

## Скоростная типизация средней и нижней мантии Европы

© И. В. Бугаенко, Л. Н. Заец, Т. А. Цветкова, 2015

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 29 сентября 2014 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

У роботі використано 3D  $P$ -швидкісну модель мантиї Європи. Модель побудовано за запропонованим В. С. Гейком методом тейлорового наближення розв'язку задачі сейсмічної томографії. Проведено аналіз швидкісної будови середньої та нижньої мантиї цієї швидкісної моделі. Під Європою виділено чотири типи мантиї: стабільна, активізована, усталена за активізованим типом, не усталена за стабільним типом.

**Ключові слова:** сейсмотомографія,  $P$ -швидкісна модель, середня і нижня мантия, типізація, Європа.

**Вступление.** Хорошо известно, что глубинные движения в Земле являются основой ее геодинамического развития и в значительной мере влияют на тектонические процессы, происходящие на поверхности и в коре. При исследовании процессов, происходящих в верхней мантии, переходной зоне верхней мантии, средней и нижней мантии используются геофизические методы: сейсмические, гравитационные, термические, электромагнитные. Наиболее эффективный метод для изучения глубинных неоднородностей — сейсмическая томография, где традиционно скоростная структура регионов рассматривается в пределах коры и, в лучшем случае, верхней мантии. В то же время нельзя отрицать влияния процессов, происходящих в нижней и средней мантии, как на особенности формирования тектоники регионов, так и на процессы формирования месторождений полезных ископаемых. Однако изучение скоростного строения на этих глубинах в большей части связывается с проблемами мантийной конвекции [Добрецов и др., 2001]. В практике сейсмической томографии скоростное строение мантии под Европой даже для таких относительно хорошо освещенных, как источниками, так и приемниками (например, Средиземноморье) регионов 3D  $P$ -скоростные модели представлены до глубин 600—700 км, максимум 1000—1400 км [Spakman et al., 1993; Zielhuis, Nolet, 1994; Piromal-

lo, Morelli, 2003; Koulakov et al., 2009]. Наиболее глубинными являются: модель [Spakman et al., 1993], осветившая мантию до глубины 1400 км, и модель [Piromallo, Morelli, 2003], осветившая мантию до 1000 км.

При рассмотрении скоростного строения мантии привлекаются три основных модели. Первая — геодинамическая — предполагает раздел мантии на две части: верхнюю и нижнюю по границе на глубине 660 км [Трубицын, 2010]. Вторая — химико-минералогическая модель — делит мантию на четыре части: верхнюю до глубины 400 км, переходную зону в интервале глубин 400—700 км, нижнюю в интервале глубин 700—2650 км и слой  $D''$  мощностью приблизительно 250 км до глубины 2900 км [Трубицын, 2010]. Третья модель — химико-минералогическая — модель Ю. М. и Д. Ю. Пушаровских [Пушаровский Ю. М., Пушаровский Д. Ю., 2010].

Последняя модель учитывает данные сейсмотомографии, данные о составе мантии (в пределах существующих в настоящий момент физико-химических представлений) и сейсмических границах [Пушаровский Ю. М., Пушаровский Д. Ю., 2010]. Структура предложенной модели следующая (табл. 1).

Сразу оговорим, что представления о повышенных и пониженных скоростях вводятся для каждой конкретной скоростной модели относительно заданной для нее одномерной референт-

ной модели скорости. Согласно модели Пушчаровских для активизированной и стабильной мантии предполагается послойная инверсность скоростей для каждого типа и относительно друг друга. Свойство послойной инверсности скоростей в мантии было впервые указано в работе [Inoue et al., 1990]. В модели Пушчаровских это свойство нашло свое продолжение.

В работе использовалась 3D *P*-скоростная модель мантии под Европой как часть построенной по методу тейлорового приближения, предложенного В. С. Гейко [Гейко, 1997; Гейко и др., 1998; Geuko, 2004], трехмерной модели мантии под Евразией. Нашей задачей является анализ скоростного строения средней и нижней мантии данной скоростной модели, определение соответствия полученной субгоризонтальной скоростной расслоенности мантии модели Пушчаровских и, на основании этого, выделение возможных типов мантии под Европой. Рассматривается область в пределах (20° з. д. — 60° в. д.) × (30° с. ш. — 70° с. ш.).

Исходными данными являются времена первых вступлений *P*-волн, представленные в бюллетенях ISC, начиная с 1964 по 2006 гг. Система источников и приемников представлена на рис. 1, 2. Используемая база данных в настоящее время содержит более 2 000 000 сейсмических трасс.

На рис. 3 представлена карта-схема плотности системы наблюдений территории Европы. Здесь *d* — плотность системы наблюдений, определенная как  $d = \lg(100N/S)$ , где *N* — число

лучей, вершины которых расположены под областью с площадью *S* на поверхности мантии, измеренной в единицах градус на градус. Наиболее хорошо освещенной является южная часть (Средиземноморье), неудовлетворительно освещена северо-восточная часть исследуемой территории.

Предложенный В. С. Гейко метод тейлорового приближения решения задачи лучевой сейсмической томографии по отношению к классическому методу Лаврентьева — Романова [Лаврентьев и др., 1980] обладает рядом преимуществ [Гейко, 1997; Geuko, 2004]:

- 1) не требует задания референтной скорости как начального приближения, является задачей, корректной по Тихонову, дает ощутимый выигрыш в точности приближения нелинейности задачи;
- 2) значительно сокращает размерность задачи численного обращения;
- 3) в равной мере справедлив как для решения в прямоугольной системе координат, так и в полярной, благодаря известному конформному отображению шара на полупространство [Gervert, Markushevich, 1966].

Отметим, что результатом решения задачи сейсмической томографии является модель, оптимальная в пределах принятых физико-математических представлений. Последние включают: аксиоматику, теорию метода, принятую параметризацию среды, численные методы решения задачи, аппроксимирующие методы, графические методы и т. д.

**Т а б л и ц а 1. Химико-минералогическая модель мантии [Пушчаровский Ю. М., Пушчаровский Д. Ю., 2010]**

Слои мантии	Глубина слоя	Скоростная характеристика стабильной мантии	Скоростная характеристика активизированной мантии
Верхняя мантия	Граница Мохо — 410 км	повышенные	пониженные
Переходная зона верхней мантии	410 км — 670 км	пониженные	повышенные
Зона раздела-1	670 км — 850 км	повышенные	пониженные
Средняя мантия	850 км — 1700 км	пониженные	повышенные
Зона раздела-2	1700 км — 2200 км	повышенные	пониженные
Нижняя мантия и зона D''	2200 км — 2900 км, 2650 км — 2900 км	пониженные	повышенные

