

**HETEROGENEOUS LITHOSPHERIC STRUCTURE OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD: SEISMIC DATA**N.V. Sharov , A.A. Lebedev 

Institute of Geology of the Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, 11 Pushkinskaya St, Petrozavodsk 185910, Russia

ABSTRACT. A generalization has been obtained based on the data for deep seismic studies on longitudinal DSS profiles (explosion seismology) and seismological evidence found for local and distant earthquakes (earthquake seismology) in the Fennoscandian Shield over the past 40 years. This provided an opportunity to obtain quantitative data on the horizontal and vertical heterogeneities of the lithosphere. 3D seismological models were first constructed for the individual parts of the Fennoscandian Shield which show that the crystalline crust structure acquires a block hierarchy pattern, with no persistent seismic boundaries found within the entire shield. The upper crust is characterized by the local occurrence of both waveguides and high-velocity zones correlated with geological bodies. The structural plans of the velocity isolines of various deep sections were found to be inconsistent. It has been proved that major geotectonic provinces have a thick crust and that the Early Proterozoic volcanogenic belts are characterized by elevated velocities and a large crustal thickness. In the upper mantle of the Fennoscandian Shield there were identified the layers with anomalously high velocities. No robust evidence was found for a waveguide, which is sometimes related to the concept of the lithosphere.

KEYWORDS: Fennoscandian Shield; Earth's crust; upper mantle; seismic model; M-discontinuity; superdeep drilling; Precambrian shield

FUNDING: The study was carried out as part of a state assignment of IG KarRC, RAS, under Project AAAA-A18-118020290086-1, and partly funded by the RFBR under Research Project 19-05-00481 "Lithospheric structure and dynamics of the White Sea Region".

RESEARCH ARTICLE

Received: May 13, 2021

Revised: June 16, 2021

Accepted: July 12, 2021

Correspondence: Nikolay V. Sharov, sharov@krc.karelia.ru

FOR CITATION: Sharov N.V., Lebedev A.A., 2022. Heterogeneous lithospheric structure of the Fennoscandian Shield: seismic data. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (1), 0569. doi:10.5800/GT-2022-13-1-0569

НЕОДНОРОДНОЕ СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Н.В. Шаров, А.А. Лебедев

Институт геологии КарНЦ РАН, 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия

АННОТАЦИЯ. По совокупности данных глубинных сейсмических исследований на длинных профилях ГСЗ (сейсмология взрывов), с привлечением материалов сейсмологии местных и удаленных землетрясений (сейсмология землетрясений), накопленных на территории Фенноскандинавского щита за последние сорок лет, сделаны обобщающие построения. Они позволили получить количественные сведения о горизонтальных и вертикальных неоднородностях литосферы. Впервые построены объемные сейсмологические модели для отдельных частей Фенноскандинавского щита, которые показывают, что структура кристаллической коры приобретает блочно-иерархическое фрактальное строение, внутри нее не обнаружено выдержанных сейсмических границ в пределах всего щита. В верхней части коры локально развиты как волноводы, так и высокоскоростные зоны, коррелирующиеся с геологическими телами. Отмечено несоответствие структурных планов изолиний скорости разных глубинных срезов. Доказано, что основные геотектонические провинции отличаются мощностью коры, а вулканогенные раннепротерозойские пояса характеризуются повышенной скоростью и мощностью земной коры. В верхней мантии Фенноскандинавского щита выделены слои с аномально высокой скоростью. Не обнаружен мощный волновод, с которым иногда связывают понятие литосферы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Фенноскандинавский щит; земная кора; верхняя мантия; сейсмическая модель; граница Мохоровичича; сверхглубокое бурение; докембрийский щит

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания ИГ КарНЦ РАН по теме НИР АААА-А18-118020290086-1, частично профинансирована РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00481 «Строение и динамика литосферы Беломорья».

