

Главная геодинамическая граница и сейсмическая визуализация плюмов Восточно-Европейской платформы

Т. А. Цветкова, И. В. Бугаенко, А. Н. Заец, 2019

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

Поступила 1 октября 2018 г.

Згідно з тривимірною P -швидкісною моделлю мантії під Євразією, отриманою методом тейлорового наближення, проведено сейсмічну візуалізацію проявів мантійних плюмів і надглибинних флюїдних процесів Східноєвропейської платформи. Як вихідні дані використано часи перших вступів P -хвилі згідно з бюлетенями ISC за період 1964—2006 рр. Визначено флюїдний домен як зону поширення низькошвидкісних неоднорідностей з нижньої, середньої мантії у верхню та розтікання по латералі верхнього завершення її центральної частини. Центральну, низькошвидкісну, частину флюїдного домену визначено як плюм. На території Східноєвропейської платформи виділено плюми Північноазовський, Волино-Оршанський, Московський, Тіманський, Біломорський, Варангер та Шеллефтео. У зоні розтікання мантійних доменів виявлено 19 надглибинних мантійних флюїдів. За характером поведінки градієнта швидкості з глибиною побудовано головну геодинамічну межу (між верхньою та середньою мантією), що в межах Східноєвропейської платформи залягає на глибині від 525 до 700 км. Згідно з глибиною залягання головної геодинамічної межі Східноєвропейську платформу розділено на Фенноскандію (575 км), Сарматію (виділено дві частини з глибинами 575 і 600—625 км) та Волго-Уралію (625 км). Головну геодинамічну межу Баренцевоморської плити розділено на Східну і Західну (525—550 км). Для цієї межі виявлено зменшення градієнта швидкості (різкості) з півночі на південь від $0,734 \text{ с}^{-1}$ у мантії під архіпелагом Медвежий до середнього значення, в основному $\leq 0,2 \text{ с}^{-1}$, у мантії північніше 55° півн. ш.

Ключові слова: сейсмічна томографія, Східноєвропейська платформа, головна геодинамічна межа, плюми (Волино-Оршанський, Північноазовський, Московський, Тіманський, Біломорський, Варангер, Шеллефтео), надглибинні флюїди.

Введение. Глобальным изменениям мантийной среды по радиусу Земли соответствуют глобальные границы. Такими принято считать границы 410, 520, 670, 2900 км. Наряду с ними выделяются промежуточные границы: 60, 80, 100, 220, 330, 710, 900, 1050, 2640 км [Пушаровский, Пушаровский, 2010]. Промежуточные границы имеют разное пространственное распространение. Согласно Н. В. Шарову [Шаров, 2017], они свидетельствуют о латеральной изменчивости физических свойств мантии.

Одна из первых моделей внутреннего строения Земли К. Буллена [Буллен, 1966] предполагает следующее деление мантии Земли на геосферы: А — земная кора, В — верхняя мантия Земли, С — переходная зона от верхней к нижней мантии, D — нижняя мантия, при этом D' — верхняя часть нижней мантии. Акцентировалось внимание на том, что для мантии особое значение имеют два уровня — верхняя граница нижней мантии на глубине 660—670 км и слой в основании мантии на границе с ядром, получивший обозначение D''.

На границе переходной зоны верхней мантии и средней, нижней мантии, называемой главной геодинамической границей (ГГГ), происходит возрастание скорости распространения сейсмических волн, объясняемое изменением минералогического состава мантии — ее гранатово-пироксеновый состав изменяется на перовскит-магнезиовюститовый, что сопровождается эндотермическим эффектом [Хайн, Ломидзе, 2005]. Эта граница является предельной для распространения очагов (гипоцентров) землетрясений. Она же служит полупроницаемым барьером для субдукции литосферы и для подъема плюмов с мантийных глубин. Субдуцируемые пластины литосферы (слабы) могут не проникать ниже этой границы, в других случаях их материал скапливается ниже нее и периодически распространяется вглубь мантии, иногда до слоя D'' . Плюмы, поднимающиеся снизу, могут испытывать на границе переходной зоны и нижней мантии расщепление. Известно сопротивление проникновению плюма в верхнюю мантию [Nolet et al., 2006]. На ГГГ (650—700 км) он изменяет свои характеристики и становится более слабым в верхней мантии, что объясняется различным фазовым взаимодействием при холодной и горячей температуре проникающего материала.

Согласно работе [Жарков, 1983], на глубинах 660—740 км ГГГ связана со сменой структуры граната структурой ильменита. Предполагается, что градиент температур переходной зоны соответствует 2 град/км. Если же градиент температуры в 2 раза меньше, то подошва переходной зоны определяется на 570 км. Отмечается проявление твердофазового перехода первого рода и, в зависимости от градиента температуры, можно ожидать различную глубину залегания ГГГ.

Развитие методов сейсмической томографии как решения обратной многомерной кинематической задачи сейсмоки позволило получить трехмерное скоростное строение коры и мантии Земли. Учитывая отсутствие непосредственной связи скорости распространения сейсмических волн

в среде и термических параметров, рассмотрим, как проявляются процессы дегазации в скоростных характеристиках среды. Целью предлагаемой работы является сейсмическая визуализация главной геодинамической границы мантии, плюмов, сверхглубинных флюидов мантии под Восточно-Европейской платформой (ВЕП), что является одним из представлений дегазации Земли.

В основе работы лежит полученная по методу тейлорового приближения [Гейко, 1997; Геуко, 2004] трехмерная P -скоростная модель мантии под Евразией. Использована часть мантии под ВЕП и ее окружением. Основные преимущества метода Тейлорового приближения следующие:

- 1) независимость от референтной модели (начального приближения);
- 2) лучшее приближение нелинейности.

Скоростное строение мантии под ВЕП представлено в работах [Гейко и др., 2005, 2006; Цветкова и др., 2009, 2010а, б, 2016; Цветкова, Бугаенко, 2012]. Полученные результаты определяются исходной системой наблюдений. Используются времена первых вступлений P -волн, представленных в бюллетенях ISC за период 1960—2006 гг. Графическое представление трехмерной P -скоростной модели мантии определяется горизонтальными сечениями с шагом 25 км в "истинных" скоростях, широтными и долготными сечениями с шагом 1° , которые представлены как изменение с глубиной невязок полученной скорости и некоторой величины, определяемой как референтная модель [Лаврентьев и др., 1980], либо обобщенной средней скорости [Геуко, 2004] для фиксированных широты либо долготы исследуемой области. Отсюда следует, что используется конечноразностная производная скорости $V(x, y, z)$, и тем самым получаем сейсмические границы второго рода [Пузырев, 1997]. Резкость границы определяется как изменение между градиентами скорости над границей и под ней. В настоящей статье сейсмические границы второго рода определены в пределах полученной модели для каждого из сечений обобщенного

поля времен как нормированные относительно шага h величины $[v(z+h) - v(z)]/h$. Более детально в работе [Цветкова, Бугаенко, 2016].

Главная геодинамическая граница мантии под ВЕП. В настоящее время считается, что раздел между верхней и средней (нижней) мантией проходит по ГГГ на глубинах 650—700 км [Пуцаровский, Пуцаровский, 2010]. Глубина залегания ГГГ меньше 650 км, предполагает подъем ГГГ вследствие процесса дегазации нижней мантии и ядра. Положение ГГГ не менее 650 км — наличие плитовых процессов в верхней

мантии и ее переходной зоне, выходящих в зону раздела 1, среднюю либо нижнюю мантию [Добрецов, 2010].

На рис. 1 представлена тектоническая схема ВЕП. На рис. 2 показана построенная схема расположения ГГГ ВЕП. Согласно [Геуко, 2004], прямоугольники соответствуют областям сечений обобщенного поля времен. В них указана глубина залегания ГГГ, изменяющаяся от 525 до 700 км. Геометрия, в том числе размеры, определяются системой наблюдения.

