

Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная P -скоростная модель мантии под Фенноскандией. Ч. II

© Т. А. Цветкова, Л. А. Шумлянская, И. В. Бугаенко, Л. Н. Заец, 2010

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 6 февраля 2009 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Стаття є продовженням циклу робіт із сейсмічної томографії Східноєвропейської платформи. Наведена швидкісна картина відповідає мантиї під Фенноскандинавським щитом — північно-західної частини платформи. Основною швидкісною характеристикою мантиї під Фенноскандією, погодженою за вертикальними і горизонтальними перерізами, є загальна інверсність швидкісної будови мантиї. Мантию під основною частиною Фенноскандії за швидкісними характеристиками поділено на три групи. До першої належить мантия під Карельським, Біломорським, Центральнокольським і Мурманським блоками Кольсько-Карельського мегаблока, Прибалтійським мантийним блоком і Свекофенським блоком-1. Друга група — мантия під Лапландсько-Беломорським поясом-2, Свекофенським блоком-2, Свеконорвезьким мегаблоком. Третя група — це мантийні зони під Прибалтійським блоком, Свекофенським блоком-1, Лапландсько-Беломорським поясом-1, що є перехідною між першою і другою групами. Основні межі розділення мантиї під Фенноскандією погоджені як за горизонтальними, так і за вертикальними перерізами. Ці межі визначено: за загальними швидкісними мантийними характеристиками — розділенням мантиї за швидкісними характеристиками горизонтальних перерізів; за особливостями розподілу швидкостей — наявністю субгоризонтальних високошвидкісних похилих шарів, що поширюються із шару сейсмічної літосфери в шар Голицина—Гейка. Високошвидкісні похилі шари виділяють мантийну зону під Трансскандинавською магматичною зоною і в межах мантиї під Кольсько-Карельським мегаблоком, а також зону поширення впливу мантиї під Північною Атлантикою на схід.

This paper is an extension of a set of works on seismic tomography of East European platform. A velocity pattern given corresponds to the mantle under Fenno-Scandian shield as a northwestern part of EEP. The main velocity characteristics of the mantle under the Fennoscandia, conformed along vertical and horizontal sections is common inverse property of velocity structure of the mantle. The mantle under the main part of Fennoscandia is subdivided into three groups according to its velocity characteristics. To the first group belongs the mantle under Karelian, Belomorian and Central Kola + Murmansk blocks of the Kola-Karelian mega-block, Baltic mantle block and Svekofennian block-1. To the second one belongs the under Lapland-Belomorian belt-2, Svecofennian block-2, Sveconorwegian megablock. The third group comprises the mantle areas under the Baltic block, Svekofennian block 1, Laplandian-Belomorian belt-1, which belong to transitional ones between the first and the second groups. The main borders of mantle divisibility under Fennoscandia are coordinated by both horizontal and vertical sections. They are determined by common velocity mantle characteristics, such as divisibility of the mantle according to velocity characteristics of horizontal sections, special features of velocity distribution such as presence of sub-horizontal high-velocity inclined layers, which spread from the layer of seismic lithosphere into the layer of Golitsyn-Geiko. High-velocity inclined layers separate the mantle area under Trans-Scandinavian magmatic zone and, within the limits of the mantle under Kola-Karelian mega-block, the area of distribution of mantle effects under the North Atlantic eastward.

Введение. Основные скоростные характеристики рассмотрены согласно тектонической схеме [Хаин, 2001; Bogdanova et al., 1996] на рис. 1.

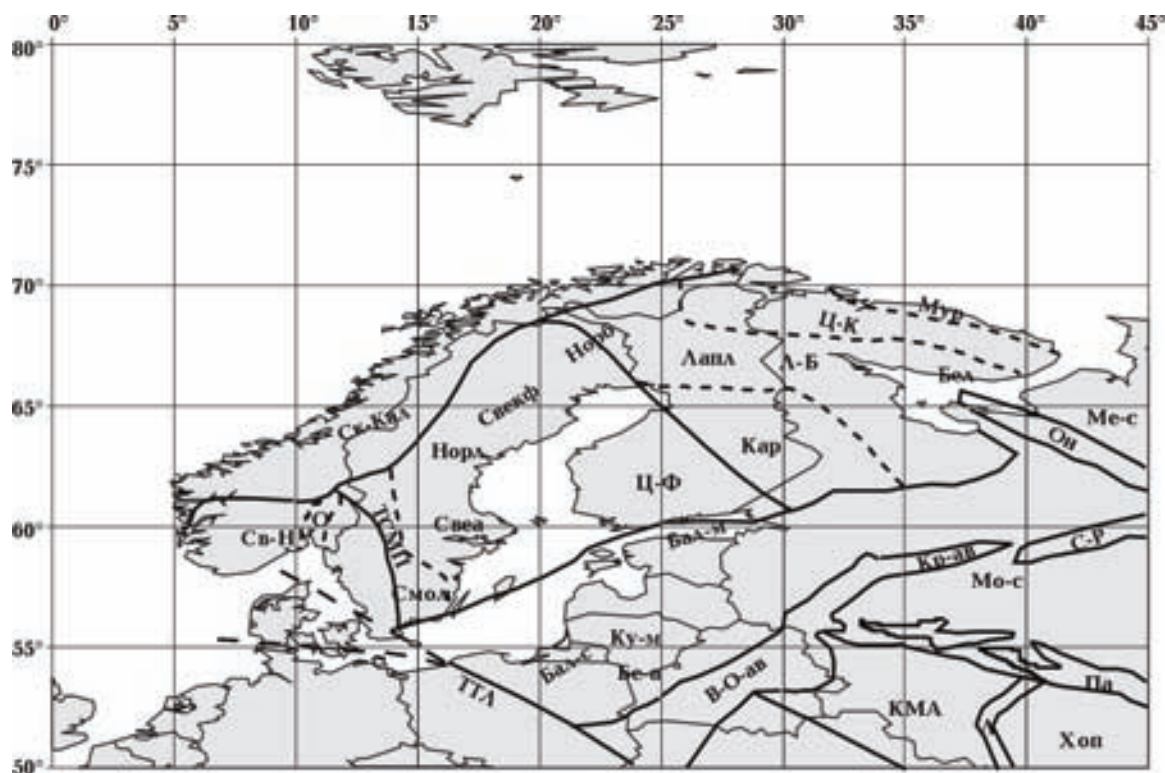


Рис. 1. Тектоническая схема ВЕП по [Хаин, 2001]: Бал-м — Балтийская моноклинал, Бал-с — Балтийская синеклиза, Бе-а — Мазуро-Белорусская антеклиза, Бел — Беломорский блок, В-О-ав — Вольно-Оршанский авлакоген, Кар — Карельский блок Кольско-Карельского мегаблока, КМА — мегаблок КМА Воронежского кристаллического массива, Кр-ав — Крестовский авлакоген, Ку-м — массив Курземе, Л — Лосевская шовная зона Воронежского кристаллического массива, Л-Б — Лапландско-Беломорский гранитогнейсовый пояс Кольско-Беломорского мегаблока, Лапл — Лапландский массив, Мо-с — Московская синеклиза, Ме-с — Мезенская синеклиза, Мур — Мурманский блок Кольско-Карельского мегаблока, Норб — район гранитов Норрботен, Норл — геосинклинальная область Центрального Норрланда (Свекофенский мегаблок), О — грабен Осло (Свекофенский мегаблок), Он — Онежский грабен (Кольско-Карельский мегаблок), Па — Пачелмский авлакоген, С-Н — Среднерусский авлакоген, Св-Н — Свекофенский мегаблок, Св-Кал — Скандинавские каледониды, Смол — район гранитов Смоланда (Свекофенский мегаблок), Свекф — Свекофенский мегаблок, ТСМП — Транскандинавский магматический пояс, ТТЛ — линия Тейсейра—Торнквиста, Хоп — Хоперский мегаблок Воронежского кристаллического массива, Ц-К — Центрально-Кольский блок (Кольско-Карельский мегаблок), Ц-Ф — Центральный Финляндский массив (Свекофенский мегаблок).

Представленные в предыдущей статье [Цветкова и др., 2009] горизонтальные сечения мантии под территорией Фенноскандии позволили сделать следующие выводы.

1. Восточной границей в мантии под Фенноскандией и остальными скоростными мантийными структурами Восточно-Европейской платформы (ВЕП) является полоса раздела ВЕП на глубине 50—125 км.

2. В мантии под Фенноскандией выделяются основные скоростные мантийные области в интервале глубин 50—325 км в соответствии с принятой тектонической схемой (рис. 2):

- мантийная область FSCHW, соответствующая мантии под западной частью Лапландско-Беломорского пояса Кольско-

Карельского мегаблока, западной частью Свекофенского мегаблока, исключая район гранитов Смоланда;

- мантийная область FSCL, соответствующая мантии под Гранулитовым массивом и северо-западом Центрально-Кольского блока, основной частью Лапландского массива Лапландско-Беломорского пояса Кольско-Карельского мегаблока, восточной частью Свекофенского мегаблока (Центральный Финляндский массив и его окружение), северной частью Балтийской синеклизы, включая массив Курземе;
- мантийная область FSCHN, объединяющая мантию под Мурманским блоком,



Рис. 2. Мантийное скоростное деление Фенноскандии на глубине 50—325 км. Условные обозначения см. на рис. 1.

