

Структура скоростной этажности мантии под Фенноскандией по данным сейсмотомографии

© Т. А. Цветкова, И. В. Бугаенко, 2016

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 17 ноября 2015 г.

Представлено членом редколлегии В.И. Старостенко

Згідно з тривимірною P -швидкісною моделлю мантиї під Фенноскандією, показано швидкісну поверховість верхньої мантиї та її перехідної зони. Виділено чотири швидкісні поверхи і відповідні їм сейсмічні межі 2-го роду, в тому числі перехідної зони. У верхній мантиї ці межі відповідають відомим межам, установленим за наддовгими профілями: Феннолора, Кварц, Рубін і масив Свеколапка.

Ключові слова: сейсмічна томографія, сейсмічні межі 2-го роду.

Введение. Многомерная задача обращения времен пробега объемной волны в изотропной упругой среде сводится к решению в общем случае нелинейного операторного уравнения первого рода: $\mathbf{F}(n) = t$, где \mathbf{F} — вполне непрерывный оператор, $n \in N$, N и T — полные метрические пространства, а пространство N такое, что никакой шар в нем не является компактом [Лаврентьев и др., 1980]. С точки зрения математической физики задача состоит в решении интегрального уравнения первого рода

$$\mathbf{F}(n) \equiv \int_{r(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1)} n(\mathbf{x}) |d\mathbf{x}| = t(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1)$$

относительно римановой метрики $n(\mathbf{x}) |d\mathbf{x}|$ в замкнутой области D евклидова пространства R^m , $m \geq 2$, переменной $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ с гладкой границей S через ее расстояния $t(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1)$, $\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1 \in S$, вдоль геодезических $\gamma(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1)$, соединяющих точки поверхности S . Функции t и $v = n^{-1}$ имеют смысл времени и скорости передачи сигнала. Размерность вектора переменных $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, $k \geq 1$, на котором определена функция n , меньше или равна размерности пространства R^m , содержащего область D .

Метод линеаризации в строгом изложении состоит в следующем. Пусть

$$n(\mathbf{x}) = n_0(z) + n_1(\mathbf{x}),$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$, $z = x_3$ — глубина, $n_0(z)$ —

одномерная эталонная (референтная) медленность и $n_1(\mathbf{x})$ — ее малое возмущение. Если выполняется условие

$$\|n_1(\mathbf{x})\|_{C^2(D)} \ll \|n_0(z)\|_{C^2(D)},$$

то справедливо приближенное равенство

$$t(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1) = t_0(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1) + O(n_1^2),$$

где

$$t_0(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1) = \int_{\gamma_0(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1)} n_0(z) |d\mathbf{x}|$$

есть время пробега сигнала в референтной среде и

$$t_1(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1) = \int_{\gamma_0(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1)} n_1(\mathbf{x}) |d\mathbf{x}|$$

— его возмущение на геодезической $\gamma_0(\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1)$ референтной модели.

Пусть функция $n(\mathbf{x}, z)$: 1) положительна; 2) ограничена; 3) принадлежит пространству $C^1(-\infty, \infty)$ по переменным \mathbf{x}, z ; 4) как функция переменной z : а) дважды кусочно-гладкая, б) монотонно убывает всюду кроме слоев с повышенной медленностью (пониженной скоростью), число которых конечно; 5) такая, что

$$\|n\|_{C^1(0, \infty)} \gg \|n\|_{C^1(-\infty, \infty) \times C^1(-\infty, \infty)},$$

где $\|n\|$ — норма n как функции z слева и как функции \mathbf{x} справа.

Пусть в евклидовом пространстве R^3 переменных \mathbf{x}, z , $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$, где ось z направлена вниз, задана область $D = \{(\mathbf{x}, z) : |\mathbf{x}| < \infty, 0 \leq z \leq Z < \infty\}$ с верхней и нижней границами $S : z = 0$ и $R : z = Z$.

Численное решение обратной многомерной линеаризованной кинематической задачи сейсмологии (задачи сейсмической томографии) независимо от метода решения есть положительная, дважды дифференцируемая функция $v(x, y, z)$, определенная в области D как функция z , монотонно возрастающая всюду, кроме слоев с пониженной скоростью, число которых конечно. Как правило, численное решение задачи представляется в виде горизонтальных сечений функции по z с шагом h , а также долготных и широтных сечений, которые представляют собой невязки скорости относительно некоторой референтной модели V_{ref} скорости:

$$\delta(x, y, z) = V(x, y, z) - V_{\text{ref}}(z).$$

Отсюда, учитывая, что $\delta(x, y, z)$ определяет поправку к референтной модели (мы не конкретизируем референтную модель), получаем

$$(V(x, y, z) - V_{\text{ref}}(z)) / h \sim \partial V / \partial x(x, y, z), \\ x \in (x_H, x_K),$$

$$(V(x, y, z) - V_{\text{ref}}(z)) / h \sim \partial V / \partial y(x, y, z), \\ y \in (y_H, y_K),$$

что соответствует при условии $h \rightarrow 0$ конечно-разностному представлению градиента скорости по широте и долготе соответственно. Учитывая трехмерность рассматриваемой задачи, введем величину

$$(V(x, y, z+h) - V(x, y, z)) / h \sim \partial V(x, y, z) / \partial z, \\ z \in (z_H, z_K).$$

Тем самым в рассмотрение вводится конечно-разностные представления градиента скорости по глубине. Последнее завершает градиентное представление трехмерной скоростной среды. Учитывая разрешающую способность метода сейсмической томографии, в пределах верхней мантии и ее переходной зоны ($0,5^\circ \times 0,5^\circ \times 50$ км) в конечно-разностном представлении градиентных характеристик выбран шаг $h = 25$ км [Artemieva, 2011]. Следствием этого является до-

статочно грубое представление градиента по глубине.

Настоящая статья является продолжением серии предыдущих работ по скоростному строению мантии под Фенноскандией [Цветкова и др., 2009, 2010, 2015]. В работе использованы следующие общие представления.

Под обобщенным полем времен понимается поле произвольного распределения источников (x_i, y_i, z_i) и приемников (ζ_i, η_i, ξ_i) в пространстве зависимости времен для волны заданного типа от указанных шести переменных [Пузырев, 1997]. Различные сечения такого многомерного поля представляют собой как частные поля времен, так и годографы того или иного вида.

Сейсмические границы 2-го рода определяются изменением градиента скорости по глубине (переход от увеличения к уменьшению, и наоборот) [Пузырев, 1997].

Скоростное строение мантии под Фенноскандией получено согласно решению задачи сейсмической томографии методом тейлорового приближения, предложенного В. С. Гейко [Geuko, 2004]. Тейлорово приближение трехмерной задачи обращения времен пробега имеет следующие ключевые преимущества по сравнению с методом линеаризации:

- 1) дает ощутимый выигрыш в точности приближения нелинейности;
- 2) справедливо при более слабых ограничениях на скорость. Особенно важно, что тейлорово приближение применимо, когда в разрезе имеются зоны с пониженной скоростью;
- 3) не требует задания референтной скорости как начального приближения;
- 4) является задачей, корректной по Тихонову, вместо существенно некорректной задачи классической линеаризации;
- 5) значительно сокращает размерность задачи численного обращения, поскольку предполагает сканирование поля времен и обращение вместо его обращения в целом;
- 6) в равной мере справедливо как для решения в прямоугольной декартовой системе координат, так и в полярной, благодаря известному конформному отображению шара на полупространство [Gerver, Markushevich, 1967].

Метод может быть применен как в случае обращения 3D сейсмологических и 2D данных ГСЗ о временах пробега преломленных волн, так и для интерпретации отражений от субгоризонтальных границ раздела. Радикальную де-

тализацию 3D P (или S) скоростной модели можно ожидать только при использовании для каждого региона не только данных Международного сейсмологического центра данных (бюллетени ISC), но и дополнительных данных о:

- а) временах первых и последующих вступлений, наблюдаемых на длинных (long-range) и refraction/wide angle reflection профилях ГСЗ;
- б) временах прихода первых и последующих фаз от слабых землетрясений, записанных близкими станциями региональных сейсмических сетей;
- в) временах вступления последующих фаз в диапазоне эпицентральных расстояний примерно $12\text{--}25^\circ$, определенных по записям сильных землетрясений.

Использование пунктов а) и б) позволило бы уточнить структуру литосферы и астеносферы, а данные пункта в) — топографию и характер границ раздела на глубинах переходной зоны верхней мантии приблизительно 410 и 670 км.

Численная реализация метода [Цветкова, 1996] предполагает следующие этапы построения модели:

- 1) построение обобщенного поля времен, согласно бюллетеням ISC, и областей-сечений обобщенного поля времен (для мантии под Фенноскандией представлены на рис. 1);
- 2) построение годографов-сечений обобщенного поля времен в формате средней точки;
- 3) численное обращение полученных годографов преломленной волны;
- 4) построение графического изображения полученных результатов.

Дальнейшие построения справедливы в рамках принятой модели, которая определяется аксиоматикой, включающей в себя априорные предположения, теорию, алгоритмизацию, численные методы решения, графическое представление полученных решений.

