

Сейсмическая визуализация плюмов и сверхглубинных флюидов в мантии под территорией Украины

© Т. А. Цветкова, И. В. Бугаенко, Л. Н. Заец, 2017

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 25 мая 2017 г.

Згідно з тривимірною P -швидкісною моделлю мантиї під Євразією, отриманою методом тейлорового наближення, проведено сейсмічну візуалізацію прояву мантийних плюмів і надглибинних флюїдних процесів. Як вихідні дані використано часи перших вступів P -хвилі згідно з бюлетенями ISC за період 1964—2006 рр. Зона дослідження визначена в інтервалі ($45\text{—}50^\circ$ пн.ш.) \times ($23\text{—}48^\circ$ сх.д.) до глибини 2500 км, в інтервалі ($51\text{—}55^\circ$ пн.ш.) \times ($23\text{—}48^\circ$ сх.д.) до глибини 1700 км відповідно до використаної системи спостережень і охоплює мантию під Сарматією (у тому числі територією України) та її облямування. Визначено флюїдний домен як зону поширення низькошвидкісних неоднорідностей з нижньої та середньої мантиї у верхню і розтікання по латералі верхнього завершення її центральної частини. Центральну, низькошвидкісну частину флюїдного домену визначено як плюм, тобто флюїдний домен є зоною, пов'язаною зі слідами проходження плюма.

Мантия під територією України зазнає впливу Північноазовського, Волино-Оршанського і Центрально-Чорноморського плюмів та зон їх розтікання (флюїдних доменів). Верхня мантия над центральною частиною як Північноазовського (до глибини 525 км), так і Волино-Оршанського флюїдного домену (до глибини 300 км) є високошвидкісною. З огляду на відсутність проявів виходів центральної зони флюїдного домену з нижньої мантиї та наявність високошвидкісної верхньої мантиї, можна очікувати, що обидві зазначені центральні зони, що пов'язані з проявом плюмів, перебувають на стадії загасання. Центральні зони обох флюїдних доменів належать до зон зчленування тектонічних структур: Північноазовський приурочений до зчленування Хоперського мегаблока Воронежського кристалічного масиву і Донбасу, Волино-Оршанський — до зчленування Курського мегаблока Воронежського кристалічного масиву, Оршанської западини (Волино-Оршанський авлакоген) і північно-західної частини Дніпрово-Донецької западини. У зоні розтікання як Північноазовського, так і Волино-Оршанського флюїдного домену виділено 12 надглибинних флюїдів.

Ключові слова: сейсмічна томографія, Україна, Волино-Оршанський флюїдний домен, Північноазовський флюїдний домен, надглибинні флюїди.

Введение. Согласно существующим в настоящее время представлениям [Добрецов, 2010; Хаин, 2010], новая концепция глобальной геодинамики (тектоника) Земли включает в себя:

а) тектонику плит, определяемую конвекцией в верхней и нижней мантии и взаимодействием астеносферы и литосферы;

б) тектонику плюмов, зарождающихся на границе ядро—мантия и определяющих крупные магматические провинции (LIP), или горячие поля, по определению

Л. П. Зоненшайна и М. И. Кузьмина [Зоненшайн, Кузьмин, 1993];

в) космические факторы, определяющие прежде всего изменения солнечной радиации и вариации климата (циклы Миланковича).

В свою очередь, развитие методов интерпретации геофизических потенциальных полей, сейсмических методов ГСЗ—КМПВ, решения обратных кинематических задач сейсмоки позволило продвигаться в понимании процессов мантийно-

го диапиризма, в том числе на территории Украины, а также получить скоростные модели земной коры и прилегающих верхов мантии вдоль сейсмических профилей. Наиболее полно материалы по мантийному диапиризму на территории Украины представлены в работе Ю. П. Оровецкого [Оровецкий, 1990]. Автором отмечаются области проявления мантийных диапиров транскорвых геофизических аномалий в пределах Украинского щита (УЩ): Подольской (Подольский мегаблок), Кировоградской (Ингульский мегаблок), Волынской (Волынский мегаблок), Приазовской (Приазовский мегаблок). Учитывая возможную связь мантийных диапиров и плюмов, рассмотрим сейсмическую визуализацию плюмовых процессов, имеющих влияние на мантию под территорией Украины.

Методика. Сейсмическая визуализация проявления плюмов и сверхглубинных флюидов в мантии под территорией Украины определяется решением обратной линейаризированной многомерной кинематической задачи сейсмоки (задачи сейсмической томографии). В работе использована трехмерная P -скоростная модель мантии, полученная методом тейлорового приближения, предложенного В. С. Гейко [Гейко, 1997; Геуко, 2004]. Тейлорова аппроксимация трехмерной задачи обращения времен пробега имеет следующие ключевые преимущества [Геуко, 2004] по сравнению с методом классической линейаризации Романова—Лаврентьева [Лаврентьев и др., 1980]:

- 1) дает ощутимый выигрыш в точности приближения нелинейности;
- 2) справедлива при более слабых ограничениях на скорость; тейлорово приближение применимо при наличии в разрезе зон с пониженной скоростью;
- 3) не требует задания референтной скорости как начального приближения;
- 4) является задачей, корректной по Тихонову, вместо существенно некорректной задачи классической линейаризации;
- 5) значительно сокращает размерность задачи численного обращения, поскольку предполагает сканирование поля времен

и обращение годографов-сечений вместо его обращения в целом;

б) в равной мере справедлива для решения как в прямоугольной декартовой системе координат, так и в полярной системе благодаря известному конформному отображению шара на полупространство [Gerver, Markushevich, 1966].

В качестве исходных были использованы данные о временах прихода первых вступлений P -волн, представленные в бюллетенях ISC за 1964—2006 гг. на станции мировой сейсмической сети. Схема плотности использованных исходных данных приведена в работе [Цветкова и др., 2010].

Согласно выполненному тестированию, точность обращения годографов составляет 0,015 км/с. Отметим, что результатом решения задачи сейсмической томографии является модель, оптимальная в пределах принятых физико-математических представлений. Последние включают в себя: аксиоматику, теорию метода, принятую параметризацию среды, численные методы решения задачи, аппроксимирующие методы, графические методы и др.

Модель мантии представляется в виде горизонтальных сечений (в истинных скоростях с шагом 25 км по глубине) и вертикальных сечений с шагом 1° в невязках скорости (δ) относительно обобщенной модели средней скорости:

$$\delta = V_{\text{ист}} - V_{\text{aver}}.$$

Обобщенная модель средняя скорость — глубина $\{V_{\text{min}(z)}, V_{\text{max}(z)}, V_{\text{aver}(z)}\}$ представлена до глубины 2500 км в статье [Бугаенко и др., 2008]. Сравнение этой модели и глобальных одномерных референтных моделей приведено в работе [Геуко, 2004]. На рис. 1 показано соотношение обобщенная средняя скорость — глубина. Сечение изолиний невязок скорости (δ) составляет 0,025 км/с.