Центрально-Кольским блоком (исключая Кейвский блок), восточной частью Лапландско-Беломорского пояса, Карельским блоком, с продолжением на запад полосы, проходящей в мантии под Мазуро-Белорусской антеклизой, Мазовецкой впадиной, выходящей под Щецинской впадиной и далее под Центральный Польский вал, поднятие Рингкюбинг-Фюн и Норвежско-Датскую впадину;

- мантийная область FSCHL3, соответствующая мантии под Свеконорвежским мегаблоком с выходом на Северную Атлантику.

Следует отметить, что полученное деление мантии по скоростям согласно горизонтальным сечениям соответствует данным геотермики [Artemieva, 2006].

3. В интервале глубин 50—250 км мантии под Фенноскандией соответствуют высокие, относительно принятой референтной модели, скорости. После 200 км начинается распад сформировавшихся в пределах этих глубин скоростных структур, характеризующихся условно более низкими и более высокими скоростями. На глубине 100—200 км при сохра-

нении общей высокоскоростной характеристики рассматриваемой области происходит условная инверсия скоростей: более высокоскоростные области становятся менее высокоскоростными на общем фоне и наоборот. Можно ожидать, что это явление связывается с проявлением подошвы литосферы. Начиная со 150 км формируется восточная граница области FSCHW, как граница распространения высоких скоростей на запад со стороны основной части мантии под ВЕП. При этом область FSCHW остается высокоскоростной, но в западном направлении значения скорости уменьшаются. В интервале 200—325 км происходит перестройка плана, в результате чего отмечается возврат к субмеридиональному простиранию скоростных структур. С глубины 250 км начинает формироваться полная инверсия скоростей. На фоновых скоростях выделяется низкоскоростная мантийная область под Лапландским массивом Лапландско-Беломорского пояса и Гранулитовым массивом Центрально-Кольского блока Кольско-Карельского мегаблока.

На всех сечениях в пограничной, по отношению к зоне Тейсейра—Торнквиста (юго-западная граница ВЕП), скоростной области

отмечается распространение мантийных скоростных структур Карпато-Балканского региона и Среднеевропейской платформы в мантийные структуры под Фенноскандией и распространение мантийных скоростных структур под Фенноскандией в мантию под Среднеевропейской платформой. Отмечается связь мантийных структур под западной частью Свеконорвежского мегаблока с мантийными структурами под Атлантикой, т. е. взаимосвязь мантийных скоростных структур под пограничными районами юга и запада Фенноскандии и окружающими ее структурами.

Рассмотрение вертикальных (долготных и широтных) сечений детализирует полученную модель. В данной работе проведен анализ взаимосвязей скоростных характеристик исследуемой области мантии — скорости и глубин залегания таких слоев, как подошва сейсмической литосферы, подошва слоя Голицына—Гейко (скоростной характеристики переходной зоны верхней мантии), выделение различного типа наклонных высокоскоростных слоев.

В настоящей статье аналогично [Гейко, 2004; Цветкова и др., 2009] результаты представляются в виде невязок истинных скоростей относительно обобщенной средней скорости (табл. 1) в мантии под территорией Евразии [Гейко и др., 1998; Гейко, 2004]:

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

Границе перехода от верхней мантии к слою Голицына—Гейко, а затем от него к зоне раздела 1 между верхней и средней мантией соответствует нулевая невязка. Учитывая отсутствие трехмерной P -скоростной модели коры единой для всей изучаемой территории и использование как исходных данных времена первых вступлений P -волн из бюллетеней ISC, скоростные характеристики коры введены согласно модели Джеффриса—Булена.

Широтные и долготные сечения мантии под территорией Фенноскандии получены в контексте трехмерной P -скоростной модели мантии под Евразией через 1° до глубины 850 км в интервале от 45° с. ш. — 80° с. ш. до 0° в. д. — 40° в. д. К сожалению, технические возможности журнала не позволяют показать все сечения. Результаты представлены выборочно: на рис. 3 — долготные сечения, на рис. 4 — широтные. Сечения показывают, что скоростная характеристика мантии представлена скоростными слоями различного типа.

Таблица 1. Одномерная референтная модель

Глубина, км	$V_{\text{мин}}$, км/с	$V_{\text{макс}}$, км/с	$V_{\text{сред}}$, км/с
50	7,458	8,203	7,929629
75	7,634	8,275	8,010952
100	7,693	8,343	8,08223
125	7,927	8,421	8,139054
150	7,987	8,465	8,189975
175	8,026	8,533	8,241168
200	8,086	8,568	8,295821
225	8,182	8,597	8,355837
250	8,268	8,636	8,422751
275	8,322	8,699	8,498226
300	8,416	8,788	8,584044
325	8,523	8,938	8,682515
350	8,63	9,062	8,79453
375	8,732	9,174	8,918518
400	8,821	9,307	9,053036
425	8,835	9,431	9,176933
450	8,857	9,602	9,287932
475	8,888	9,78	9,400266
500	8,938	9,952	9,521788
525	9,027	10,117	9,661266
550	9,291	10,273	9,828119
575	9,408	10,303	10,00855
600	9,829	10,41	10,17991
625	9,999	10,537	10,3323
650	10,183	10,644	10,46646
675	10,239	10,735	10,5851
700	10,528	10,828	10,69028
725	10,654	10,899	10,7827
750	10,751	10,982	10,86553
775	10,839	11,053	10,94084
800	10,916	11,117	11,01008
825	10,987	11,174	11,07436
850	11,051	11,227	11,13431

Прежде всего, это горизонтальные и субгоризонтальные слои, наклонные высокоскоростные слои. Следует отметить, что последние могут различаться по углу наклона α , глубине максимального проникновения скоростного слоя. Будем различать собственно наклонные высокоскоростные слои $180^\circ > \alpha > 0^\circ$, субгоризонтальные наклонные слои, где $\alpha \rightarrow 0^\circ$ либо $\alpha \rightarrow 180^\circ$ и горизонтальные слои разделения, более присущие слою Голицына—Гейко окраинных мантийных областей, где происходит субгоризонтальное распространение инверсного, по отношению к рассматриваемой пограничной мантийной области, слоя в слой Голицына—Гейко основной мантийной области (скоростная окраинная «вилка»).

Следует отметить общую рельефность всех границ и, следовательно, различную мощность тех либо иных скоростных областей.

Скоростное строение мантии под мегаблоками Фенноскандии по вертикальным сечениям. Свеко норвежский мегаблок (рис. 3 (SN 10), рис. 4, а (WE 59, 58, 56), рис. 4, б (WE 60)). Особенностью скоростного строения мантии под Свеко норвежским мегаблоком является характерная «раздробленность», которая определяется принадлежностью ее к пограничной части мантии под юго-западной окраиной ВЕП. Выделяются наклонные высокоскоростные слои, распространяющиеся в мантии, начинаясь под западной частью Свекофенского мегаблока (Свекофенский блок-2), со стороны шельфа Норвежского моря в западной части блока в сторону Северного моря (см. рис. 5). Разделение мантии под Свеко норвежским мегаблоком по скоростным характеристикам на две части восточную (Свеко норвежский блок-1) и западную (Свеко норвежский блок-2) определяется сложным контактом в мантии под Свекофенским и Свеко норвежским мегаблоками (см. рис. 4, а, б). К контактной области приурочено окончание субгоризонтального распространения низкоскоростного слоя Голицына—Гейко под Свекофенским мегаблоком. Наблюдается высокоскоростной наклонный слой, распространяющийся на запад в слой Голицына—Гейко со стороны слоя сейсмической литосферы свекофенид Свеаленда Свекофенского мегаблока до глубины 400 км, и горизонтальное разделение слоя Голицына—Гейко в мантии под Свеко норвежским мегаблоком субгоризонтальным распространением высокоскоростного слоя Голицына—Гейко со стороны Атлантики (скоростная окраинная «вилка»). Такое встречное распространение приводит к «дроблению» окраинной части слоя Голицына—Гейко. К этой скоростной области относится выход низких скоростей из средней мантии, раздел мантии под Свеко норвежским мегаблоком по скоростным характеристикам на западную и восточную части согласно формированию в сейсмической литосфере двух противоположно направленных высокоскоростных слоев, начиная с мантии под грабеном Осло:

1) распространяющегося в западном направлении до глубины 275 км;

2) распространяющийся в восточном направлении до глубины 500 км в сторону мантии под Трансскандинавский магматический пояс.

Глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы в основном 250—300 км. В сторону Свекофенского мегаблока и Скандинавских каледонид она уменьшается до 250—200 км, в сторону Смоланда — до 250—300 км. По скоростным характеристикам выделяется мантия под районом Мер-Рюмсдаль с глубиной залегания подошвы сейсмической литосферы 425 км и включением низкоскоростного слоя (глубина залегания кровли слоя — 225 км, подошвы — 375 км).