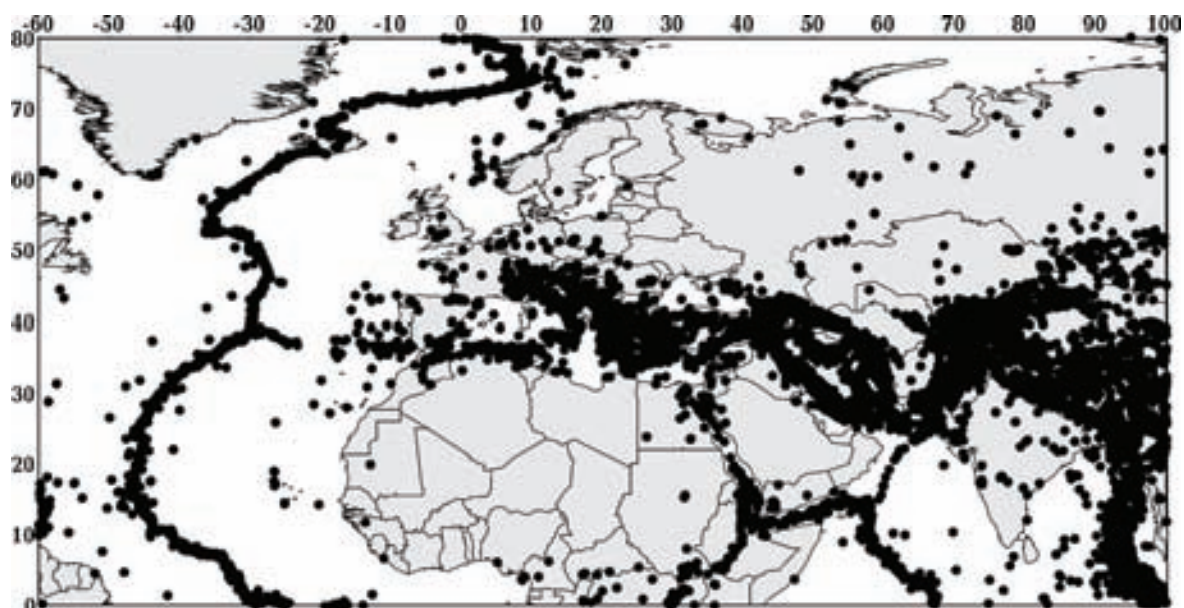


Рис. 1. Карта гипоцентров землетрясений, используемых в работе.

Численная реализация метода тейлорового приближения предполагает следующие основные этапы [Гейко и др., 1998; Геуко, 2004; Цветкова, 1996]:

- 1) создание базы данных времен прихода первых вступлений  $P$ -волн на станции мировой сети, представленные в бюллетенях ISC;
- 2) построение обобщенного поля времен в формате средней точки;

3) построение годографов-сечений обобщенного поля времен (годографы преломленной волны);

4) численное обращение годографов-сечений.

При визуализации результатов в качестве референтной модели использовалась модель обобщенной средней скорости для мантии под территорией Евразии и ее окружения (табл. 2), по-

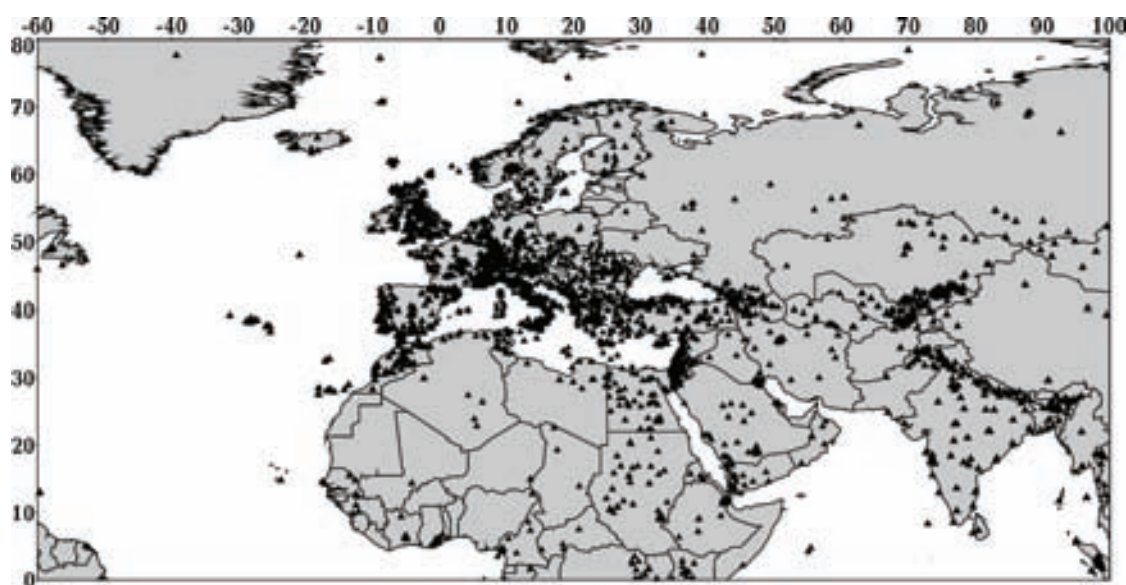


Рис. 2. Карта расположения сейсмических станций ISC, используемых в работе.

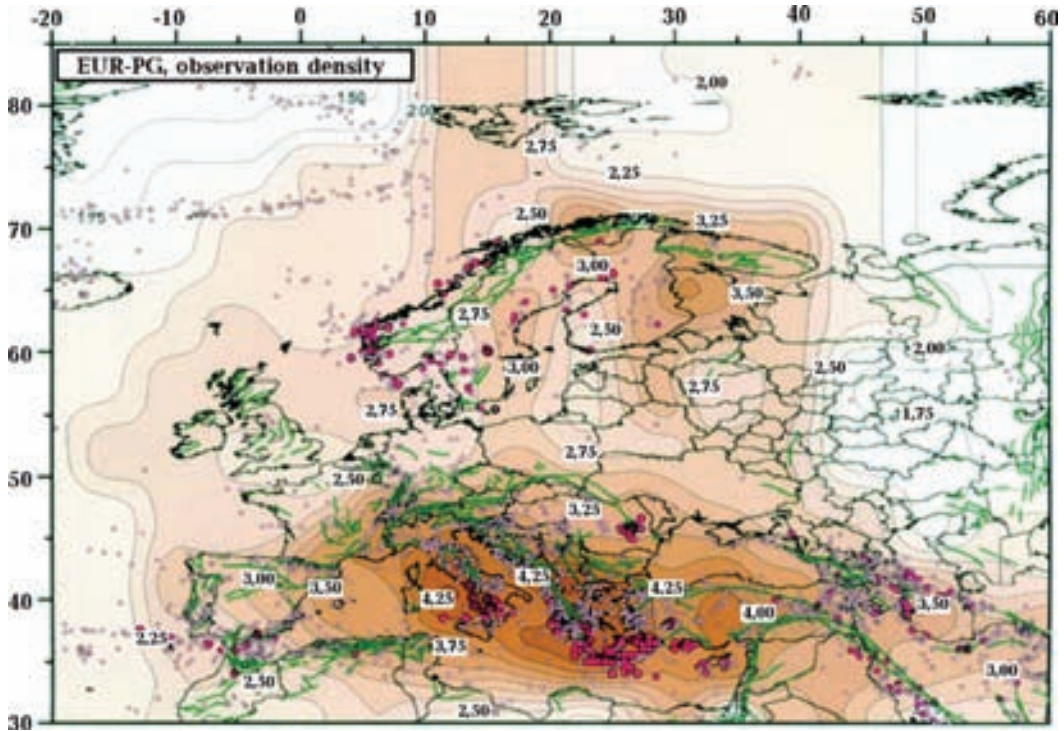


Рис. 3. Плотность наблюдения.

лученная для трехмерной скоростной модели [Гейко и др., 1998]:

$$V_{\max} = \sup_{\psi, \lambda \in S} V(\psi, \lambda, z),$$

$$V_{\min} = \inf_{\psi, \lambda \in S} V(\psi, \lambda, z),$$

$$V_{\text{aver}}(z) = z \left( \int_0^z \frac{d\zeta}{\sum(\zeta)} \iint_{s(\zeta)} \frac{d\psi d\lambda}{V(\psi, \lambda, \zeta)} \right)^{-1},$$

где  $S(\zeta)$  — сечение области обобщения на глубине  $\zeta$ , а  $\sum(\zeta)$  — его площадь в координатах  $\psi, \lambda$ .

