

УДК 549.903.55

Л.Р. Цыдыпова<sup>1</sup>, А.Г. Гоев<sup>2</sup>, В.Б. Пийп<sup>3</sup>

## СЕЙСМИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПО ПРОФИЛЮ FENNOLORA (БАЛТИЙСКИЙ ЩИТ) НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНО-НЕОДНОРОДНОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ

Рассмотрены материалы глубинного сейсмического зондирования по профилю FENNOLORA длиной 2100 км. Интерпретация проведена методом однородных функций с учетом кривизны Земли. Получен сейсмический разрез глубиной до 200 км. На разрезе под литосферой в мантии без каких-либо предварительных моделей получено изображение мощной литосферной пластины, погружающейся в северном направлении. Проведено сравнение полученных данных с результатами других авторов.

*Ключевые слова:* профиль FENNOLORA, глубинный разрез, метод однородных функций, учет кривизны Земли.

Materials along the super long profile “FENNOLORA” are considered. The interpretation along this profile is carried out by the method of homogeneous functions. 2100 km of seismic data are worked out. The seismic cross-section is obtained to a depth of 200 km. The image of a powerful plate, immersed to north is received in the section under the lithosphere in mantle without what or preliminary models. An analysis of this data with the results, obtained by other authors, is shown.

*Key words:* profile FENNOLORA, depth section, method of homogeneous functions, the account of curvature of the Earth.

**Введение.** Изучение глубинного строения Балтийского щита имеет важное значение для понимания и исследования проблем эволюции земной континентальной коры, особенно ее европейской части. Поверхность этой структуры испытывает непрерывное поднятие, а данные геолого-геофизических исследований свидетельствуют о ее существенной внутренней неоднородности, разномасштабной гетерогенности как по площади, так и по глубине залегания, причем не только в земной коре, но и в мантии.

Цель нашей работы заключалась в интерпретации сейсмических данных по профилю FENNOLORA и построении разреза с использованием метода однородных функций с учетом кривизны Земли.

В качестве исходных материалов для получения сейсмических разрезов использованы наблюдаемые годографы по этому профилю на всем протяжении от Баренцева до Белого моря по материалам [Guggisberg, Berthelsen, 1987]. Нами построен сейсмический разрез общей протяженностью 2100 км и глубиной до 200 км и выполнено его сравнение с результатами интерпретации указанных авторов по тому же профилю.

**Геологическое строение региона.** Балтийский щит, занимающий территорию Карелии и Кольского п-ова, Финляндию и большую часть Скандинавского п-ова, представляет собой самый обширный на Восточно-Европейской платформе выступ кристаллического фундамента, в подавляющей части сложенный архей-

скими и раннепротерозойскими метаморфическими и интрузивными образованиями. Лишь на небольших его участках присутствуют верхнепротерозойские и палеозойские породы. Геология Балтийского щита освещена во многих исследованиях [Милановский, 1996; Шаров, 1993].

В тектоническом отношении Балтийский щит разделяется на три области — Кольско-Карельскую, Свекофеннскую и Свеконорвежскую.

Профиль FENNOLORA проходит по Балтийскому щиту (рис. 1) почти целиком в Свекофеннской области (пикеты G–B), и только северным окончанием пересекает каледониды Скандинавской складчатой области (в районе пикетов H и I).

В Свекофеннской протогеосинклинальной области к нижнему протерозою относится распространенный на большей части ее площади мощный (более 8 км) комплекс геосинклинальных метаморфизованных вулканогенно-осадочных образований — граувакк, глинистых сланцев, вулканитов и туфов кислого состава, а выше по разрезу и среднего и основного состава. Во внешней восточной зоне этой области, частично попадающей в пределы России в Северном Приладожье, геосинклинальное происхождение имеет лишь ладожская флишеподобная филлитовая серия с возрастом 1,9–2 млрд лет. Накопление геосинклинального комплекса в Свекофеннской области завершилось 1,9 млрд л.н. главными пароксизмом склад-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, аспирант; *e-mail:* laraMGU@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт физики Земли РАН, аспирант; *e-mail:* a-goev@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, вед. науч. с., профессор; *e-mail:* piip@list.ru