Мантия под ВЕП по глубине залегания ГГГ (см. рис. 2) делится на следующие ре-

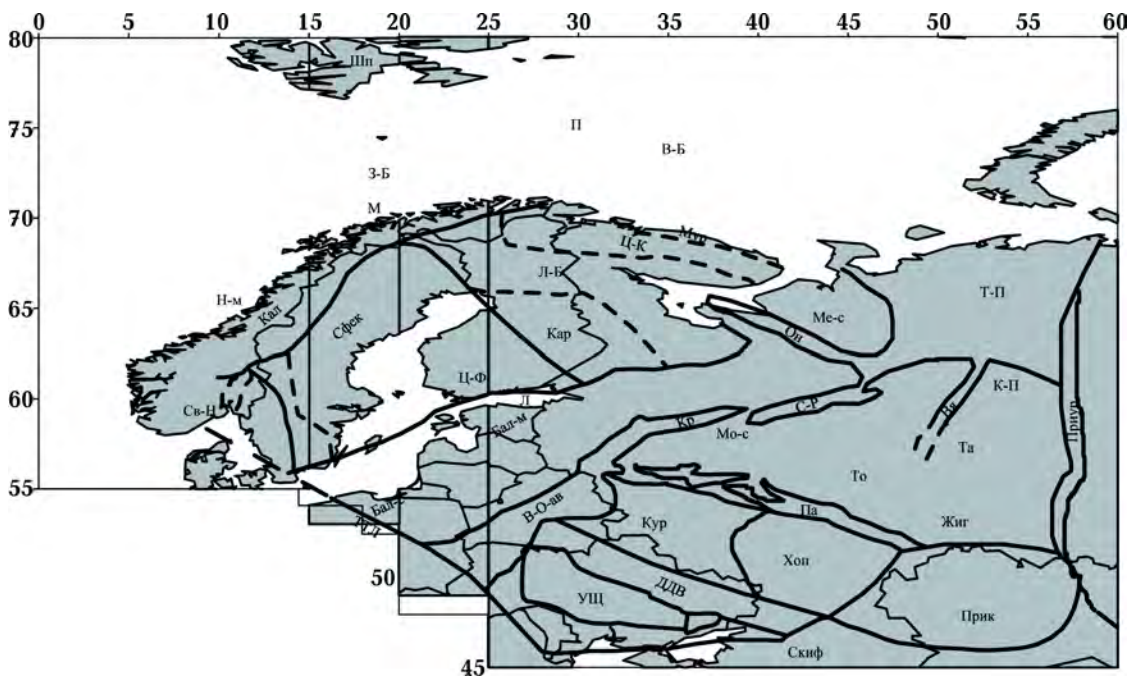


Рис. 1. Тектоническая схема исследуемой территории по В.Е. Хаину [Хаин, 2001] (обобщенно). Условные обозначения: Бал-м — Балтийская моноклираль, Бал-с — Балтийская синеклиза, В-Б — Восточная Баренция, В-О-ав — Вольно-Оршанский авлакоген, Вя — Вятский авлакоген, ДДВ — Днепровско-Донецкая впадина, Жиг — Жигулевское поднятие, З-Б — Западная Баренция, К-П — Коми-Пермятский свод, Кал — Скандинавские каледониды, Кар — Карельский блок Кольско-Карельского мегаблока, Кр — Крестовский авлакоген, Кур — Курский мегаблок Воронежского массива, Л-Б — Лапландско-Беломорский гранитогнейсовый пояс Кольско-Беломорского мегаблока, М — архипелаг Медвежий, Мо-с — Московская синеклиза, Ме-с — Мезенская синеклиза, Мур — Мурманский блок Кольско-Карельского мегаблока, Н-м — Норвежское море, Он — Онежский грабен, П — поднятие Персея, Па — Пачелмский авлакоген, Прик — Прикаспийская впадина, Приур — Приуралье, С-Р — Среднерусский авлакоген, Св-Н — Свеконорвежский мегаблок, Свек — Свекофеннский мегаблок, Скиф — Скифская плита, ТТЛ — линия Тейссейра—Торнквиста, Та — Татарский свод, То — Толмачевский свод, Т-П — Тимано-Печорская плита, УЩ — Украинский щит, Ц-К — Центрально-Кольский блок (Кольско-Карельский мегаблок), Хоп — Хоперский мегаблок Воронежского массива, Ц-Ф — Центральный Финляндский массив (Свекофеннский мегаблок), Ш — Шпицберген.

гионы, соответствующие интервалам глубин: 1) 525—550 км, 2) 575 км, 3) 600 км, 4) 625 км, 5) 650—700 км:

1. Наименьшими глубинами залегания ГГГ 525—550 км определяются северные структуры мантии под Баренцевым морем, разделенные на восточную и западную части мантией под поднятием Персея и Западным желобом Баренцевоморской плиты. Западная часть ГГГ соответствует мантии под Шпицбергенем и его окружением, восточная часть — мантии под землей Франца-Иосифа и ее окружением.

2. Глубиной залегания ГГГ 575 км характеризуется большая часть мантии под ВЕП (см. рис. 2). Это основная часть мантии под Фенноскандией, в том числе под системой авлакогенов ВЕП (Вольно-Оршанский, Средне-Русский, Крестовский и др.), западная часть ДДВ, запад ВКМ (мегаблок КМА), запад УЩ (Вольнский, Подольский, Росинско-Бугский мегаблоки, часть Ингульского мегаблока до тектонического шва Херсон—Смоленск).

3. Глубиной залегания ГГГ 600 км объединяется мантия под центральной частью Баренцевого моря, поднятием Персея и Западным желобом Баренцевоморской плиты, севером Кольского мегаблока, Беломорским плюмом и областью его растекания, мантия под областью растекания сверхглубинного мантийного флюида Костомукши, в том числе Ладогой. Глубине залегания 600 км также соответствует мантия под северной частью Сарматии, включая юго-восточную часть Пачелмского авлакогена.

4. Регион, определяющийся глубиной залегания ГГГ 625 км, объединяет мантию под Тимано-Печорской плитой, Волго-Уралией, Хоперским мегаблоком Воронежского кристаллического массива (ВКМ), центральной и юго-восточной частью ДДВ.

5. Интервалу глубин 650—700 км соответствуют участки наклонных слоев, связанные с выходом последних в среднюю мантию. Примером может служить наклонный слой, выделенный в мантии под Украинским щитом, начиная в мантии под ДДВ до Восточных Карпат (рис. 3, 20°—35° в. д.). Указанному интервалу глубин

соответствует и внедрение высокоскоростного слоя переходной зоны мантии под Черным морем в низкоскоростную мантию под Украинским щитом [Цветкова, Бугаенко, 2012] (рис. 4, 45°—50° с. ш.).

Учитывая, что глубина залегания ГГГ исследуемой территории не более 625 км (за исключением областей, в которых присутствуют наклонные слои, уходящих в зону раздела 1), можно ожидать, что мантия под ВЕП находится под влиянием процессов дегазации.

Полученная схема раздела ГГГ в основном соответствует известному делению ВЕП на Фенноскандию, Волго-Уралию и Сарматию (рис. 5). Отсюда следует связь формирования раздела ВЕП по С. В. Богдановой с процессами дегазации мантии. При этом отмечается продолжение области раздела Баренцевоморских мантийных структур на северо-восток Фенноскандии.

На рис. 6 показаны изменения значений градиента скорости на ГГГ в мантии ВЕП и ее северного окружения. В целом, отмечается уменьшение резкости с севера на юг от $0,734 \text{ с}^{-1}$ (архипелаг Медвежий, Западная Баренция) и $0,694 \text{ с}^{-1}$ (Штокмановское нефтегазовое месторождение, Восточная Баренция) до $0,140 \text{ с}^{-1}$ на шельфе Норвежского моря, Прикаспии и др. Отметим наиболее резко выраженные участки ГГГ мантии под ВЕП, соответствующие наибольшим значениям перепада градиентов скорости, определяющих ГГГ. Примеры приведены в таблице.