Невязки истинных скоростей относительно указанной выше обобщенной средней скорости представляются в виде

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

Тогда выполнение условия  $\delta > 0$  определяет повышенные скорости,  $\delta < 0$  соответствует пониженным скоростям,  $\delta = 0$  — скоростной границе перехода между этими областями.

Горизонтальные сечения представлены в "истинных" скоростях, вертикальные — в виде невязок "истинных" скоростей относительно обобщенной модели средней скорости. Согласно проведенному тестированию, точность обращения годографов определена как 0,015 км/с [Цветкова, 1986; Гейко, Цветкова, 1989, 1993; Цветкова, 1996; Гейко, 1997; Гейко и др., 1998; Гейко, 2004]. Указанная точность задания скорости оправдана только в рамках выбранной оптимальной модели, параметры которой жестко связаны и взаимно обусловлены.

Использованные данные ISC позволили получить скоростное строение мантии под Европой в следующих интервалах глубин:

- 1) в полосе 30° с. ш. — 50° с. ш. модель представлена до глубины 2500 км;
- 2) в полосе 50° с. ш. — 60° с. ш. до глубины 1700 км;
- 3) в полосе 60° с. ш. — 70° с. ш. до глубины 1100 км;
- 4) в полосе 70° с. ш. — 80° с. ш. до глубины 850 км.

Детальное рассмотрение скоростного строения верхней мантии представлено в работах [Гейко и др., 2005—2007; Шумлянская, 2008; Бугаенко и др., 2008, 2012; Заец и др., 2009; Заец, 2011; Цветкова и др., 2009, 2010; Старостенко и др., 2011].

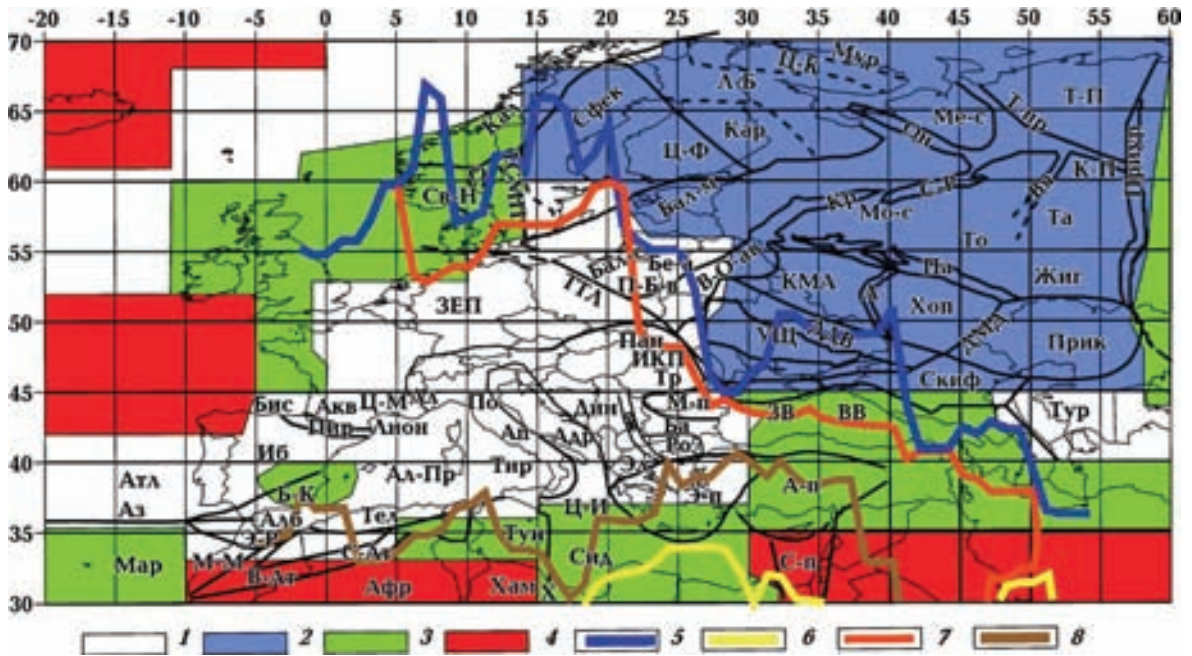


Рис. 4. Типизация мантии под Европой. *Типы мантии*: 1 — неустановившаяся по стабильному типу, 2 — стабильная, 3 — неустановившаяся по активизированному типу, 4 — активизированная. *Переходная зона верхней мантии*: 5 — максимальное северное распространение высокоскоростной переходной зоны фанерозойского окружения ВЕП, 6 — максимальное южное распространение высокоскоростной переходной зоны фанерозойского окружения Афро-Аравийской платформы, 7 — максимальное южное распространение низкоскоростной переходной зоны ВЕП, 8 — максимальное северное распространение низкоскоростной переходной зоны Афро-Аравийской платформы.

др., 2011 а—в]. Учитывая, что только для мантии под Восточно-Европейской платформой получено более 150 годографов-сечений, в приведенных публикациях [Гейко и др., 2007; Бугаенко и др., 2008; Цветкова и др., 2009] соотношения наблюдаемых и теоретических годографов представлены выборочно.

Основной целью работы было:

- 1) выделение основных типов мантии, соответствующих модели Пушаровских и отличающихся от нее, в соответствии с полученным скоростным строением, его основной субгоризонтальной расслоенностью;
- 2) определение соответствия тектонических структур выделенным типам мантии под рассматриваемым регионом.

Основной акцент делается на скоростных структурах средней и нижней мантии с учетом глубины освещенности.

**Типизация средней и нижней мантии под Европой.** Общим результатом проведенного анализа трехмерной  $P$ -скоростной модели мантии заданной области является типизация средней и нижней мантии под Европой. Карта-схе-

ма представлена на рис. 4. Базовый тип мантии определялся по скоростным характеристикам средней и нижней мантии без учета верхней мантии. Неустановившийся тип мантии определяется нарушениями основных типов расслоенности модели мантии Пушаровских, таких как отсутствие зоны раздела-1, несоответствие скоростных характеристик верхней мантии типизации средней и нижней, приведенной в табл. 1. Такие признаки характерны для неустановившейся мантии как по стабильному типу, так и по активизированному. Распространение высокоскоростных наклонных слоев из высокоскоростной переходной зоны с расширением в средней мантии, как правило, порождает активизированную мантию либо неустановившуюся по активизированному типу. Карта-схема (см. рис. 4) показывает, что основную часть мантии под Европой представляет неустановившаяся мантия по стабильному типу либо мантия стабильного типа, в совокупности определяющие юго-западное—северо-восточное направление. В целом выделяются четыре типа мантии по характеристикам средней и нижней мантии:

1) стабильная мантия, согласно модели Пушаровских;

2) неустановившаяся мантия по стабильному типу (нарушения стабильного типа мантии);

3) активизированная мантия, согласно модели Пушаровских;

4) неустановившаяся мантия по активизированному типу (нарушения активизированного типа мантии).