1. ВВЕДЕНИЕ

Геолого-геофизические исследования, развивающиеся на Фенноскандинавском щите (ФЩ) в последние годы, наряду с решением практических задач, углубились в разработку фундаментальных проблем тектоники и геодинамики раннего докембрия, петрологии и эволюции корообразующих процессов, глубинной геологии и физики тектоносферы. В 2002 г. в Финляндии издан комплект цифровых карт: Геологическая карта дочетвертичных образований (рис. 1), Карта аномального магнитного поля (ΔT)_a [Korhonen et al., 2002b] и Карта поля силы тяжести ($\sigma=2.67$ г/см³) Фенноскандинавского щита в масштабе 1:2000000 [Korhonen et al., 2002a].

ФЩ является наиболее крупным и стабильным на протяжении позднедокембрийско-фанерозойской истории выступом древнего кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы. С запада и юго-запада он ограничен системой разломов, представляющих собой крайнее северо-западное ответвление известной «линии Торнквинста-Тейссейра», в пределах южной, юго-восточной, восточной окраины поверхности полого погружается под рифейские и более молодые отложения Русской плиты. Северная граница щита по системе разломов Карпинского проходит вдоль Мурманского побережья.

Главные характерные черты внутренней структуры щита обусловлены закономерной геотектонической зональностью, выраженной в омоложении коры

с востока на запад, и представлены тремя провинциями: восточной – Лапландско-Кольско-Карельской, центральной – Свекофеннской, западной, или Дальсландской. Различия между провинциями обусловлены, однако, не только временем становления коры, но и сложным сочетанием первичных и наложенных преобразующих процессов. Изучение этих соотношений показало, что структуру щита в целом можно рассматривать как раннепротерозойскую, а решающую роль в ее формировании отдать свекофеннской орогении с возрастом главных эндогенных событий 1.8–1.7 млрд лет [Windley, 1992; Khain, 1993; Shcheglov et al., 1993].

Дальсландская провинция является и, вероятно, являлась окраиной ФЩ во время его выделения. В структуре провинции большую роль играют разломы и надвижки, зоны милонитов. Слагают ее гранитоиды, сланцы, гнейсы, обычно высокометаморфизованные. Первоначально они могли представлять собой породы, обдуцированные на край щита в результате коллизионных процессов, или аналоги пород, слагающих смежные структуры Свекофеннской провинции, позднее переработанные Свекофенно-Гренвиллской и Каледонской орогенией с участием деструктивных и коллизионных процессов [Gaal, Gorbatschev, 1987; Rundqvist, Mitrofanov, 1988; Glebovitsky, 1993].

Свекофеннская провинция занимает центральное положение в структуре щита. Предполагается ее моноциклическое происхождение, связанное с развитием

окраинного морского бассейна, заканчивающегося Svecofennской орогенцией (1.95–1.70 млрд лет назад). Последняя явилась завершающей и для всего раннепротерозойского (свекокарельского) мегацикла, что и определило ее значение для структуры щита в целом.

Особый наложенный характер присущ системе разломов Ладожско-Ботнической зоны и их продолжению в зоне Шелефтео. Однако контролируемые ими магматические образования и высокотемпературная метаморфическая зональность свекофеннского времени обязывают отнести их к разломам раннего, доорогенного, заложения, вероятно, обновленным в позднем протерозое или фанерозое.

Восточная, или Лапландско-Кольско-Карельская, провинция представляет наибольший интерес, так как обладает наиболее длительной и разнообразной геологической историей. Здесь различается три крупных

раннедокембрийских структурно-стратиграфических комплексов. Наиболее древний – саамский – представлен первично-коровыми сиалическими образованиями: тоналитами, серыми гнейсами. Первичное строение комплекса неизвестно. Возраст в основании стерт последующими процессами, и можно лишь предположить, что он достигает 3.5 млрд лет. На этом протофундаменте после глубокой денудации и деструктивных процессов в интервале 3.1–2.7 млрд лет был сформирован позднеархейский лопийский комплекс амфиболитов, гнейсов, кристаллических сланцев. Он образует линейные структуры, которые сопоставляются с зеленокаменными поясами других регионов мира. На Кольском полуострове, наряду с линейными, известны более обширные изометрические структуры. Общая позднеархейская структура, сформированная на Кольском полуострове, с учетом глубины эрозионного