Из таблицы и рис. 6 следует, что наиболее резко выраженные участки ГГГ ВЕП характеризуют мантию под Баренцевоморской плитой, Фенноскандией. Указанным областям в значительной мере соответствуют проявления дегазации. Таким обра-

Рис. 4. Долготное сечение 34° в. д. трехмерной P -скоростной модели мантии. Пониженные скорости выделены красным цветом, повышенные — голубым, нулевая изолиния — желтым. Условные обозначения: А-п — Анатолийская плита, ВЩ — Воронежский массив, ДДВ — Днепровско-Донецкая впадина, К — Крым, Ч-М — Черное море, ФЩ — Фенноскандинавский щит.

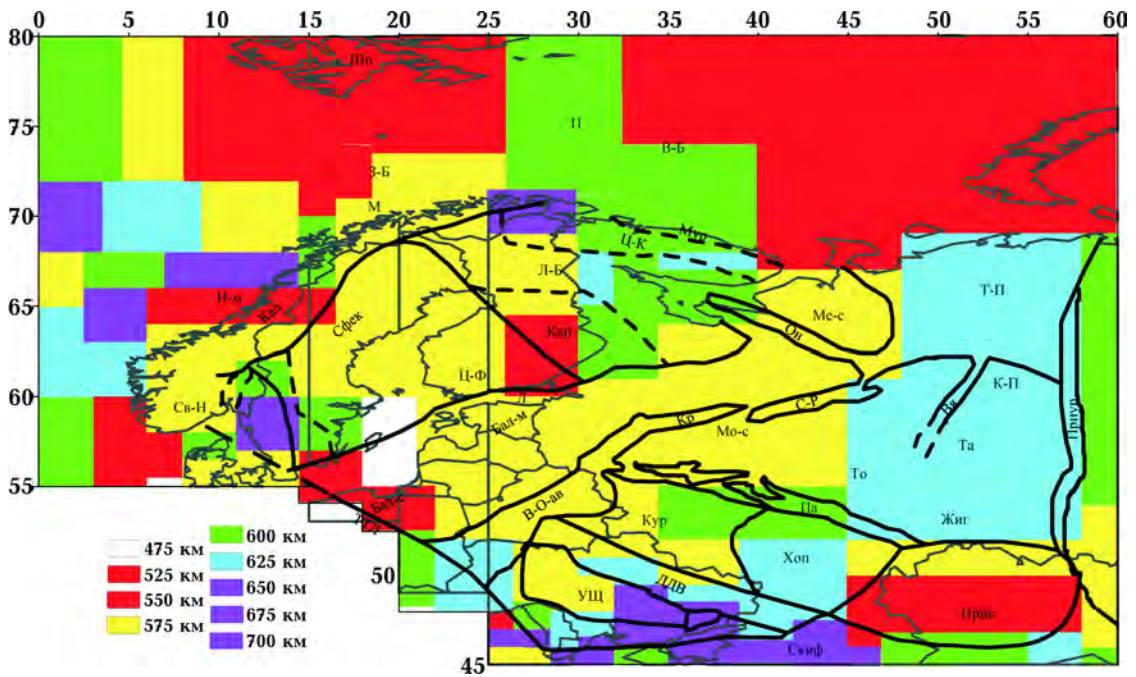


Рис. 2. Глубина залегания главной геодинамической границы Восточно-Европейской платформы. Условные обозначения те же, что и на рис. 1.

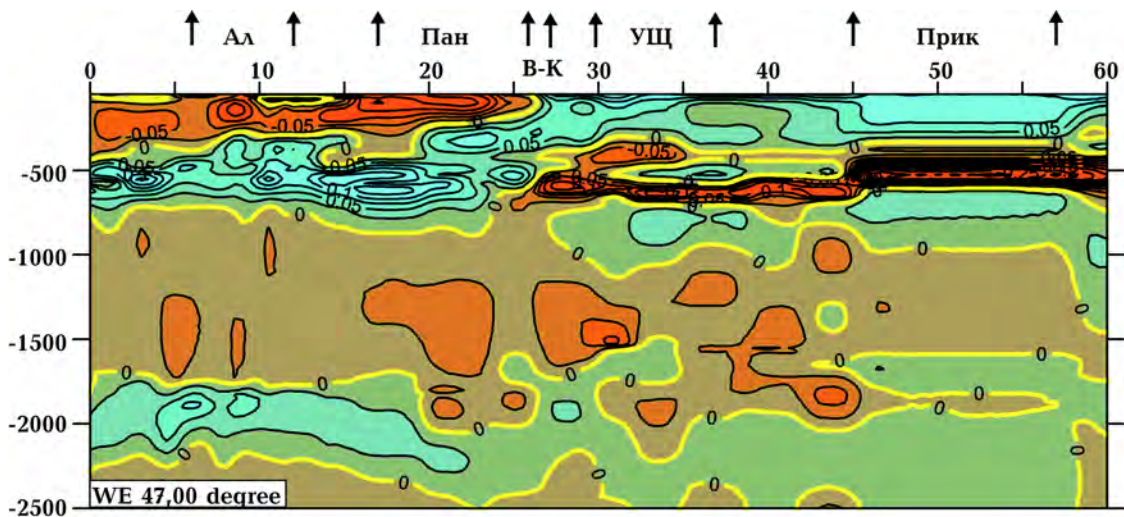


Рис. 3. Широтное сечение 47° с. ш. трехмерной P -скоростной модели мантии. Пониженные скорости выделены красным цветом, повышенные — голубым, нулевая изолиния — желтым. Условные обозначения: Ал — Альпы, В-К — Восточные Карпаты, Пан — Паннонская впадина, Прик — Прикаспийская впадина, УЩ — Украинский щит.

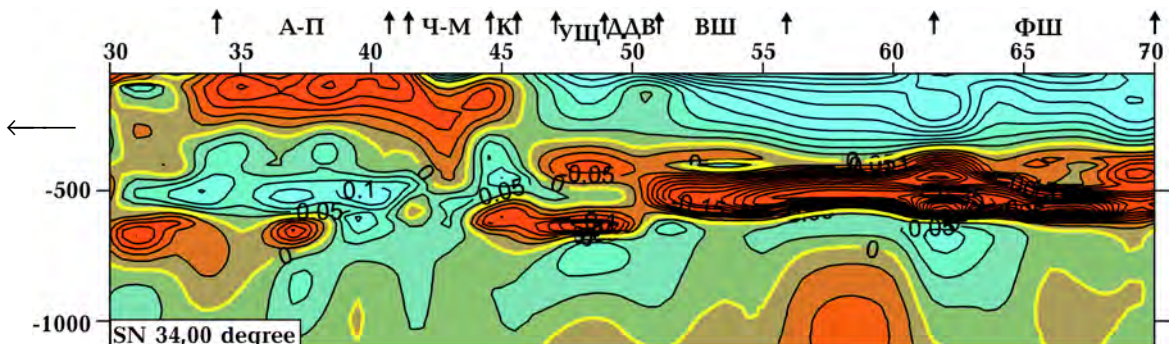




Рис. 5. Карта-схема деления ВЕП по С. В. Богдановой [Shcipansky, Bogdanova, 1996; Bogdanova, 1993; Gorbatshev, Bogdanova, 1993].

зом, все выделенные области можно представить как те, в которых происходит подъем вещества и энергии из нижней мантии к дневной поверхности.

Сейсмическая визуализация плюмов ВЕП. Дегазация Земли является мощным источником энергии и преобразований мантийного вещества, необходимых для формирования плюмов и проявления сверхглубинных мантийных флюидов.