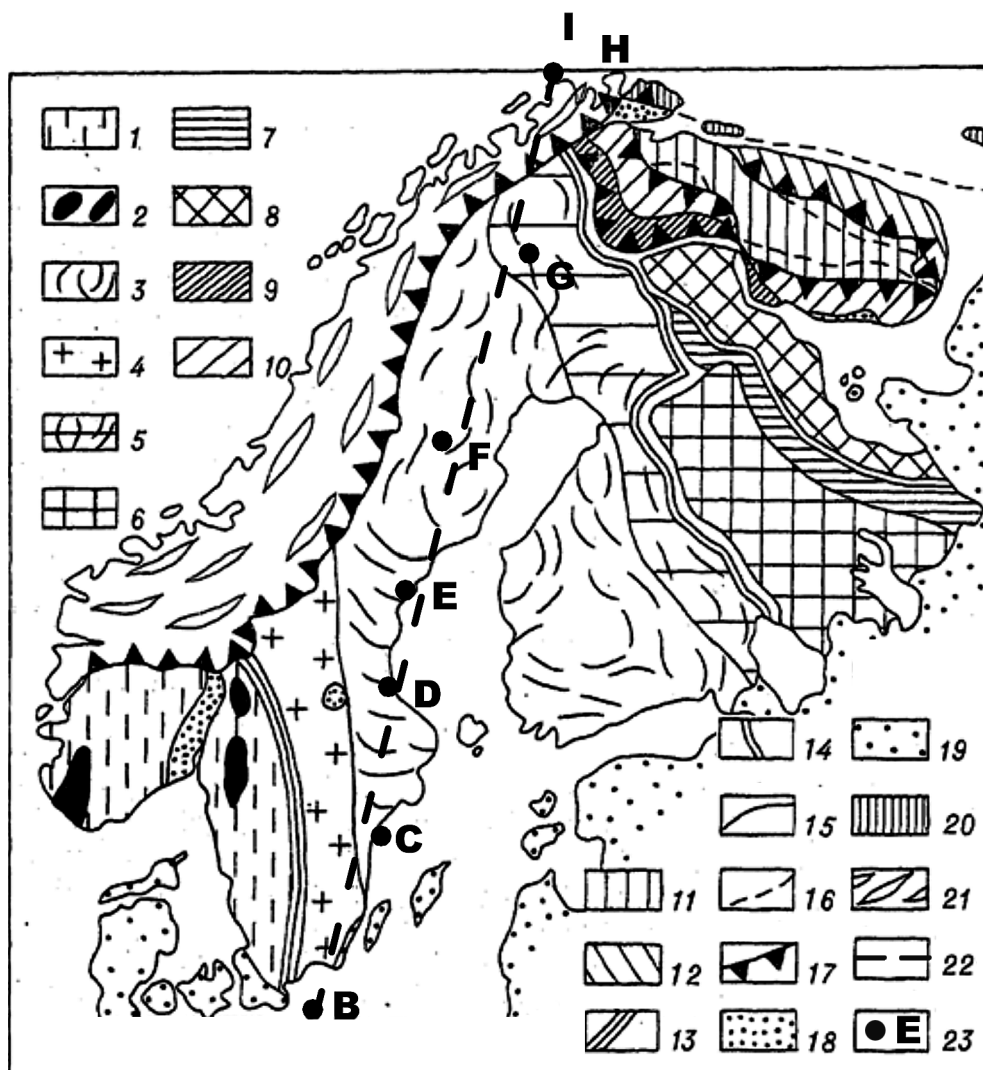


Рис. 1. Положение профиля FENNOLORA на тектонической карте Балтийского щита [Милановский, 1996]: 1 — Свеконорвежская область; 2 — районы распространения в ней дальсандского комплекса; 3–5 — Свекофеннская область: 3 — ее внутренняя часть, 4 — Готская зона (вулканоплутонический пояс), 5 — Ладожско-Восточно-Финская краевая зона; 6–12 — Кольско-Карельская область; 6–7 — Карельская мегазона: 6 — Карельский массив, 7 — Куола-Выгозерская (Восточно-Карельская) зона; 8 — Беломорская мегазона; 9–12 — Кольская мегазона: 9 — Лапландский и Колвицкий гранулитовый массивы, 10 — Южно-Кольская (Терско-Лоттинская) зона, 11 — Центральнo-Кольская зона с тремя подзонами, 12 — Северо-Кольская зона (Мурманский блок); 13 — границы областей; 14 — границы мегазон; 15 — границы зон; 16 — границы подзон; 17 — крупнейшие надвиги и тектонические покровы; 18 — платформенный чехол на Балтийском щите — верхнепротерозойский на востоке и палеозойский на западе; 19 — платформенный чехол на Русской плите; 20 — байкалиды и салаириды Тимано-Варангерской авлакогеосинклинальной зоны; 21 — каледониды Скандинавской складчатой области; 22 — линия профиля FENNOLORA; 23 — пункты взрыва

чатых деформаций и максимальным прогревом ее коры, что привело к метаморфизации, ремобилизации архейского гнейсового основания и его диапировому «всплыванию» в виде многочисленных синорогенных гранитных куполов и позднеорогенных гранитоидных плутонов с возрастом 1,9–1,8 млрд лет. Конец раннего протерозоя — период кратонизации (1,8–1,6 млрд лет) — отмечен в южной части Свекофеннской области становлением ряда крупных посторогенных гранитных массивов типа рапакиви, а в ее западной части — формированием субмеридионального Готского вулканоплутонического пояса, образованного