Как было указано, пределы исследуемой области — (20° в. д. — 60° в. д.) × (30° с. ш. — 70° с. ш.). Область включает северо-восточную часть Ат-

**Т а б л и ц а 2. Обобщенная модель средней скорости мантии под Евразией**

Depth, км	$V_{aver}$ , км/с	Depth, км	$V_{aver}$ , км/с	Depth, км	$V_{aver}$ , км/с
50	7,93	875	11,191	1700	12,4
75	8,011	900	11,244	1725	12,434
100	8,082	925	11,295	1750	12,469
125	8,139	950	11,343	1775	12,504
150	8,19	975	11,39	1800	12,538
175	8,241	1000	11,435	1825	12,57
200	8,296	1025	11,478	1850	12,6
225	8,356	1050	11,519	1875	12,63
250	8,422	1075	11,56	1900	12,659
275	8,498	1100	11,599	1925	12,688
300	8,584	1125	11,637	1950	12,716
325	8,682	1150	11,675	1975	12,745
350	8,794	1175	11,711	2000	12,775
375	8,918	1200	11,746	2025	12,834
400	9,053	1225	11,781	2050	12,865
425	9,177	1250	11,816	2075	12,865
450	9,29	1275	11,85	2100	12,896
475	9,4	1300	11,884	2125	12,927
500	9,522	1325	11,917	2150	12,959
525	9,661	1350	11,945	2175	12,99
550	9,829	1375	11,982	2200	13,022
575	10,007	1400	12,014	2225	13,054
600	10,18	1425	12,046	2250	13,086
625	10,322	1450	12,078	2275	13,118
650	10,466	1475	12,11	2300	13,149
675	10,585	1500	12,142	2325	13,18
700	10,69	1525	12,173	2350	13,211
725	10,783	1550	12,205	2375	13,241
750	10,866	1575	12,238	2400	13,27
775	10,94	1600	12,27	2425	13,299
800	11,01	1625	12,302	2450	13,328
825	11,074	1650	12,334	2475	13,356
850	11,134	1675	12,366	2500	13,384

лантического океана, северную окраину Афро-Аравийской платформы, западную часть Альпийско-Гималайского подвижного пояса и Внутренне-Альпийскую Европу, Восточно-Европейскую платформу, Скифскую плиту и часть Туранской плиты. В работе использована "Тектоническая карта Европы" под редакцией В. Е. Хаина [Тектоническая ..., 1985]. Указанным типам мантии соответствует мантия под следующими тектоническими областями.

*Стабильная мантия* выделяется под Восточно-Европейской платформой (за исключением ее северо-западной части), Скифской плитой и северо-западной частью Туранской плиты. Данная область ограничена с востока структурами Урала, под которыми выделяется неустановившаяся мантия по активизированному типу.

*Активизированная мантия* выделяется в четырех областях. Первая расположена в крайней северо-западной части, под о-вом Исландия и его окружением в Северной Атлантике. Активизация мантии в этом районе может быть соотнесена с влиянием известных "горячих точек" (плюмов) таких, как Исландский плюм и плюм Ян Майен [Anderson, Schramm, 2005].

Вторая область также располагается в Северной Атлантике (северная часть Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента). В нее входят Кантамбрийская зона и зона Астурии-Леона Иберийской микроплиты. Ее основную центральную часть составляет Западно-Европейская котловина Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента Северной Атлантики.

Третья область выделяется в северо-западной части Африканской плиты. С запада она ограничена Марокканской микроплитой (в Северной Атлантике) и включает Марроканскую Мессету, Высокий Атлас. Область распространяется на восток до грабена Хона и впадины Сидра, с севера ограничена Средним Атласом и Тунисской микроплитой. Одна из причин современного активизированного состояния мантии может быть связана с горячими точками Африки и Атлантики: Алжирской горячей точкой — (23° с. ш., 6° в. д.), Тибести — (21° с. ш., 17° в. д.), горячими точками Азорских о-вов (38° с. ш., 28° з. д.), Канарских о-вов (33° с. ш., 17° з. д.), Мадейры (28° с. ш., 17° з. д.) [Anderson, Schramm, 2005].

Четвертая область расположена в юго-западной части исследуемого региона, распространяется узкой полосой от Синайской субплиты в восточном направлении через Аравийскую плиту, Загрос и далее в пределах рассматриваемой территории. Влияние на активизированное состояние мантии могут оказывать Афарский

плюм (12° с. ш., 42° в. д.), горячая точка Дарфур (13° с. ш., 24° в. д.).

*Неустановившаяся мантия по активизированному типу.* Данный тип мантии представлен в пяти областях. Наименьшая из них выделяется в юго-западной части Иберийской микроплиты и прилегающих к ней с востока структур. Она включает в себя Западно-Иберийскую зону и восточную часть Центрально-Иберийской зоны Иберийской микроплиты, восточную часть Бетских Кордильер и примыкающую часть Средиземного моря в районе западных Балеарских о-вов (наиболее крупным является о-в Ибица). Следующие по размерам области выделяются под Уралом (на востоке) и Марокканской плитой в Северной Атлантике (на юго-западе исследуемой территории). Северным ограничением выделенной области под Марокканской микроплитой служит Азоро-Гибралтарский трансформный разлом.

Следующая область расположена на северо-западе Европы и характеризуется юго-западным—северо-восточным распространением. Она включает в себя Свеконорвежский мегаблок Балтийского щита, западную часть Скандинавских Каледонид, Северное море, о-ва Великобритания и Ирландия с прилегающей шельфовой зоной, Армориканский массив. Ее крайняя южная часть граничит с Бискайским заливом.

Пятая область находится на юго-востоке исследуемой территории и может быть разделена на две части: юго-западную и северо-восточную. Юго-западная часть включает в себя северо-восток Африканской плиты (между грабеном Хона и Синайской субплитой) с примыкающим на севере Средиземным морем, южные части Эгейской и Тунисской микроплит и далее на запад восточную часть Среднего Атласа. Северо-восточная часть включает в себя Анатолийскую микроплиту, Черное море (за исключением восточной и северной частей), Горный Крым, южную часть Скифской плиты, Кавказ, Южно-Каспийскую впадину, Эльбурс, хребет Копетдаг.

*Неустановившаяся мантия по стабильному типу.* Выделяются три области с неустановившейся мантией по стабильному типу. Первая находится в Северной Атлантике и обладает юго-западным—северо-восточным направлением. В данную область входит плато Роккол, Норвежский и Лофотенский бассейны. Вторая область находится в районе Среднего Каспия и Туранской плиты.

Третья, наибольшая из трех, располагается в центре исследуемой территории, характери-