Трехмерная P -скоростная модель мантии под Фенноскандией была представлена в виде горизонтальных сечений в истинных скоростях с шагом 25 км по глубине, вертикальных (долготных и широтных) сечений с шагом через 1° [Цветкова и др., 2015]. Долготные и широтные сечения показаны в невязках скорости относительно полученной для мантии под территории

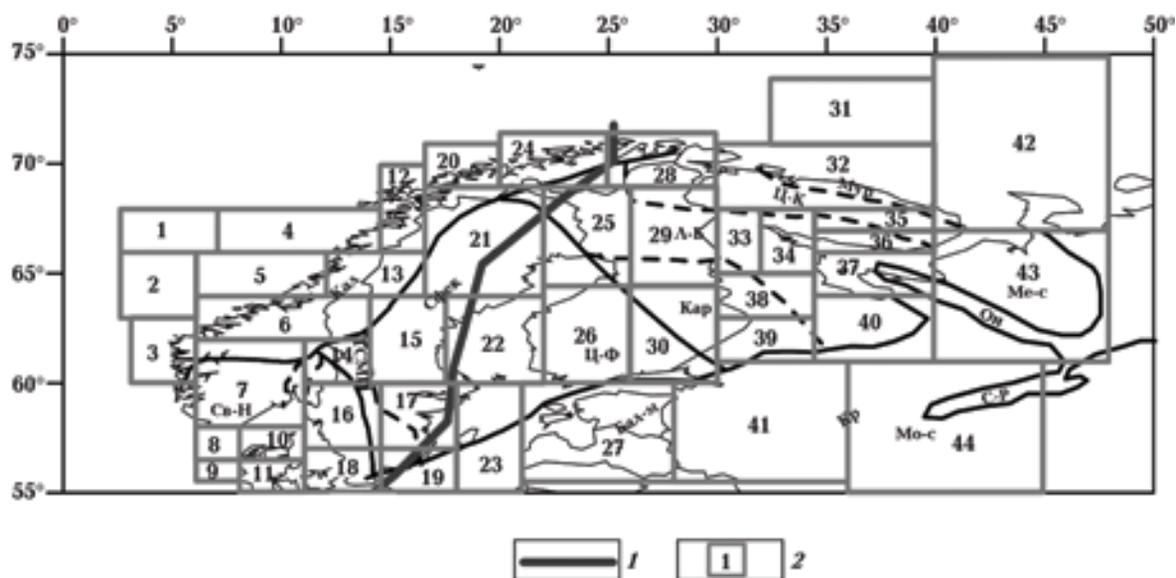


Рис. 1. Тектоническая схема Фенноскандинавского щита (по В.Е. Хаину [Хаин, 2001] (обобщенно)) с вынесенной схемой расположения вертикальных годографов-сечений поля времен: 1 — профиль Феннолора, 2 — номер вертикальных годографов-сечений; Бал-м — Балтийская моноклиналь, Кал — Скандинавские каледониды, Кар — Карельский блок Кольско-Карельского мегаблока, Кр — Крестовский авлакоген, Л-Б — Лапландско-Беломорский гранитогнейсовый пояс Кольско-Беломорского мегаблока, Мо-с — Московская синеклиза, Ме-с — Мезенская синеклиза, Мур — Мурманский блок Кольско-Карельского мегаблока, О — грабен Осло (Свекофенский мегаблок), Он — Онежский грабен (Кольско-Карельский мегаблок), С-Р — Среднерусский авлакоген, Св-Н — Свекофенский мегаблок, ТСМП — Трансскандинавский магматический пояс, Ц-К — Центрально-Кольский блок (Кольско-Карельский мегаблок), Ц-Ф — Центральный Финляндский массив (Свекофенский мегаблок).

ей Евразии и ее окружения обобщенной модели средняя скорость—глубина $\{V_{\min}(z), V_{\max}(z), V_{\text{aver}}(z)\}$. Относительно нее в горизонтальных сечениях проведено выделение повышенных и пониженных скоростей. Обобщенная модель скорость — глубина получена для трехмерной скоростной модели согласно следующим формулам [Гейко и др., 1998]:

$$V_{\max} = \sup V(\varphi, \lambda, z), \quad \varphi, \lambda \in S,$$

$$V_{\min} = \inf V(\varphi, \lambda, z), \quad \varphi, \lambda \in S,$$

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

где $S(\zeta)$ — сечение области обобщения на глубине ζ , а $\Sigma(\zeta)$ — его площадь в координатах φ, λ .

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

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

Скоростная этажность верхней мантии и переходной зоны. Учитывая достаточно детальную сеть профилей ГСЗ, ОГТ МОВЗ, присутствие таких сверхдлинных профилей, как Феннолора, Кварц, Рубин, системы Свеколапка (их расположение представлено на рис. 8 согласно работе [Трипольский, Шаров, 2004]), нашей задачей является анализ изменения производной скорости по глубине и, как следствие, выделение структурных скоростных этажей, соответствующих полученным сейсмическим границам 2-го рода верхней мантии, ее переходной зоны, зоны раздела 1 в пределах всей исследуемой территории.

В предыдущих работах [Цветкова и др., 2009, 2010, 2015] были представлены схемы источников и приемников, использованных при построении трехмерной P -скоростной модели мантии под Фенноскандией, соответствие наблюдаемых и полученных теоретических годографов, а также проанализированы полученная структура скоростной градиентной среды по долготе и широте и горизонтальные сечения на глубине до 850—1100 км в зависимости от освещенности мантии исследуемой территории.

Результат решения задачи сейсмической томографии по методу тейлорового приближения может быть представлен как матрица $\{V_j(x, y, z)\}$, где $z_k^j = z_{k-1}^j + h$, $z_k \in (50, H_j)$, глубина освещенности среды для j -й области-сечения исход-

ного обобщенного поля времен, (x^j, y^j) — долгота и широта центров тяжести этой же области-сечения, N_j — количество областей-сечений, S_j — одна из них. Функции $\{V_j(x, y, z)\}$ не убывают. Последнее определено тем, что одномерная задача обращения времен пробега, когда скорость зависит только от глубины z , всегда сводится к решению линейного операторного уравнения [Гейко, 1993]

$$\mathbf{A}H = t,$$

где $H(u) = \text{mes}\{z \geq 0 : n(z) \geq u\}$, $u \geq 0$ — функция распределения медленности $n(z)$. Каждая из функций $V_j(z)$ соответствует функции $H_j(u)$.

Известно, что непрерывная дважды дифференцируемая функция имеет точки перегиба, в которых $v''(z) = 0$ определяет переход от $v''(z-h) < 0$ к $v''(z+h) > 0$ и наоборот.

Построим последовательности $\{v^j(z_k) - v^j(z_{k-1})\} / h$, $j = 1, m$, согласующиеся с полученной скоростной моделью. Последние будут представлять приближение конечно-разностных градиентов. Проведем масштабирование конечно-разностных градиентов относительно шага h . Последовательность $\{h(v^j(z_k) - v^j(z_{k-1})) / h\} / h$, $j = 1, m$ — невязки скорости по глубине.

Следует отметить, что в силу требования убывания функции скорости невозможно получить сейсмические границы 1-го рода и, как следствие, границы, на которых происходят отражения. Рис. 2 показывает поведение градиентов скорости для сечений обобщенного поля времен. Глубины залегания сейсмической границы 2-го рода соответствуют глубинам изменения градиента скорости для области сечения.

Результаты построения сейсмических границ 2-го рода для исследуемого региона приведены на рис. 3. Согласно поведению градиентов в пределах верхней мантии и ее переходной зоны выделяются четыре скоростных этажа. Как кровля, так и подошва каждого этажа не выдержаны по глубине залегания. I этаж определяется в основном на глубине 50—150 км и содержит слои, определяемые как повышением, так и понижением градиентов. II этаж определяется достаточно обширной областью повышения градиента, соответствующей, в основном, интервалу глубин 150—400 км, и не содержит слоев, определяемых убыванием градиентов скорости. III этаж определен в основном на глубине 400—575 км и также, как и I, содержит слои, определяемые повышением и понижением градиентов. IV этажу соответствует понижение градиента скорости. Как было указано, переходу от повышения градиента к пони-