Трехмерная P -скоростная модель мантии под Восточно-Европейской платформой (в том числе под территорией Украины), а именно верхняя мантия и ее переходная зона, представлена в работах [Гейко и др., 2005, 2006; Шумлянская и др.,

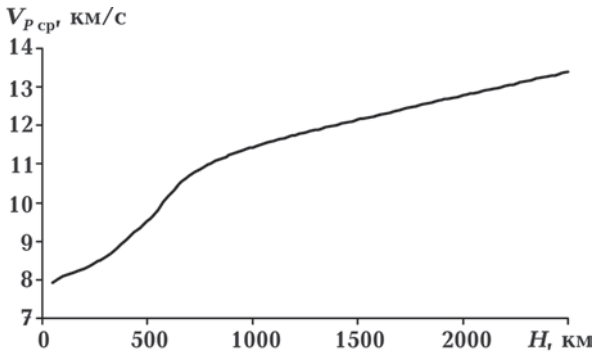


Рис. 1. Обобщенная модель средняя скорость — глубина.

2007, 2014; Шумлянская, 2008; Цветкова, Бугаенко, 2012; Старостенко и др., 2014; Цветкова и др., 2016]. Для мантии под Фенноскандией плюмы и сверхглубинные системы флюидов рассмотрены в публикациях [Цветкова и др., 2015а,б].

Восточно-Европейская платформа делится на три части: Фенноскандию, Волго-Уралию и Сарматию [Shchipansky, Bogdanova, 1996]. Границей между Фенноскандией и Сарматией служит Вольно-Оршанский авлакоген, а между Волго-Уралией и Сарматией — Пачелмский авлакоген (рис. 2). В данной статье рассматривается трехмерная *P*-скоростная модель

мантии в пределах (45—55° с.ш.)×(23—48° в.д.), включающая область Сарматии (в том числе УЩ) и ее окружение. Используемые данные позволяют осветить скоростное строение мантии в интервале 45—50° с.ш. на глубинах до 2500 км и далее на север — до 1700 км.

По скоростным характеристикам мантия под Сарматией относится к мантии по стабильному типу Ю. М. и Д. Ю. Пуцаровских [Пуцаровский, Пуцаровский, 2010]. Следовательно, относительно принятой референтной модели верхняя мантия (граница М — 410 км) характеризуется повышенными скоростями V_p , зона Голицына—Гейко (ЗГГ) — скоростная характеристика переходной зоны верхней мантии (410—650 км) — пониженными скоростями, зона раздела-1 (650—850 км) — повышенными скоростями, средняя мантия (850—1700 км) — пониженными скоростями, зона раздела-2 (1700—2200 км) — повышенными скоростями, нижняя мантия (2200—2900 км) — пониженными скоростями. Границы между верхней мантией, ЗГГ, зоной раздела-1, средней мантией, зоной раздела-2 и нижней мантией определяются нулевой изолинией невязок скорости δ в связи с

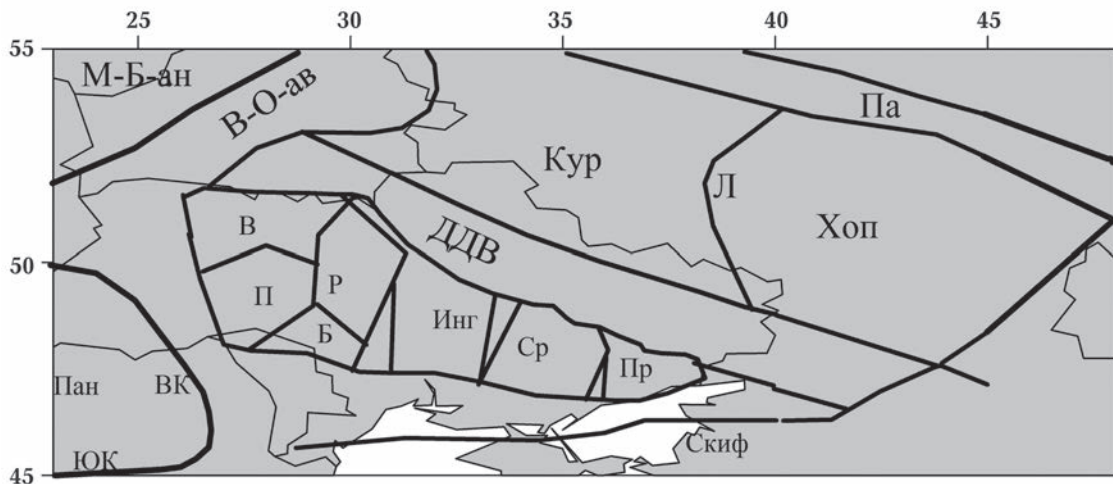


Рис. 2. Упрощенная схема тектонического районирования по В. Е. Хаину [Хаин, 2001] и О. Б. Гинтову [Гинтов, 2005]). Структуры: Б — Бугский мегаблок УЩ, В — Вольнский мегаблок УЩ, ВК — Восточные Карпаты, В-О-ав — Вольно-Оршанский авлакоген, ДДВ — Днепровско-Донецкая впадина, Инг — Ингульский мегаблок УЩ, Кур — Курский мегаблок ВКМ, Л — Лосевская шовная зона, М-Б-ан — Мазуро-Белорусская антиклизма, 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, Хоп — Хоперский мегаблок ВКМ, ЮК — Южные Карпаты.

чередованием повышения и понижения последних.

Согласно данным работы [Богатиков и др., 2010], под мантийными плюмами понимают струи разогретого мантийного вещества, которые поднимаются из различных глубин до уровня своей плавучести, где их головные части начинают растекаться.

По Ф. А. Летникову, флюид — существенно водная, водно-газовая, паровая или газовая среда, состоящая из компонент флюида в соединении с петрогенными, рудными и иными элементами. Сверхглубинный высокоэнергетический флюид [Летников, 1999] связан с понятием плюмов, отделяющихся от земного ядра. Согласно Ф. А. Летникову, «сформировалось представление о том, что в геологической истории Земли от жидкого ядра Земли неоднократно отделялись мощные газовые потоки, которые со временем достигали верхних горизонтов литосферы, включая и земную кору. Эти восходящие потоки флюидов, в которых преобладают газы и летучие компоненты широкого круга элементов, получили название плюмов».

В скоростных разрезах плюмы проявляются как низкоскоростные аномалии, распространяющиеся, возможно, от границы ядро—мантия до коры. Сверхглубинным

флюидным процессам соответствует чередование субвертикально расположенных повышенных и пониженных аномалий скорости, возможно, начиная от нижней мантии.