Глубина залегания подошвы слоя Голицына—Гейко под Свеко норвежским мегаблоком 550—625 км. Западная окраинная часть низкоскоростного слоя под этой областью разделяется на две внедрением высокоскоростного слоя Голицына—Гейко со стороны палеозойской Европы и Северной Атлантики (скоростная окраинная «вилка»). При этом отмечается выход низкоскоростной нижней части в среднюю мантию.

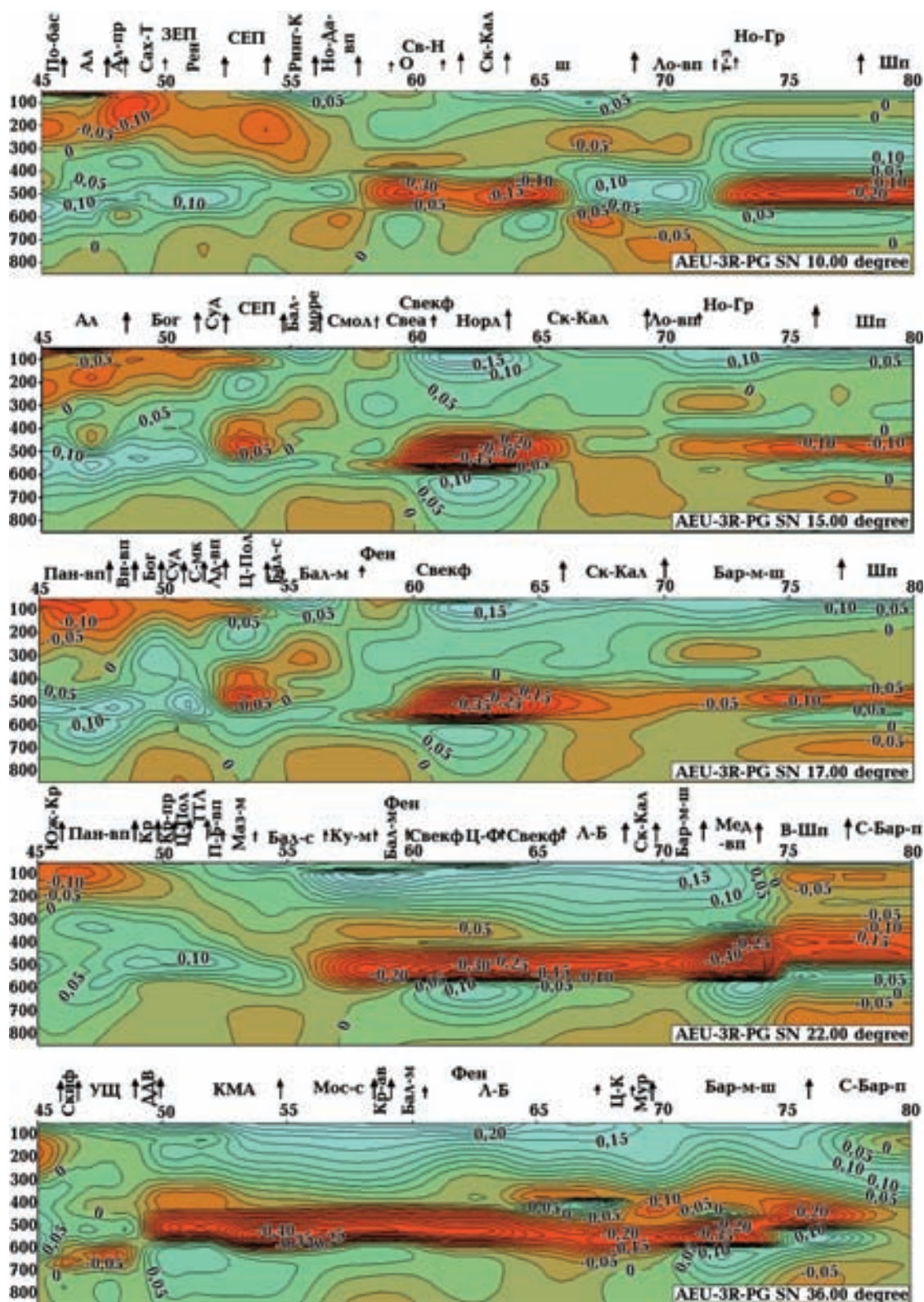
Невязки скорости в слое сейсмической литосферы изменяются от 0,00 до 0,075 км/с. В слое Голицына—Гейко отмечаются изменения невязок скорости в западной части от 0,00 до -0,15 км/с, в восточной части — от 0,00 до -0,075 км/с.

Свекофенский мегаблок (рис. 3 (SN 15, 17), рис. 4, б (WE 62, 64)), рис. 4, в (WE 66, 67, 68)).

Полученная трехмерная скоростная модель позволила по скоростным характеристикам разделить Свекофенский мегаблок на две части: западную (Свекофенский блок-2) и восточную (Свекофенский блок-1). Граница определяется распространением максимальной скорости со стороны основной части ВЕП в слое сейсмической литосферы, разделением слоя Голицына—Гейко на части под Свекофенским мегаблоком (см. рис. 1).

Западная часть Свекофенского мегаблока (Свекофенский блок-2). Глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы Свекофенского блока-2 выдержана в пределах 375—400 км. Формируется высокоскоростной

Рис. 3 Долготные вертикальные сечения 3D P -скоростной модели мантии под Фенноскандией: Ал — Альпы, Ал-пр — Предальпийский прогиб, Бал-море — Балтийское море, Бар-м-ш — шельф Баренцева моря, Бог — Богемский массив, Вн-вп — Венская впадина, В-Шп — Восточного Шпицбергена поднятие, ДДВ — Днепровско-Донецкая впадина, ЗЕП — Западно-Европейская платформа, Кр — Карпаты, Кр-пр — Предкарпатский прогиб, Ло-вп — Лофотенская впадина, Лд-вп — Лодзинская впадина, Маз-м — Мазовецкий массив, Мед-вп — впадина



о-ва Медвежий, Но-гр — Норвежско-Гренландский сегмент, Но-Да-вп — Норвежско-Датская впадина, Пан-вп — Паннонская впадина, П-Б-вп — Подляско-Брестская впадина, По-бас — бассейн По, РЕН — Реногерциникум, Ринг-К — Ринг-Кьюбинг-Фюн, Сах-Т — Саксотюрингия, С-Бар-п — Северо-Баренцева плита, СЕП — Средне-Европейская платформа, Скиф — Скифская платформа, С-мк — Предсудетская моноклираль, УЩ — Украинский щит, Шп — Шпицберген, ш — шельф, Фен — Фенноскандия, Ц-Пол — Центральный Польский вал, Юж-Кр — Южные Карпаты. Остальные условные обозначения см. на рис. 1.

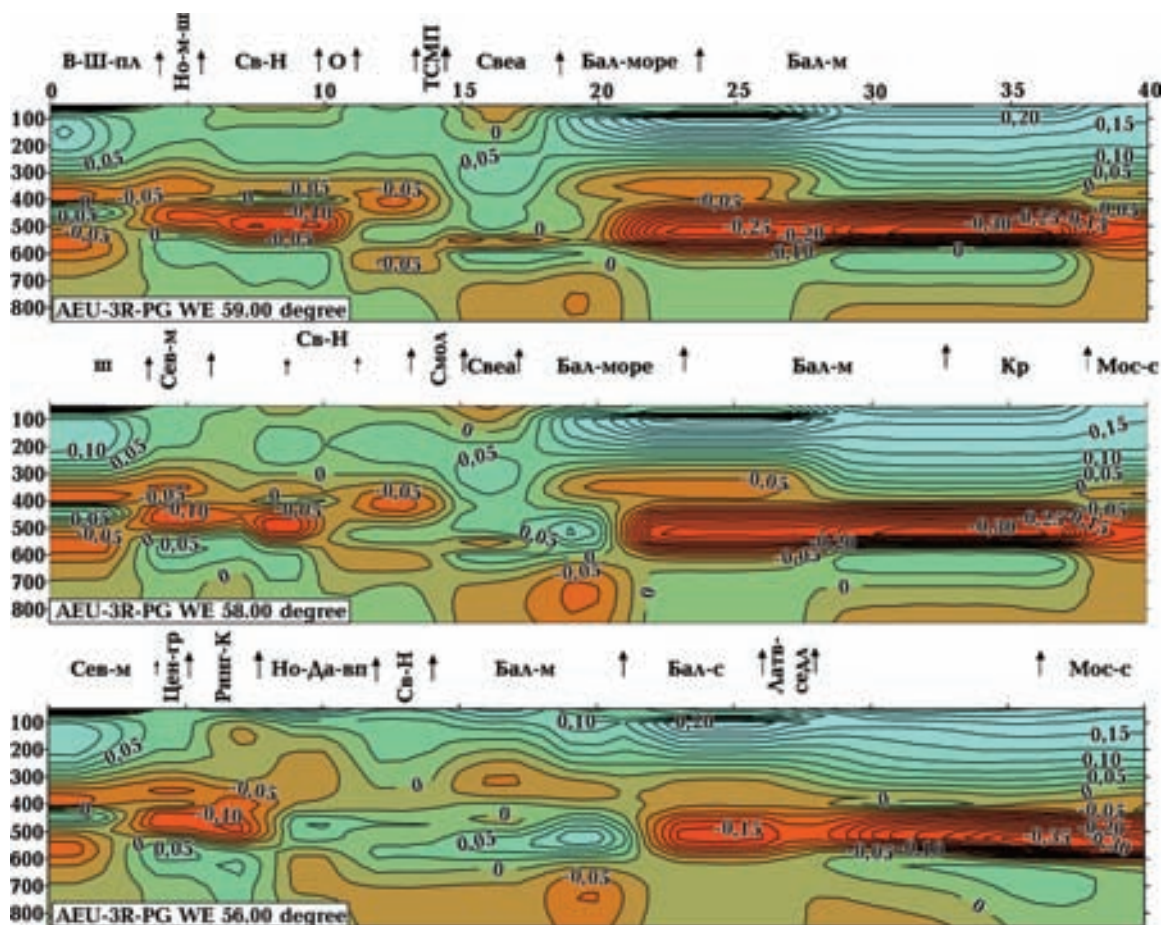


Рис. 4, а.

