського флюїду (флюїд f4) та північні закінчення флюїдів f3 та f12. До Лохвицького сегмента належить північно-західна частина флюїду f3, а також північно-західне закінчення флюїду f2, південно-західне закінчення флюїду f4. Північно-східне закінчення флюїду f2 належить до Чернігівського сегмента, північно-

східна частина флюїду f12 — до Донбаського сегмента. Землетруси на цій ділянці додатково підтверджують розподіл її на Чернігівський, Лохвицький, Ізюмський та Донецький сегменти.

Проведено аналіз зміни градієнта швидкості з глибиною для вказаної ділянки, що дає змогу визначити сейсмічні межі мантиї (точки перегину градієнтів швидкісних кривих відповідають швидкісним межах). На їх підставі виділено глибину залягання головної геодинамічної межі мантиї (підшви перехідної зони верхньої мантиї). Під Лохвицьким, Ізюмським та Донецьким сегментами Дніпровсько-Донецької западини вона визначена як 625 км. Глибиною залягання 575 км характеризується більша частина Чернігівського сегмента та північно-західна частина — Ізюмського, що відповідає Курсько-Білгородському флюїду. Така глибина залягання головної геодинамічної межі мантиї відповідає процесам дегазації. Зміна градієнтів швидкості з глибиною ще раз вказує на поділ досліджуваної ділянки на дві частини. У східній, до якої належать Ізюмський і Донецький сегменти, виділено зону підкорових хвилеводів. Для Чернігівського та Лохвицького сегментів підкорові хвилеводи не виділяються, за винятком крайнього північного сходу Лохвицького сегмента, куди поширюється зона Курсько-Білгородського флюїду. Пояснення структури, що спостерігається, у східній частині верхньої мантиї (Ізюмський і Донецький сегменти) засновано на припущенні, що формування в ній хвилеводів пов'язане з режимом нерівномірного підймання до поверхні надглибинних флюїдів.

Ключові слова: тривимірна P -швидкісна модель, мантия, Дніпровсько-Донецька западина, головна геодинамічна межа, сверхглибинні флюїди.