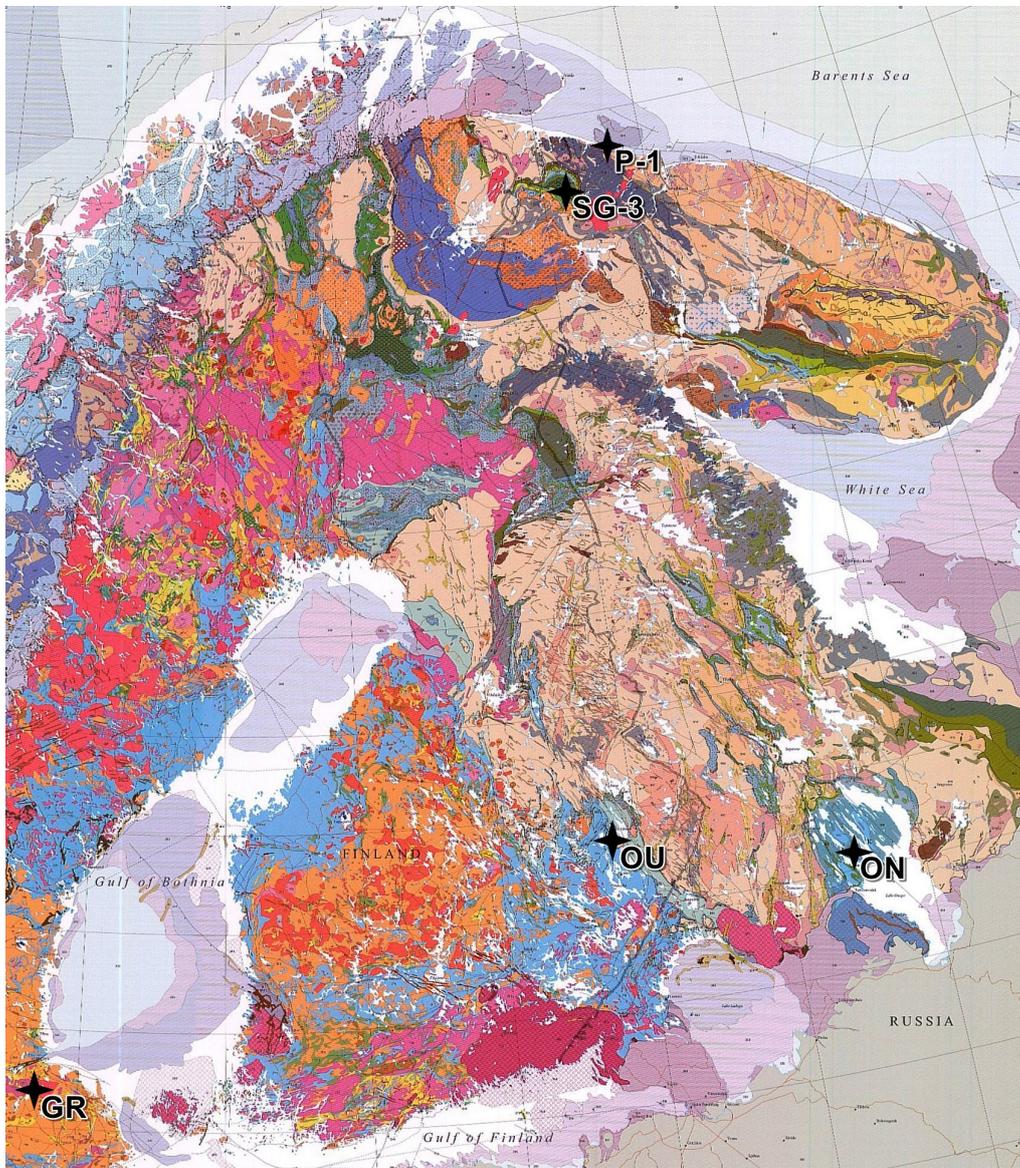


Рис. 1. Фрагмент геологической карты Фенноскандинавского щита [Koistinen et al., 2001] и местоположение глубоких скважин.
Fig. 1. A fragment of a geological map of the Fennoscandian Shield [Koistinen et al., 2001] and the location of deep boreholes.