главным образом наземными кислыми вулканитами субиотнига (1,75–1,6 млрд лет) и комагматичными им гранитоидами.

Судя по данным бурения и геофизических исследований, Свекофеннская протогеосинклинальная область, по-видимому, почти не распространялась в пределы Русской плиты, замыкаясь на юге вблизи юго-восточного берега Балтийского моря [Милановский, 1996].

Метод однородных функций при решении обратной кинематической задачи сейсморазведки и программа ГОДОГРАФ. При построении разреза использована компьютерная программа ГОДОГРАФ для обработки и интерпретации годографов преломленных волн [Пийп, 1991]. Эта программа основана на методе однородных функций, где решение обратной задачи представлено в рамках непрерывной аппроксимации среды.

Начальные модели среды при построении разрезов не используются.

Процесс интерпретации полностью автоматизирован. В качестве исходных данных используются материалы (оцифрованные годографы первых вступлений), полученные по данным метода преломленных волн, не требуется отождествления преломленных волн от различных границ преломления на годографах из разных источников, это происходит автоматически.

Для вертикально-неоднородной среды все годографы на поверхности среды идентичны; для решения обратной задачи — восстановления зависимости скорости от глубины — достаточно задать годограф из одного любого источника. Для восстановления произвольной скоростной функции двух координат необходима полная система годографов на поверхности среды [Piiр, 2001].

Программа позволяет получать скоростные разрезы, горизонтальные глубинные карты-срезы, криволинейные поверхности (например, рельеф