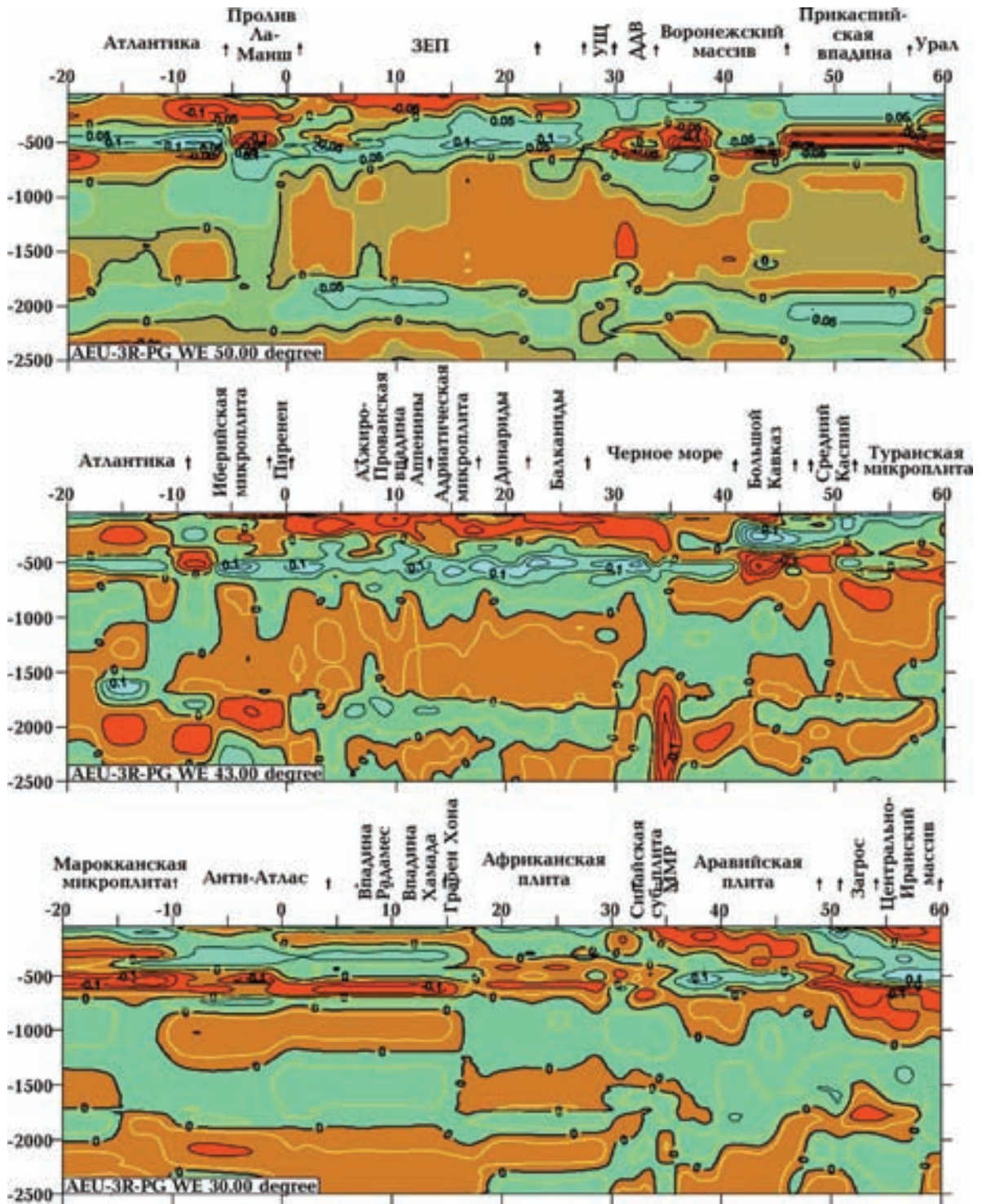


Рис. 5. Широтные вертикальные сечения 3D  $P$ -скоростной модели мантии до 2500 км: 50° с. ш., 43° с. ш., 30° с. ш.

зуется юго-западным—северо-восточным направлением. В нее входят следующие основные структуры: южная часть Иберийской котловины и Иберийского плато (Ньюфаундлендско-Иберийский

сегмент Северной Атлантики), Иберийская микроплита (за исключением северо-западной и юго-восточной частей), структуры Альпийско-Гималайского пояса (Пиренеи, Бетская Кордильера,



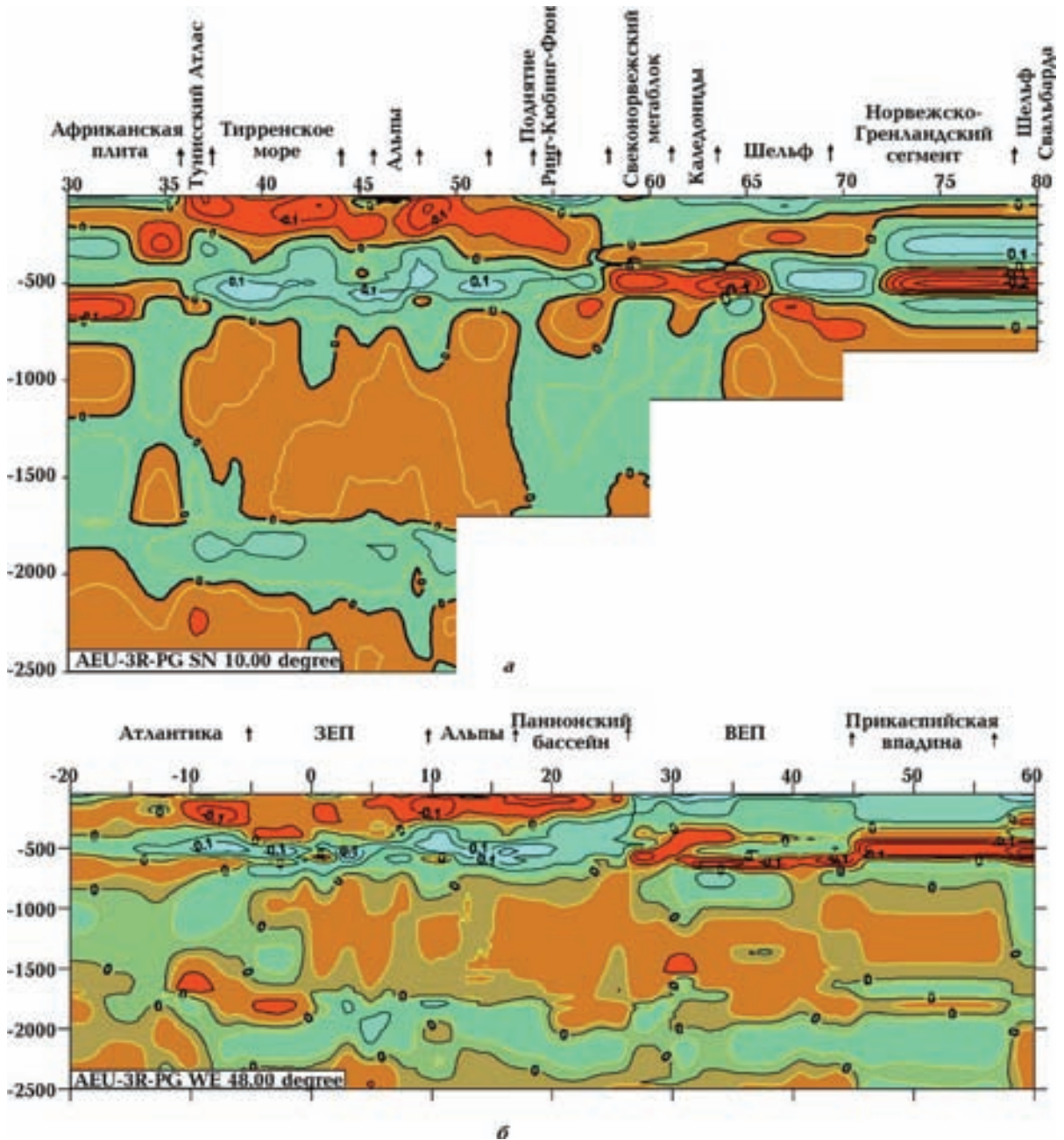


Рис. 6. Долготное вертикальное сечение 3D  $P$ -скоростной модели мантии  $10^\circ$  в. д. (а) и широтное вертикальное сечения 3D  $P$ -скоростной модели верхней мантии ( $48^\circ$  с. ш.) (б).

Эр-Риф, Тель-Атлас, Апеннины, Альпы, Динариды, Эллиниды, Карпаты, Балканиды), Алборанское море, Алжиро-Прованский бассейн, Тирренское море, северная часть Эгейского моря, Паннонский бассейн, Адриатическая плита, Мизийская плита, Западно-Европейская платформа, южная окраинная часть Восточно-Европейской платформы: район свекофенид Свеален-

да Свекофенского мегаблока Балтийского щита, юг Балтийского моря, Балтийская синеклиза, Мазуро-Белорусская антеклиза, юго-западная часть Вольно-Оршанского авлакогена.