среза может рассматриваться как глыбово-складчатая с отдельными линейными элементами.

Позднеархейские орогенные процессы проявились на всей территории восточной части ФШ около 2.8–2.7 млрд лет назад. В это время здесь был создан основной объем континентальной коры, и поэтому эту часть ФШ можно рассматривать как область позднелопийской кратонизации.

ФШ удобен для изучения внутренней структуры кристаллической коры, так как здесь отсутствует искажающее влияние осадочного чехла, что создает хорошие возможности для непосредственного исследования и сопоставления глубинных геологических и геофизических данных.

Сводка данных по изменению скорости с глубиной в литосфере по многим районам мира дана в работах [Tripolsky, Sharov, 2004; Sharov, 2017]. Авторами предпринята попытка сформулировать некоторые результаты этих исследований относительно общих закономерностей в структуре земной коры и верхней мантии, что позволяет выявить новые детали глубинного строения литосферы региона.

2. СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Известно, что разрешающая способность сейсмического метода на порядок и более превышает разрешающую способность всех остальных геофизических методов. При работе по системе пересекающихся сейсмических профилей проводится картирование глубинных горизонтов, составляются трехмерные модели геологических структур, трассируются глубинные разломы. К настоящему времени на территории ФШ выполнен значительный объем детальных работ и региональных сейсмических исследований. Оработано более 50 глубинных сейсмических профилей (рис. 2) [EUGENO-S Working Group, 1988; Luosto et al., 1989; Guggisberg et al., 1991; Windley, 1992; Babel Working Group, 1993; Grad, Luosto, 1993; Schueller et al., 1997; Sharov, 2017; Tiira et al., 2020].

Сложнодислоцированная земная кора ФШ описывается мозаично-неоднородной моделью. Ее эквивалентность определяется масштабными параметрами и составляет величину от первых сотен метров в сейсмоземле до нескольких километров при глубинных сейсмических исследованиях (ГСЗ). В верхней части

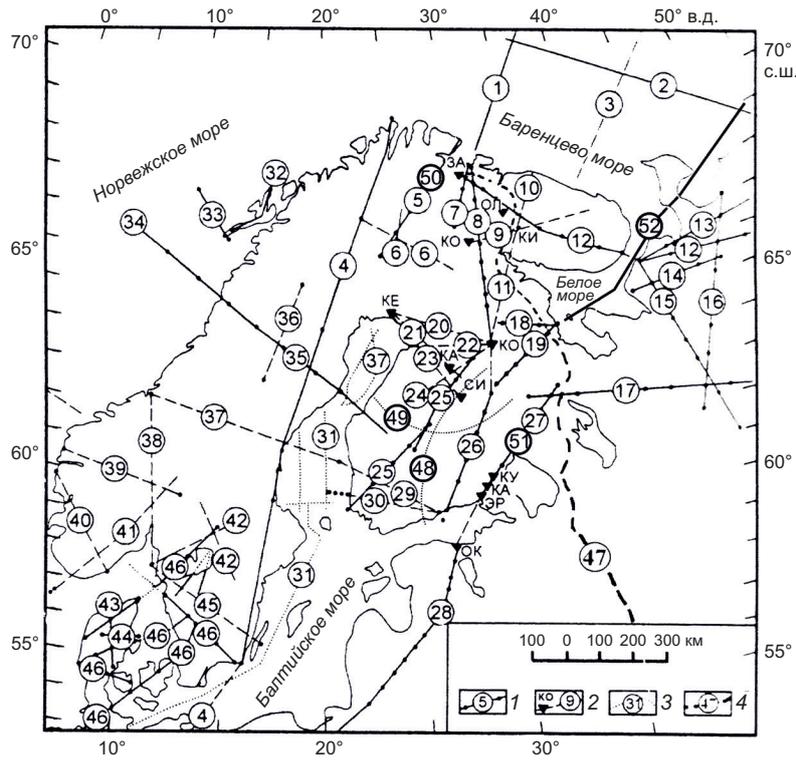


Рис. 2. Схема расположения глубинных сейсмических профилей на территории Северной Европы.