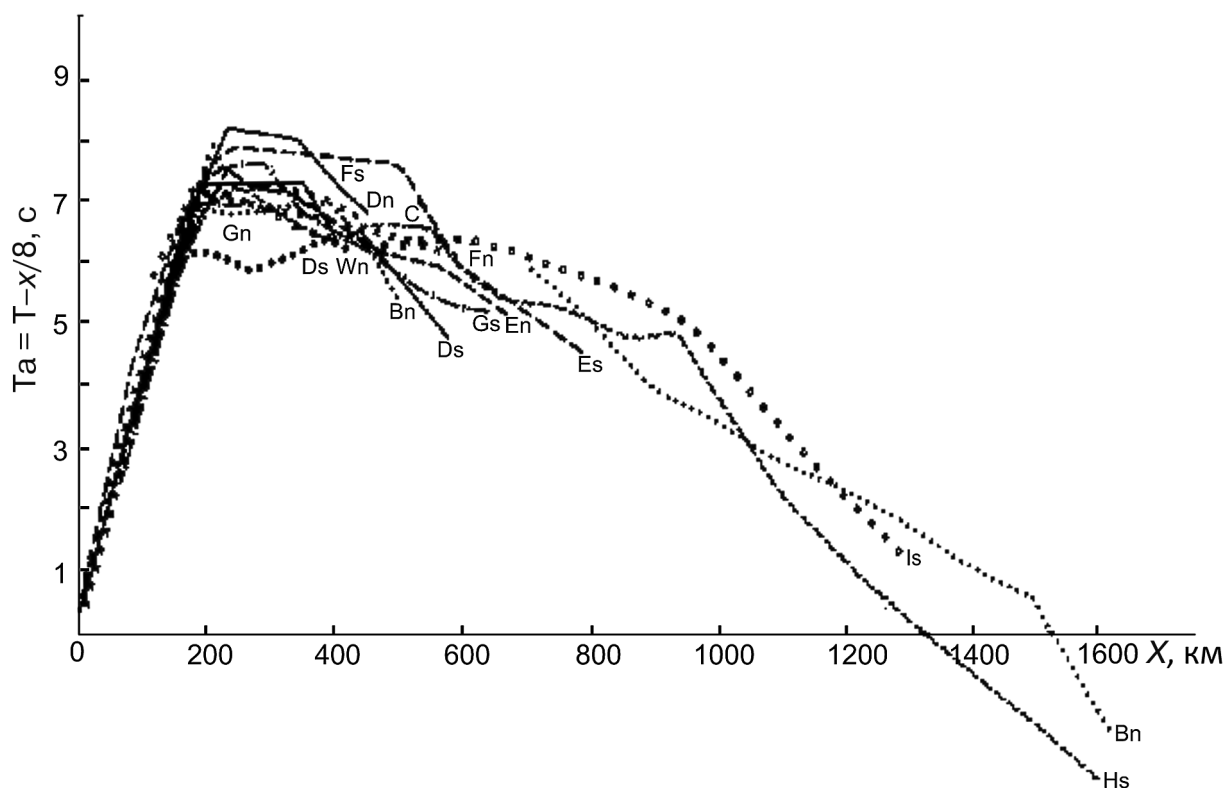


Рис. 2. Сводные редуцированные годографы первых вступлений, по [Шаров, 1993]. Буквенные обозначения — пункты взрыва; n, s — направление годографа (север, юг)

границ раздела), разрезы распределения физических параметров.

**Построение сейсмических разрезов с учетом кривизны Земли.** При интерпретации длинных годографов для построения сверхглубоких разрезов необходимо учитывать кривизну Земли. Однако большинство методов созданы и используются только для «плоской» Земли, в числе прочих к ним относится и метод однородных функций. В работе [Пийп, 2009] опубликованы формулы преобразований годографов, заданных на линии полуокружности (в случае произвольного изменения скорости внутри полукруга) в годографы для случая полуплоскости. Начало координат исключается из рассмотрения.

После введенных преобразований поля времен соответствуют декартовым координатам, т.е. плоской земле, когда источники колебаний расположены на поверхности. Отметим, что при этих преобразованиях горизонтальное расстояние заменяется угловым удалением. Характеристики уравнения поля времен — сейсмические лучи, которые тоже преобразуются к случаю плоского полупространства. Следовательно, годографы, зарегистрированные на сверхдлинных расстояниях от источника, после введенных преобразований можно интерпретировать любым методом, который справедлив для случая плоской двумерно-неоднородной среды, а затем результат преобразовать обратно к двумерно-неоднородной модели, заданной на полуокружности [Пийп, 2009].

В работах [Гервер, Маркушевич, 1968; Muller, 1971] подробно и полно описаны преобразования от модели сферической Земли к плоской модели и обратно в предположении, что Земля является сферически симметричной, т.е. скорость зависит только от радиуса. В работе [Пийп, 2009] показано, что эти преобразования справедливы для двумерно-неоднородной круглой Земли.