На примере некоторых вертикальных сечений трехмерной  $P$ -скоростной модели мантии Европы представим более детально проявления различных типов мантии.

**Вертикальные сечения (рис. 5, 6).** В представленных сечениях изолиния нулевой невязки скорости представлена черным цветом (утолщенная), изолинии желтого цвета определяют ее доверительный интервал, согласно заявленной выше точности.

*Широтное сечение 30° с. ш. (см. рис. 5).* Согласно скоростным характеристикам, приведенным на рис. 5 для данного сечения, верхняя мантия и переходная зона верхней мантии в районе разлома Мертвого моря делится на две части — западную и восточную.

Западная часть характеризуется в основном высокоскоростной верхней мантией и низкоскоростной переходной зоной верхней мантии. Под Марокканской микроплитой и восточной частью Африканской плиты (между грабеном Хона и Синайской субплитой) отмечается отсутствие зоны раздела-1. Под этими структурами квазигомогенная средняя мантия характеризуется повышенными скоростями с включением на разных глубинах областей с пониженными скоростями: 1400—1700 км под западной частью Марокканской микроплиты, 1300—1650 км под Африканской плитой между грабеном Хона и Синайской субплитой. Зона раздела-2 характеризуется пониженными скоростями. Доступная исследованию часть нижней мантии характеризуется повышенными скоростями. Под Марокканской микроплитой, частью Африканской плиты (до грабена Хона включительно, в пределах 0—17° в. д.) и Синайской субплитой нижняя мантия обладает пониженными скоростями как и вышележащая зона раздела-2.

Под Аравийской плитой, Загросом и Центрально-Иранским массивом (восточная часть) верхняя мантия в основном низкоскоростная (со своими особенностями, связанными с распространением высокоскоростных наклонных слоев), переходная зона верхней мантии — высокоскоростная. В отличие от западной части, в восточной присутствует низкоскоростная зона раздела-1, характеризующаяся увеличенной мощностью (достигающей в некоторых местах глубины 1100 км). Особенность структур под Загросом и Центральным Иранским массивом — выделение в верхней и средней мантии наклонных слоев, имеющих восточное направление распространения и повышенную гетерогенность высокоскоростной средней мантии. Общим для всего сечения является основной высокоскоростной фон средней мантии с последующими низкоскоростными слоями зоны раздела-2 и выходами высокоскоростных областей из нижней мантии. Отмечаются выходы из средней ман-

тии через зону раздела-2 высокоскоростных слоев в нижнюю мантию под Синайской субплитой и Аравийской плитой, поднятие до 1500 км зоны раздела-2 под Загросом, общий наклон в восточном направлении высокоскоростной средней мантии со стороны Синайской субплиты в сторону Аравийской плиты.

Исходя из описанного, для данного сечения мантия под Марокканской микроплитой и частью Африканской плиты (между грабеном Хона и Синайской субплитой) характеризуется как неустановившаяся по активизированному типу, а мантия между данными структурами определяется как активизированная. Мантия под Аравийской плитой, Загросом, Центрально-Иранским массивом определяется как активизированная (см. рис. 4).

*Широтное сечение 43° с. ш. (см. рис. 5).* Для данного сечения основная характеристика верхней мантии низкоскоростная, за исключением высокоскоростных структур мантии под Туранской плитой и Каспийским морем, а также расслоенной мантии под Атлантической океанической плитой. Переходная зона в основном высокоскоростная, низкоскоростная под Туранской плитой и Каспийским морем. Следует отметить, что высокоскоростная переходная зона имеет повышенную мощность до 750 км, выходы в среднюю мантию до 1100 км под Пиренеями. Под Западно-Черноморской впадиной из высокоскоростной переходной зоны формируется высокоскоростной наклонный слой, распространяющийся на восток до глубины 1800 км под Каспийским морем. Такой же наклонный слой отмечается и в западном направлении — от Иберийской микроплиты до Атлантической океанической плиты (под которой выделяется зона раздела-1). Средняя мантия в основном низкоскоростная, за исключением областей распространения наклонных высокоскоростных слоев, связанных с высокоскоростной переходной зоной. Зона раздела-2 преимущественно высокоскоростная, нижняя мантия низкоскоростная, кроме области, распространяющейся от Иберийской микроплиты на запад и от Восточно-Черноморской впадины на восток, где она расслоена.

Таким образом, исходя из характера расслоенности скоростных характеристик, мантия под Атлантикой определяется как активизированная, между Атлантикой и условной границей 30° в. д. — как неустановившаяся по стабильному типу, а восточнее — как неустановившаяся по активизированному типу (за исключением мантии под Туранской микроплитой и Сред-

ним Каспием, которая определяется как неустановившаяся по стабильному типу).

*Широтное сечение 50° с. ш. (см. рис. 5).* На данном сечении представлены все четыре типа мантии. Стабильная мантия (с высокоскоростной верхней мантией, низкоскоростной переходной зоной верхней мантии, высокоскоростной зоной раздела-1, низкоскоростной средней мантией, высокоскоростной зоной раздела-2, низкоскоростной нижней мантией) выделяется от западной окраины Украинского щита на восток до Урала. Следует отметить, что на данном сечении существуют некоторые отклонения от классической стабильной мантии, например, увеличенная зона раздела-1 под ДДВ и мегаблоком КМА Воронежского кристаллического массива и высокоскоростная нижняя мантия под Прикаспийской впадиной.

Неустановившаяся мантия по стабильному типу (низкоскоростная верхняя мантия, высокоскоростная переходная зона верхней мантии, отсутствие зоны раздела-1, низкоскоростная средняя мантия, высокоскоростная зона раздела-2 и низкоскоростная нижняя мантия) выделяется от западного склона Украинского щита на запад до пролива Ла-Манш. Неустановившаяся по активизированному типу мантия выделяется под проливом Ла-Манш и Уралом, а активизированная мантия выделяется к западу от пролива Ла-Манш под структурами Северной Атлантики.

*Долготное сечение 10° в. д. (см. рис. 6, а).* На данном сечении представлены три типа мантии. Активизированная мантия выделяется под Африканской плитой (южнее 33° с. ш.). Неустановившаяся мантия по активизированному типу выделяется под Тунисским Атласом и примыкающей к нему северной частью Африканской плиты (севернее 33° с. ш.), а также под областью, которая включает в себя поднятие Ринг-Кюбинг-Фюн, Норвежско-Датскую впадину, Свеконорвежский мегаблок Фенноскандинавского щита и Скандинавские Каледониды. Неустановившаяся мантия по стабильному типу выделяется между вышеописанными областями с неустановившейся мантией по активизированному типу, а также к северу от Скандинавских Каледонид в Норвежском море.

**Выводы.** Общим результатом проведенного анализа трехмерной *P*-скоростной модели мантии под Европой является типизация средней и нижней мантии. Характерным признаком неустановившейся мантии по стабильному типу есть низкоскоростная верхняя мантия, высокоскоростная переходная зона, отсутствие зоны

раздела-1, средняя и нижняя мантии по стабильному типу. Неустановившаяся мантия по активизированному типу связывается, как правило, с распространением наклонных слоев, распространяющихся из верхней в среднюю (нижнюю) мантию и отсутствием зоны раздела-1.