наклонный слой в сторону Скандинавских Каледонид и Атлантики. Соотношение со скоростными слоями Свеконорвежского мегаблока описано выше. В сечениях 15—17° в. д. выделяется высокоскоростной наклонный слой в сторону Среднеевропейской платформы. Погружение идет до глубины 400 км, проходя в мантии под территорией Смоланда. В этой же полосе наклонные высокоскоростные слои от геосинклинальной зоны Центрального Норланда на юг в сторону Смоланда отслеживаются до глубины 400 км. Для долготных сечений скоростные характеристики в пределах 8—17° в. д. показывают увеличение глубины залегания подошвы сейсмической литосферы с севера на юг. В пределах Фенноскандинавского щита, начиная с 18° в. д., глубина залегания подошвы сейсмической литосферы увеличивается с юга на север (18°—23° в. д. × 55—75° с. ш., 24—26° в. д. × 56—75° с. ш., 27—29° в. д. × 60—73° с. ш.).

Под Свекофенским блоком-2 подошва слоя Голицына—Гейко залегает на глубине 575—600 км с выходом низких скоростей из средней мантии в окраинных частях. Невязки скорости в слое сейсмической литосферы изменяются от 0,00 до 0,20 км/с, под южной частью Свеаленда и Смоландом — от 0,00 до 0,050 км/с. Невязки скорости в слое Голицына—Гейко в южной и северной частях изменяются от 0,00 до -0,10 км/с, в остальной части от 0,00 до -0,45 км/с.

Восточная часть Свекофенского мегаблока (Свекофенский блок-1). Глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы Свекофенского блока-1 выдержана в пределах 275—350 км. Особенностью его рельефа является влияние распространения субгоризонтального высокоскоростного слоя со стороны сейсмической литосферы Карельского мегаблока в низкоскоростной слой Голицына—Гейко Свекофенского блока-1, в результате чего

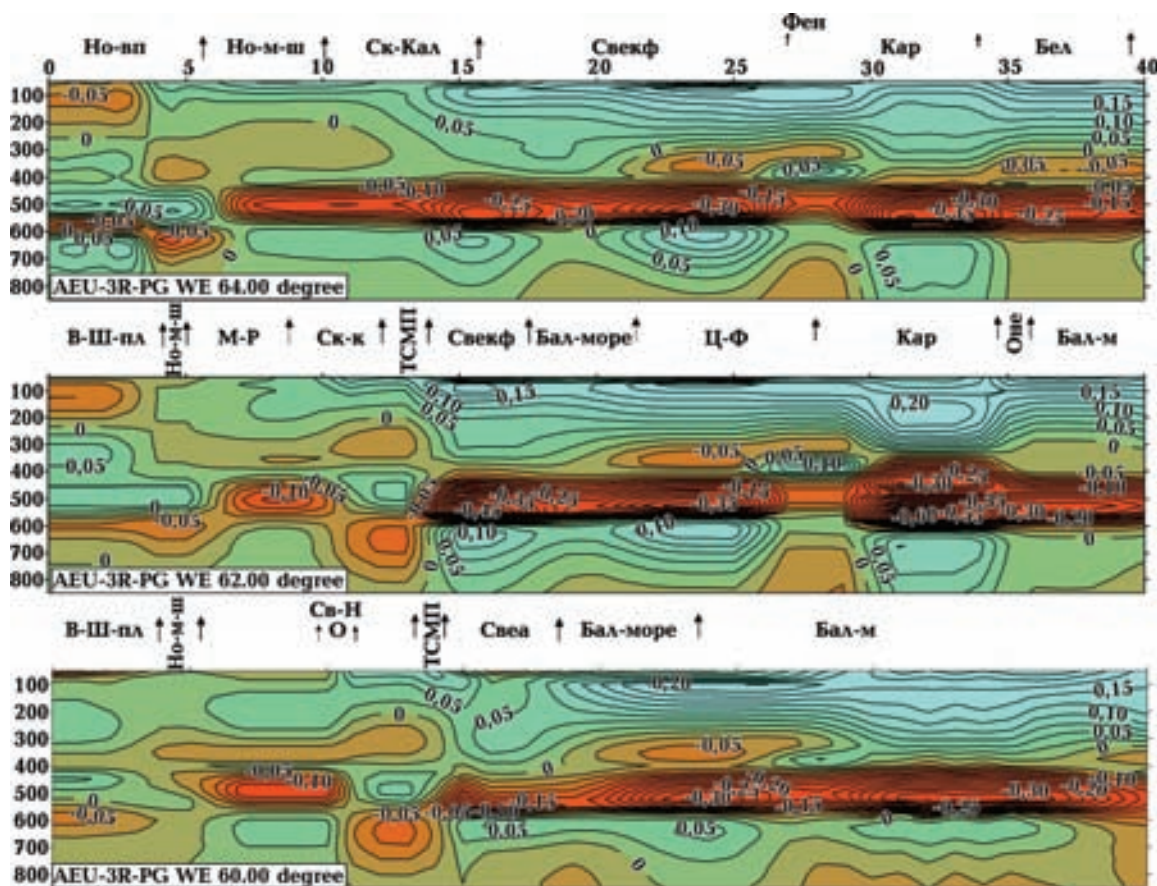


Рис. 4. б.

глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы Свекофенского блока-1 уменьшается до 275 км. При этом происходит ее увеличение к скоростной границе под Свекофенским блоком-1 и Свекофенским блоком-2 до 300—350 км в интервале 60—64° с. ш. (см. рис. 4, б, табл. 2). Скоростные характеристики такого типа встречаются в коровых структурах Фенноскандии («крокодилы» Майснера [Meissner et al., 1990], «тектонический клин» А. В. Чекунова [Чекунов и др., 1993], дислокации Ю. К. Шукина [Юдахин и др., 2003]). Глубина залегания подошвы слоя внедрения 375—400 км. Аналогичный субгоризонтальный высокоскоростной слой наблюдается со стороны Балтийской моноклинали. Следует отметить, что указанные субгоризонтальные слои порождают мантийное «сводобразование» общего рельефа скоростных слоев. Причиной этого служит уменьшение глубины залегания подошвы слоя сейсмической литосферы над распространением субгоризонтального слоя и увеличение ее в стороны от него.

Глубина залегания подошвы слоя Голицына—Гейко под восточной частью Свекофенского блока-1 550—575 км с выходом низких скоростей из средней мантии под указанными субгоризонтальными высокоскоростными слоями. Невязки скорости в слое сейсмической литосферы изменяются в пределах 0,00—0,20 км/с, в слое Голицына—Гейко — от 0,00 до -0,35 км/с.