**Методика проведения полевых работ.** На профиле FENNOLORA, проходящем через Балтийский щит, расположено 9 пунктов взрыва — от северной части Польши до мыса Нордкап (рис. 1). Сейсмические данные регистрировались трехкомпонентными сейсмографами, размещенными через каждые 3,5 км вблизи источника, и через каждые 10 км на удалениях, больших чем 400 км от источника. Встречные годографы на больших офсетах регистрировались между точками взрыва I и H (1935 км) в северной части профиля и в точке взрыва В (1750 км) в южной части (рис. 2). Исследования глубинного строения коры и верхней мантии вдоль профиля FENNOLORA ранее выполнены несколькими авторами [Шаров, 1993; Abramovitz et al., 2002; Guggisberg, Berthelsen, 1987]. Перед нами стояла задача построить разрез путем обработки и интерпретации годографов по профилю FENNOLORA методом однородных функций с учетом кривизны Земли [Пийп, 2009].

Для дополнения системы наблюдений выполнена интерполяция годографов (рис. 3). Для этого

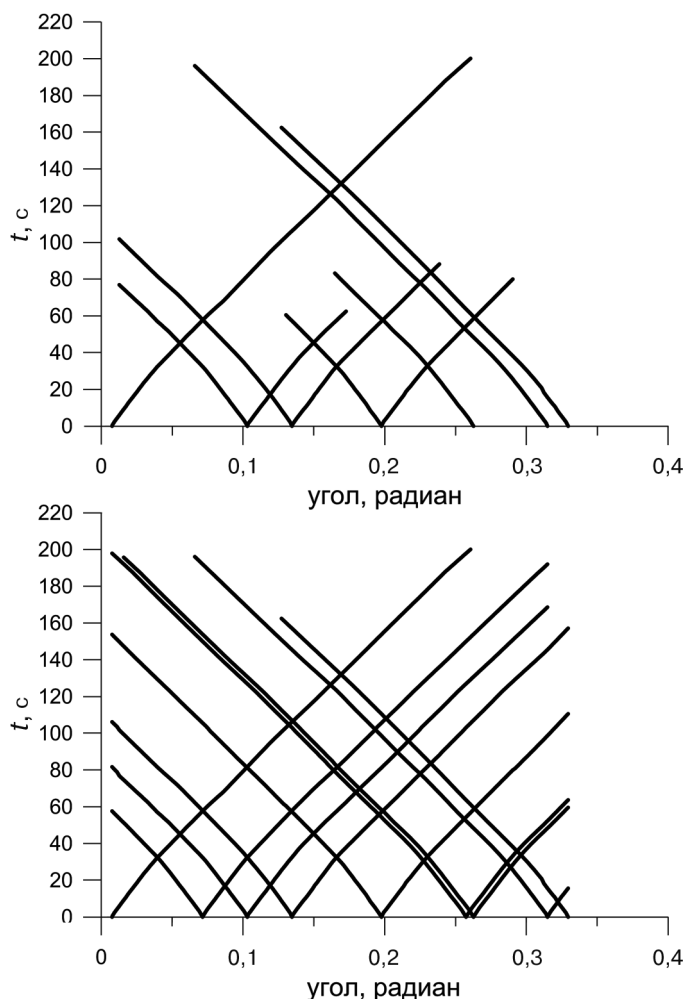


Рис. 3. Система наблюдаемых (вверху) и интерполированных (внизу) годографов по профилю FENNOLORA: радиан =  $X/R$ , где  $X$  — расстояние по профилю,  $R$  — радиус Земли

использовано представление системы годографов в виде разреза равных офсетов [Пийп, 2001]. В отношении точек взрывов годографы интерполированы равномерно. Все имевшиеся годографы использованы при расчете разреза.

Для достижения максимальной точности и в связи с существенной протяженностью профиля разрез построен с учетом кривизны Земли. В автоматическом режиме построен разрез земной коры и верхней мантии глубиной до 200 км.