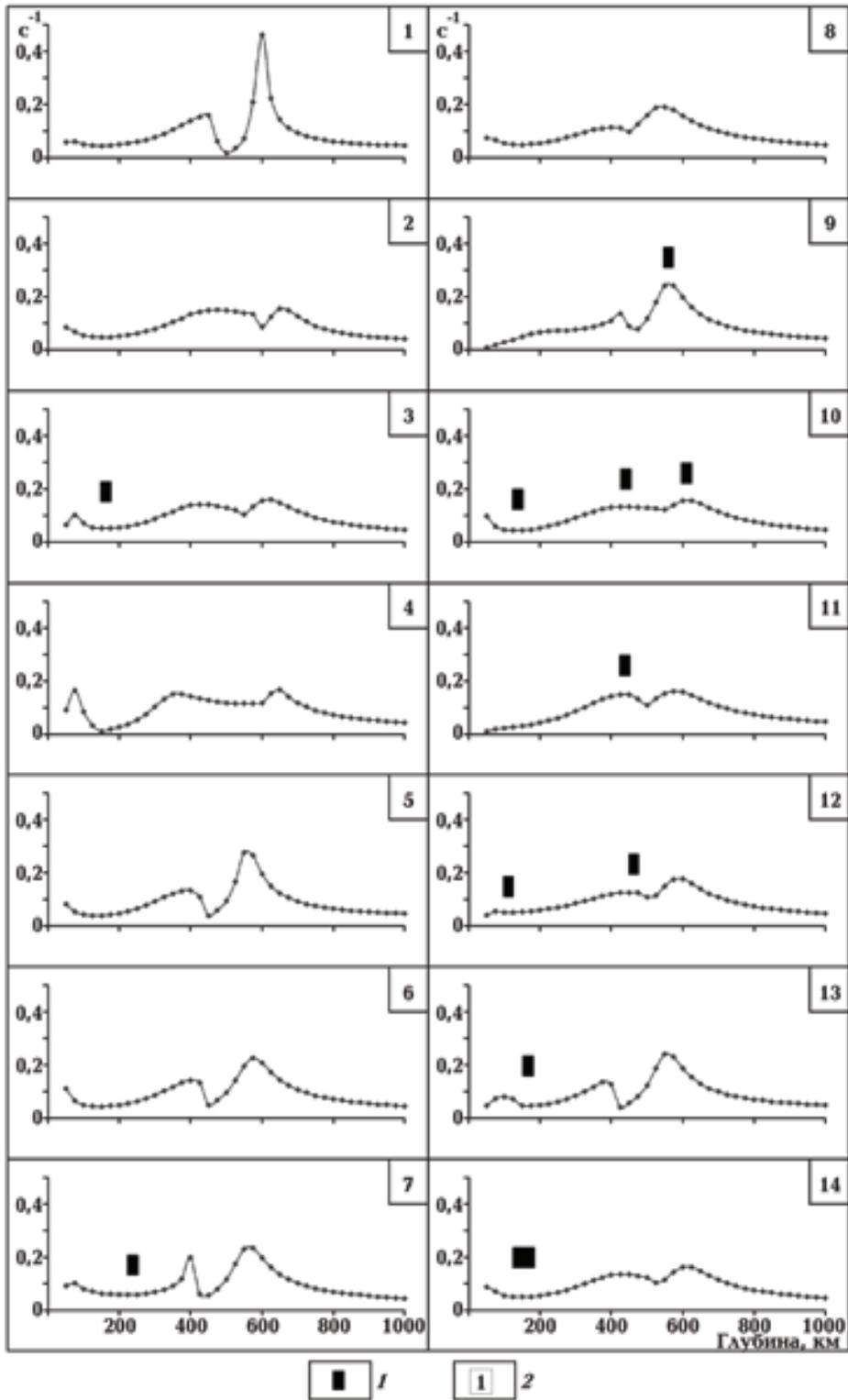
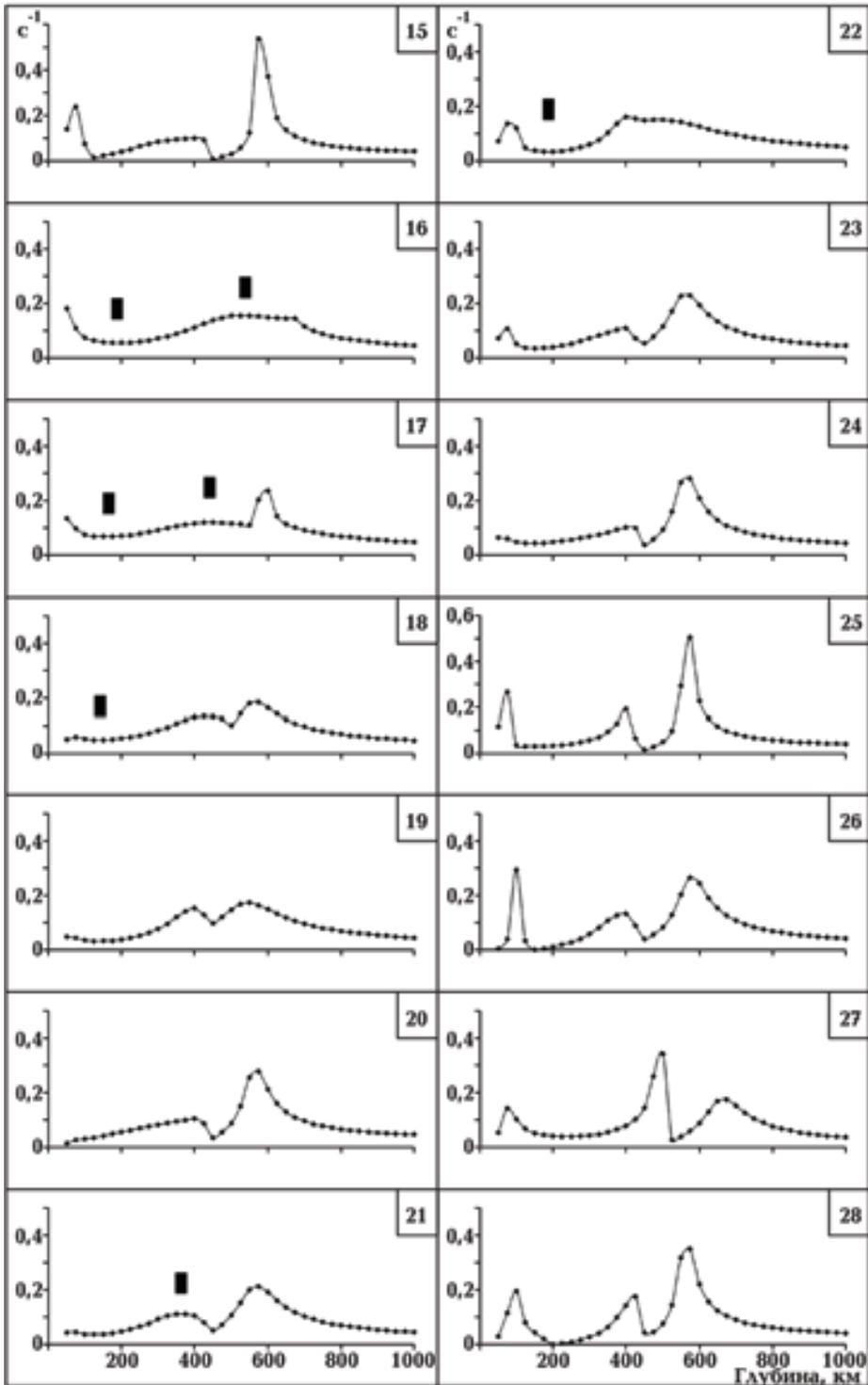


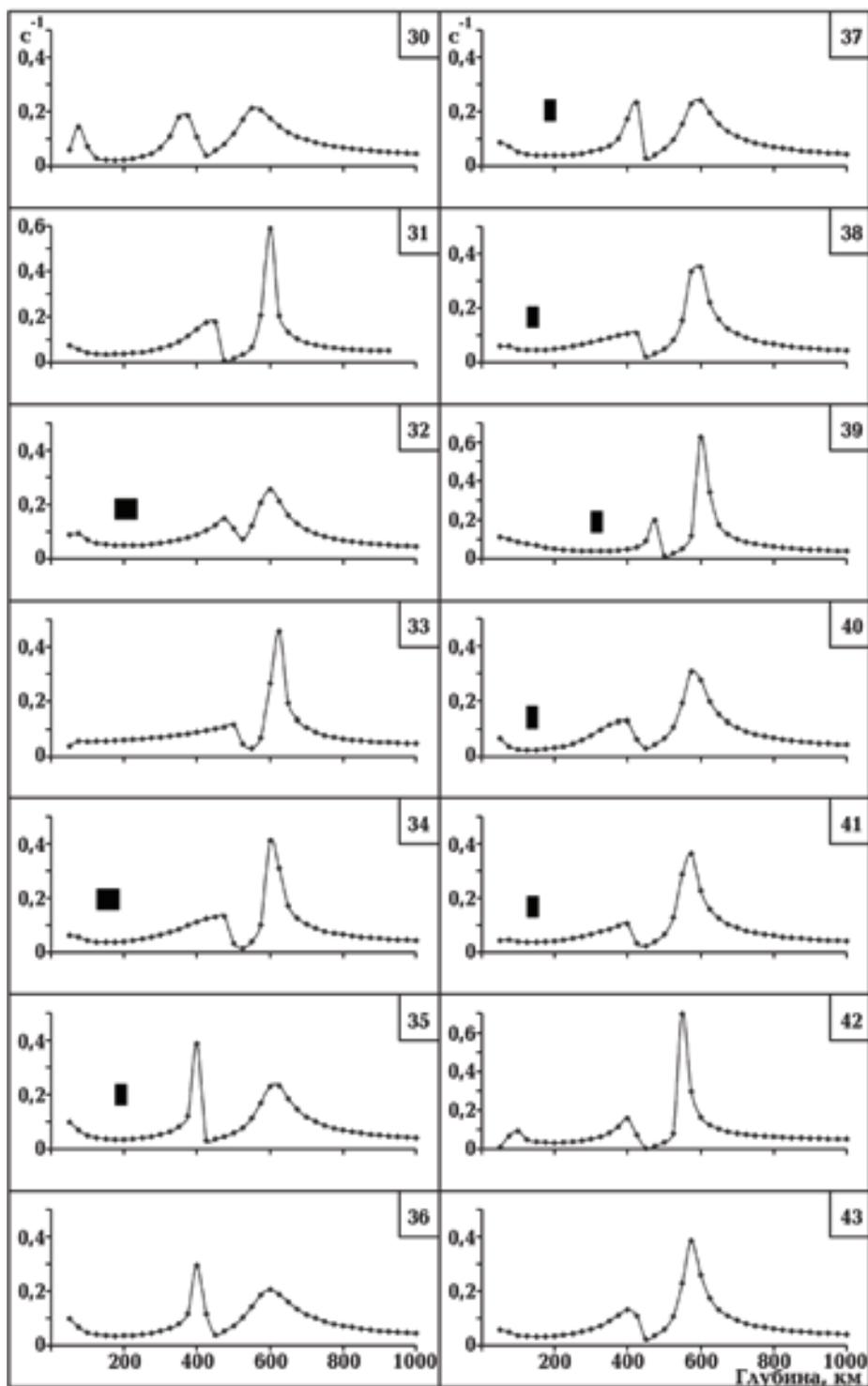
Рис. 2. Поведение градиента скорости с глубиной под Фенноскандией: 1 — глубина в мантии, на которой градиент скорости постоянен с глубиной, 2 — номер вертикальных сечений-годографов поля времен (см. рис. 1).



Продолжение рис. 2.

жению, и наоборот, соответствуют сейсмические границы 2-го рода. На рис. 3 послойно показаны глубины залегания сейсмических границ 2-го рода. Выделяемые скоростные этажи

определяются входящими в них слоями. За исключением слоя 1, где кровля определена на 50 км для всей территории, кровля каждого последующего есть подошва предыдущего.



Окончание рис. 2.

I этаж (рис. 3, а, б). На рис. 3, а представлена область распространения возрастающего градиента скорости, начиная с глубины 50 км, соответствующей кровле I этажа. При этом не-

закрашенным (белым) выделяются области понижающихся, начиная с глубины 50 км, градиентов скорости. К ним относятся: центральная часть Ладожско-Ботнической зоны, почти весь