1 – профили с системой годографов преломленных и отраженных на поверхности М волн; 2 – профили с системой годографов только отраженных волн; 3 – морские профили с пневмоисточниками, сухопутные – с вибраторами; 4 – профили ОГТ – ГСЗ. Цифрами обозначено название профилей, основные из них: 4 – Феннолора (EU-1), 5 – Поляр, 8 – Печенга – Ковдор – Костомукша, 12 – Печенга – Умбозеро – Ручьи (Кварц), 17 – Рубин, 25 – Свеко, 26 – Балтик, 31 – BABEL, 46 – EUGENO, 47 – Геотраверс 1-ЕВ, 52 – 3-АР Арктический.

Fig. 2. A scheme showing the distribution of deep seismic profiles in Northern Europe.

1 – profiles with a system of curves of refracted waves and waves reflected on M-discontinuity; 2 – profiles with a system of curves for only reflected waves; 3 – sea profiles with pneumosources, land profiles with vibrators; 4 – CDP-DSS profiles. Numbers indicate the names of profiles, the major of those are: 4 – Fennolora (EU-1), 5 – Polar, 8 – Pechenga – Kovdor – Kostomuksha, 12 – Pechenga – Umbozero – Ruchyi (Quartz), 17 – Rubin, 25 – Svenco, 26 – Baltic, 31 – BABEL, 46 – EUGENO, 47 – Geotraverse 1-EB, 52 – 3-AP Arctic.

коры развиты как волноводы, так и высокоскоростные зоны, увязанные с геологическими телами. Вулкано-генные раннепротерозойские пояса характеризуются повышенной скоростью и мощностью коры, а также аномально высокой граничной скоростью вдоль Поверхности Мохоровичича (ПМ). Следуя исторически сложившейся традиции, обобщенную модель региона можно представить тремя скоростными этажами, однако здесь имеются специфические особенности. Выявлены зоны развития высокоскоростного этажа (7.2–7.4 км/с) в низах консолидированной коры; установлено, что чем мощнее кора, тем меньше контраст скорости на границе М. Сделан вывод, что верхняя и средняя кора содержит 50–70 % кремнезема, а верхи мантии состоят на 45 % из кремнезема и порядка 50 % из темноцветных минералов.

Обобщены и систематизированы имеющиеся по российской и зарубежной части щита первичные сейсмические материалы, и создан банк данных, применяемый при решении обратной задачи сейсмоки различными методами для выявления скоростной неоднородности в пределах как одного профиля, так и с переходом к трехмерному изучению литосферы [Sharov, 2017]. Результаты сопоставления данных пространственной интерпретации и профильных наблюдений ГСЗ показывают, что трехмерные модели дополняют разрезы ГСЗ и латеральные изменения скорости. Отмечено несоответствие структурных планов изолиний скорости разных глубинных срезов. Объемные сейсмогеологические модели земной коры важны для понимания природы геофизических границ, разработки геодинамических и петрологических моделей и металлогенических оценок.

Сверхглубокое бурение и его влияние на сейсмические модели. Успехи в изучении глубинного строения земной коры ФЩ за последние годы связаны главным образом с бурением глубоких скважин, завершением работ по международным и российским профилям ОГТ (общей глубинной точки), ГСЗ (глубинного сейсмического зондирования) и МОВЗ (методом обменных волн землетрясений). Все это позволило наметить ряд принципиально новых направлений в интерпретации глубинного строения. На смену представлениям о толстослоистом строении земной коры приходят тонкослоистые модели, допускающие инверсионный характер сейсмических разрезов, и происходит смена идеи об индивидуальности в этом смысле каждой типовой структуры. Проанализированы результаты бурения глубоких скважин (см. рис. 1) на территории ФЩ: Кольской, Россия (SG-3), до глубины 12262 м (1970–1990 гг.); Гравберг (GR) и Штенберг, Центральная Швеция, до глубины 6337 м (1986–1987 гг.) и 6529 м (1991–1992 гг.); Оутокумпу (OU), Юго-Восточная Финляндия, до глубины 2516 м (2004–2005 гг.); Пограничная (P-1), полуостров Средний, Мурманская область, Россия, до глубины 5200 м (2004–2006 гг.); Онежской (ON), Центральная Карелия, Россия, до глубины 3537 м (2007–2008 гг.). Они выявили серьезные несоответствия между

прогнозируемыми сейсмогеологическими моделями и фактическим строением верхней части континентальной коры [Sharov, 2017, 2020].