В мантии под Сарматией выделяются области, основной особенностью которых является распространение низкоскоростных неоднородностей из средней мантии через зону раздела-1 в ЗГГ. Как следствие этого, отмечается специфика скоростной расслоенности верхней мантии и ЗГГ. В работах [Добрецов и др., 2001; Nataf, 2000] распространение пониженных скоростей из нижней и средней мантии в верхнюю, возможное вплоть до коры, связывается с сейсмическим проявлением плюмовых процессов. Субвертикальные скоростные колонки чередующихся повышенных и пониженных аномалий скорости распространения сейсмических волн связываются с сейсмическим проявлением сверхглубинных флюидов [Гуфельд, 2007].

Геофизические признаки плюмовых процессов определяются характерными особенностями, а именно более глубоким залеганием границы М (более 45 км), положительными гравитационными аномалиями и повышенным тепловым потоком, низкоскоростной областью, распространяю-

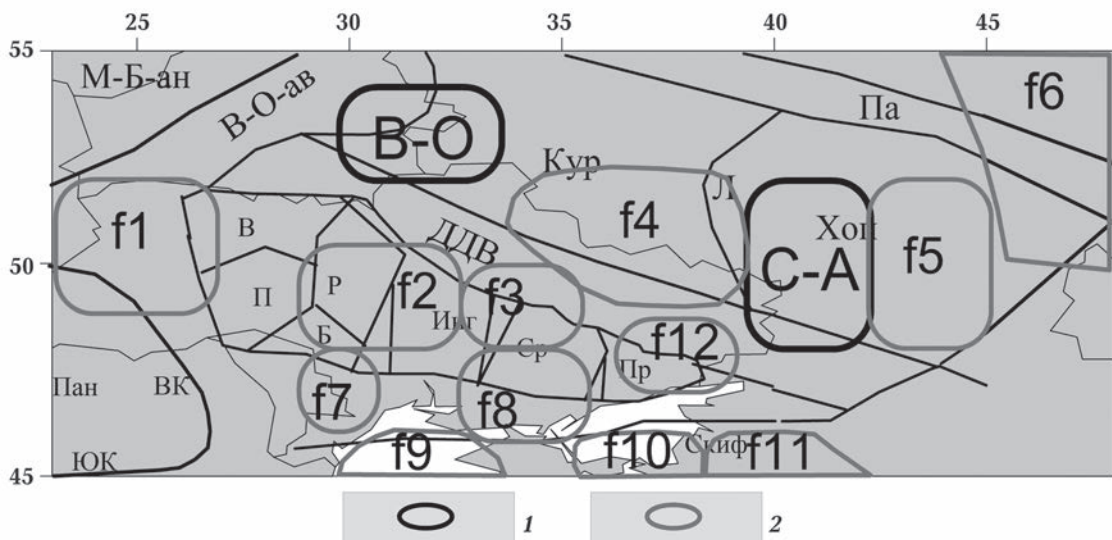


Рис. 3. Центральные части флюидных доменов (1) и сверхглубинные флюиды (2) исследуемой территории: В-О — Вольно-Оршанский ФД, С-А — Северо-Азовский ФД, f1—f12 — сверхглубинные флюиды.

щейся от нижней мантии вверх [Богатиков и др., 2010]. Определим *флюидный домен* (ФД) как область выходов низкоскоростных неоднородностей из нижней и средней мантии в верхнюю, возможно, вплоть до коры (центральная часть) включительно, и растекания по латерали вершин их центральной части. Центральная, низкоскоростная, часть ФД определяется как плюм. Отсюда ФД — это область, связанная со следами прохождения плюмов. В то же время следует отметить, что возможна локализация подошвы плюма в любой из геосфер мантии при общем распространении низкоскоростной неоднородности вверх. Границы области растекания определяются изменением скоростной структуры: переходом к области с повышенными скоростями или в низкоскоростную среднюю мантию. В данной статье с учетом трехмерности скоростной модели мантии рассмотрены растекания в направлениях юг—север и восток—запад для исследуемых глубин.

Отметим, что, согласно модельным исследованиям, время существования докембрийских плюмов (флюидов) [Добрецов, 2010] составляет 120 млн лет, активное время существования плюма — предположительно 25 млн лет [Добрецов, 2010; Фурман, 2010]. Затухание плюмового процесса связывается с исчезновением нижней части (ножки) в нижней и средней мантии, предположительно после 34 млн лет [Фурман, 2010]. Время существования фанерозойских (в том числе современных) плюмов — 32 млн лет [Добрецов, 2010; Фурман, 2010]. Глобальные (но иногда с локальным усилением) циклы, связанные с периодичностью плюмов, кратной 30 млн лет, составляют 30, 60, 90 и 120 млн лет [Добрецов, 2010].

Исходя из этого, данные сейсмической томографии представляют сейсмическую визуализацию следов распространения наиболее молодых плюмов.

Результаты. Таким образом, на скоростных сечениях трехмерной *P*-скоростной модели мантии территории Сарматии визуализируются, как минимум две разновидности скоростных неоднородностей,