Кольско-Карельский мегаблок (рис. 3 (SN 22, 36), рис. 4, б (WE 62, 64), рис. 4, в (WE 66, 67, 68)). Карельский блок. Глубина залегания подошвы сейсмической литосферы под Карельским блоком не выдержана как субгоризонтальная. В пределах 61—63° с. ш. наблюдается высокоскоростной наклонный слой, распространяющийся со стороны сейсмической литосферы Центрального Финляндского массива Свекофенского блока-1 в сейсмическую литосферу Карельского блока. Максимальная глубина распространения наклонного слоя 350 км. В сечениях 64—65° с. ш. глубина залегания подошвы слоя сейсмической

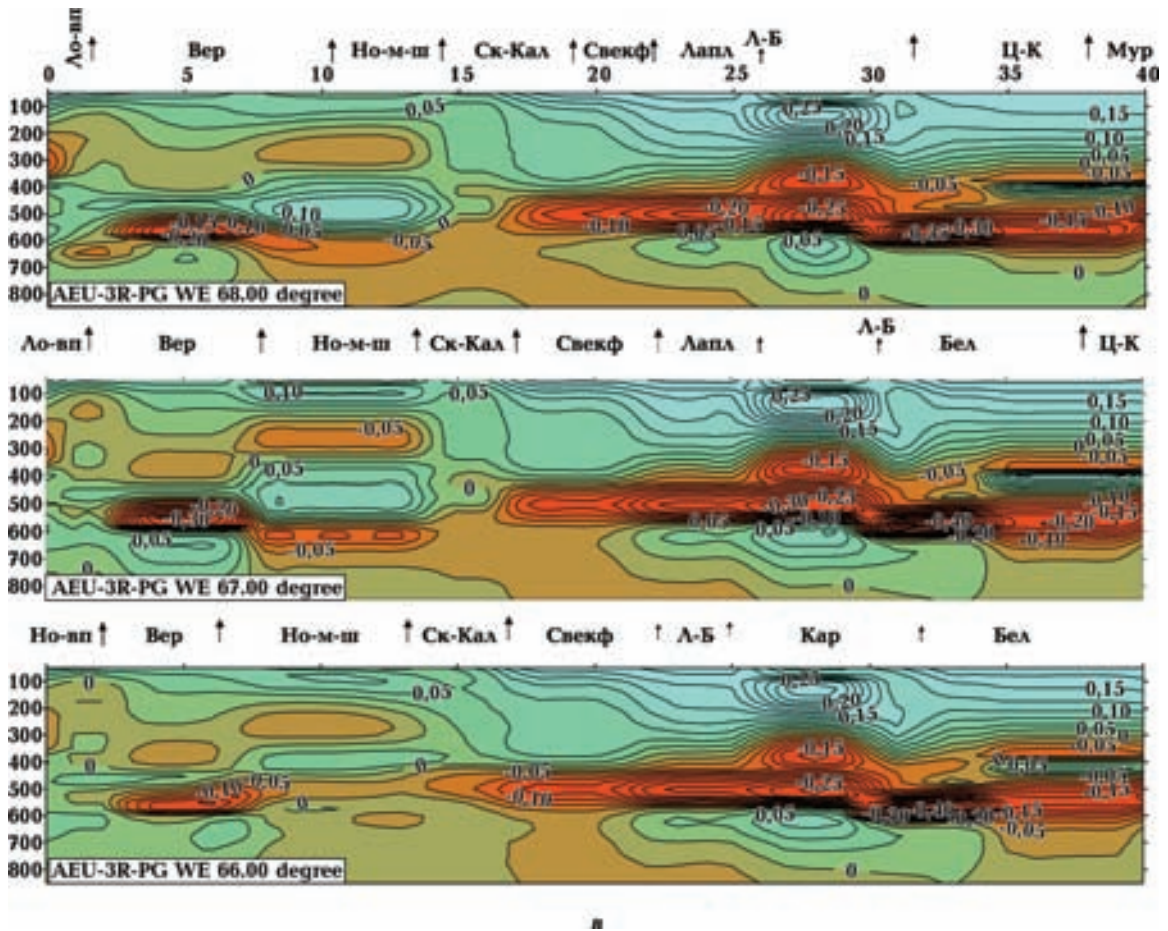


Рис. 4. Широтные вертикальные сечения 3D P -скоростной модели мантии под Фенноскандией: *a* — 56, 58, 59° с. ш., *б* — 60, 62, 64° с. ш., *в* — 66, 67, 68° с. ш.; В-Ш-пл — Восточно-Шетландская плита, Кр — Крестовский авлакоген, Латв-седл — Латвийская седловина, Но-м-ш — шельф Норвежского моря, Сев-м — Северное море, Цен-гр — Центральный грабен, Но-вп — Норвежская впадина, Бел — Беломорский блок, М-Р — район Мюр-Рпомсдаль, Оне — Онежское озеро, Вер — плато Веринг. Остальные условные обозначения см. на рис. 1 и 3.

литосферы 250 км по области поднятия, в сторону Беломорского блока увеличивается до 375 км, в сторону Свекофенского блока-1 — до 350 км. В сечении 64° с. ш. появляется субгоризонтальный наклонный высокоскоростной слой, распространяющийся из верхней мантии Беломорского блока в низкоскоростной слой Голицына—Гейко Карельского блока на глубине 350—425 км. В сечениях 61—63° с. ш. наблюдается такого же типа наклонный субгоризонтальный слой со стороны Карельского блока по направлению к Центральному Финляндскому массиву Свекофенского блока-1. При этом зоной сочленения между Карельским и Свекофенским-1 блоками выступает Ладожско-Ботническая шовная зона, характеризующаяся упомянутым субгоризонтальным распространением высоких скорос-

тей в низкоскоростной слой Голицына—Гейко и выходом низких скоростей из средней мантии. В этом интервале глубина залегания слоя сейсмической литосферы определяется как 350 км в мантии под Карельским блоком и 300 км для Ладожско-Ботнической шовной зоны. Долготные сечения более четко показывают уменьшение глубины залегания слоя сейсмической литосферы в сторону Беломорского блока до 300—350 км. Невязки скорости для слоя сейсмической литосферы изменяются в интервале 0,00—0,275 км/с.

Отсюда следует, что в мантии под Карельским блоком выделяется как наклонный высокоскоростной слой, распространяющийся в слое сейсмической литосферы со стороны мантии под Свекофенским блоком-1 до глубины 350 км, так и субгоризонтальный высокоскоростной

Таблица 2. Общая характеристика скоростных особенностей

Блоки	Глубина залегания подошвы сейсмической литосферы, км	Интервал изменения невязок скорости в слое сейсмической литосферы, км/с	Глубина залегания подошвы слоя Голицына—Гейко, км	Интервал изменения невязок скорости в слое Голицына—Гейко, км/с
Кольско-Карельский мегаблок				
Центрально-Кольский и Мурманский блоки	300—350	0,00—0,20	600—700	от 0,00 до -0,20с
Карельский блок	250—375	0,00—0,275	600—650	от 0,00 до -0,45
Лапландско-Беломорский пояс				
Беломорский блок	300—375	0,00—0,225	575—600	от 0,00 до -0,40
Лапландско-Беломорский пояс-1	300—350	0,00—0,275	550—575	от 0,00 до -0,30
Лапландско-Беломорский пояс-2	250—350	0,00—0,175	550	от 0,00 до -0,30
Прибалтийский мантийный блок				
Прибалтийский мантийный блок	250—375	0,00—0,25	600—650	от 0,00 до -0,25
Свекофенский мегаблок				
Свекофенский блок-1	275—400	0,00—0,250	550—575	от 0,00 до -0,35
Свекофенский блок-2	375—400	0,00—0,175	575—600	от 0,00 до -0,45
Свеконорвежский мегаблок				
Свеконорвежский блок-1	200—250	0,00—0,075	550—625	от 0,00 до -0,075
Свеконорвежский блок-2	250—300	0,00—0,075	Уход в среднюю мантию	от 0,00 до -0,15

слой, распространяющийся в мантии под восточной частью Лапландско-Беломорского пояса (Беломорский блок) в слой Голицына—Гейко. Отмечается мантийное «сводовобразование» в слое сейсмической литосферы.

Граница подошвы слоя Голицына—Гейко определяется в основном глубиной залегания 600—650 км с резкой скоростной дифференцированностью внутри него и по зоне раздела-1. Невязки скорости для слоя Голицына—Гейко изменяются от 0,00 до -0,45 км/с.

Беломорский блок (рис. 4, б (WE64)), рис. 4, в (WE66, 67)). Беломорский блок Лапландско-Беломорского пояса рассмотрен в представлении [Хаин, 1977], т.е. подстилает большую часть Белого моря, включает тектонические структуры северного, южного, западного побережья и на северо-западе уходит в направлении Лапландии. Глубина залегания подошвы сейсмической литосферы под Беломорским блоком определяется как 300 км в центральной части с резким увеличением в сторону Карельского блока до 375 км и плавным увеличением в сторону Центрально-Кольского блока и Мезенской синеклизы до 325—350 км. В сечении 66° с. ш. скоростная область мантии под Беломорским блоком выде-

ляется на фоне скоростных характеристик мантии под Лапландско-Беломорским поясом с дальнейшим разделением мантии на две части вдоль Кандалакшинского грабена. Часть, граничащая с мантией под Карельским блоком, имеет резкий наклон и уже указанный перепад глубин залегания подошвы сейсмической литосферы. Рельеф подошвы второй части сейсмической литосферы мантии под Беломорским блоком (35—40° в.д.) выположен в сторону Мезенской синеклизы, глубина залегания подошвы сейсмической литосферы 300 км. В этом интервале отмечается субгоризонтальный высокоскоростной наклонный слой, распространяющийся с юга в полосе 35—39° в. д., начиная от мантии под южной частью Беломорского блока до Карельского блока включительно. Распространение слоя на север проходит в слое Голицына—Гейко под Лапландско-Беломорским поясом, Центрально-Кольским и Мурманским блоками. В сечениях 63—65° с.ш севернее Кандалакшинского грабена находится выход низких скоростей из средней мантии.

Подошва слоя Голицына—Гейко расположена на глубине 575—600 км. В слое сейсмической литосферы невязки скорости изменя-

ются от 0,00 до 0,175—0,225 км/с. В слое Голицына—Гейко интервал изменения невязок скорости от 0,00 до –0,40 км/с.