Отметим, что мантийный плюм — проявление внутриплитной тектонической и магматической активности, обусловленное процессами в нижней мантии, источник которой может находиться на любой глубине, вплоть до границы ядро — мантия — слой D'' [Грачев, 2000]. Его существование устанавливается данными глобальной и региональной сейсмотомографии, хотя прямое их наблюдение недоступно. Крупные плюмы, достигая подошвы литосферы, могут расщепляться с накоплением расплава под участками утоненной рифтингом литосферы или даже непосредственно внедряться в рифтовые зоны. Такое расщепление может происходить и на границе ГГГ верхней и средней, нижней мантии, как уже указыва-

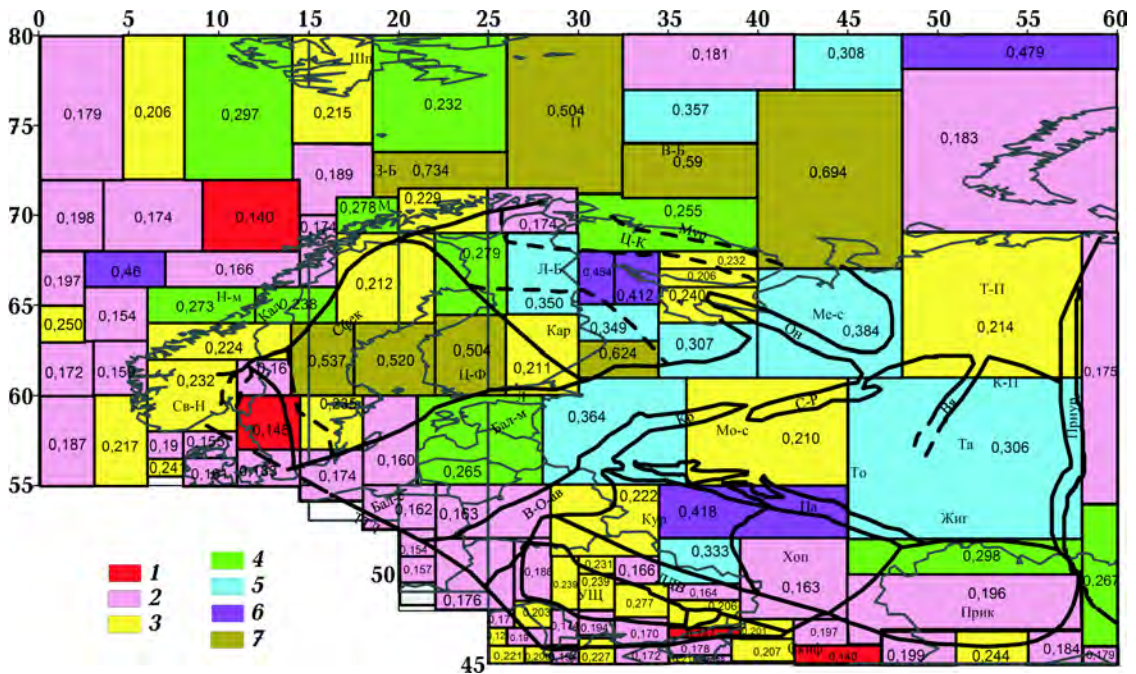


Рис. 6. Карта-схема значений градиентов скорости на ГГГ мантии ВЕП (резкость ГГГ). Цветом выделены значение градиентов в пределах: 1 — $0 < dV/dz \leq 0,15 \text{ c}^{-1}$; 2 — $0,15 < dV/dz \leq 0,2 \text{ c}^{-1}$; 3 — $0,2 \text{ c}^{-1} < dV/dz \leq 0,25 \text{ c}^{-1}$; 4 — $0,25 \text{ c}^{-1} < dV/dz \leq 0,3 \text{ c}^{-1}$; 5 — $0,3 \text{ c}^{-1} < dV/dz \leq 0,4 \text{ c}^{-1}$; 6 — $0,4 \text{ c}^{-1} < dV/dz \leq 0,5 \text{ c}^{-1}$; 7 — $0,5 \text{ c}^{-1} < dV/dz \leq 0,8 \text{ c}^{-1}$. Условные обозначения те же, что и на рис. 1.

Наибольшие значения градиентов скорости (резкость границы ГГГ) исследуемой территории

Координаты центров областей-сечений (В. Д. × С. Ш.)	Регион	Величина градиент (с ⁻¹) — глубина (км)	Примечания
25° × 73°,5	Западная Баренция	0,735—575	Архипелаг Медвежий, месторождение углеводородов, землетрясения
45° × 76°	Восточная Баренция (Баренцево-Карский НГБ)	0,697—550	Штокмановское месторождение углеводородов, землетрясения
33°,75 × 62°,5	Фенноскандия	0,624—600	Ладога, Онега, землетрясения
37° × 73°	Восточная Баренция	0,590—600	
31° × 77°	Баренция	0,504—600	
31°,5 × 67°,5	Фенноскандия	0,454—625	Кандалакша, землетрясения
39° × 55°	Сарматия	0,418—600	Пачелмский авлакоген, Рязанско-Саратовский НГБ, землетрясения
43° × 53°	Сарматия	0,418—600	Пачелмский авлакоген, Рязанско-Саратовский НГБ, землетрясения
39° × 54°	Сарматия	0,418—600	Пачелмский авлакоген Рязанско-Саратовский НГБ, землетрясения
45° × 66°	Фенноскандия	0,384—575	Мезенская синеклиза (Тимано-Печорский НГБ)
37° × 58°,5	Фенноскандия	0,364—575	Крестовский авлакоген
33° × 60°	Фенноскандия	0,364—575	
39° × 73°	Баренция	0,357—525	Восточная Баренция
33°,5 × 75°,5	Баренция	0,357—525	Баренция
27°,5 × 68°,5	Фенноскандия	0,350—575	Лапландский пояс
32°,5 × 64°,5	Фенноскандия	0,349—600	Карелия
36°,75 × 51°,25	Сарматия	0,333—575	ДДВ НГБ, землетрясения
38°,25 × 51°	Сарматия	0,333—575	ДДВ НГБ, землетрясения
36°,00 × 50°	Сарматия	0,333—575	ДДВ НГБ, землетрясения
50° × 47°	Прикаспий	0,322—575	
51°,00 × 47°,00	Прикаспий	0,322—575	
26°,5 × 67°,5	Фенноскандия	0,316—550	Лапландский пояс
39°,25 × 62°,5	Фенноскандия	0,307—575	Карелия
38° × 63°,5	Фенноскандия	0,307—575	Карелия
51° × 57°	Волго-Уралия	0,306—625	Ромашкинское месторождение НГБ, землетрясения
29°,5 × 67°,5	Фенноскандия	0,305—575	Лапландский пояс
51°,50 × 50°	Волго-Уралия	0,298—575	НГБ, землетрясения

лось, которая служит полупроницаемым барьером не только для субдуцируемых слэбов, но и для поднимающихся горячих струй. Что касается закономерностей локализации плюмов, то их расположение во многих случаях совершенно очевидно: одни находятся на пересечении оси спрединга с крупными разломами; другие приурочены к внутриплитным, внутриконтинентальным рифтовым системам, тяготея к их тройным сочленениям или пересечению крупными зонами разломов [Кузьмин, Ярмолюк, 2014]. В настоящей статье рассматривается сейсмическая визуализация плюмов в мантии под ВЕП.

Как уже отмечалось в предыдущих работах [Цветкова и др., 2017], в мантии выделяются области, особенностью которых является распространение низкоскоростной неоднородности из средней мантии через зону раздела 1 в переходную зону верхней мантии (зону Голицына—Гейко, ЗГГ), и, как следствие этого, отмечается специфика скоростной расслоенности верхней мантии и ее переходной зоны. В работах [Добрецов и др., 2001; Nataf, 2000] распространение вещества, характеризующегося пониженной скоростью, из нижней и средней мантии в верхнюю, возможны вплоть до коры, что связывают с сейсмическим проявлением плюмовых процессов. С сейсмическим проявлением сверхглубинных флюидов связываются субвертикальные колонки чередующихся повышенных и пониженных аномалий скорости [Гуфельд, 2007; Павленкова, 2001]. Геофизические признаки плюмовых процессов также определяются более глубоким залеганием границы M (≥ 45 км), положительными гравитационными аномалиями и повышенным тепловым потоком [Богатиков и др., 2010].