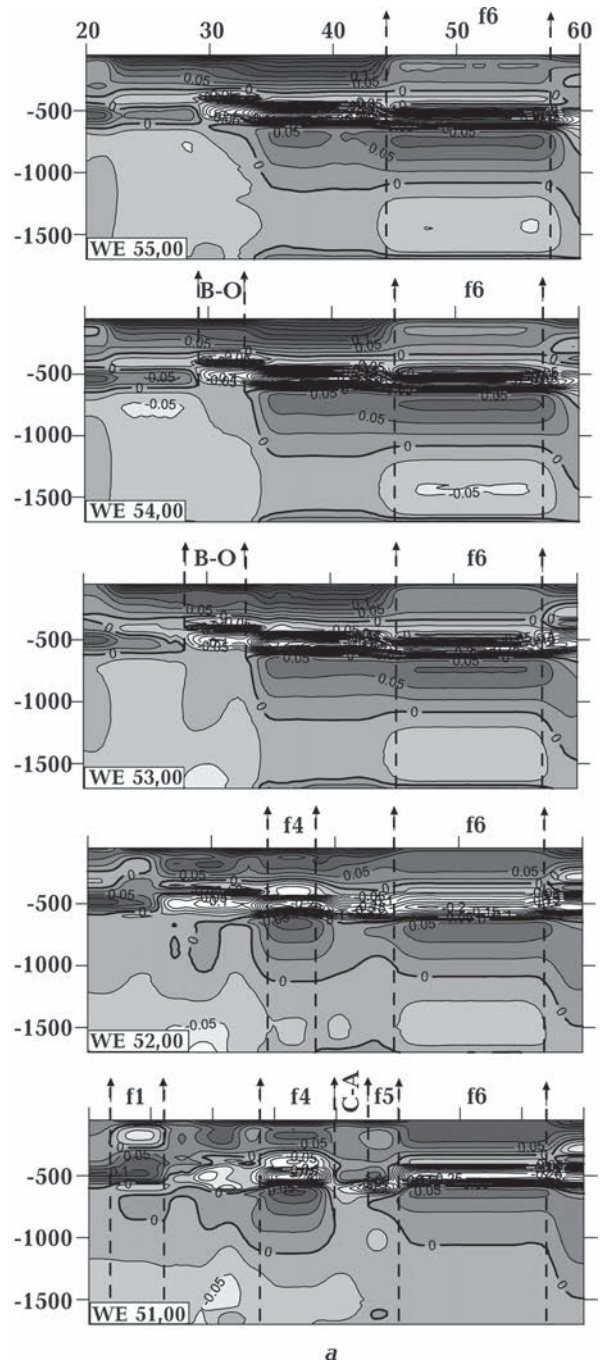
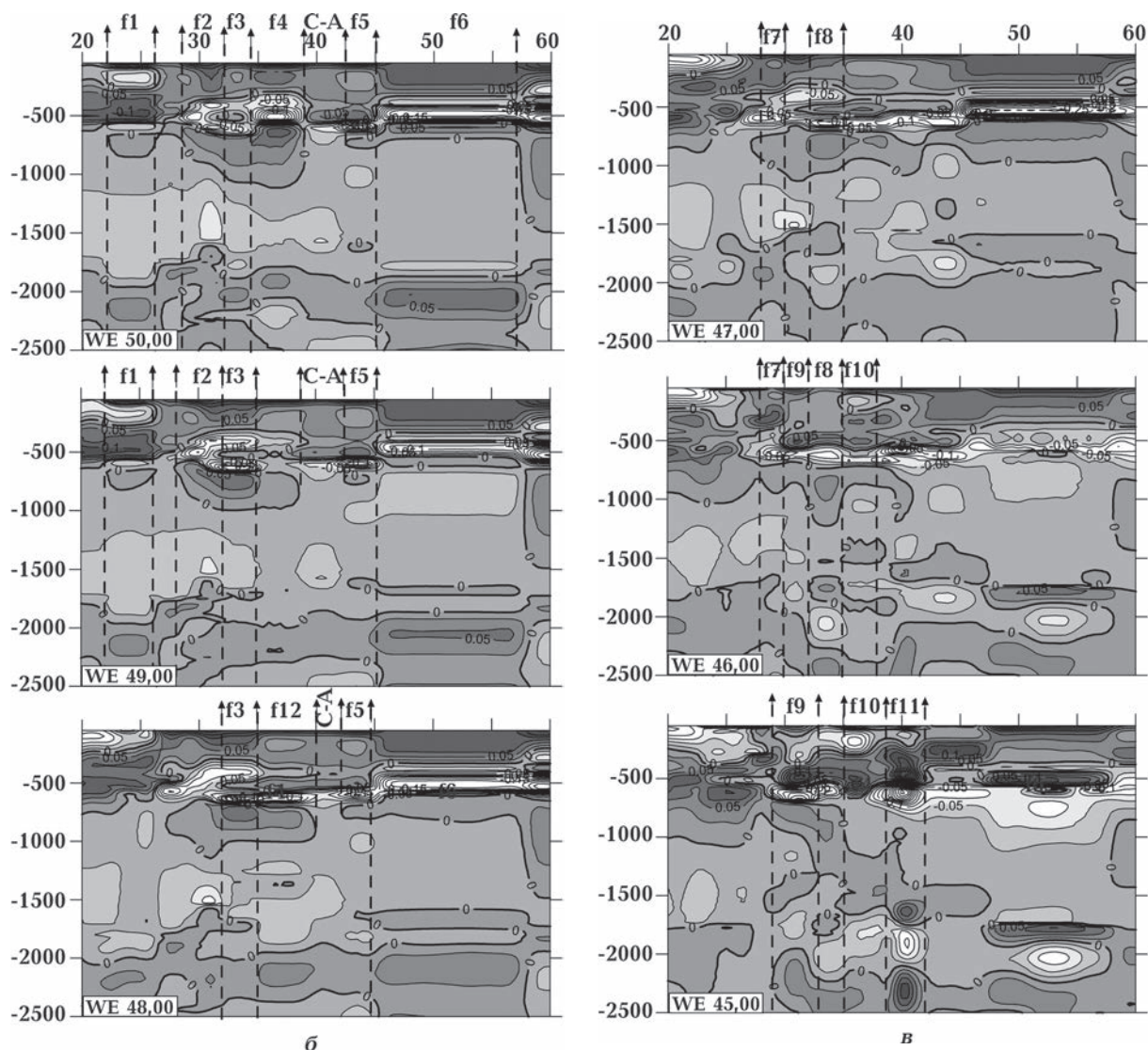


Рис. 4. Широтные вертикальные сечения трехмерной *P*-скоростной модели мантии исследуемой территории. Координаты: а — 55—51° с.ш., б — 50—48° с.ш., в — 47—45° с.ш.; сокращения: В-О — центральная часть Вольно-Оршанского ФД, С-А — центральная часть Северо-Азовского ФД, f1—f12 — сверхглубинные флюиды исследуемой территории (см. рис. 3—5).

связанных с плюмовыми процессами, — флюидные домены, центральные области которых являются собственно плюмами,



Продолжение рис. 4.

и сверхглубинные флюиды (f), представленные субвертикальными скоростными колонками чередующихся повышенных и пониженных аномалий скорости. Плановое положение этих мантийных структур показано на рис. 3.

Для рассматриваемого региона характерны следующие флюидные домены: Северо-Азовский, Вольно-Оршанский, Центрально-Черноморский. Их центральным частям (областям плюмов) соответствуют координаты: Северо-Азовский ФД — (39—42° в.д.)×(48—52° с.ш.); Вольно-Оршанский ФД — (29—33° в.д.)×(53—54° с.ш.). Центрально-Черноморский плюм, расположенный к югу от территории Украины (34—

35° в.д.; 42—45° с.ш.), представлен в работах [Бугаенко и др., 2008; Гинтов и др., 2016], поэтому здесь не рассматривается.

Северо-Азовский ФД. Центральная часть домена относится к мантии под Сарматией, а именно к сочленению мантии под Днепровско-Донецкой впадиной (ДДВ) (Донбассом) и Хоперским мегаблоком Воронежского кристаллического массива (рис. 3, 4, 5). Выход низкоскоростной средней мантии через зону раздела-1 и переходную зону фиксируется на глубине 525 км (рис. 4, а, сечение 51°; рис. 5, б, сечения 48—50°). Отмечается отсутствие низкоскоростных выходов из нижней мантии и зоны раздела-2, что, как было пред-

ставлено выше, предполагает затухание плюма. В то же время наблюдаются низкоскоростные аномалии в средней мантии, в области «выхода» плюма.