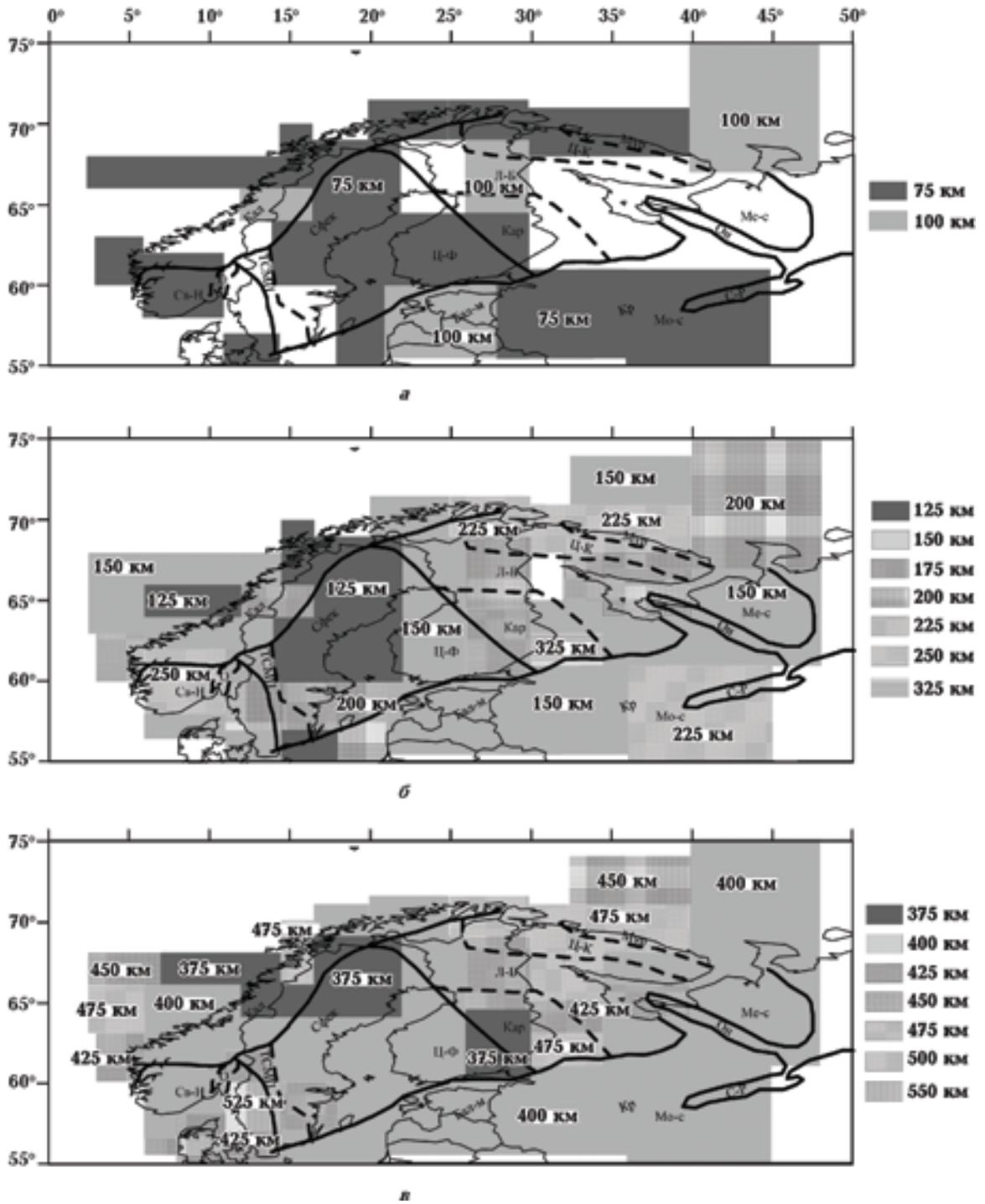
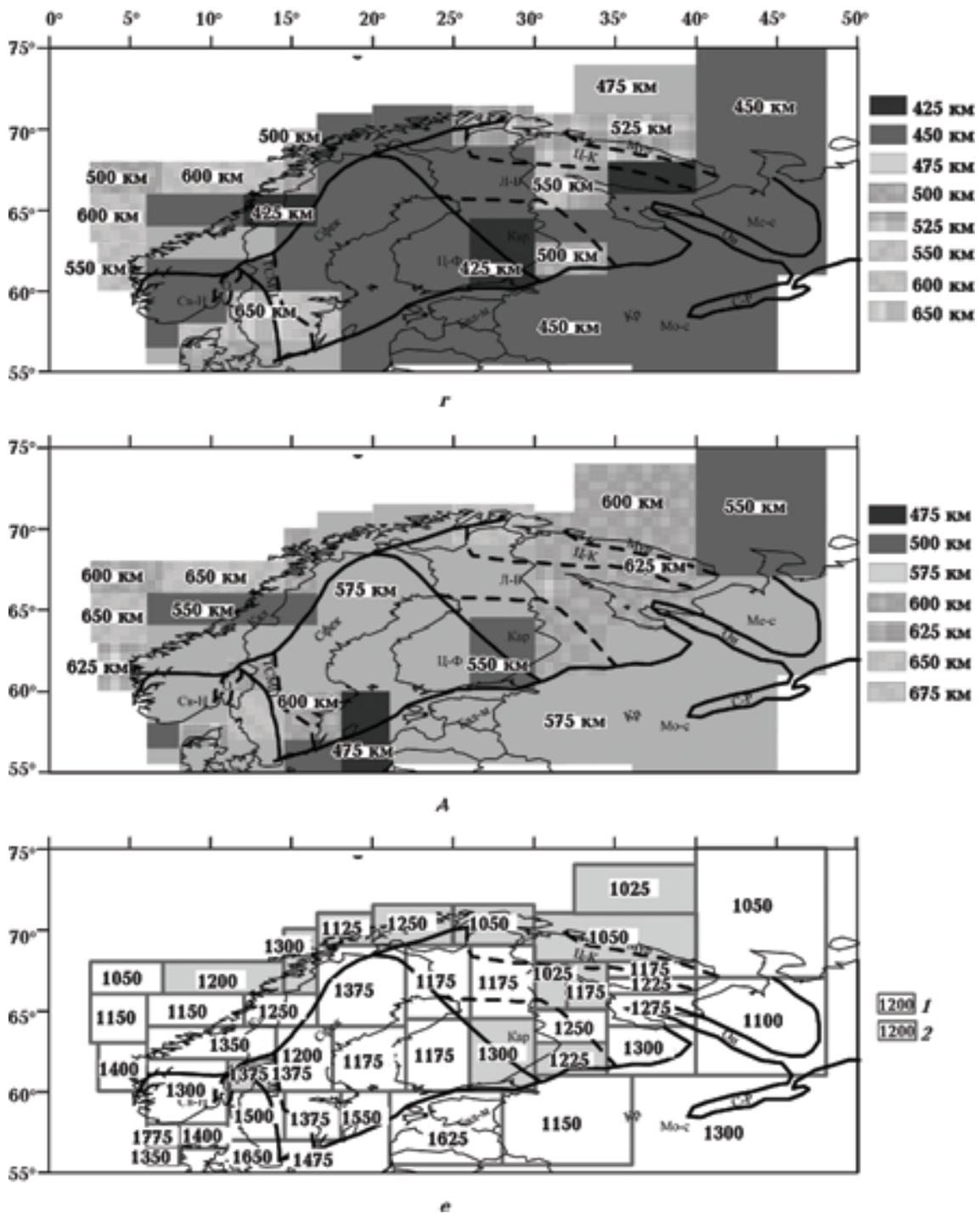


Рис. 3. Границы в мантии под Фенноскандией (выделенные по изменению поведения градиента скорости с глубиной): а, в, д — возрастающий с глубиной градиент начинает убывать, б, г, е — убывающий с глубиной градиент начинает возрастать.

Кольско-Карельский мегаблок без северной окраины (Мурманский блок).

Основной градиентной характеристикой слоя 1 (см. рис. 3, а) является повышение значений градиента в целом. Для большей части исследуе-

мого региона мощность слоя повышенных градиентов 25 км. Мощности слоя 50 км соответствует мантия под Центрально-Баренцевским поднятием, восточной частью Лапландско-Беломорского подвижного пояса, массивом Кур-



Окончание рис. 3.

земе и южной частью Центральных Каледонид. Отсюда основные границы для этого слоя определены как 75 и 100 км в соответствии с переходом от повышения градиента скорости к понижению.

Вторым скоростным слоем I этажа является слой понижающихся градиентов (см. рис. 3, б).

Понижение градиента скорости определено как с глубины 50 км, так и с глубин, соответствующих окончанию повышения градиен-

та, т. е. с глубины залегания подошвы предыдущего слоя. Таким образом, минимальная глубина залегания кровли слоя — 50 км, максимальная — 100 км (см. рис. 3, б). Залегание подошвы слоя 2 по отношению к кровле этого слоя не выдержано по глубине и изменяется в пределах от 125 км (мантия под Свекофенским мегаблоком) до 325 км (мантия под Ладужской структурой Кольско-Карельского мегаблока). Мощность слоя изменяется от 50 км (минимальная глубина залегания подошвы) до 275 км (максимальная). Преобладающая мощность слоя 50—100 км.

В пределах I этажа выделяется дополнительный слой (рис. 4), обуславливающий области постоянного градиента. Его кровлей является подошва слоя 2. Мощность слоя 25—50 км. Слой определен в мантии под западными и восточными крайними структурами.

Дополнительный слой завершает I скоростной этаж. Соответственно, в представленном этаже основные скоростные границы 2-го рода установлены в пределах слоя 1 на глубине 75 и 100 км; в пределах слоя 2 на глубине:

- 125 км (в основном соответствуют западной части Свекофенского мегаблока);
- 150 км (восточная часть Свекофенского мегаблока, северо-западная часть Кольско-Карельского мегаблока, прилегающая к ней северная часть Скандинавских каледонид, входящая в область рассмотрения части шельфа Норвежского моря, структуры ВЕП, граничащие с Фенноскандинавским щитом, за исключением Московской синеклизы);
- 200 ± 25 км (область мантии под Кольско-Карельским мегаблоком);
- 175—250 км (область мантии под Свеко-норвежским мегаблоком и его окружением;