Согласно модельным исследованиям, время существования докембрийских плюмов, по [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, составляют 30, 60, 90 и 120 млн лет.

Исходя из этого, данные сейсмической томографии представляют сейсмическую визуализацию только современных плюмов либо следов затухающих плюмов.

В настоящее время существует достаточное количество работ, посвященных плюмам ВЕП. Как правило, в них задействована кора либо литосфера. Такие вопросы, как проявление плюмовых характеристик в коре, соответствие флюидных доменов областям тройного сочленения, рассмотрены в работах Ю. П. Оровецкого [Оровецкий, 2010]. Были рассмотрены следующие плюмы: Вольно-Оршанский плюм [Гарецкий, Каратаев, 2014], плюмы Фенноскандии [Богатиков и др., 2010], плюмы ВЕП [Шестоपालов и др., 2018].

Нашей задачей является представить мантийные плюмы и сверхглубинные мантийные флюиды на основе, построенной по методу тейлорового приближения, трехмерной P -скоростной модели мантии ВЕП (рис. 7). Вольно-Оршанский и Северо-Азовский плюмы и сверхглубинные мантийные флюиды под номерами 1—11, 13 детально представлены в работе [Цветкова и др., 2017], а Беломорский, Шеллефтео, Варангер плюмы и сверхглубинные мантийные флюиды под номерами 16, 17 детально рассмотрены в работе [Цветкова и др., 2015].

В данной работе плюмы мантии под ВЕП дополнены Московским и Тиманским плюмами. На рис. 8 представлены широтное 60° с. ш. и долготное 41° в. д. сечения, пересекающие Московский плюм. Здесь четко выделяется выход относительно низкоскоростной неоднородности из средней мантии до верхней и растекание ее на запад до Свеко-Норвежского мегаблока Фенноскандинавского щита и на восток до Урала. На рис. 9 показаны широтное 63° с. ш. и долготное 53° в. д. сечения, проходящие

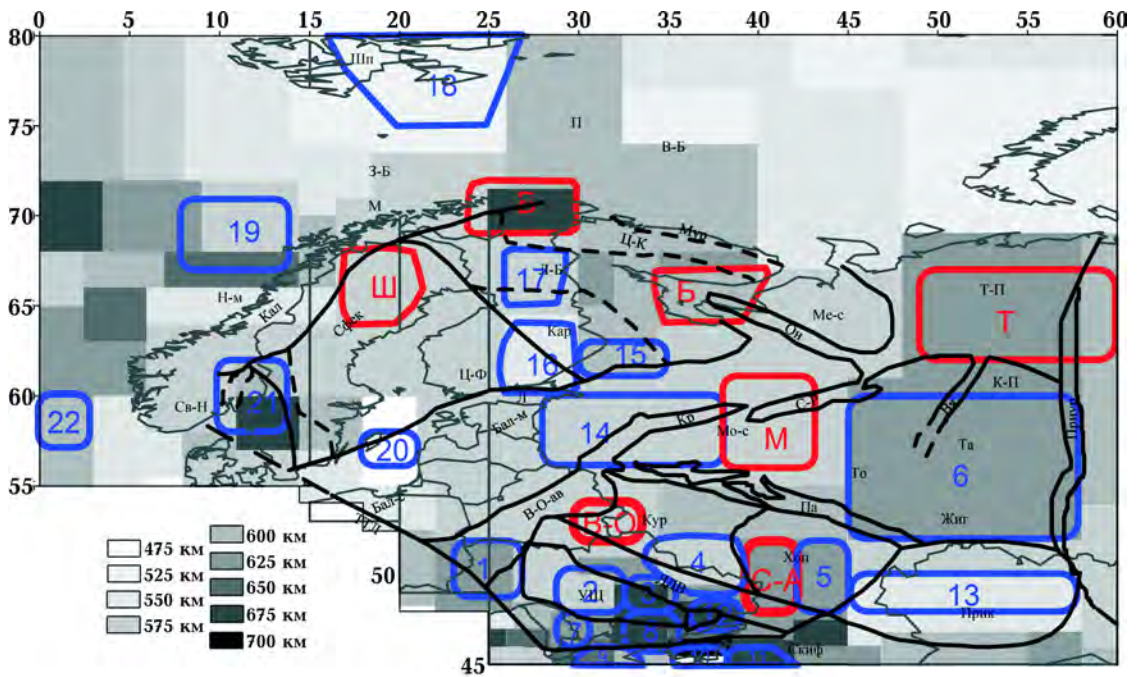


Рис. 7. Карта-схема расположения плюмов и сверхглубинных мантийных флюидов мантии под ВЕП, вынесенные на карту-схему ГГГ (рис. 2). Красное — плюмы (Б — Беломорский, В — Варангер, В-О — Вольно-Оршанский, М — Московский, С-А — Северо-Азовский, Т — Тиманский, Ш — Шеллефтео), синие — сверхглубинные мантийные флюиды.

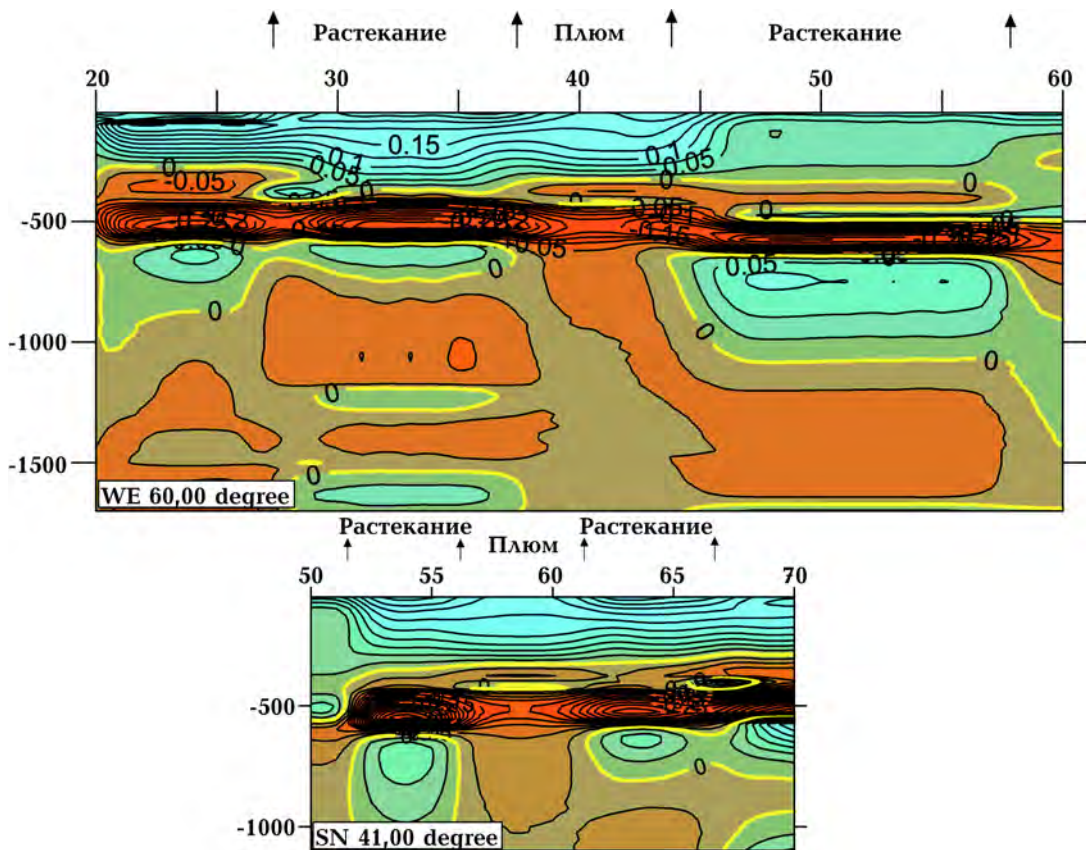


Рис. 8. Вертикальные широтное сечение 60° с. ш. и долготное 41° в. д. трехмерной P-скоростной модели мантии, проходящие через Московский плюм.