Широтному сечению 50° с.ш. (рис. 4, б) центральной части Северо-Азовского ФД, соответствуют следующие скоростные характеристики: скоростная расслоенность высокоскоростной верхней мантии — сгущение изолиний невязок скорости (до $0,075$ км/с) в более высокоскоростном слое на глубине 50 — 100 км; наличие более высокоскоростного слоя ($0,025$ — $0,05$ км/с) на глубинах 475 — 525 км. Необходимо отметить существенно увеличенную мощность высокоскоростной верхней мантии до глубины 525 км. В средней и нижней мантии в центральной области плюма выделяются низкоскоростные аномалии ($-0,025$ км/с).

На остальных широтных сечениях, которые проходят через центральную часть Северо-Азовского ФД, сохраняется аналогичная скоростная характеристика мантии с незначительными изменениями конфигурации изолиний (рис. 4, а, б).

Согласно приведенному выше определению области растекания, восточная область растекания Северо-Азовского ФД распространяется на широтных сечениях мантии от центральной части ФД на восток до окончания Прикаспийской впадины (58° в.д.). Для сечения 52° с.ш. области растекания соответствует мантия под южным окончанием Волго-Уралии (Жигулевско-Оренбургским массивом и Восточно-Жигулевской проекцией), что выходит за пределы рассматриваемой области исследования. Залегание кровли переходной зоны в обоих случаях определено на глубине 325 км, подошва в первом случае — на глубинах 550 — 575 , во втором — 625 км.

Западная область растекания Северо-Азовского ФД определена по кровле переходной зоны на глубине 300 км и заканчивается выходом ее через зону раздела-1 в среднюю мантию (26° в.д.). На сечениях 48 — 51° с.ш. указанная область ограничена высокоскоростным наклонным слоем, который распространяется начиная с глу-

бины 50 км от мантии под Подольским мегаблоком УЩ. Для сечения 52° с.ш. начало наклонного слоя определено на глубине 300 км, его завершение — на глубине 575 км в переходной зоне верхней мантии под Припятской впадиной.

Долготные сечения (см. рис. 5, 40° в.д.) соответствуют основным приведенным скоростным характеристикам широтных сечений ФД.

Северная область растекания Северо-Азовского ФД ограничивается мантией под Хоперским мегаблоком (Варваринский блок) Воронежского кристаллического массива (ВКМ) (55° с.ш.). Южная область растекания включает в себя мантию под Скифской плитой (45° с.ш.) и простирается далее до мантии под Рионской впадиной, которая находится за пределами области рассмотрения.

Волыно-Оршанский ФД. Центральная часть домена относится к сочленению мантии под Курским мегаблоком ВКМ, Оршанской впадиной (Волыно-Оршанский авлакоген) и северо-западной частью ДДВ (см. рис. 3, 4, а, в, 5). Используемая система наблюдений позволяет охарактеризовать распределение скорости в рассматриваемой области до глубины 1700 км. Выход низкоскоростной средней мантии через зону раздела-1 в переходную зону определяется на глубине 650 км.

Широтному сечению 53° с.ш. (рис. 4, а), проходящему через центральную часть домена, соответствуют следующие основные скоростные характеристики: подошва высокоскоростной верхней мантии определена на глубине 300 км; на глубине 50 — 125 км наблюдается сгущение изолиний невязок скорости, изменяющихся в интервале $0,1$ — $0,2$ км/с. Начиная с глубины 300 км и до 1700 км общей характеристикой мантии являются низкие скорости. В центральной части ФД низкоскоростной слой на глубине 300 — 650 км разделен на три части: на глубине 375 — 425 км выделяется высокоскоростная линза с невязками до $0,1$ км/с; верхняя часть слоя характеризуется значением невязки скорости до $-0,05$ км/с; нижняя часть — до $-0,125$ км/с.

Аналогичная трехслойность характерна для плюмов Фенноскандинавского щита [Цветкова и др., 2015а,б].

Для широт 53—54° с.ш. восточные области растекания Вольно-Оршанского ФД связаны с мантией под ВКМ (до Лосевской шовной зоны), западные области растекания — с мантией под Вольно-Оршанским авлакогеном и Мазуро-Белорусской антеклизой (до 15° в.д.). Для широты 52° с.ш. западная часть ФД охватывает Припятскую впадину и ограничена мантией под Подляско-Брестской впадиной.

Долготные сечения (см. рис. 5, 31° в.д.) соответствуют основным приведенным скоростным характеристикам широтных сечений ФД.

Долготные области растекания ограничены мантией под Оршанской впадиной на северном направлении (до 60° с.ш.). На южном направлении, для долгот 28—30° в.д., область растекания ограничена мантией под Северной Добруджей, для долгот 31—33° в.д. — северо-западным шельфом Черного моря (Каркинитский грабен). Следует отметить, что для последних сечений область растекания ограничена наклонным высокоскоростным слоем, распространяющемся от мантии под Сарматией до мантии под прогибом Сорокина, что выходит за пределы исследуемой территории.

Сверхглубинные флюиды. Наряду с выделенными плюмами для рассматриваемой территории выделяются субвертикальные колонки, характеризующиеся чередованием пониженных и повышенных аномалий скорости, представляющие проявление сверхглубинных флюидов. Для исследуемой территории выделяется 12 сверхглубинных флюидов, нумерация которых показана на рис. 3—5.

Флюид 1, 50° с.ш. (см. рис. 4, б): в верхней мантии высокоскоростная аномалия (невязки скорости более 0,1 км/с) на глубине 50—100 км и низкоскоростная (более -0,05 км/с) до глубины 280 км, в высокоскоростной переходной зоне аномалии до 0,1 км/с. Выделяется низкоскоростная аномалия более 0,025 км/с на глубине 550—

650 км и высокоскоростная до глубины 850 км, а также высокоскоростная аномалия (более 0,025 км/с) в зоне раздела-2.

Флюид 2, 49° с.ш. (см. рис. 4, б): области определения соответствует часть наклонного слоя, распространяющегося от ВКМ до Скифской плиты, между высокоскоростной верхней мантией (ступение изолиний на глубинах 50—100 км, значение невязок скорости 0,15 км/с) и низкоскоростной переходной зоной (более -0,15 км/с). Выделяется высокоскоростная зона раздела-1 (более 0,05 км/с), более низкоскоростная (более -0,05 км/с) аномалия в средней мантии на глубине 1400—1550 км и аномалии в зоне раздела-2 и нижней мантии.

Флюид 3, 49° с.ш. (см. рис. 4, б): высокоскоростная верхняя мантия до глубины 300 км. В низкоскоростной переходной зоне верхней мантии до глубины 675 км определяется высокоскоростная линза на глубине 500—550 км. Выделяется высокоскоростная зона раздела-1 (более 0,05 км/с) и высокоскоростная аномалия (до 0,025 км/с) на глубине 1700—1775 км в низкоскоростной средней мантии.