**Сопоставление результатов интерпретации с сейсмогеологическим разрезом, приведенным в [Guggisberg, Berthelsen, 1987].** Разрез этих авторов (рис. 4) отличается большой глубиной (до 270 км) и достаточно большой детальностью, построен методом моделирования [Abramovitz et al., 2002], поэтому имеет ряд существенных недостатков, главный из которых — необходимость уточнения заданных предварительно скоростных моделей интерпретатором, а также большого количества априорной информации для создания таких моделей. Кроме того, метод моделирования — это метод перебора моделей с помощью многократного решения прямой задачи. Конечная

детальность полученного разреза не может быть установлена однозначно, так как результат зависит от начальной модели.

На разрезе, приведенном на рис. 4, выделяется земная кора, мощность которой изменяется вдоль профиля от 35 до 55 км. На границе кора — верхняя мантия можно выделить переходный, относительно высокоскоростной слой мощностью 5–10 км. Характерная особенность верхней мантии Балтийского щита (глубина 60–250 км), по результатам этой интерпретации, — ее линзовидно-слоистое строение. Это проявляется в чередовании тонких прослоев с разной сейсмической скоростью. Выделяется область, предположительно связанная с астеносферой. Ее кровля прослеживается как зона понижения скорости с 8,8 до 8,5 км/с в интервале глубины 220–230 км и зона со скоростью 8,55–8,4 км/с на глубине 110–120 км.

Разрез, полученный нами, представлен на рис. 5. Земная кора на всем протяжении профиля имеет трехслойную структуру с четкими границами раздела. Мощность земной коры варьирует от 40 до 50 км. Верхняя кора прослеживается почти на поверхности, характеризуется относительно малой мощностью и скоростью от 6 до 6,4 км/с. Кровля средней коры со скоростью около 6,4 км/с и кровля нижней коры, где скорость составляет около 6,8 км/с, также видны на разрезе. Земная кора отделена от верхней мантии четкой границей 2-го рода, на которой резко снижается градиент скорости (величина градиента — кратная расстоянию между изолиниями), скорость вблизи границы Мохо 8 км/с. Ниже прослеживается неоднородная литосфера с переменной мощностью от 60 км на юге до 10 км на севере и скоростью от 8 до 8,4 км/с, градиент скорости относительно повышен. В центральной части разреза на пикетах 600–800 км и на глубине около 100 км из литосферы отделяется наклонный слой (слэб) примерно с такими же параметрами, как и литосфера (скорость 8,3–8,6 км/с, относительно повышенный градиент) и мощностью от 25 до 45 км. Этот слэб погружается в северном направлении. Вмещающая слэб мантия — слабоградиентная со скоростью 8,3 км/с, т.е. это астеносфера. Скорость в астеносфере немного возрастает до 8,6 км/с на глубине 200 км.

**Заключение.** Обработка и интерпретация сейсмических исследований методом ГСЗ на Балтийском щите по профилю FENNOLORA позволили выявить важные и вместе с тем простые черты глубинного строения района. Интерпретация выполнена с использованием компьютерного пакета программ ГОДОГРАФ, основанного на методе однородных функций с учетом кривизны Земли. Результаты свидетельствуют о высокой эффективности метода, особенно в условиях недостаточности данных.

Сейсмический профиль находится в пределах крупных геологических структур, известных ранее. Главные новые геологические результаты касаются глубинных частей коры и верхней мантии, где все