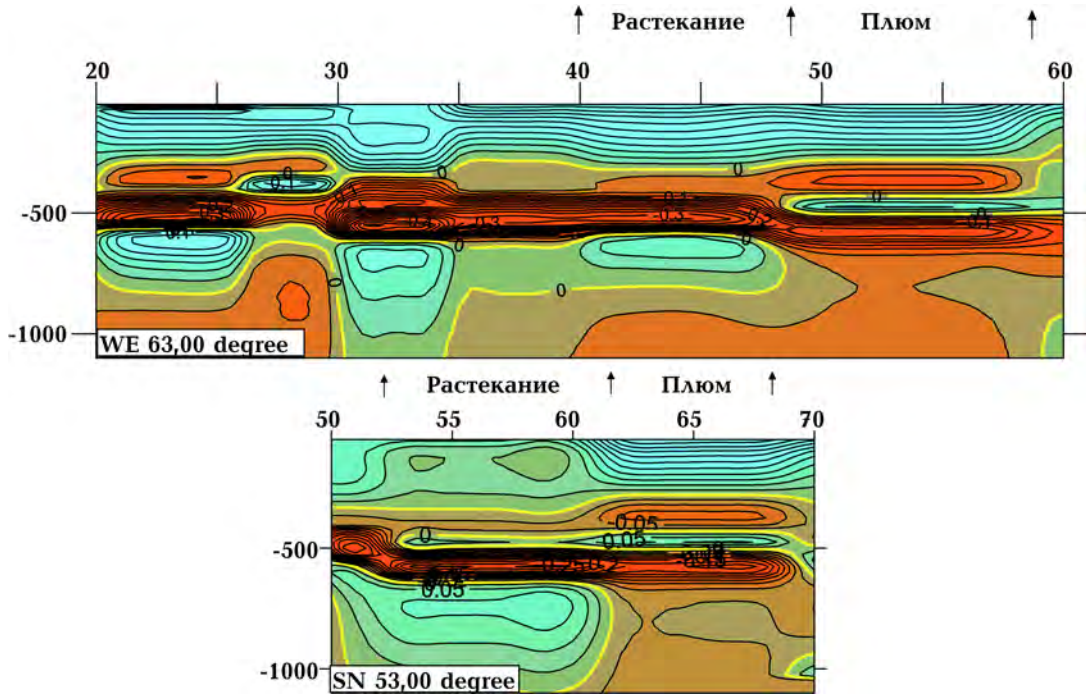


Рис. 9. Вертикальные широтное 63° с. ш. и Долготное 53° в. д. сечения, проходящие через Тиманский плюм.

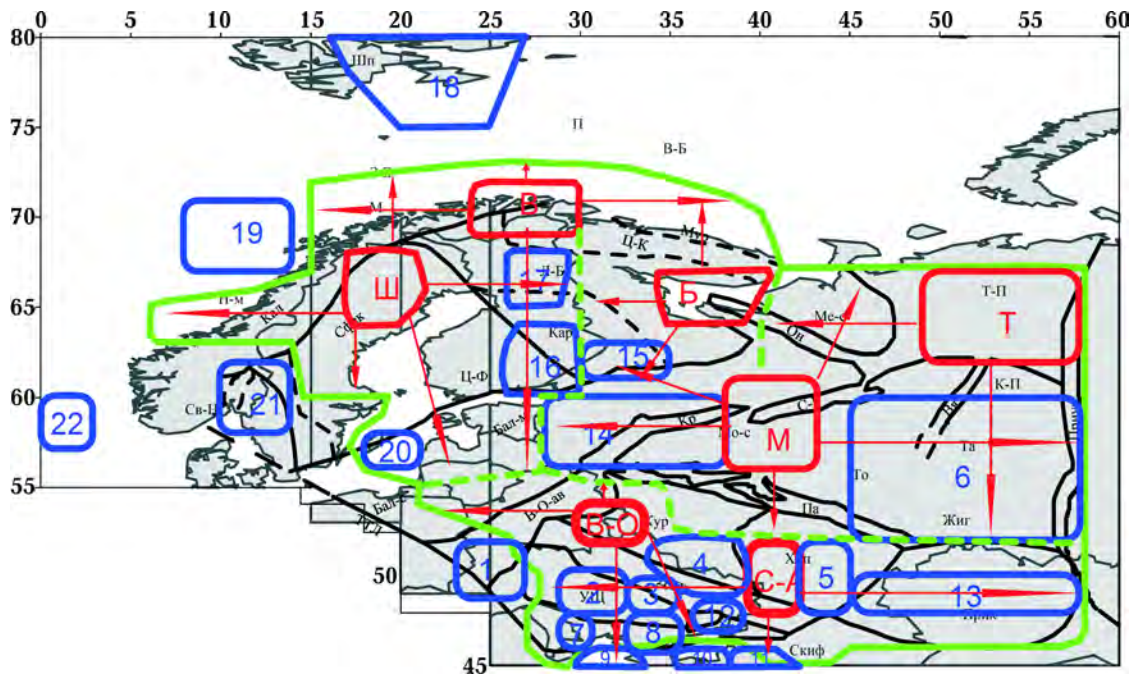


Рис. 10. Мантийные домены ВЕП (плюмы и области их растекания). Непрерывная зеленая кривая ограничивает области мантийных доменов ВЕП, зеленая штрих-линия ограничивает растекание выделенных плюмов (красный цвет), красные стрелки — направления растекания плюмов, синие геометрические фигуры — сверхглубинные мантийные флюиды (см. рис. 7).

через Тиманский плюм. Аналогично Московскому плюму, в широтных и долготных сечениях выделяется выход относительно низкоскоростной неоднородности под переходной зоной верхней мантии, растекание на запад под мантией Мезенской синеклизы до Беломорского мегаблока Фенноскандинавского щита и на восток под Западно-Сибирскую плиту. Более детально они будут рассмотрены в последующих работах.

Особое положение занимает область влияния плюма Франца-Иосифа, характеризующаяся глубиной залегания ГГГ 525—550 км и область сверхглубинного флюида в мантии под архипелагом Шпицберген с такой же глубиной залегания. Недостаточность системы наблюдений (ограничение на север — 80° с. ш.) не позволила выделить плюм Франца-Иосифа. В настоящее время геологии и геофизике этой области уделяется большое внимание [Филатова, Хаин, 2007; Столбов, 2011; Шипилов, 2011]. Мантийная плюмовая система ВЕП подчеркивается существованием системы авлакогенов (Волыно-Оршанский и Средне-Русский), соответствующей полученной схеме делимости ГГГ схеме С.В. Богдановой.

Следствием представленных результатов является связь ГГГ мантии ВЕП с процессами дегазации.

Выделенные плюмы позволили показать и области их растекания, тем самым представить мантийные домены ВЕП на рис. 10. Мантийный домен включает в себя плюм и область его растекания. Как показывает рис. 10, выделяются пересекающиеся области мантийных доменов, которым соответствуют сверхглубинные флюиды. Наиболее значительными являются области: 1) объединяющие распространения Волыно-Оршанского и Северо-Азовского плюмов (Сарматская область) с выделением соответствующего сверхглубинного флюида (f4), характеризующаяся резкостью на ГГГ $0,333 \text{ с}^{-1}$ (см. рис. 10, мантия под ДДВ и Курско-Белгородским блоком ВКМ); 2) Волго-Уральская область, представляющая сверхглубинный флюид

(f6), общий для флюидных доменов Московского, Тиманского плюмов и мантийных структур Преденисейского НГБ (Западная Сибирь) и характеризующаяся резкостью ГГГ $0,306 \text{ с}^{-1}$. Структуры Преденисейского НГБ связывают с Сибирским суперплюмом. Области растекания Тиманского плюма на востоке связывается также с Преденисейским НГБ (Ханты-Мансийский округ, Западная Сибирь). Как сверхглубинному мантийному флюиду f4 (Сарматская область), так и сверхглубинному мантийному флюиду f6 (Волго-Уралия) соответствуют землетрясения и мощные нефтегазовые месторождения.