В верхней мантии под территорией Европы четко проходит разграничение на стабильную верхнюю мантию под Восточно-Европейской платформой (верхняя мантия высокоскоростная, переходная зона низкоскоростная), что полностью соответствует модели Пушаровских, и активизированную верхнюю мантию (низкоскоростная верхняя мантия, высокоскоростная переходная зона), соответствующую фанерозойской Европе. Изменение основных скоростных границ в переходной зоне мантии под Европой показано на рис. 4. Представленные скоростные границы переходной зоны мантии не соответствуют границам распространения основных тектонических структур. Обращают на себя внимание области, связанные с распространением высокоскоростного наклонного слоя от мантии под западным окончанием УЩ, Подляско-Брестской впадины и Центральным Польским валом на запад (см. рис. 6, б). Их характерной чертой является отсутствие зоны раздела-1 и, как следствие, при сохранении инверсии скоростей, нарушение характеристик активизированной мантии модели Пушаровских. На отсутствие зоны раздела-1 показывают и представленные в работах [Spakman, 1993; Zielhuis, Nolet, 1994; Pìromallo, Morelli, 2003; Koulakov et al., 2009] скоростные модели мантии Средиземноморья.

Таким образом, под Европой выделяются четыре типа мантии, определенных относительно модели Пушаровских (см. рис. 4):

- а) стабильная мантия — основная часть ВЕП;
- б) активизированная мантия — фрагменты Северной Атлантики, северо-западная часть Африканской плиты, Синайская субплита, север Аравийской плиты, Загрос, структуры Средней Азии, Исландия и Западно-Европейская котловина (Северная Атлантика);
- в) неустановившаяся мантия по активизированному типу — Марокканская микроплита в Атлантике, северо-восточная часть Африканской плиты (с примыкающей с севера частью Средиземного моря), Анатолийская микроплита, основная часть Черного моря, Кавказ, Южно-Каспийская впадина, Урал, Свеконорвежский мегаблок Балтийского щита, западная часть Скандинавских Каледонид, Северное море, область о-вов Великобритании и Ирландии;

г) неустановившаяся мантия по стабильному типу — Западно-Европейская платформа, западная часть ВЕП, структуры Западного и Восточного Средиземноморья (Альпийско-Гималайского пояса), Структуры Северной Атлантики (Иберийская котловина, плато Роккол, Норвежский и Лофотенский бассейн), Центральный Каспий.

Проведенные рассмотрения показывают распространение тектоносферы на все слои мантии. Типизация средней и нижней мантии увязывается с геодинамическими процессами, связанными с Срединно-Атлантическим хребтом, становлением и развитием Альпийского пояса (см. [Хаин, 2001]).

### Список литературы

- Бугаенко И. В., Шумлянская Л. А., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. Трехмерная  $P$ -скоростная модель верхней мантии Западного Средиземноморья. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 1. С. 14—31.
- Бугаенко И. В., Шумлянская Л. А., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. Трехмерная  $P$ -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., Бугаенко И. В., Шумлянская Л. А., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. 3D  $P$ -скоростное строение верхней мантии Восточного Средиземноморья. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 4. С. 13—30.
- Гейко В. С., Цветкова Т. А. Об условной корректности одномерной кинематической задачи сейсмологии. *Геофиз. журн.* 1993. Т. 15. № 3. С. 27—50.
- Гейко В. С., Цветкова Т. А. О единственности решения одномерной обратной кинематической задачи сейсмологии. 3. *Геофиз. журн.* 1989. Т. 11. № 6. С. 61—66.
- Гейко В. С., Цветкова Т. А., Санникова Н. П., Ливанова Л. П., Гейко К. В. 3D  $P$ -скоростная модель мантии северо-западной Евразии. 1. Европа. *Геофиз. журн.* 1998. Т. 20. № 3. С. 67—91.
- 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.
- Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд. СО РАН "ГЕО", 2001. 408 с.
- Заец Л. Н. Скоростные границы в мантии Юго-Восточной Азии и Южного Китая. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 1. С. 62—71.
- Заец Л. Н., Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Шумлянская Л. А. 3D  $P$ -скоростное строение верхней мантии Индокитая и его окружения. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 2. С. 47—60.
- Лаврентьев М. М., Романов В. Г., Шишатский С. П. Некоторые проблемы математической физики и анализа. Москва: Наука, 1980. 286 с.
- Пуцаровский Ю. М., Пуцаровский Д. Ю. Геология мантии Земли. Москва: Геос, 2010. 138 с.
- Старостенко В. И., Кензгера А. В., Бугаенко И. В., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. Цунамогенное землетрясение у побережья Северной Суматры (26 декабря 2004 г.). *Геофиз. журн.* 2011 а. Т. 33. № 2. С. 3—15.
- Старостенко В. И., Кензгера А. В., Бугаенко И. В., Цветкова Т. А. Землетрясение в Аквиле и особенности трехмерного  $P$ -скоростного строения мантии под Адриатической микроплитой и ее окружением. *Геофиз. журн.* 2011 б. Т. 33. № 4. С. 62—73.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е., Цветкова Т. А., Заец Л. Н., Донцов В. В., Савиных Ю. В. Об участии суперглубинных флюидов в нефтидогенезе (по данным изучения уникального нефтяного месторождения Белый Тигр). *Геофиз. журн.* 2011 в. Т. 33. № 4. С. 3—32.
- Тектоническая карта Европы. Под ред. В. Е. Хаина. Москва: Мингео СССР, 1985.
- Трубицын В. П. Природа границы между верхней и нижней мантией и ее влияние на конвекцию. *Физика Земли.* 2010. Т. 19. № 6. С. 2—18.
- Шумлянская Л. А. Мантийные блоки и зоны повышенной проницаемости Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 2. С. 135—144.
- Цветкова Т. А. Продолжение обобщенного поля времен вниз и обратная кинематическая задача сейсмологии. *Доп. НАН України.* 1996. № 1. С. 79—85.
- Цветкова Т. А. Численное дифференцирование экспериментальных сейсмических годографов. *Докл. АН УССР. Сер. Б.* 1986. № 10. С. 24—28.

- Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской и Баренцево-Печорской платформ: трехмерная  $P$ -скоростная модель мантии под Волго-Уралией, Прикаспийской впадиной и Баренцево-Печорской платформой. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 5. С. 35—50.
- Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная  $P$ -скоростная модель мантии под Фенноскандией. I. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 1. С. 53—72.
- Хаин В. Е. Тектоника континентов и океанов. Москва: Научный мир, 2001. 604 с.
- Anderson D. L., Schramm K. A., 2005. Global Hot-spot Maps. In: *Plates, Plumes and Paradigms*. Publ. Geol. Soc. Amer. Special Paper 388, 19—29.
- 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. *Geofizicheskiy zhurnal* 26 (1), 3—32.
- Inoue H., Fukao Y., Tanabe K., Ogata Y., 1990. Whole mantle  $P$ -wave travel-time tomography. *Phys. Earth Planet. Int.* 59, 294—328.
- Koulakov I., Kaban M. K., Tesauro M., Cloetingh S., 2009.  $P$ - and  $S$ -velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data. *Geophys. J. Int.* 179, 345—366.
- Piromallo C., Morelli A., 2003.  $P$ -wave tomography of the mantle under the Alpine-Mediterranean area. *J. Geophys. Res.* 108 (B2), 2065. doi: 10.1029/2002JB001757.
- Spakman W., Van der Lee S., Van der Hilst R. D., 1993. Travel-time tomography of the European-Mediterranean mantle down to 1400 km. *Phys. Earth Planet. Int.* 79, 3—74.
- Zielhuis A., Nolet G., 1994. Shear-wave velocity variations in the upper mantle beneath central Europe. *Geophys. J. Int.* 117, 695—715.