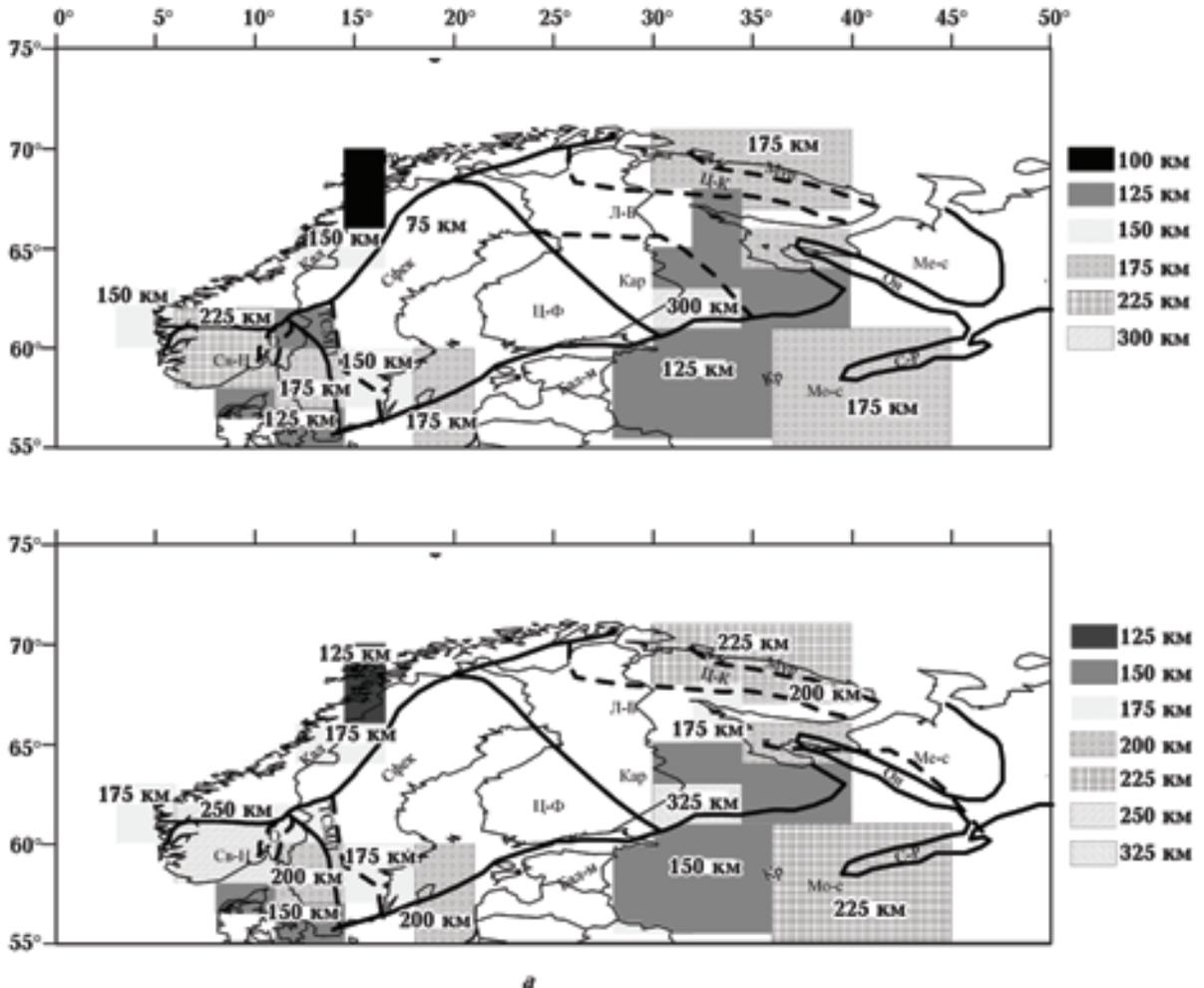
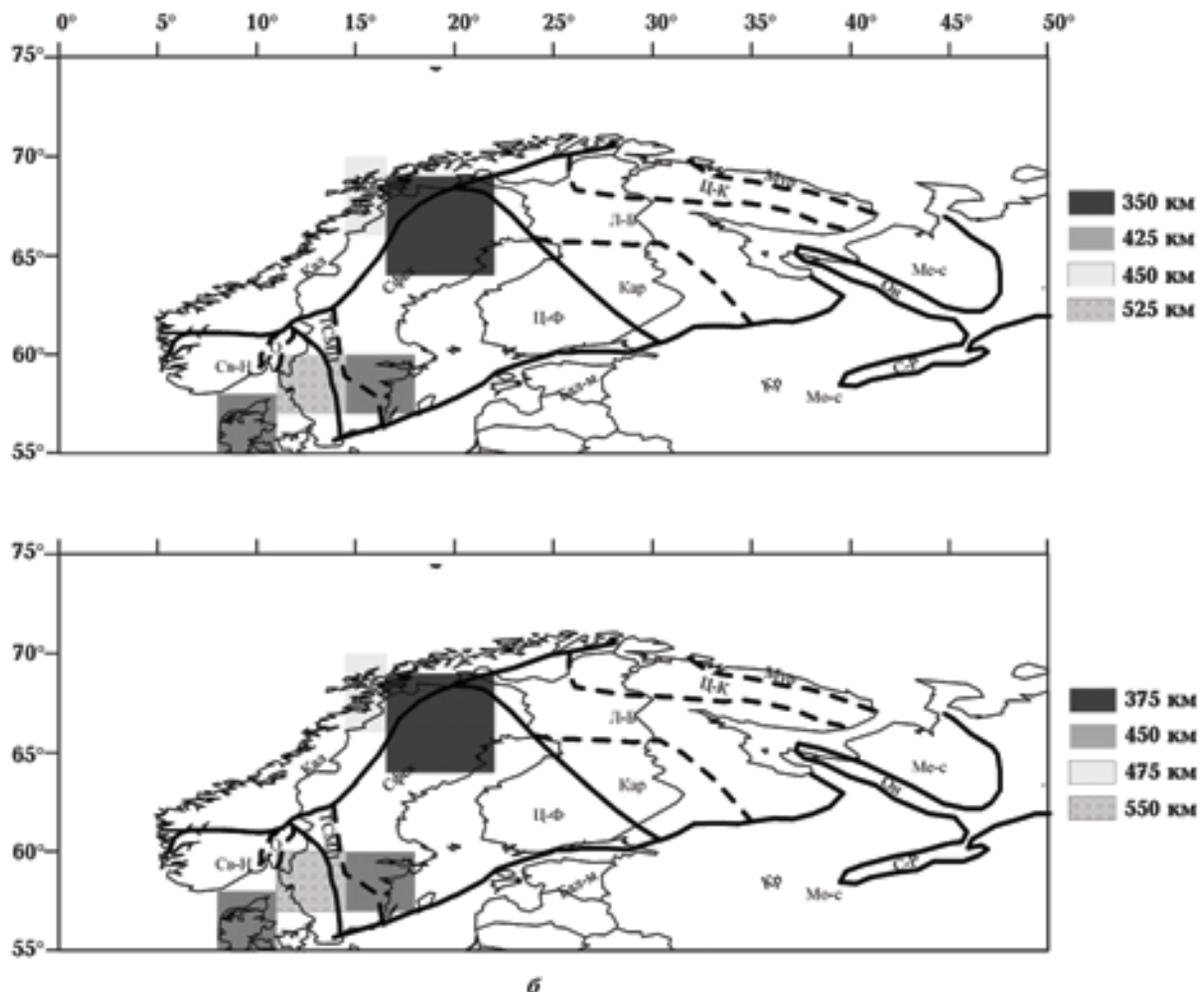


Рис. 4. Кровля и подошва областей с постоянным градиентом в верхней мантии (а), на границе верхней мантии и переходной зоны верхней мантии (б), на границе переходной зоны верхней мантии и зоны раздела 1 (в).

250 км — западная часть (раздел на западную и восточную части по грабену Осло) Свеконорвежского мегаблока, 175—200 км — прилегающая к нему с запада зона Гарда, восточная часть Свеконорвежского мегаблока и южная оконечность Свекофенского мегаблока, юг Балтийского моря).

II этаж (рис. 3, в) определяется как область повышения градиента без дополнительного расщепления, т. е. в области не выделяются сейсмические границы 2-го рода и, следовательно, она является областью прозрачности относительно этих границ. Кровля II этажа определена подошвой I этажа и соответствующей глубиной залегания. Подошва II этажа в большей своей части соответствует глубине залегания 400 км, увеличиваясь до глубины 425 ± 50 км для мантии под Кольско-Карельским мегаблоком, достигая максимальных значений 500 км для

мантии под Варангером и Кандалакшским массивом и минимальных 375 км для мантии под Ладожско-Ботнической зоной (район Костамукши). Повышенная глубина залегания подошвы II этажа определяется на юго-западе рассматриваемой территории: для мантии под восточной частью Свеконорвежского мегаблока — 550 км, для мантии под поднятием Ринг-Кюбинг-Фюн и областью Свекофенид Свеаланда Свекофенского мегаблока — 450 км. Прилегающая с запада мантия под шельфовой зоной Норвежского моря характеризуется глубиной залегания подошвы II этажа в пределах 375—475 км. Завершая рассмотрение глубины залегания подошвы II этажа, отметим, что максимальные значения определены в мантии под восточной частью Свеконорвежского мегаблока (550 км) и массивами Варангер и Кандалакшским (500 км), минимальные (375 км) — под Кандалакшским гра-



Продолжение рис. 4.

чений градиента скорости. Его кровля определена подошвой вышележащего слоя. Сохраняется полученный согласно глубине залегания границы кровли этажа раздел рассматриваемой области. Глубина залегания подошвы основной части области 575 км. Северо-восточная часть мантии (Кольско-Карельский мегаблок) определяется границей на глубинах 550, 600, 625, 675 км. Глубине 550 км соответствует граница мантии под Центрально-Баренцевским поднятием и Ладожско-Ботнической зоной (район Костамукши), глубине 600 км — граница мантии под юго-восточной частью Карельского блока, восточной частью Лапландско-Беломорского подвижного пояса, Центрально-Кольским и Мурманским блоками, прилегающая с севера мантия под Западно-Баренцевской впадиной, глубине 625 км — граница подошвы слоя 3.2 под западным окончанием Беломорского блока (антиклинорий Кандакши), Кейвской синеклизой, глубине 675 км — граница подошвы слоя под западным окончанием Центрально-Кольского блока (Гранулитовый массив, Варангер).

Юго-западной части рассматриваемого региона соответствуют следующие глубины залегания границы подошвы слоя: 600 км — мантия под грабеном Осло, Транскандинавской шовной зоной, районом Свекофенид Свеаленда, частью Норвежско-Датской впадины (северная часть поднятия Ринг-Кюбинг-Фюн), 675 км — мантия под восточной частью Свеконорвежского мегаблока, 550 км — мантия под юго-западной частью шельфа Норвежского моря (область, распространяющаяся от шельфа на восток с выходом через Скандинавские каледониды до района Норботтен), 625 ± 25 км — шельфовая зона Норвежского моря.

IV этаж мантии (рис. 3, е) характеризуется понижением градиента. Его кровля соответствует подошве III этажа. Основной характеристикой этажа является отсутствие промежуточных слоев и, как следствие, выделение второй зоны прозрачности относительно сейсмических границ 2-го рода. Учитывая освещенность мантии рассматриваемого региона сейсмическими данными, на рис. 3, в приведены границы подошвы этажа там, где это позволяют данные. Глубина залегания подошвы IV этажа не выдержана, увеличивается от 1025—1175 км на северо-востоке (Центрально-Баренцевское поднятие, Мурманский блок) до 1650 ± 25 км на юго-западе рассматриваемого региона (Курземе, Норвежско-Датская впадина, восточная оконечность Свеконорвежского мегаблока). Отсюда основными сейсмическими границами 2-го рода в

пределах рассматриваемой модели являются кровля и подошва выделенных структурных скоростных этажей и их слоев:

- 1) в пределах I этажа подошва слоя 1 определена как 75—100 км, подошва слоя 2 разноразмерная, глубина залегания 125, 150, 175 км, в целом соответствует интервалу 50—325 км (см. рис. 3, а, б);
- 2) в пределах II этажа кровля определяется в основном глубиной 150 ± 25 км, подошва — в основном 400 км, в целом изменяясь от 375 до 550 км (см. рис. 3, в);
- 3) в пределах III этажа кровля соответствует подошве II этажа, подошва определяется в основном глубиной 575 км, в целом изменяясь в пределах от 475 до 675 км. Этаж определен двумя слоями. Слой 3.1 (см. рис. 3, г) определен понижающимся, слой 3.2 — повышающимся градиентом (см. рис. 3, д). Подошва слоя 3.1 в основном определена на глубине 450 км, в целом изменяясь от 425 до 650 км. Подошва слоя 3.2 соответствует подошве этажа;
- 4) IV этаж, аналогично этажу II, не расслоен, характеризуется понижающимися градиентами (см. рис. 3, е). Его кровля соответствует подошве III этажа. На рис. 3, е границы подошвы приведены там, где выделить их позволяет освещенность. Глубина залегания подошвы IV этажа не выдержана, увеличиваясь от 1025—1175 км на северо-востоке (Центрально-Баренцевское поднятие, Мурманский блок) до 1650 ± 25 км на юго-западе рассматриваемого региона (Курземе, Норвежско-Датская впадина, восточная оконечность Свеконорвежского мегаблока).