Флюид 4, 50° с.ш. (см. рис. 4, б): в высокоскоростной верхней мантии до 300 км выделяется более высокоскоростная область на глубине 50—100 км (более 0,175 км/с). Низкоскоростная до 580 км переходная зона верхней мантии характеризуется двумя аномалиями с максимумами до -0,075 км/с на глубине 400 км и -0,2 км/с на 500 км. Высокоскоростная до 1600 км зона раздела-1 содержит аномалию со значением невязки скорости до 0,075 км/с на глубине 600—700 км. Также выделяется аномалия в высокоскоростной зоне раздела-2 на глубине 1850—1975 км.

Флюид 5, 50° с.ш. (см. рис. 4, б): в высокоскоростной верхней мантии на глубине 50—100 км выделяется более высокоскоростная аномалия (более 0,175 км/с) и менее высокоскоростная (меньше 0,025 км/с) на глубине 120—300 км. В переходной зоне верхней мантии высокоскоростная аномалия (более 0,05 км/с) на глубине 450—550 км и низкоскоростная (более -0,15 км/с) на глубине до 700 км. В низко-

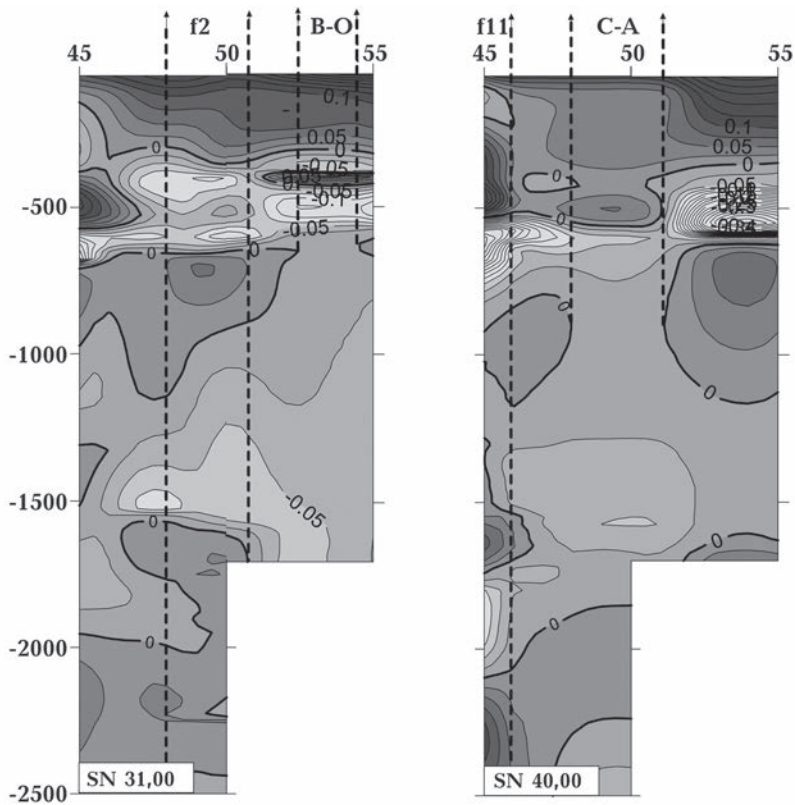


Рис. 5. Долготные вертикальные сечения трехмерной P -скоростной модели мантии исследуемой территории, пересекающие центральную часть Вольно-Оршанского (31° в.д.) и Северо-Азовского (40° в.д.) ФД. Условные обозначения те же, что и на рис. 4.

скоростной средней мантии прослеживается более низкоскоростная аномалия (меньше $-0,05$ км/с) на глубине 420—500 км и высокоскоростная (до $0,025$ км/с) на глубине 1580—1650 км.

Флюид 6, 52° с.ш. (см. рис. 4, а): высокоскоростная верхняя мантия (более $0,075$ км/с) до глубины 330 км, сильно низкоскоростная переходная зона (более $-0,2$ км/с) и высокоскоростная зона раздела-1 со значением невязки скорости более $0,05$ км/с. В низкоскоростной средней мантии определена низкоскоростная аномалия (более $-0,25$ км/с) на глубине 1300—1630 км.

Флюид 7, 47° с.ш. (см. рис. 4, в): в высокоскоростной верхней мантии на глубине 100—175 км выделяется менее высокоскоростная область (меньше $0,025$ км/с). Переходная зона низкоскоростная, зона раздела-1 — высокоскоростная. Выделяется более низкоскоростная аномалия (более

$-0,05$ км/с) на глубине 1400—1550 км в низкоскоростной средней мантии и более высокоскоростная (более $0,025$ км/с) на глубине 1875—2000 км в высокоскоростной зоне раздела-2.

Флюид 8, 47° с.ш. (см. рис. 4, в): высокоскоростная верхняя мантия до глубины 300 км, в низкоскоростной переходной зоне присутствует высокоскоростная аномалия на глубине 500—550 км. В высокоскоростной зоне раздела-1 отмечается более высокоскоростная аномалия (более $0,025$ км/с). Также выделяются аномалии в средней мантии и зоне раздела-2.

Флюид 9, 45° с.ш. (см. рис. 4, в): верхняя мантия до 125 км является высокоскоростной (более $0,05$ км/с), до 380 км — низкоскоростной (более $-0,05$ км/с). Переходная зона до 580 км высокоскоростная (более $0,15$ км/с), до 700 км — низкоскоростная (более $-0,2$ км/с). В средней мантии, зоне раздела-2 и нижней мантии также наблю-

дается чередование аномалий.

Флюид 10, 47° с.ш. (см. рис. 4, в): до 75 км верхняя мантия высокоскоростная, до 300 км — низкоскоростная (невязки скорости более $-0,1$ км/с). Переходная зона высокоскоростная до 675 км (более $0,125$ км/с), зона раздела-1 — низкоскоростная. В низкоскоростной зоне раздела-2 присутствует более низкоскоростная аномалия (менее $-0,05$ км/с) на глубине 1250—1350 км.

Флюид 11, 47° с.ш. (см. рис. 4, в): характеризуется наиболее контрастным чередованием скоростных аномалий на всем протяжении глубин исследуемой территории, особенно в нижней части средней мантии, зоне раздела-2 и нижней мантии.

Флюид 12, 48° с.ш. (см. рис. 4, б): в высокоскоростной верхней мантии до глубины 380 км выделяется менее высокоскоростная аномалия (менее $0,025$ км/с) на глубине 125—225 км. Переходная зона является низкоскоростной до глубины 700 км с высокоскоростной линзой на глубине 450—560 км. В низкоскоростной средней мантии присутствуют две более низкоскоростные аномалии (более $-0,025$ км/с) на глубине 1175—1290 и 1500—1880 км. В высокоскоростной зоне раздела-2 определена более высокоскоростная аномалия на глубине 2030—2240 км.