Центрально-Кольский и Мурманский блоки (рис. 3 (SN36), рис. 4, в (WE68)) имеют достаточно выдержанную глубину залегания подошвы слоя сейсмической литосферы (300—350 км). Рельеф слоя выполаживается в сторону Мезенской синеклизы на восток, наблюдается плавное погружение на север в сторону шельфа Баренцева моря. Как уже отмечалось, низкоскоростной слой Голицына—Гейко под Центрально-Кольским и Мурманским блоками разделен на две части субгоризонтальным высокоскоростным слоем, распространяющимся с юга. С юга на север наблюдается распространение высокоскоростного наклонного слоя со стороны Беломорского блока до глубины 250 км. Под областью максимального погружения наклонного слоя в слое Голицына—Гейко отмечается низкоскоростная аномалия –0,125 км/с и выход низких скоростей из средней мантии. Со стороны сейсмической литосферы мантии под Северо-Баренцевой плитой наблюдается встречный по направлению субгоризонтальный высокоскоростной слой, распространяющийся в слой Голицына—Гейко под шельфом Баренцева моря, и определяющий мантийную зону сочленения между мантией под Северо-Баренцевой плитой и мантией под Центрально-Кольским и Мурманским блоками.

Выделяется субгоризонтальный высокоскоростной слой, который простирается из слоя сейсмической литосферы под северо-западом Центрально-Кольского блока в низкоскоростной слой Голицына—Гейко мантии под шельфом Баренцева моря, Скандинавскими каледонидами и северо-западным окончанием Лапландско-Беломорского пояса.

Глубина залегания подошвы слоя Голицына—Гейко 600—700 км. Увеличение глубины отмечается к востоку. В мантии под Кейвской синеклизой отмечается выход низких скоростей из средней мантии. Интервал изменения невязок скорости в слое сейсмической литосферы в пределах 0,00—0,20 км/с, в слое Голицына—Гейко от 0,00 до –0,20 км/с.

Лапландско-Беломорский пояс (го Беломорского блока) (рис. 4, в (WE66, 67, 68)). По скоростным характеристикам мантия под Лапландско-Беломорским поясом в рассматриваемой части может быть разделена на две части. Западная часть (Лапландско-Беломорский пояс-2) включает мантию под севером райо-

на Норботтен, западной оконечностью Лапландско-Беломорского пояса с выходом под Скандинавские каледониды. Восточная часть (Лапландско-Беломорский пояс-1) включает мантию под Лапландским массивом, западом Центрально-Кольского блока и Гранулитовый массив. Глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы под восточной частью определяется как 250 км с погружением в сторону северной части Норботтена до 300 км и в сторону Беломорского блока до 350 км. Погружение на запад под Скандинавские каледониды спокойнее и доходит до 400 км. Также определяется погружение на север. Отмеченное деление определяется специфической скоростной характеристикой восточной части. Восточная часть имеет слоистое скоростное строение: в интервале глубин 50—250 км невязки скорости 0,00—0,275 км/с, что выше по отношению к окружающему фону (0,00—0,175 км/с); на глубине 300—450 км значение невязок от 0,00 до –0,175 км/с на фоне –0,05 км/с; на глубине 450—550 км значение невязок –(0,05—0,300) км/с на фоне –0,15 км/с; на глубине 575—750 км невязки от 0,00 до –0,075 км/с. Такое поведение зависимости скорость/глубина вместе с распространением субгоризонтального высокоскоростного слоя со стороны Балтийской моноклинали в слой Голицына—Гейко Свекофенского блока-1 приводит к наклонному рельефу подошвы слоя сейсмической литосферы от Балтийской моноклинали на север в сторону шельфа Баренцева моря.

Глубина залегания подошвы слоя Голицына—Гейко определяется как 550 км в западной части и как 550—750 км в восточной. Невязки изменяются от 0,00 до –0,300 км/с в восточной части и от 0,00 до –0,30 км/с в западной.

Прибалтийский скоростной мантийный «блок» (рис. 3 (SN22), рис. 4, а (WE56, 58, 59)). Под Прибалтийским мантийным скоростным «блоком» будем понимать мантию (в пределах рассматриваемой глубины) под Балтийской синеклизой от Балтийской моноклинали до Полоцко-Курземской зоны включительно. Область объединяет Белорусско-Прибалтийский гранулитовый блок, Инчукалнский блок и Западно-Литовский гранулитовый блок. Глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы определяется как 250—375 км, невязки скоростей изменяются в интервале 0,00—0,25 км/с. Уменьшение глубины залегания подошвы слоя сейсмической литосферы

связано с пограничным положением Полоцко-Курземской зоны. Южнее ее наблюдается окраинное распространение слоя высоких скоростей («вилка») в низкоскоростной слой Голицына—Гейко, что приводит к поднятию его верхней части и выходу в среднюю мантию нижней. Выше отмечалось распространение субгоризонтальных высокоскоростных наклонных слоев с северной части данного блока в слой Голицына—Гейко под Свекофенским блоком-1 (Центрально-Финляндский массив). Глубина залегания подошвы слоя Голицына—Гейко 600—650 км, невязки скорости в этом слое изменяются от 0,00 до -0,25 км/с.

Обобщенные скоростные характеристики мантии. Как обобщенные скоростные характеристики мантии под Фенноскандией будем рассматривать общие скоростные характеристики, высокоскоростные наклонные слои, субгоризонтальные высокоскоростные наклонные слои, распространяющиеся из слоя сейсмической литосферы в слой Голицына—Гейко. Учитывая последующее рассмотрение скоростных особенностей пограничной области мантии под ВЕП, здесь не приводятся детальные характеристики окраинных мантийных слоев.

Общая характеристика скоростных особенностей рассмотренных мегаблоков приводится в табл. 2. Отсюда по значениям невязок скорости и глубинам залегания подошвы слоя сейсмической литосферы и подошвы слоя Голицына—Гейко в мантии под Фенноскандией можно выделить две основные группы мантийных скоростных областей.

1. Первой группе соответствуют более высокие невязки скорости и меньшие глубины залегания подошвы слоя сейсмической литосферы, более высокие невязки слоя Голицына—Гейко по отношению ко второй основной группе. Сюда относятся мантийные области под Карельским блоком, Центрально-Кольским и Мурманским блоками, Беломорским блоком Кольско-Карельского мегаблока, Прибалтийским мантийным блоком и Свекофенским блоком-1.

2. Ко второй группе относятся мантийные области под Свеконорвежским мегаблоком, Свекофенским блоком-2, Лапландско-Беломорским поясом-2.

Следует отметить, что мантийные области под Прибалтийским блоком, Свекофенским блоком-1 и Лапландско-Беломорским поясом-1 относятся к переходным между первой и второй группами.

Наиболее высокие невязки в слое Голицына—Гейко соответствуют мантии под пограничной областью ВЕП (мантия под Свеконорвежским мегаблоком и под Центрально-Кольским и Мурманским блоками).

Высокоскоростные наклонные слои в мантии под Фенноскандией. На рис. 5 представлена схема расположения наклонных высокоскоростных слоев в мантии Фенноскандии. По встречным высокоскоростным наклонным слоям выделяется мантия под Трансскандинавской магматической зоной. Показан наклон слоя сейсмической литосферы в интервале 8—17° в. д. на юг и с 18 в. д. инверсно на север. Широтные высокоскоростные наклонные зоны, соответствующие Кольско-Карельскому мегаблоку и северу Свекофенского мегаблока, распространяются на восток со стороны Северной Атлантики. Привлекают внимание наклонные слои в мантии под юго-восточным окончанием Карельского блока между Ладожским и Западно-Онежским грабенами (зона Полканова). Учитывая двумерность представленной схемы, можно предположить, как результирующее, северо-восточное направление распространения наклонных высокоскоростных слоев в мантии под Кольско-Карельским мегаблоком, что согласуется с мнением, высказанным в работе [Юдахин и др., 2003], о северо-восточном, северо-западном и южном распространении основных тектонических структур Фенноскандии.

В табл. 3 и 4 представлены основные характеристики выделенных наклонных высокоскоростных слоев.

Отмечается, что чем южнее расположено начало наклона слоя, тем глубже наблюдается погружение. На приведенной схеме наибольшее погружение испытывает слой, начинающийся в мантии под Балтийским морем (около Смоланда) и распространяющийся в мантии до Предсудетской моноклинали Среднеевропейской платформы (550 км). При этом северные и западные наклонные слои распространяются на глубину 250—350 км. Различаются углы наклона при максимальном погружении слоя: более резкие (50—55°) для мантии под внутренними структурами (Трансскандинавская магматическая зона) и более пологие (30—40°) для мантии под окраинными структурами (со стороны Норвежско-Гренландского бассейна Северной Атлантики, выход под Предсудетскую моноклинали Среднеевропейской платформы).