По глубине выделения сейсмических границ 2-го рода мантия под исследуемой областью может быть разделена на четыре части. Первая часть — северо-восточная — соответствует мантии под Кольско-Карельским мегаблоком, за исключением западной части Лапландско-Беломорского пояса. Вторая — юго-западная — соответствует в основном мантии под Свеконорвежским мегаблоком с прилегающей к нему мантией под Транскандинавской магматической зоной, областью Свекофенид Свеаленда Свекофенского мегаблока и югом Балтийского моря. Третья — центральная — включает в себя основную часть Свекофенского мегаблока и запад Лапландско-Беломорского подвижного пояса. Четвертая — западная — объединяет мантию под шельфовой зоной Норвежского моря, с севера ограниченную Вест-фьордом и его про-

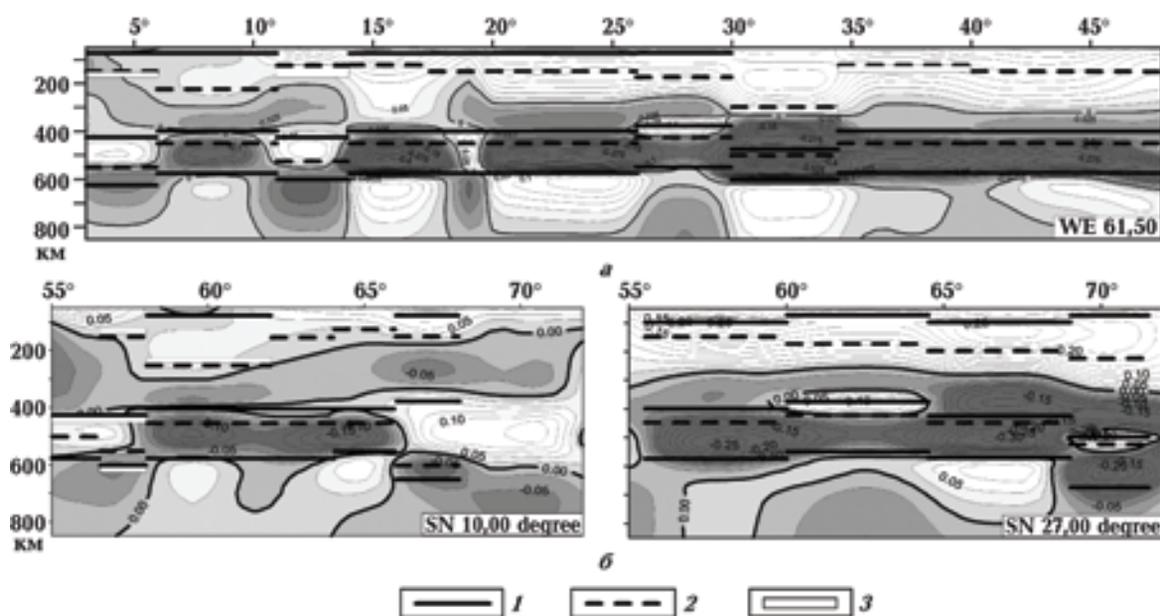


Рис. 5. Вертикальные сечения трехмерной P -скоростной модели верхней мантии с вынесенными границами, выделенными по поведению градиента скорости с глубиной (повышается, понижается или постоянен): a — широтное сечение $61,5^\circ$ с. ш., b — долготные сечения 10 и 27° в. д.; 1, 2 — границы в мантии, до которых градиент скорости возрастает (1) или убывает с глубиной (2), 3 — области, где градиент скорости постоянен.

должением в море до границы с плато Веринг на западе, а также Скандинавские каледониды на востоке. Наиболее глубоко залегают границы северо-восточной части исследуемой области, далее юго-западной и западной. Глубина залегания границ центральной части меньше по отношению к предыдущим и они более выдержаны по глубине залегания. Наибольшим разбросом глубин залегания выделенных границ характеризуется северо-восточная часть.

Приведенный раздел согласно выделенным границам более соответствует выделяемым для данного исследуемого региона тектоническим провинциям [Сейсмогеологическая ..., 1998]: юго-западной (Дальсландской), центральной (Свекофенской), северо-восточной (Кольско-Лапландско-Карельской), западной (Каледонской).

Особый интерес вызывают области, определяемые постоянными градиентами (см. рис. 4).

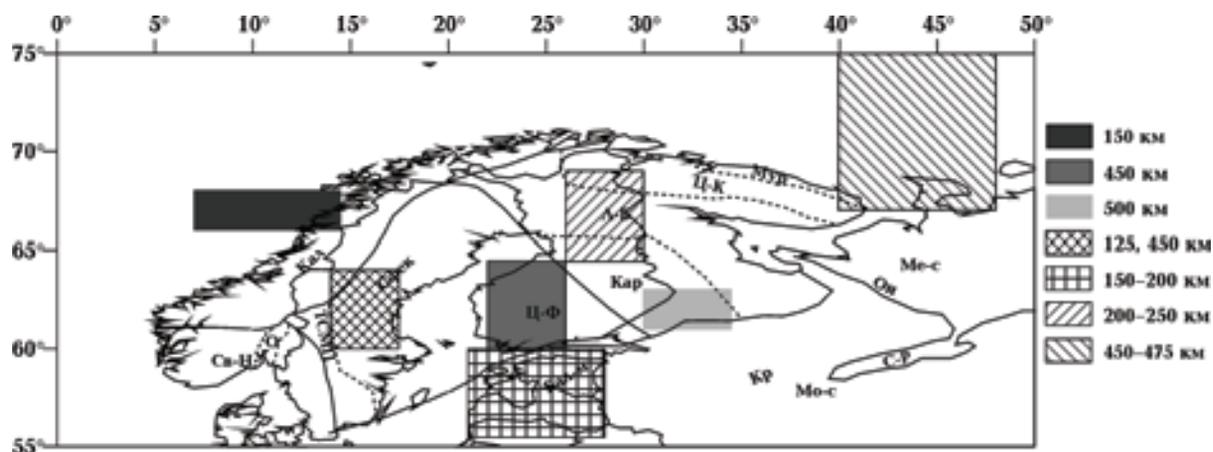


Рис. 6. Волноводы.

В данном рассмотрении, учитывая приуроченность выделения постоянных градиентов к границам окончания слоев, можно ожидать появления неустойчивости в пределах выделенных этажей. А принимая во внимание, что рассматриваются области сечений, среда в которых определена как вертикально-неоднородная, можно ожидать, что выделяемые области деформаций (сжатия и растяжения) показывают формирование раздела между отдельными частями мантии не только как раздел, обусловленный изменением характера градиента скорости, но и как результат возможных мантийных процессов, действие которых происходит как от нижней мантии вверх, так и наоборот. Примером могут служить Кольско-Карельский и Свекофенский мегаблоки. Распространение таких зон представлено на рис. 5. Рассмотрены сечения $61^{\circ} 50' \text{ с. ш.}$, 10° в. д. , 27° в. д. Сечения показывают, что постоянные градиенты могут появляться:

- при погружении высокоскоростного наклонного слоя (сечение $61^{\circ} 50' \text{ с. ш.}$ — Ладожская структура, $30\text{—}34^{\circ} \text{ в. д.}$; сечение 10° в. д. — окончание погружения с севера, начиная от Скандинавских Каледонид до Норвежско-Датской впадины, $58\text{—}62^{\circ} \text{ с. ш.}$);
- в областях, связанных с распространением низких скоростей из средней мантии (растекание затухающих плюмов, сечение $61^{\circ} 50' \text{ с. ш.}$ — область растекания Московского плюма, Онежская структура, $35\text{—}40^{\circ} \text{ в. д.}$);
- в области проявления скоростных мантийных колонок, связанных с сверхглубинными флюидными процессами (сечение $61^{\circ} 50' \text{ с. ш.}$ — грабен Осло, $10\text{—}15^{\circ} \text{ в. д.}$; сечение 10° в. д. — Норвежско-Датская впадина, $56\text{—}58^{\circ} \text{ с. ш.}$, поднятие Ринг-Кюбинг-Фюн, $54\text{—}56^{\circ} \text{ с. ш.}$).

Возможные волноводы верхней мантии и переходной зоны. Рассмотрение градиентов скоростей позволило выделить области возможных волноводов в мантии. Волноводы определены по условию нулевых значений конечно-разностного градиента скорости, нормированного с шагом h , $(\Delta v(x, y, z) / h)$, $h \leq 0,015 \text{ км/с}$ (рис. 6, табл. 1). Последнее значение определяет точность полученных результатов при решении задачи сейсмической томографии методом тейлорового приближения.

Волновод в верхней мантии юго-западной части Свекофенского мегаблока на глубине 125 км соответствует волноводу профиля Феннолора в указанном районе. Выделенные возможные волноводы могут быть разделены на две группы. Волноводы первой группы определены по данным геоэлектрики [Астапенко, 2010] в пределах I и II этажей, вторая соответствует III этажу. Мы не указываем волноводы непосредственно под границей Мохо по причине отсутствия трехмерной скоростной модели коры.