Как отмечалось выше, плюмовым и сверхглубинным флюидным процессам кроме сейсмической визуализации должны соответствовать повышенный тепловой поток и повышенная гравитационная аномалия. Сложность этих связей в общем случае определяется нелинейностью и глубиной рассматриваемых мантийных

процессов. Как правило, построены карты для указанных полей на уровне земной поверхности (тепловое поле) или уровне моря (аномалии Буге и Фая). На карте теплового потока на уровне земной поверхности [Geothermal..., 1981] и на карте гравитационных мантийных аномалий [Кабан, 2001] отмечается выполнение указанных выше требований.

Выводы. Приведенные данные позволяют заключить следующее.

1. Мантия под территорией Украины находится под влиянием Северо-Азовского, Вольно-Оршанского и Центрально-Черноморского ФД и областей их растекания.

2. Верхняя мантия как над Северо-Азовским ФД (до глубины 525 км), так и над Вольно-Оршанским ФД (до глубины 300 км) высокоскоростная.

3. В рассматриваемом случае с учетом отсутствия проявлений выходов центральной области ФД из нижней мантии и наличия высокоскоростной верхней мантии можно ожидать, что обе указанные центральные области, связанные с проявлением плюмов, находятся на стадии затухания.

4. Как Северо-Азовский, так и Вольно-Оршанский ФД (центральные области) относятся к областям сочленения тектонических структур. Северо-Азовский ФД приурочен к сочленению Хоперского мегаблока ВКМ и Донбасса; Вольно-Оршанский — Курского мегаблока ВКМ, Оршанской впадины (Вольно-Оршанский авлакоген) и северо-западной части ДДВ.

5. В области растекания как Северо-Азовского, так и Вольно-Оршанского ФД выделяются 12 сверхглубинных флюидов.

Список литературы

- Богатиков О. А., Коваленко В. И., Шарков Е. В. Магматизм. Тектоника. Геодинамика Земли. Москва: Наука, 2010. 607 с.
- Бугаенко И. В., Шумлянская Л. А., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. Трехмерная Р-скоростная модель мантии Черного моря и прилегающей территории. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 5. С. 145—160.
- 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 3-D Р-скоростная модель мантии Сарматии (юго-запад Восточно-Европейской платформы). *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 6. С. 27—39.
- Гейко В. С., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. Трехмерная модель

- верхней мантии Украины по временам прихода Р-волн. *Геофиз. журн* 2006. Т. 28. № 1. С. 3—16.
- Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформации земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 568 с.
- Гинтов О. Б., Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Муровская А. В. Некоторые особенности строения мантии Восточного Средиземноморья и их геодинамическая интерпретация. *Геофиз. журн*. 2016. Т. 38. № 1. С. 17—29.
- Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Добрецов Н. Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели Земли. *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 6. С. 761—784.
- Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. 405 с.
- Зоненшайн Л. П., Кузьмин М. И. Палеогеодинамика. Москва: Наука, 1993. 192 с.
- Кабан М. К. Гравитационная модель коры и верхней мантии Северной Евразии. Мантийные и изостатические аномалии силы тяжести. *Российский журнал наук о Земле*. 2001. Т. 3. № 2. http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v03/v03con_r.htm#no2.
- Лаврентьев М. М., Романов В. Г., Шишатский С. П. Некоторые проблемы математической физики и анализа. Москва: Наука, 1980. 286 с.
- Летников Ф. А. Флюидные фации континентальной среды и проблемы рудообразования. Смирновский сборник. Москва: Изд-во МГУ, 1999. С. 63—95.
- Оронецкий Ю. П. Мантийный диапиризм. Киев: Наук. думка, 1990. 172 с.
- Пуцаровский Ю. М., Пуцаровский Д. Ю. Геология мантии Земли. Москва: Геос, 2010. 138 с.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е., Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А. Геофлюиды и современное проявление активизации Ингульского мегаблока Украинского щита. *Геофиз. журн*. 2014. Т. 36. № 5. С. 3—25.
- Фурман В. Теплоперенесення і теплова дифузія в плині конвективних мантийних плюмів Землі. *Вісник Львів. ун-ту. Сер. геолог.* 2010. Вип. 24. С. 35—49.
- Хаин В. Е. Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли. *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 6. С. 753—760.
- 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—172.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Скоростная делимость мантии под Украинским щитом. *Геофиз. журн*. 2016. Т. 38. № 4. С. 75—87.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Структура низкоскоростных областей в мантии северной Европы. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2015а. № 7. С. 106—126.
- Цветкова Т., Бугаенко И., Заец Л. Трехмерная Р-скоростная модель мантии Фенноскандии. Saarbrücken (Deutschland): LAP LAMBERT Academic Publ., 2015b. 138 с.
- Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской и Баренцево-Печорской платформ: трехмерная Р-скоростная модель мантии под Волго-Уралией, Прикаспийской впадиной и Баренцево-Печорской платформой. *Геофиз. журн*. 2010. Т. 32. № 5. С. 35—50.
- Шумлянская Л. А. Мантийные блоки и зоны повышенной проницаемости мантии Украинского щита. *Геофиз. журн*. 2008. Т. 30. № 2. С. 135—144.
- Шумлянская Л. А., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. Трехмерная скоростная структура мантии территории Украины и нефтегазоносность. *Геофиз. журн*. 2007. Т. 29. № 1. С. 122—131.
- 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.
- Gervert M., Markushevich V., 1966. Determination of a seismic wave velocity from the travel-time curve. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 11, 165—173.
- Gejko V. S., 2004. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофиз. журн* 26(2), 3—32.
- Geothermal atlas of Europe, 1981. Ed. Hurtig. Potsdam: Hermann Haack Verlagsgesellschaft mbH Gotha.
- Nataf H.-C., 2000. Seismic imaging of mantle plumes. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 28, 391—417. doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.391.
- Shchipansky A., Bogdanova S. V., 1996. The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets aulacogen. *Tectonophysics* 268(1-4), 109—125.

Seismic visualization of plumes and super-deep fluids in mantle under Ukraine

© T. A. Tsvetkova, I. V. Bugaenko, L. N. Zaets, 2017

According to the Taylor approximation of the three-dimensional P-velocity model of the mantle under Eurasia, a seismic visualization of the manifestation of mantle plumes and super-deep fluid processes was carried out. As initial data, the times of the first arrival of the P-wave were used according to the ISC bulletins for the period 1964—2006. The research area is defined in the interval (45—50° N)×(23—48° E) to the depth of 2500 km, in the interval (51—55° N)×(23—48° E) to the depth of 1700 km according to the used observation system and includes a mantle near Sarmatia (including the territory of Ukraine) and its surroundings. The fluid domain is defined as the region of the yields of low-velocity heterogeneities from the lower, middle mantle to the upper one and spreading along the laterals of their central part. The central, low-velocity part of the fluid domain is defined as a plume. Hence, the fluid domain is an area associated with traces of the passage of plumes.