Таблица 4. Долготные высокоскоростные наклонные слои

Откуда	Куда	Глубина максимального погружения высокоскоростного слоя сейсмической литосферы, км	Угол наклона α , град.
8—11° в. д. × 72° с. ш. (Северная Атлантика)	8—11° в. д. × 57° с. ш. (Свеконорвежский блок-2))	250	30
15—17° в. д. × 60° с. ш. (Свекофенский блок-2, Центральный Норланд)	15—17° в. д. × 57° с. ш. (Свекофенский блок-2, Свеаленд)	400	20
15—17° в. д. × 56° с. ш. (Балтийское море, Смоланд)	15—17° в. д. × 48° с. ш. (Среднеевропейская платформа, Предсудетская моноклинал)	550	40
30—34° в. д. × 60° с. ш. (Балтийская моноклинал)	30—34° в. д. × 63° с. ш. (Карельский блок)	250	30
25—29° в. д. × 58° с. ш. (Карельский блок)	25—29° в. д. × 72—73° с. ш. (Баренцево море)	250	25

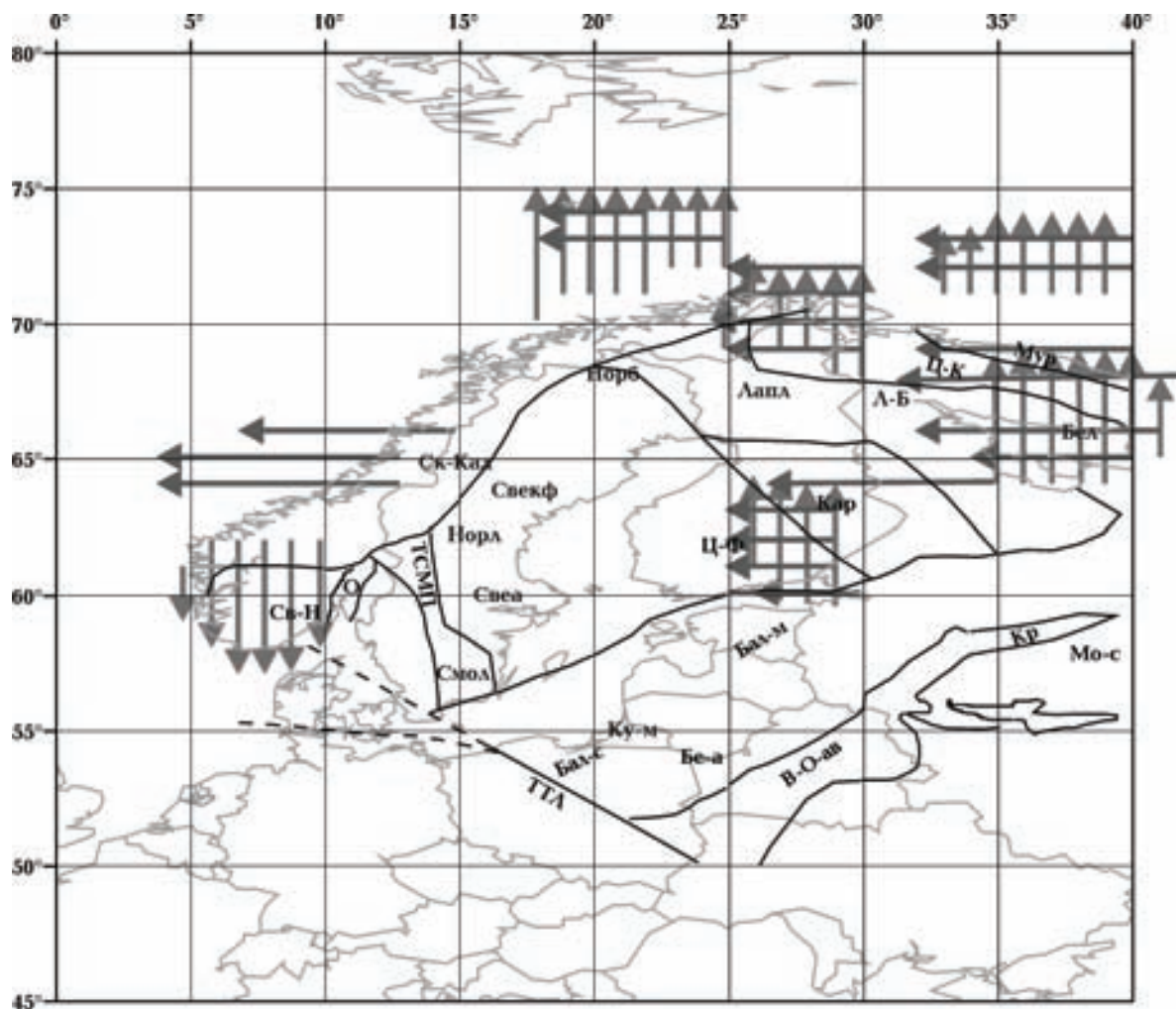


Рис. 6. Схема распространения субгоризонтальных высокоскоростных наклонных слоев. Условные обозначения см. на рис. 1 и 3.

Таблица 5. Субгоризонтальные широтные наклонные высокоскоростные слои, распространяющиеся из слоя сейсмической литосферы в слой Голицына—Гейко

Откуда	Куда	Глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы, км	«Сводообразование»	Выход низких скоростей
60—64° с. ш.×29,5°—30° в. д. (Карельский блок)	60—64° с. ш.×24—25° в. д. (Свекофенский блок-2, Ладожско-Ботническая зона)	250—275	да	да
65—69° с. ш.×43—40° в. д. (Русская плита, Мезенская синеклиза)	65—69° с. ш.×34—31,5° в. д. (Кольско-Карельский мегаблок: Мурманский блок, Центрально-Кольский блок Лапландско-Беломорский пояс)	300	да (слабо)	да
69° с. ш.×30—25° в. д. (Кольско-Карельский мегаблок: Лапландско- Беломорский пояс, Центрально-Кольский блок)	72° с. ш.×30—25° в. д. (шельф Баренцевого моря, Скандинавские каледониды)	300	да	да
64° с. ш.×15—12,5° в. д. (Скандинавские каледониды)	66° с. ш.×3,5—7° в. д. (Атлантика, Норвежский бассейн)	250	да	да

Таблица 6. Субгоризонтальные долготные наклонные высокоскоростные слои, распространяющиеся из слоя сейсмической литосферы в слой Голицына—Гейко

Откуда	Куда	Глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы, км	«Сводообразование»	Выход низких скоростей
59—61° с. ш.×30—29,5° в. д. (Балтийская моноклиналь, Свекофенский-1 блок)	64° с. ш.×30—24° в. д. (Карельский блок Кольско- Карельского мегаблока)	250	да	да
64—65° с. ш.×41—40° в. д. (Русская плита, Мезенская синеклиза, Беломорский блок Лапландско-Беломорского пояса)	64—65° с. ш.×41—35° в. д. (Кольско-Карельский мегаблок: Мурманский блок, Центрально-Кольский блок, Лапландско-Беломорский пояс)	300	да (слабо)	да
68,5—72° с. ш.×30° в. д. (Кольско-Карельский мегаблок: Лапландско- Беломорский пояс, Центрально-Кольский блок)	68,5—72° с. ш.×25° в. д. (шельф Баренцевого моря)	300	нет	да
64—65° с. ш.×21—25° в. д. (Лапландский массив Лапландско-Беломорского пояса, Свекофенский блок-2)	59—60° с. ш.×21—25° в. д. (Прибалтийский блок, Свекофенский блок-2)	250	да (слабо)	да

Субгоризонтальные наклонные высокоскоростные слои в мантии под Фенноскандией. На рис. 6 представлена схема расположения субгоризонтальных наклонных высокоскоростных слоев, распространяющихся из

слоя сейсмической литосферы в слой Голицына—Гейко. Спецификой указанных мантийных скоростных областей является приуроченность к ним выходов низких скоростей из средней мантии в высокоскоростную зону