Т а б л и ц а 1. Волноводы мантии Фенноскандии

Область	Глубина, км	Градиент, с^{-1}	Мощность волновода, км
Шельф Норвежского моря	150 (подошва I этажа)	0,011	25
Свекофенский мегаблок (юго-запад)	125 (подошва I этажа)	0,015	25
Свекофенский мегаблок (юго-запад)	450 (подошва слоя 3.1)	0,008	25
Курземе	150—175—200 (кровля II этажа)	0,003—0,007—0,012	50
Центральная часть Лапландско-Беломорского пояса	200—225—250 (кровля II этажа)	0,000—0,004—0,009	50
Центрально-Финляндский массив	450 (подошва слоя 3.1)	0,015	25
Центрально-Баренцевское поднятие	450—475 (кровля слоя 3.2)	0,004—0,015	25
Ладожская структура	500 (подошва слоя 3.1)	0,014	25

Полученные границы дополняют трехмерную P -скоростную модель мантии (см. рис. 5):

1) глубина залегания подошвы I этажа соответствует глубине залегания литосферы, выделенной ранее [Глазнев, 2003];

2) глубина залегания подошвы II этажа — глубине залегания верхней мантии, определенной как нулевая изолиния относительно референтной модели;

3) глубина залегания подошвы слоя 3.1 III этажа — нижней границе верхнего сгущения изолиний невязок скорости переходной зоны, а также подошве высокоскоростных аномалий переходной зоны;

4) глубина залегания подошвы III этажа — глубине залегания подошвы переходной зоны;

5) наиболее резко, согласно значениям конечно-разностных градиентов, выделяются границы, соответствующие подошве III этажа (переходной зоны), затем — подошве II этажа (верхней мантии).

Сравнение выделенных границ с границами, полученными по сверхдлинным профилям, проходящим по территории Фенноскандии. Учитывая, что рассматривается мантия под Фенноскандией, для сравнения был выбран сейсмический разрез по хорошо известному профилю Феннолора (рис. 7). Сразу отметим, что использованные для получения модели данные содержат информацию о временах прихода первых вступлений преломленных волн, что может быть причиной недостаточной детальности (отсутствие отражающих границ).

Чем больше проводится сейсмологических исследований, тем больше появляется сейсми-

ческих границ. В настоящее время глобальными принято считать границы 410, 520, 670, 2900 км. Наряду с ними выделяются промежуточные границы 60, 80, 100, 220, 330, 710, 900, 1050, 2640 км. Дополнительно имеются указания геофизиков на существование границ 800, 1200—1300, 1700, 1900—2000 км. В качестве промежуточных сейсмических границ в верхней мантии выделяются следующие: 75, 100, 150, 200—250, 270—330 км [Пушаровский, Пушаровский, 2010; Сафонов, 2011; Павленкова, Павленкова, 2014]. Ситуация с промежуточными сейсмическими границами переходной зоны верхней мантии сложнее по причине ее меньшей изученности. В то же время промежуточные сейсмические границы подчеркивают как скоростную, так и структурную неоднородность рассматриваемой среды. Эти границы позволили разделить области на структурные подобласти и, учитывая слабую освещенность исследуемой области сверхдлинными профилями, выделить сейсмические границы верхней мантии по всей исследуемой области. Согласно проведенным работам по сверхдлинным профилям Феннолора, Кварц, Рубин, системе Свеколапка, были определены региональные сейсмические границы. Расположение профилей представлено на рис. 8. В работах [Трипольский, Шаров, 2004; Павленкова, Павленкова, 2014] приведены сейсмические разрезы, полученные вдоль указанных профилей. Следует отметить, что промежуточные сейсмические границы, как правило, имеют различное пространственное распространение, что свидетельствует о латеральной изменчивости физических свойств мантии. Их выделение объясняют изменениями минерального состава и

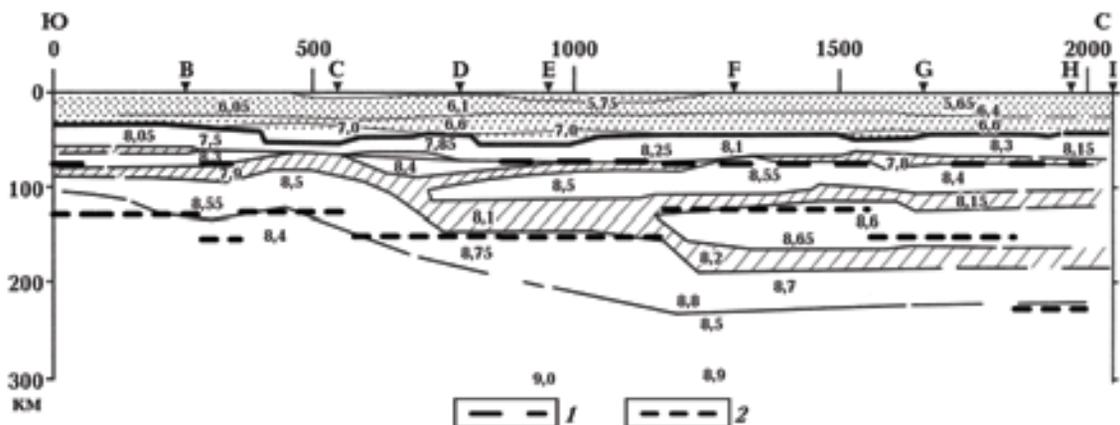


Рис. 7. Профиль Феннолора [Guggisberg, 1986] с вынесенными границами по поведению градиента скорости с глубиной: 1, 2 — границы в мантии, до которых градиент скорости возрастает с глубиной (1), убывает с глубиной (2).

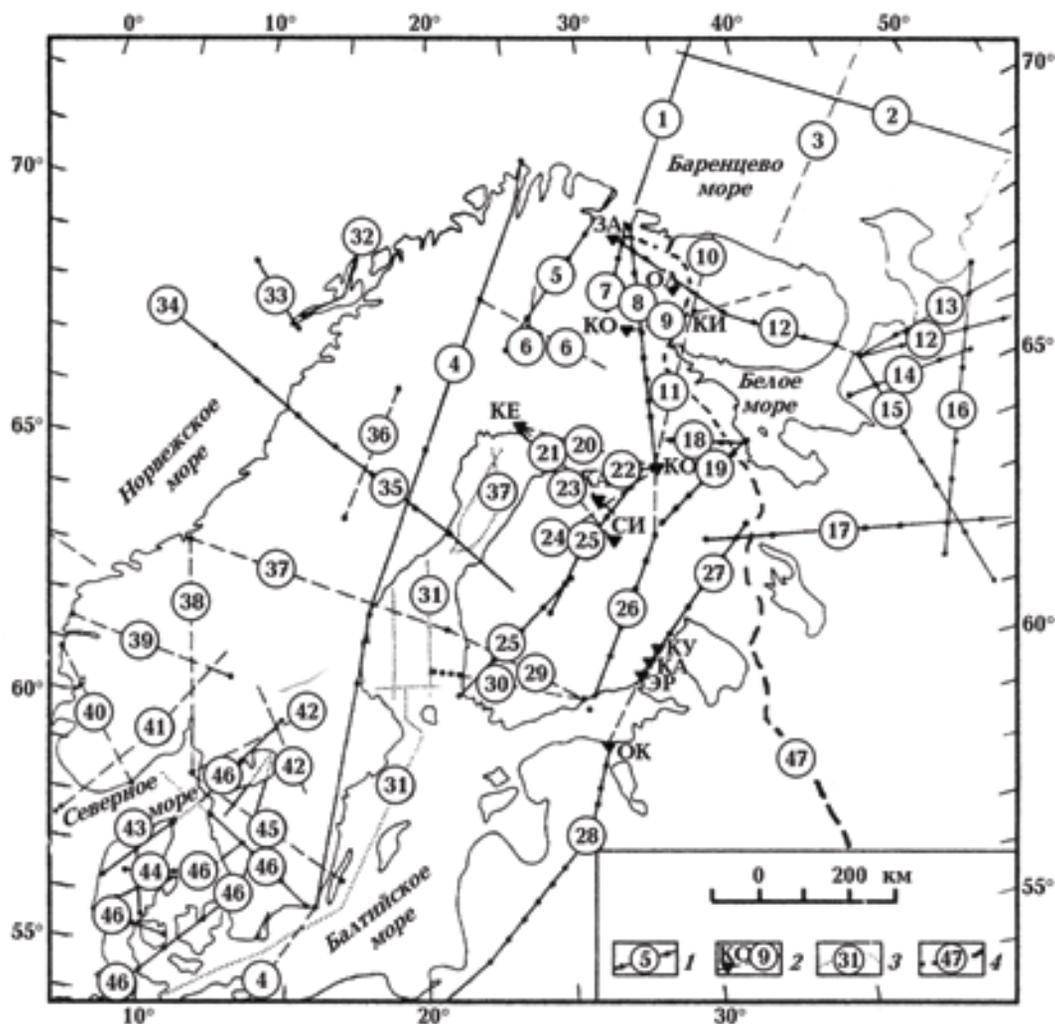


Рис. 8. Профили Фенноскандии [Трипольский, Шаров, 2004].

физических условий, от которых они зависят [Пушаровский, Пушаровский, 2010].

Выделенные сейсмические разделы сравнивались с сейсмическими границами, полученными при проведении работ по сверхдлинным профилям Феннолора, Рубин, Кварц, по массиву Свеколапка на участках, относящихся к исследуемой территории (см. рис. 8). Более детально рассматривался профиль Феннолора. На рис. 1 представлено расположение профиля. Сейсмический разрез вдоль профиля [Guggisberg, 1986], а также полученные в данной статье границы, показаны на рис. 7. Принимая во внимание, что сравниваются результаты работ по сейсмической томографии, где используются только времена первых вступлений, и результаты обработки данных ГСЗ по сверхдлинному профилю, итоги сравнения можно считать удовлетворительными, учитывая и выделение волновода в

мантии на юго-западе Свекофенского мегаблока (см. рис. 6, табл. 1). Приведенный сейсмический разрез является в настоящее время классическим для данного профиля. В работе [Павленкова, Павленкова, 2014] представлены различные варианты обработки, однако принципиальных различий в выделенных границах нет. В табл. 2 показаны глубины залегания выделенных границ по сейсмическим сверхдлинным профилям, определенные различными авторами.

Учитывая разрешающую способность метода геометрической сейсмологии, различие использованных систем наблюдений и численных методов, можно отметить достаточно устойчивое определение глубины залегания выделенных границ.

Выводы. 1. Рассмотрение в рамках полученной трехмерной P -скоростной модели мантии под Фенноскандией конечно-разностных аналогов производных скоростной функции $v(x, y, z)$

Т а б л и ц а 2. Глубина залегания границ, км

Профиль	Границы, по данным других авторов, км	Границы, выделенные авторами настоящей статьи, км
Феннолора	60—75, 100, 170—220 [Guggisberg, Berthelsen, 1987]	75, 125, 150, 175, 225
Свеколапка	100—130, 400 [Трипольский, Шаров, 2004; Сейсмологическая ..., 1998]	75, 150, 175, 400
Рубин	70, 120, 150, 200 [Павленкова, Павленкова, 2014]	125, 150, 200
Кварц	70, 120 [Павленкова, Павленкова, 2014]	75, 125, 175, 200, 225

по глубине позволило полностью представить трехмерную P -скоростную градиентную модель мантии под Фенноскандией.