## Velocity typing the middle and lower mantle of Europe

© I. V. Bugaenko, L. N. Zaets, T. A. Tsvetkova, 2015

We used 3D  $P$ -velocity model of the mantle of Europe. The model was constructed by V. S. Geyko's proposed method of Teylor approximate solution of seismic tomography. The velocity structure of the middle and lower mantle of the velocity model was analyzed. Four types of mantle have been allocated under Europe: the stable mantle, the activated mantle, the mantle unsteady on an activated type, the unsteady mantle on a stable type.

**Key words:** seismotomography,  $P$ -velocity model, middle and lower mantle, typification, Europe.

### References

- Bugaenko I. V., Shumlyanskaya L. A., Zaets L. N., Tsvetkova T. A., 2012. Three-dimensional  $P$ -velocity model of the upper mantle of the Western Mediterranean. *Geofizicheskiy zhurnal* 34 (1), 14—31 (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 surrounding area. *Geofizicheskiy zhurnal* 30 (5), 145—160 (in Russian).
- Geyko V. S., 1997. Taylor approximation of the wave equation and the eikonal in seismic inverse problems. *Geofizicheskiy zhurnal* 19 (3), 48—68 (in Russian).
- Geyko V. S., Bugaenko I. V., Shumlyanskaya L. A., Zaets L. N., Tsvetkova T. A., 2007. 3D  $P$ -velocity structure of the upper mantle of the Eastern Mediterranean. *Geofizicheskiy zhurnal* 29 (4), 13—30 (in Russian).
- Geyko V. S., Tsvetkova T. A., 1993. The conditional correctness of one-dimensional kinematic seismic problem. *Geofizicheskiy zhurnal* 15 (3), 27—50 (in Russian).

- Geyko V.S., Tsvetkova T.A., 1989. On the uniqueness of solutions of two-dimensional inverse kinematic seismic problem. 3. *Geofizicheskiy zhurnal* 11 (6), 61—66 (in Russian).
- Geyko V.S., Tsvetkova T.A., Sannikova N.P., Livanova L.P., Geyko K.V., 1998. 3D *P*-velocity model of the mantle northwestern Eurasia. 1. Europe. *Geofizicheskiy zhurnal* 20 (3), 67—91 (in Russian).
- Geyko V.S., Tsvetkova T.A., Shumlyanskaya L.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., 2005. Regional 3D *P*-velocity model of the mantle of Sarmatia (south-west of the East European Platform). *Geofizicheskiy zhurnal* 27 (6), 927—939 (in Russian).
- Geyko V.S., Shumlyanskaya L.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., Tsvetkova T.A., 2006. Three-dimensional model of the upper mantle of Ukraine at times *P*-wave. *Geofizicheskiy zhurnal* 28 (1), 3—16 (in Russian).
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G., Kirdyashkin A.A., 2001. Deep geodynamics. Novosibirsk: Publ. SB RAS "GEO", 408 p. (in Russian).
- Zaets L.N., 2011. Speed mantle boundary in Southeast Asia and southern China. *Geofizicheskiy zhurnal* 33 (1), 62—71 (in Russian).
- Zaets L.N., Tsvetkova T.A., Bugaenko I.V., Shumlyanskaya L.A., 2009. *P*-velocity structure of the upper mantle of Indochina and its environment. *Geofizicheskiy zhurnal* 31 (2), 47—60 (in Russian).
- Lavrentiev M.M., Romanov V.G., Shishatskiy S.P., 1980. Some problems of mathematical physics and analysis. Moscow: Nauka, 286 p. (in Russian).
- Pushcharovskiy Yu.M., Pushcharovskiy D.Yu., 2010. Geology Earth's mantle. Moscow: Geos, 138 p. (in Russian).
- Starostenko V.I., Kendzera A.V., Bugaenko I.V., Zaets L.N., Tsvetkova T.A., 2011 a. Tsunamogennoe earthquake of the coast of North Sumatra (26 December 2004). *Geofizicheskiy zhurnal* 33 (2), 3—15 (in Russian).
- Starostenko V.I., Kendzera A.V., Bugaenko I.V., Tsvetkova T.A., 2011 b. Earthquake in L'Aquila and features three-dimensional *P*-velocity structure of the mantle beneath the Adriatic microplate and its surroundings. *Geofizicheskiy zhurnal* 33 (4), 62—73 (in Russian).
- Starostenko V.I., Lukin A.E., Tsvetkova T.A., Zaets L.N., Dontsov V.V., Savinykh Yu.V., 2011 c. On participation superglubinnyyh fluids in naphthidogenesis (according to the study of the unique oil field White Tiger). *Geofizicheskiy zhurnal* 33 (4), 3—32 (in Russian).
- Tectonic map of Europe. Ed. V.E. Khain. Moscow: Ministry of Geology of the USSR, 1985. (in Russian).
- Trubitsin V.P., 2010. Nature border between the upper and lower mantle and its influence on convection. *Fizika Zemli* 19 (6), 2—18 (in Russian).
- Shymlyanskaya L.A., 2008. Mantle blocks and zones of increased permeability of the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy zhurnal* 30 (2), 135—144.
- Tsvetkova T.A., 1996. Continuation of the generalized field the way down and inverse kinematic problem of seismology. *Dopovidi NAN Ukrainy* (1), 79—85 (in Russian).
- Tsvetkova T.A., 1986. Numerical differentiation of experimental seismic travel-time curves. *Doklady AN USSR. Ser. B* (10), 24—28 (in Russian).
- Tsvetkova T.A., Shumlyanskaya L.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., 2010. Seismotomography East European and Barents-Pechora platforms: three-dimensional *P*-velocity model of the mantle beneath the Volga-Urals, the Caspian Basin and the Barents and Pechora platform. *Geofizicheskiy zhurnal* 32 (5), 35—50 (in Russian).
- Tsvetkova T.A., Shumlyanskaya L.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., 2009. Seismotomography East European Platform: three-dimensional *P*-velocity model of the mantle beneath Fennoscandia. I. *Geofizicheskiy zhurnal* 31 (1), 53—72 (in Russian).
- Khain V.E., 2001. Tectonics continents and oceans. Moscow: Nauchnyy Mir, 604 p. (in Russian).
- Anderson D.L., Schramm K.A., 2005. Global Hot-spot Maps. In: *Plates, Plumes and Paradigms*. Publ. Geol. Soc. Amer. Special Paper 388, 19—29.
- 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. *Geofizicheskiy zhurnal* 26 (1), 3—32.
- Inoue H., Fukao Y., Tanabe K., Ogata Y., 1990. Whole mantle *P*-wave travel-time tomography. *Phys. Earth Planet. Int.* 59, 294—328.
- Koulakov I., Kaban M.K., Tesauro M., Cloetingh S., 2009. *P*- and *S*-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data. *Geophys. J. Int.* 179, 345—366.
- Piromallo C., Morelli A., 2003. *P*-wave tomography of the mantle under the Alpine-Mediterranean area. *J. Geophys. Res.* 108 (B2), 2065. doi: 10.1029/2002JB001757.
- Spakman W., Van der Lee S., Van der Hilst R.D., 1993. Travel-time tomography of the European-Mediterranean mantle down to 1400 km. *Phys. Earth Planet. Int.* 79, 3—74.
- Zielhuis A., Nolet G., 1994. Shear-wave velocity variations in the upper mantle beneath central Europe. *Geophys. J. Int.* 117, 695—715.