Выводы. 1. Согласно полученной главной геодинамической границе (ГГГ) в мантии под ВЕП на уровне раздела между верхней и средней (нижней) мантией по глубине залегания ГГГ мантия может быть разделена на следующие части:

- Фенноскандия (за исключением восточной части Кольско-Карельского мегаблока). Глубина залегания ГГГ — 575 км;
- Сарматия делится на две части. Западная определена глубиной залегания ГГГ 575 км и связана с южным окончанием Фенноскандии, на востоке ограничена тектоническим разделом Херсон—Смоленск в пределах Украинского щита, Голованевской шовной зоной в пределах ДДВ и восточным ограничением Курского мегаблока ВКМ — Лосевской шовной зоной, исключая область влияния Пачелмского авлакогена (север Курского мегаблока, глубина залегания ГГГ — 600 км). Восточная часть ГГГ мантии под Сарматией определяется глубиной залегания 625 км и связью с мантией под Волго-Уралией;
- Волго-Уралия и Тиман — глубина залегания 625 км. Область включает восточную часть ДДВ.

2. ГГГ Баренцевоморской плиты характеризуется делением на две части: Восточную и Западную. Разделом служит мантия под поднятием Персея, Западным разделом и далее до мантии под Карельским блоком Кольско-Карельского мегаблока Балтийского щита. Глубина залегания ГГГ раз-

дела определена как 600 км с включением области под Хибинами и Центрально-Кольским блоком с глубинами 625 км. Восточная и Западная Баренция определяются глубинами залегания ГГГ 525—550 км.

3. Для представленной ГГГ отмечается уменьшение значений градиента скорости (резкости) с севера на юг от $0,734 \text{ с}^{-1}$ в мантии под архипелагом Медвежий, Западной Баренции и $0,694 \text{ с}^{-1}$ под Штокмановским месторождением Восточной Баренции до $0,14 \text{ с}^{-1}$ под шельфом Норвежского моря и значений, в основном не более $0,200 \text{ с}^{-1}$ для мантии южнее 55° с. ш.

4. В мантии ВЕП выделяются следующие

плюмы: Северо-Азовский, Вольно-Оршанский, Шелефтео, Варангер, Беломорский, Московский, Тиманский.

5. Выделены области флюидных доменов, которые пересекаются. Общие области флюидных доменов Сарматской области (сверхглубинный флюид 4, резкость ГГГ — $0,333 \text{ с}^{-1}$) и область Волго-Уралии (сверхглубинный флюид 6, резкость — $0,306 \text{ с}^{-1}$). К ним приурочены как землетрясения, так и мощные НГБ.

6. Введение в рассмотрение мантийных плюмов, их флюидных доменов и сверхглубинных флюидов позволяет на уровне ГГГ говорить о процессе дегазации ВЕП.

Список литературы

- Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли. Москва: Наука, 2010. 605 с.
- Буллен К. Введение в теоретическую сейсмологию. Москва: Мир, 1966. 460 с.
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Шовные зоны Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии. Минск: Беларуская навука, 2014, 120 с.
- 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 В.С., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н., Цветкова Т.А. Трехмерная модель верхней мантии Украины по временам прихода *P*-волн. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 1. С. 3—16.
- Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Научное издание. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Грачев А.Ф. Мантийные плюмы и проблемы геодинамики. *Физика Земли.* 2000. № 4. С. 3—37.
- Добрецов Н.Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели. *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.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. Москва: Наука, 1983. 416 с.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений. *Геология и геофизика.* 2014. Т. 55. № 2. С. 153—184.
- Лаврентьев М.М., Романов В.Г., Шишатский С.П. Некоторые проблемы математической физики и анализа. Москва: Наука, 1980. 286 с.
- Оровецкий Ю.П. К проблеме генетического обоснования древней Восточно-Европейской платформы. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 3. С. 106—111. <http://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i3.2010.117542>.

- Павленкова Н.И. Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества. *Электронный научно-информационный журнал "Вестник ОПТГН РАН"*. 2001. № 4 (19).
- Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГТМ, 1997. 301 с.
- Пушаровский Ю.М., Пушаровский Д.Ю. Геология мантии Земли. Москва: ГЕОС, 2010. 138 с.
- Столбов Н.М. Модель развития плюма земли Франца-Иосифа. *Современное состояние наук о Земле. Материалы Международной конференции, посвященной памяти Виктора Ефимовича Хаина, г. Москва, 1—4 февраля 2011 г.* Москва: Изд-во Геол. фак-та МГУ, 2011. С. 1792—1795.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В. Сейсмограмма 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>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В. Структура скоростной этажности мантии под Фенноскандией по данным сейсмограммы. *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. Сейсмическая визуализация плюмов и сверхглубинных флюидов в мантии под территорией Украины. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 4. С. 42—54. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Скоростная делимость мантии под Украинским щитом. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 4. С. 75—87. <http://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107802>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Структура низкоскоростных областей в мантии северной Европы. *Труды Карельского научного центра РАН.* 2015. № 7. С. 106—126. doi: 10.17076/geo157.
- Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмограмма Восточно-Европейской платформы: трехмерная P -скоростная модель мантии под мантии под Фенноскандией. Ч. I. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 1. С. 53—72.
- Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмограмма Восточно-Европейской платформы: трехмерная P -скоростная модель мантии под Фенноскандией. Ч. II. *Геофиз. журн.* 2010 а. Т. 32. № 1. С. 60—77. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i1.2010.117570>.
- Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмограмма Восточно-Европейской и Баренцево-Печорской платформ: трехмерная P -скоростная модель мантии под Волго-Уралией, Прикаспийской впадиной и Баренцево-Печорской платформой. *Геофиз. журн.* 2010 б. Т. 32. № 5. С. 35—50. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i5.2010.117505>.
- Шаров Н.В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2017. 168 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 радиогидрогеокол. полигон. исслед. НАН Украины, 2018. 632 с.
- Шпилов Э.В. Геодинамика суперплюмовых событий в эволюции Арктического океана и его континентальных окраин. *Современное состояние наук о Земле. Материалы Международной конференции, посвященной памяти Виктора Ефимовича Хаина, г. Москва, 1—4 февраля 2011 г.* Москва: Изд-во Геол. фак-та МГУ, 2011. С. 2110—2113.
- Филатова Н.И., Хаин В.Е. Тектоника Восточной Арктики. *Геотектоника.* 2007. Т. 41. № 3. С. 3—29.
- Фурман В. Теплоперенесення і теплова дифузія в плині конвективних мантийних плюмів Землі. *Вісник Львів.Ун-ту, сер. геол.* 2010. Вип. 24. С. 35—49.
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. Москва: Научный мир, 2001. 604 с.

- Хаин В. Е., Ломидзе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. Москва: КДУ, 2005. 560 с.
- Bogdanova, S. V. (1993). The three-segment hypothesis for the East European Craton. *Terra Nova*, 5 (Suppl 1), 313—314.
- Geyko, V. S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 2. С. 3—32.
- 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>.
- Nolet, G., Karato, S.-T., & Montelli, R. (2006). Plume fluxes from seismic tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(3-4), 685—699. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.06.011>.
- Shchipansky, 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 (1-4), 109—125. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00227-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00227-2).
- Gorbatshev, R. & Bogdanova, S. (1993). Frontiers in the Baltic Shield. *Precambrian Research*, 64 (1-4), 3—21. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(93\)90066-B](https://doi.org/10.1016/0301-9268(93)90066-B).