2. Согласно полученной P -скоростной модели мантии под Фенноскандией выделены сейсмические границы 2-го рода для глубин, соответствующих системе наблюдения (верхняя мантия, ее переходная зона, зона раздела 1).

3. Согласно полученным границам на исследуемых глубинах выделены четыре скоростных этажа. I этаж соответствует сейсмической мантийной литосфере и содержит три слоя, определяемых переходом от слоя, характеризующегося уменьшением градиента, к слою повышения градиента, затем к слою понижения. II этаж определяется как прозрачный относительно сейсмических границ 2-го рода, соответствует оставшейся части верхней мантии, отличается повышением градиента. III этаж соответствует переходной зоне и содержит два слоя. Слой 3.1 характеризуется понижением градиента, слой 3.2 — повышением. Подошве слоя 3.1 соответствует в основном граница на 450 км, подошве слоя 3.2 — в основном граница переходной зоны на глубине 575 км. IV этаж определяется как прозрачный относительно сейсмических границ 2-го рода и характеризуется понижением градиента.

4. Границы, выделенные на глубинах верхней мантии 75, 100, 125, 150—250, 325 км, как

указывалось выше, известны. Основные промежуточные границы переходной зоны определены на глубинах 450 и 525 км. Наиболее ярко выраженными согласно значениям градиентов являются глобальные границы, связанные с подошвой переходной зоны и верхней мантии.

5. Согласно глубинам залегания выделенных границ мантия под Фенноскандией может быть разделена на следующие подобласти:

- 1) первая — северо-восточная — соответствует мантии под Кольско-Карельским мегаблоком, исключая западную часть Лапландско-Беломорского пояса;
- 2) вторая — юго-западная — соответствует в основном мантии под Свеконорвежским мегаблоком с прилегающими к нему мантией под Трансскаandinавской магматической зоной, областью Свекофенид Свеаленда Свекофенского мегаблока и югом Балтийского моря;
- 3) третья — центральная — включает основную часть Свекофенского мегаблока и запад Лапландско-Беломорского подвижного пояса;
- 4) четвертая — западная — объединяет мантию под шельфовой зоной Норвежского моря, с севера ограниченную Вест-фьордом и его продолжением в море до границы с плато Веринг на западе, и включает Скандинавские каледониды на востоке.

Список литературы

- Астапенко В. Н. Зоны повышенной электропроводимости верхней мантии Восточно-Европейской платформы. Докл. НАН Беларуси. 2010. Т. 54. № 5. С. 100—104.
- Гейко В. С. Об условной корректности одномерной кинематической задачи сейсмоки. 1. Геофиз. журн. 1993. Т. 15. № 3. С. 27—50.
- Гейко В. С., Цветкова Т. А., Санникова Н. П., Ливанова Л. П., Гейко К. В. Региональная 3D Р-скоростная структура мантии северо-западной Евразии — I. Европа. 1. Геофиз. журн. 1998. Т. 20. № 3. С. 67—91.
- Глазнев В. Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2003. 251 с.
- Лаврентьев М. М., Романов В. Г., Шишатский С. П. Некоторые задачи математической физики и анализа. Москва: Наука, 1980. 286 с.
- Павленкова Н. И., Павленкова Г. А. Строение земной коры и верхней мантии северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. Москва: Геокарт, Геос, 2014. 191 с.
- Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 301 с.
- Пушаровский Ю. М., Пушаровский Д. Ю. Геология мантии Земли. Москва: Геос, 2010. 138 с.
- Сафонов О. П. Сейсмические разделы в мантии Земли и их петрологическая интерпретация. Материалы VII сессии Международной школы наук о Земле им. Л. Перчука. Одесса, 2—10 октября 2011 г. www.ises.ru/pdf-lectures/safonov_discontinuities.pdf.
- Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы. Ч. 1. Под ред. Ф. П. Митрофанова, Н. В. Шарова. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1998. 204 с.
- Трипольский А. А., Шаров Н. В. Литосфера докембрийских щитов Северного полушария Земли по сейсмическим данным. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. 158 с.
- Хаин В. Е. Тектоника континентов и океанов. Москва: Научный мир, 2001. 586 с.
- Цветкова Т. А. Продолжение обобщенного поля времен вниз и обратная кинематическая задача сейсмоки. Докл. НАН Украины. 1996. № 1. С. 79—85.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Трехмерная Р-скоростная модель мантии Фенноскандии. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academ. Publ., 2015. 138 с.
- Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная Р-скоростная модель 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. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная Р-скоростная модель мантии под Фенноскандией. Ч. II. Геофиз. журн. 2010. Т. 32. № 1. С. 60—77.
- Artemieva I. M., 2011. The lithosphere. An interdisciplinary approach. Cambridge University Press, 773 p.
- Geyko V. S., 2004. A general theory of the seismic travel-time tomography. Геофиз. журн. 26 (2), 3—32.
- Guggisberg B. Ch., 1986. Eine zweidimensionale re-fractions seismische interpretation der geschwindigkeitstufen-structure der oberen Erdmantels unter der Fennoskanischen Schild (Project Fennolora). Diss. ETN N 7945. Zurich, 199 p.
- Guggisberg B., Berthelsen K., 1987. A two-dimensional velocity model for the lithosphere beneath the Baltic Shield and it's possible tectonic significance. Terra Cognita 7, 631—638.
- Gerver M. L., Markushevich V. M., 1967. On the characteristic properties of travel-time curves. Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 13, 241—246.

The structure of velocity mantle number of horizons under Phennoscandia according to seismic-tomography data

© T. A. Tsvetkova, I. V. Bugaenko, 2016

Seismic boundaries of the second kind have been distinguished under Phennoscandia according to three-dimensional P -velocity model of the mantle and velocity number of horizons of the upper mantle and its transitional zone have been shown. Four velocity horizons and corresponding seismic boundaries of the second kind have been distinguished. It has been shown that within the limits of the upper mantle the market boundaries correspond to the known ones, distinguished by the super-long profiles: Phennolora, Quartz, Ruby and Svekalapka massif. Seismic boundaries of the second kind of transitional zone have been marked.

Key words: seismic tomography, seismic boundaries of the second kind.

References

- Astapenko V.N., 2010. Zones of increased electrical conductivity of the upper mantle of the East European platform. *Doklady NAN Belarusi* 54 (5), 100—104 (in Russian).
- Geyko V.S., 1993. Conditional correctness of Unidimensional Kinematic problem of seismic. 1. *Geofizicheskii zhurnal* 15(3), 27—50 (in Russian).
- Geyko V.S., Tsvetkova T.A., Sannikova N.P., Livanova L.P., Geyko K.V., 1998. A regional 3D P -velocity structure of the mantle of the north-western Eurasia — I. Europe. 1. *Geofizicheskii zhurnal* 20(3), 67—91 (in Russian).
- Glaznev V.N., 2003. Integrated geophysical model of the lithosphere of Fennoscandia. Apatity: KSC RAS Publ., 251 p. (in Russian).
- Lavrentev M.M., Romanov V.G., Shishatskiy S.P., 1980. Some problems of mathematical physics and analysis. Moscow: Nauka, 286 p. (in Russian).
- Pavlenkova N.I., Pavlenkova G.A., 2014. The structure of the crust and upper mantle of northern Eurasia according to seismic profiling with nuclear explosions. Moscow: Geokart, Geos, 191 p. (in Russian).
- Puzryev N.N., 1997. Methods and objects of seismic surveys. Introduction to the general seismology. Novosibirsk: Publ. House of SB RAS, SIC UIGGM, 301 p. (in Russian).
- Pushcharovskiy Yu.M., Pushcharovskiy D.Yu., 2010. Geology of the Earth's mantle. Moscow: Geos, 138 p. (in Russian).
- Safonov O.P., 2011. Seismic sections in the Earth's mantle and petrological interpretation. *Proceedings of the VII session of the International School of Earth Sciences named after L. Perchuk. Odesa, 2—10 October 2011.* www.ises.ru/pdf-lectures/safonov_discontinuities.pdf (in Russian).
- Seismogeological Nordic model of the lithosphere, 1998. Pt 1. Eds F.P. Mitrofanov, N.V. Sharov. Apatity: KSC RAS Publ., 204 p. (in Russian).
- Tripolskiy A.A., Sharov N.V., 2004. Lithosphere of Precambrian shields Northern Hemisphere from seismic data. Petrozavodsk: KSC RAS Publ., 158 p. (in Russian).
- Khain V.E., 2001. Tectonics continents and oceans. Moscow: Nauchnyy Mir, 586 p. (in Russian).
- Tsvetkova T.A., 1996. Continued generalized way down the field and inverse kinematic seismic problem. Extras. *Dopovidi NAN Ukrainy* (1), 79—85 (in Russian).
- Tsvetkova T.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., 2015. Three-dimensional P -velocity model of the mantle of Fennoscandia. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academ. Publ., 138 p. (in Russian).
- Tsvetkova T.A., Shumlyanskaya L.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., 2009. Seismotomography of the East European platform: three-dimensional P -velocity model of the mantle under the Fennoscandia. Pt I. *Geofizicheskii zhurnal* 31(1), 53—72 (in Russian).
- Tsvetkova T.A., Shumlyanskaya L.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., 2010. Seismotomography of the East

- European platform: three-dimensional *P*-velocity model of the mantle under the Fennoscandia. Pt II. *Geofizicheskiy zhurnal* 32(1), 60—77 (in Russian).
- Artemieva I.M., 2011. The lithosphere. An interdisciplinary approach. Cambridge University Press, 773 p.
- Geyko V.S., 2004. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geofizicheskiy zhurnal* 26(2), 3—32.
- Guggisberg B.Ch., 1986. Eine zweidimensionale re-fractions seismische interpretation der geschwindigkeitkerhes-trofen-structure der oberen Erdmantels unter der Fennoskanischen Scield (Project Fen-nolora). Diss. ETN N 7945. Zurich, 199 p.
- Guggisberg B., Berthelsen K., 1987. A two-dimensional velocity model for the lithosphere beneath the Baltic Shield and it's possible tectonic significance. *Terra Cognita* 7, 631—638.
- Gerver M.L., Markushevich V.M., 1967. On the characteristic properties of travel-time curves. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 13, 241—246.