The mantle under the territory of Ukraine is under the influence of the North-Azov, Volyn-Orsha and Central-Black Sea fluid domains and regions of their spreading. The upper mantle above the central part of the North-Azov fluid domain (to a depth of 525 km) and above the central part of the Volyn-Orsha fluid domain (to a depth of 300 km) is high-velocity one. In the case under consideration, taking into account the absence of manifestations of the outlet of the central region of the fluid domain from the lower mantle and the presence of a high-velocity upper mantle, it can be expected that both of these central regions associated with the manifestation of plumes are in the decay stage. The central regions of both the North-Azov and Volyn-Orsha fluid domains belong to the areas of articulation of tectonic structures. The North Azov fluid domain is confined to the junction of the Koper megablock of the Voronezh Massif and the Donbas, the Volyn-Orsha to the Kursk megablock of the Voronezh Massif, the Orsha Depression (Volyn-Orsha aulakogen) and the north-western part of the Dneprovo-Donets Basin. In the area of spreading of both the North-Azov and Volyn-Orsha fluid domains, 12 super-deep fluids are emitted.

Key words: seismic tomography, Ukraine, Volyn-Orsha fluid domain, North-Azov fluid domain, 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).
- Bugaenko I. V., Shumlyanskaya L. A., Zaets L. N., Tsvetkova T. A., 2008. Three-dimensional P-velocity model of the mantle of the Black Sea and the adjacent territory. *Geofizicheskiy zhurnal* 30(5), 145—160 (in Russian).
- 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 3-D P-velocity model of the Sarmatian mantle (south-west of the East European platform). *Geofizicheskiy zhurnal* 27(6), 27—39 (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 from the times of arrival of P-waves. *Geofizicheskiy zhurnal* 28(1), 3—16 (in Russian).
- Gintov O. B., 2005. Field tectonophysics and its application for the studies of deformations of the Earth's crust of the Ukraine. Kiev: Feniks, 568 p. (in Russian).
- Gintov O. B., Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V., Murovs-kaya A. V., 2016. Some features of the structure of the mantle of the Eastern Mediterranean and their geodynamic interpretation. *Geofizicheskiy zhurnal* 38(1), 17—29 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2007. Seismic process. Physico-chemical aspects. Korolev: TsNIIMash Publ., 160 p. (in Russian).
- Dobretsov N. L., 2010. Global geodynamic evolution of the Earth and global geodynamic models of the Earth. *Geologiya i geofizika* 51(6), 761—784 (in Russian).
- Dobretsov N. L., Kirdyashkin A. G., Kirdyashkin A. A., 2001. Deep geodynamics. Novosibirsk: Publishing house of the RAS «GEO», 405 p. (in Russian).
- Zonenshayn L. P., Kuzmin M. I., 1993. Paleogeodynamics. Moscow: Nauka, 192 p. (in Russian).
- Kaban M. K., 2001. Gravitational model of the crust and

- upper mantle of Northern Eurasia Mantle and isostatic anomalies of gravity. *Rossiyskiy zhurnal nauki o Zemle* 3(2) (in Russian). http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v03/v03con_r.htm#no2.
- Lavrentyev M. M., Romanov V. G., Shishatskiy S. P., 1980. Some problems of mathematical physics and analysis. Moscow: Nauka, 286 p. (in Russian).
- Letnikov F. A., 1999. Fluid facies of the continental environment and ore formation problems. Smirnovsky collection. Moscow: MSU Publ. House, 63—95 (in Russian).
- Orovetskiy Yu. P., 1990. Mantle diapirism. Kiev: Naukova Dumka, 172 p. (in Russian).
- Pushcharovskiy Yu. M., Pushcharovskiy D. Yu., 2010. Geology of the Earth's mantle. Moscow: Geos, 138 p. (in Russian).
- Starostenko V. I., Lukin A. E., Tsvetkova T. A., Shumlyanskaya L. A., 2014. Geofluids and the modern manifestation of the activation of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(5), 3—25 (in Russian).
- Furman V., 2010. Heat transfer and heat diffusion in the plinth of convective Manti plumes. *Visnyk Lvivskogo universyteta. Ser. geologichna* 24, 35—49 (in Ukrainian).
- Khain V. E., 2010. On the basic principles of building a truly global model of the dynamics of the Earth. *Geologiya i geofizika* 51(6), 753—760 (in Russian).
- Khain V. E., 2001. Tectonics of continents and oceans. Moscow: Nauchnyy Mir, 604 p. (in Russian).
- Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V., 2012. Seismotomography of the mantle under the East European platform: mantle velocity boundaries. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(5), 161—172 (in Russian).
- Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N., 2016. Speed divisibility of the mantle under Ukrainian shield. *Geofizicheskiy zhurnal* 38(4), 75—87 (in Russian).
- Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N., 2015a. Structure of low-speed regions in the mantle of northern Europe. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* (7), 106—126 (in Russian).
- Tsvetkova T., Bugaenko I., Zaets L., 2015b. Three-dimensional P-velocity model of the mantle of Fennoscandia. Saarbrücken (Deutschland): LAP LAMBERT Academic Publishing, 138 p. (in Russian).
- Tsvetkova T. A., Shumlyanskaya L. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N., 2010. Seismotomography of the East European and Barents Pechora platforms: a three-dimensional P-velocity model of the mantle near the Volga-Uralia, the Caspian basin and the Barents-Pechora platform. *Geofizicheskiy zhurnal* 32(5), 35—50 (in Russian).
- Shumlyanskaya L. A., 2008. Mantle blocks and areas of increased permeability of the mantle of the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy zhurnal* 30(2), 135—144 (in Russian).
- Shumlyanskaya L. A., Zaets L. N., Tsvetkova T. A., 2007. Three-dimensional high-speed structure of the mantle of the territory of Ukraine and oil and gas content. *Geofizicheskiy zhurnal* 29(1), 122—131 (in Russian).
- Shumlyanskaya L. N., Tripolskiy A. A., Tsvetkova T. A., 2014. Influence of cortical velocity structure on the results of seismic tomography of the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(4), 95—117 (in Russian).
- Gerver M., Markushevich V., 1966. Determination of a seismic wave velocity from the travel-time curve. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 11, 165—173.
- Geyko V. S., 2004. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофиз. журн* 26(2), 3—32.
- Geothermal atlas of Europe, 1981. Ed. Hurtig. Potsdam: Hermann Haack Verlagsgesellschaft mbH Gotha.
- Nataf H.-C., 2000. Seismic imaging of mantle plumes. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 28, 391—417. doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.391.
- Shchipansky A., Bogdanova S. V., 1996. The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets aulacogen. *Tectonophysics* 268(1-4), 109—125.