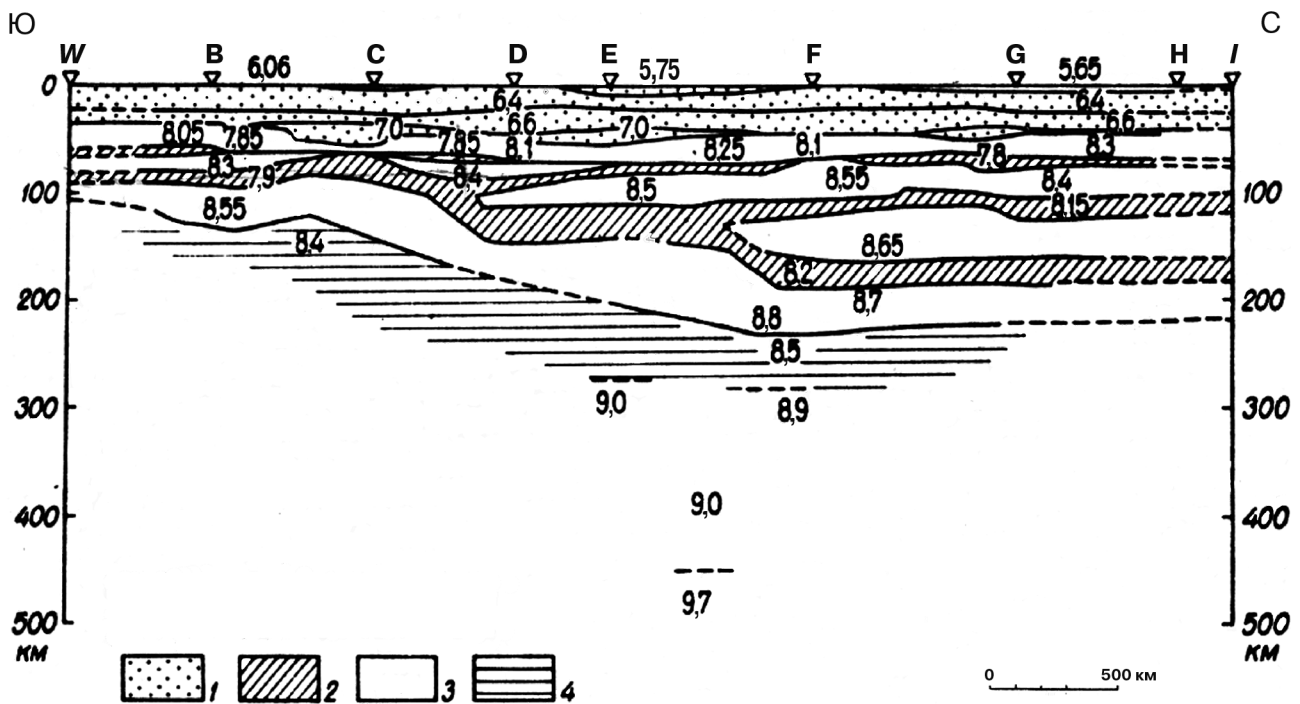


Рис. 4. Разрез литосферы и верхней мантии по профилю FENNOLORA, по [Guggisberg, Berthelsen, 1987]: 1 — земная кора; 2 — зоны пониженной скорости в литосфере; 3 — зоны повышенной скорости в литосфере; 4 — астеносфера