The main geodynamic border and seismic visualization of plumes under the East European Platform

T. A. Tsvetkova, I. V. Bugaenko, L. N. Zaets, 2019

According to the Taylor approximation method of the three-dimensional P -velocity mantle model under Eurasia, a seismic imaging of the manifold plumes and super-deep fluid processes of the East European Platform was carried out. As the source data, the time of the first wave of R wave entry according to the ISC bulletins from 1964 to 2006 was used. The fluid domain is defined as the region of distribution of low-speed inhomogeneities from the lower, middle mantle to the upper and spreading laterally in the upper end of its central part. The central, low-speed part of the fluid domain is defined as a plume. On the territory of the East European platform, the North-Azov, Volyn-Orsha, Moscow, Timan, Belomorsky, Varanger and Schelfteo plumes are highlighted. In the area of spreading the data of mantle domains there are 19 super-deep mantle fluids. By the nature of the behaviour of the gradient of velocity with depth, the main geodynamic boundary (the boundary between the upper and middle mantle) is constructed, which within the East European platform ranges from 525 to 700 km. According to the depths of the main geodynamic boundary, the East European platform is divided into Fennoscandia (575 km), Sarmatia (divided into two parts with depths of 575 km and 600—625 km) and Volga-Uralia (625 km). The main geodynamic boundary of the Barents Sea plate is divided into East and West (525—550 km). For the given main geodynamic boundary, the reduction of the gradient of speed (sharpness) from north to south from 0.734 s^{-1} in the mantle under the archipelago Medvezhy to the average is mostly $\leq 0.2 \text{ s}^{-1}$ in the mantle North of 55° northern latitude.

Key words: seismic tomography, East European platform, main geodynamic boundary, plum (Volyn-Orsha, North-Azov, Moscow, Timan, Belomorsky, Varanger, Shelefteo), 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).
- Bullen, K. (1966). *Introduction to theoretical seismology*. Moscow: Mir, 460 p. (in Russian).
- Garetskiy, R.G., & Karataev, G.I. (2014). *Suture zones of Fennoscandia, Sarmatia and Volga-Uralia*. Minsk: Belaruskaya Navuka, 120 p. (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 3D *P*-velocity model of the Sarmatian mantle (south-west of the East European platform). *Geofizicheskiy zhurnal*, 27(6), 927—939 (in Russian).
- Geyko, V.S., Shumlyanskaya, L.A., Bugaenko, I.V., Zaets, L.N., & Tsvetkova, T.A. (2006). Three-dimensional model of the upper mantle of Ukraine by the terms of *P*-waves arrival. *Geofizicheskiy zhurnal*, 28(1), 3—16 (in Russian).
- Gufeld, I.L. (2007). *Seismic process. Physical and chemical aspects. Scientific publication*. Korolev: TSNIIMash, 160 p. (in Russian).
- Grachev, A.F. (2000). Mantle plumes and problems of geodynamics. *Fizika Zemli*, (4), 3—37 (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).
- Zharkov, V.N. (1983). *The internal structure of the Earth and planets*. Moscow: Nauka, 416 p. (in Russian).
- Dobretsov, N.L. (2010). Global geodynamic evolution of the Earth and global geodynamic models. *Geologiya i geofizika*, 51(6), 761—784. doi: 10.1016/j.rgg.2010.05.002 (in Russian).
- Kuzmin, M.I., & Yarmolyuk, V.V. (2014). Mantle plumes of Northeast Asia and their role in forming endogenous deposits. *Geologiya i geofizika*, 55(2), 153—184. doi: 10.1016/j.rgg.2014.01.002 (in Russian).
- Lavrentyev, M.M., Romanov, V.G., & Shishatkiy, S.P. (1980). *Some problems of mathematical physics and analysis*. Moscow: Nauka, 286 p. (in Russian).
- Orovetskiy, Yu.P. (2010). On the problem of genetic basis of the old East European platform. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32(3), 106—111. <http://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i3.2010.117542> (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. *Electronic scientific and information journal "Vestnik OGGGN RAN"*, (4) (in Russian).
- Puzyrev, N.N. (1997). *Methods and objects of seismic studies. Introduction to general seismology*. Novosibirsk: Scientific Publishing Center of the United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy of the SB RAS, 301 p. (in Russian).
- Pushcharovsky, Yu.M., & Pushcharovsky, D.Yu., (2010). *Geology of the Earth's mantle*. Moscow: Geos, 138 p. (in Russian).
- Stolbov, N.M. (2011). Franz Josef Plume Development Model: *The current state of earth sciences. Proceedings of the International conference dedicated to the memory of Viktor Efimovich Khain, Moscow, February 1—4, 2011* (pp. 1792—1795). Moscow: Geol. Faculty of Moscow State University (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).
- Tsvetkova, T.A., & Bugaenko, I.V. (2016). The structure of velocity mantle number of horizons under Fennoscandia 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. (2017). Seismic visualization of plumes and super-deep fluids in mantle under Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal*, 39 (4), 42—54. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506> (in Russian).
- Tsvetkova, T. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2016). Velocity divisibility of the mantle beneath the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 38 (4), 75—87 (in Russian). <http://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107802>.
- Tsvetkova, T. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2015). Structure of low-speed regions in the mantle of northern Europe. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN*, (7), 106—126 (in Russian). doi: 10.17076/geo157.
- Tsvetkova, T. A., Shumlyanskaya, L. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2009). Seismotomography of the East European Platform: a three-dimensional *P*-velocity model of the mantle under the mantle under Fennoscandia. Part I. *Geofizicheskiy zhurnal*, 31 (1), 53—72 (in Russian).
- Tsvetkova, T. A., Shumlyanskaya, L. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2010a). Seismotomography of the East European platform: a three-dimensional *P*-velocity model of the mantle near Fennoscandia. Part II. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32 (1), 60—77. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i1.2010.117570> (in Russian).
- Tsvetkova, T. A., Shumlyanskaya, L. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2010b). 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. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i5.2010.117505> (in Russian).
- Sharov, N. V. (2017). *Lithosphere of Northern Europe according to seismic data*. Petrozavodsk: Edition of Karelian Research Center of RAS, 168 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).
- Shipilov, E. V. (2011). Geodynamics of superplume events in the evolution of the Arctic Ocean and its continental margins. *Proceedings of the International conference dedicated to the memory of Viktor Efimovich Khain, Moscow, February 1—4, 2011* (pp. 2110—2113). Moscow: Geol. Faculty of Moscow State University (in Russian).
- Filatova, N. I., & Khain, V. E. (2007). Tectonics of the eastern Arctic region. *Geotektonika*, 41 (3), 3—29. (in Russian).
- Furman, V. (2010). Heat transfer and heat diffusion in the plintic convective manthen plumes of the Earth. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya heolohichna*, (24), 35—49 (in Ukrainian).
- Khain, V. E. (2001). *Tectonics of continents and oceans*. Moscow: Nauchnyy Mir, 604 p. (in Russian).
- Khain, V. E., & Lomidze, M. G. (2005). *Geotectonics with the Fundamental of Geodynamics*. Moscow: KDU, 560 p. (in Russian).
- Bogdanova, S. V. (1993). The three-segment hypothesis for the East European Craton. *Terra Nova*, 5 (Suppl 1), 313—314.
- Geyko, V. S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 2. С. 3—32.
- 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>.
- Nolet, G., Karato, S.-T., & Montelli, R. (2006). Plume fluxes from seismic tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(3-4), 685—699. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.06.011>.
- Shchipansky, 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 (1-4), 109—125. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00227-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00227-2).
- Gorbatshev, R. & Bogdanova, S. (1993). Frontiers in the Baltic Shield. *Precambrian Research*, 64 (1-4), 3—21. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(93\)90066-B](https://doi.org/10.1016/0301-9268(93)90066-B).