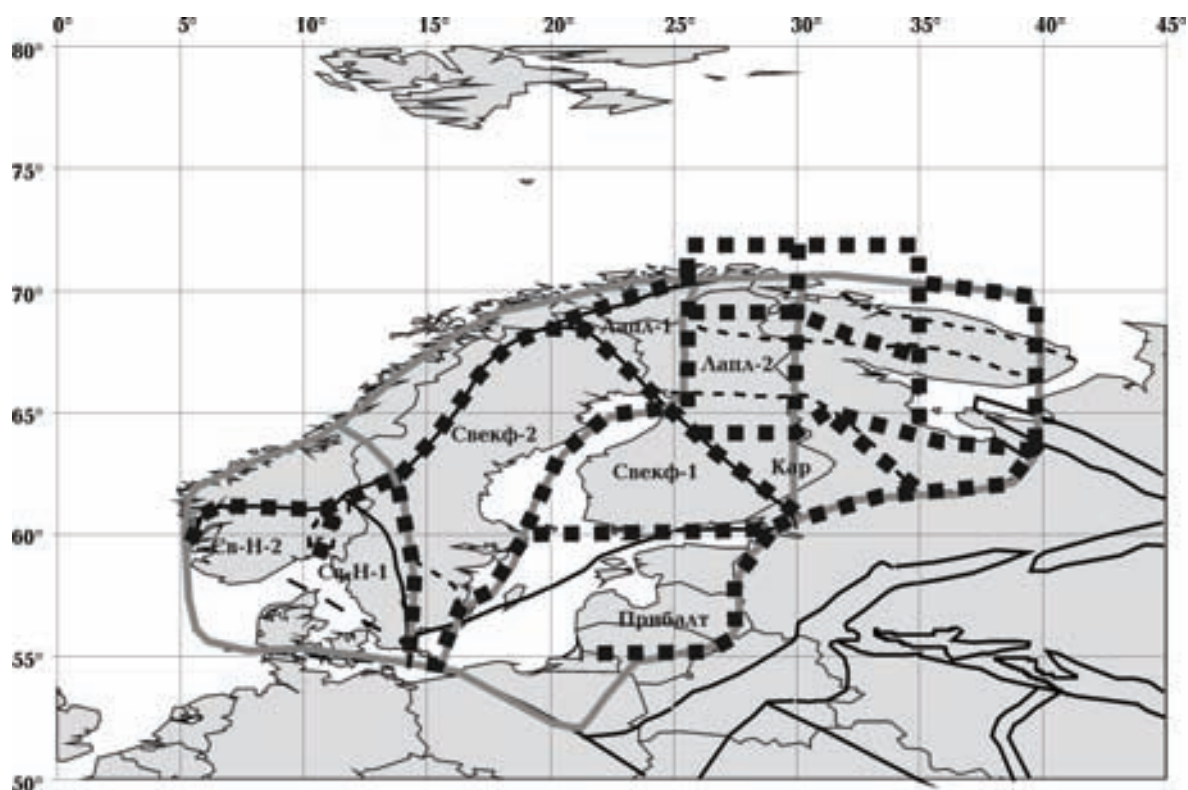


Рис. 7. Схема делимости мантии под Фенноскандией. Условные обозначения см. на рис. 1 и 3.

раздела 1 и выше, реализация мантийной делимости сейсмической литосферы и слоя Голицына—Гейко по скоростным характеристикам на отдельные скоростные области, а также проявление зон сочленения между ними. Вследствие внедрения высокоскоростного слоя сейсмической литосферы в низкоскоростной слой Голицына—Гейко глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы над слоем Голицына—Гейко уменьшается и увеличивается в стороны от области распространения, т. е. происходит «мантийное сводообразование», что вызывает деление мантийной области на части, соответствующие спокойной зоне и зоне «сводообразования».

В табл. 5, 6 приведены общие характеристики субгоризонтальных наклонных высокоскоростных слоев. Результирующие направления распространения указанных слоев — северо-западное, западное и южное. Следует отметить, что областям распространения мантийных субгоризонтальных слоев, за исключением Ладожско-Ботнической шовной зоны, соответствует более высокое залегание границы М [Шаров, 1993; Юдахин и др., 2003]. Глубина залегания границы М для шовных

зон составляет 36—38 км при среднем фоне 40 км, для Ладожско-Ботнической зоны — 63÷64 км.

Выводы. Так как скоростные характеристики мантии под пограничными структурами Фенноскандии будут рассмотрены отдельно в контексте скоростных характеристик пограничной области под ВЕП, следует отметить, что приведенная скоростная картина, в основном, соответствует мантии под Фенноскандинавским щитом, как северо-западной части ВЕП.

1. Основной скоростной, согласованной по вертикальным и горизонтальным сечениям, характеристикой мантии под Фенноскандией, является общая инверсность скоростного строения мантии: высокоскоростная сейсмическая литосфера, низкоскоростной слой Голицына—Гейко (скоростная характеристика переходного слоя), высокоскоростная зона раздела 1 и т. д. Такая скоростная характеристика присуща мантии под докембрийскими структурами.

2. До 17° в. д. отмечается общее увеличение глубины залегания подошвы слоя сейсмической литосферы с севера на юг. С 18° в. д. наблюдается инверсия — общее увеличение

глубины залегания подошвы слоя сейсмической литосферы с юга на север.

3. Мантия под основной частью Фенноскандии по скоростным характеристикам делится на три группы (см. табл. 2). К первой группе относится мантия под Карельским, Беломорским, Центрально-Кольским и Мурманским блоками Кольско-Карельского мегаблока, Прибалтийским мантийным блоком и Свекофенским блоком-1. Ко второй — мантия под Лапландско-Беломорским поясом-2, Свекофенским блоком-2, Свеконорвежским мегаблоком. Третья группа — это мантийные области под Прибалтийским блоком, Свекофенским блоком-1, Лапландско-Беломорским поясом-1, относящиеся к переходным между первой и второй группами. Глубина залегания подошвы слоя сейсмической литосферы меньше под первой группой указанных мантийных областей, невязки скорости в этом слое выше по сравнению с аналогичными мантийными характеристиками под второй группой. Невязки скорости слоя Голицына—Гейко под первой группой также характеризуются большими значениями, чем под второй группой, за исключением слоя Голицына—Гейко под Свекофенским блоком-2. Наиболее высокие невязки в слое Голицына—Гейко отвечают мантии под пограничной областью ВЕП (мантия под Свеконорвежским мегаблоком и под Центрально-Кольским и Мурманским блоками).

4. Основные границы делимости мантии под Фенноскандией (рис. 7) согласованы как

по горизонтальным, так и по вертикальным сечениям. Они определяются общими скоростными мантийными характеристиками: делимостью мантии по скоростным характеристикам горизонтальных сечений, особенностями распределения скоростей (присутствие субгоризонтальных высокоскоростных наклонных слоев, распространяющихся из слоя сейсмической литосферы в слой Голицына—Гейко).

5. Высокоскоростные наклонные слои (см. рис. 5) выделяют мантийную область под Кольско-Карельским мегаблоком как область распространения влияния мантии под Северной Атлантикой на восток.

6. Распространение субгоризонтальных высокоскоростных наклонных слоев из слоя сейсмической литосферы в слой Голицына—Гейко (см. рис. 6) приводит к уменьшению глубины залегания слоя сейсмической литосферы над областью распространения высокоскоростного слоя в слое Голицына—Гейко и увеличению (выравниванию) ее в стороны («сводообразование») (см. табл. 5, 6).

7. Совместное рассмотрение мантийных высокоскоростных наклонных слоев и субгоризонтальных наклонных слоев показывает соответствие части из них зоне Полканова (см. рис. 5, 6).

Проведенный анализ мантии под Фенноскандией создает предпосылки для детального рассмотрения зон сочленения и делимости мантии как под Фенноскандией, так и под ВЕП в целом.

Список литературы

- Гейко В. С., Цветкова Т. А., Санникова Н. П., Ливанова Л. П., Гейко К. В. 3-D P-скоростная модель мантии северо-западной Евразии — I, Европа. 1 // Геофиз. журн. — 1998. — 20, № 3. — С. 67—91.
- Хаин В. Е. Региональная геотектоника. Внеальпийская Европа и западная Азия. — Москва: Недра, 1977. — 359 с.
- Хаин В. Е. Тектоника континентов и океанов. — Москва: Науч. мир, 2001. — 604 с.
- Цветкова Т. А., Шумлянская Л. П., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная P-скоростная модель мантии под Фенноскандией. Ч. I // Геофиз. журн. — 2009. — 31, № 1. — С. 53—72.
- Чекунов А. В., Старостенко В. И., Красовский С. С., Кутас Р. И., Оровецкий Ю. П., Пашкевич И. К., Трипольский А. А., Елисеева С. В., Куприенко П. Я., Митрофанов Ф. П., Шаров Н. В., Загородний В. Г., Глазнев В. Н., Гарецкий Р. Г., Каратаев Г. И., Аксаментова Н. В., Гутерх А., Грабовская Т., Кобланьски А., Рыка В., Даглез Р., Цвойдзински С., Корхонен Х., Луосто У., Гаал Г., Журавлев В. А., Сагов А. С. Геотрансект Евро-3 // Геофиз. журн. — 1993. — 15, № 2. — С. 3—31.
- Шаров Н. В. Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1993. — 141 с.
- Юдахин Ф. Н., Щукин Ю. К., Макаров В. И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. — Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 2003. — 300 с.
- Artemieva I. M. Global 1°×1° thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implication for

- lithosphere secular evolution // *Tectonophysics*. — 2006. — **416**. — P. 245—277.
- Bogdanova S. V., Pashkevich I. K., Gorbachev R., Orlyuk M. I.* Riphean rifting and major Palaeoproterozoic crustal boundary in the basement of the East European Craton: geology and geophysics // *Tectonophysics*. — 1996. — **269**. — P. 1—21.
- Geyko V. S.* A general theory of the seismic travel-time tomography // *Геофиз. журн.* — 2004. — **26**, № 2. — С. 3—32.
- Meissner R., Weber I., Sadowiak P.* Reflectivity patterns in the Variscan mountain belts and adjacent areas: an attempt for a pattern recognition and correlation to tectonic units // *Tectonophysics*. — 1990. — **173**. — P. 361—378.