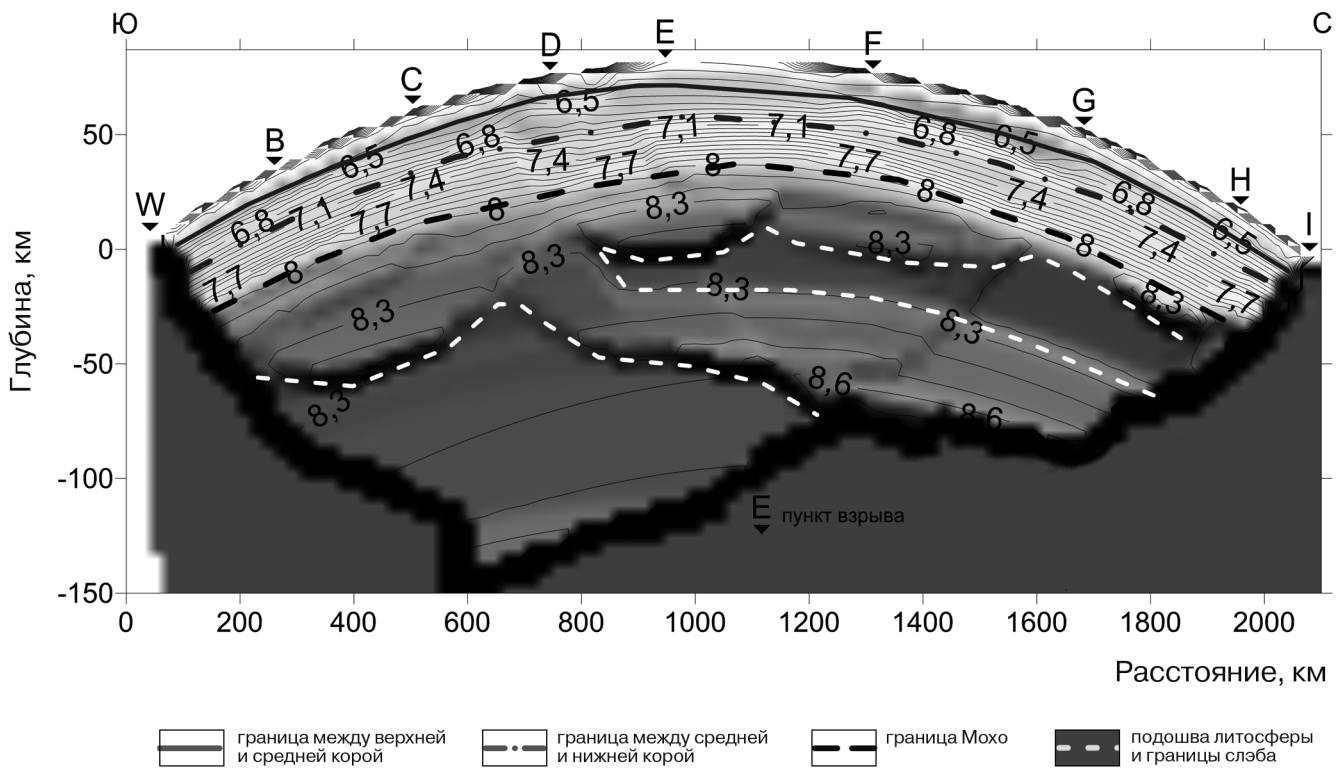


Рис. 5. Разрез земной коры и верхней мантии по профилю FENNOLORA

другие методы дают или низкую детальность, или недостаточную достоверность. В результате нам удалось обобщить и проанализировать строение земной коры и верхней мантии.

Исходя из результатов обработки данных по исследуемому профилю, можно сделать вывод, что в верхней мантии установлено существование высокоскоростного и относительно высокогради-

ентного слэба, который имеет небольшой наклон к северу.

Полученные данные проще и яснее по сравнению с результатами интерпретации других авторов, кроме того, получены методом решения обратной задачи исключительно по результатам наблюдаемых сейсмических годографов, без использования каких-либо априорных сведений о разрезе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Гервер М.Л., Маркушевич В.М.* Свойства годографа от поверхностного источника / Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии // Вычислительная сейсмология. Вып. 4. М.: Наука, 1968.

*Милановский Е.Е.* Геология России и ближнего зарубежья. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 448 с.

*Пийп В.Б.* Локальная реконструкция сейсмического разреза по данным преломленных волн на основе однородных функций // Физика Земли. 1991. № 10. С. 24–32.

*Пийп В.Б.* Строение верхней мантии Сибири по сейсмическим данным на сверхдлинных профилях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 5. С. 26–35.

*Шаров Н.В.* Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1993. 145 с.

*Abramovitz T., Thybo H., Perchuc E.* Tomographic inversion of seismic *P*- and *S*-wave velocities from the Baltic Shield based on FENNOLORA data // Tectonophysics. 2002. Vol. 358. P. 151–174.

*Guggisberg B., Berthelsen K.* A two-dimensional velocity model for the lithosphere beneath the Baltic Shield and its possible tectonic significance // Terra Cognita. 1987. N 7. P. 631–638.

*Muller G.* Approximate treatment of elastic body waves in media with spherical symmetry // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1971. Vol. 23, N 4. P. 435–449.

*Piip V.B.* 2D inversion of refraction traveltimes using homogeneous functions // Geophys. prosp. 2001. N 49. P. 461–482.

Поступила в редакцию  
02.12.2011