Результаты сверхглубокого бурения показали реальность и природу зон пониженной скорости верхней части коры, а также четкое проявление на глубине разрывных разрушений в виде зон дробления пород, увеличение их пористости, водонасыщения. Они не подтвердили усиления гомогенности слоев с глубиной. Напротив, из них следует, что по крайней мере до глубины 12 км сохраняется внутреннее строение метаморфических толщ. Установлено сильное влияние на упругие и другие физические свойства, наряду с составом, вторичных изменений горных пород, обусловленных процессами метаморфизма и наличием на больших глубинах тектонизированных зон, поэтому определение даже приближенного состава кристаллических пород по значениям только одного физического параметра – скорости – не может быть однозначным. Модели оказались значительно сложнее, чем представлялись ранее. Мы привыкли иметь дело с субгоризонтальными сейсмическими границами, и весь аппарат обработки сейсмических материалов приспособлен для этой цели. Созрела необходимость перехода от рассмотрения горизонтально-слоистых упрощенных моделей к более сложным, включающим наклонные слои и вертикальные контакты.

Огромный сейсмический материал, накопившийся к настоящему времени по ФЩ, достижения в методике анализа волновых полей позволяют не только изучить очень древнюю структуру Земли, но и сопоставить данные геофизических методов и сверхглубокого бурения. Добавим к этому практическую потребность объяснения, как распределены месторождения полезных ископаемых на щите.

3. ПОВЕРХНОСТЬ МОХОРОВИЧИЧА

По данным глубинных исследований, самой выразительной сейсмической границей на ФЩ является ПМ. Однако накопленный материал показал, что ПМ в различных местах щита ведет себя по-разному. Она не является непрерывной границей даже в разрезе одного профиля ГСЗ. На одних профилях (северо-западная часть Кольского полуострова, Онежско-Ладжская площадь) в поле отраженных волн раздел М динамически выразителен, на других (северный участок профиля Поляр) отсутствуют характерные группы волн, отраженные от М. В южной части Кольского полуострова и Северной Карелии они часто регистрируются в виде 2–3 групп осей синфазности, близких по интенсивности и форме колебаний, разделенных интервалом времени 0.2–0.4 с. В этом случае в переходной зоне от коры к мантии выделяется не одна, а две-три сейсмические границы, располагающиеся друг над другом с разницей по глубине до 3–5 км. Отмеченные явления сложного перехода от коры к мантии на ФЩ делают затруднительным составление единой схемы изолиний глубин ПМ.

При построении гипсометрических карт рельефа ПМ большое значение имеет тип сейсмических волн, по которым выделяется эта граница. Естественно поэтому, что по типу волн может производиться и оценка достоверности самих построений. Для надежной идентификации ПМ в разных районах щита определяющее значение имеют преломленные волны. Они позволяют устанавливать граничную скорость вдоль интересующей нас поверхности и, в зависимости от их величин, относить ее или к коре, или к верхней мантии. Отраженные волны дают возможность довольно точно определить глубину залегания отражающей границы, так как несут информацию о средней скорости сейсмических волн в перекрывающей среде. Однако они не содержат сведений о природе подстилающего вещества, и по ним нельзя определять, относится ли данная отражающая граница к ПМ или к каким-либо иным поверхностям. Наконец, обменные волны позволяют проследивать различные границы в кинематике и динамике, в том числе ПМ, но они не дают информацию о скорости распространения сейсмических волн по углам выхода, поэтому для выделения ПМ среди множества других границ обмена необходимо опираться на данные ГСЗ с контролем скорости по углам выхода. Таким образом, лишь совокупность различных методов может дать достаточно надежные сведения об изменении глубины залегания ПМ на площади.

Совокупность всех использованных материалов (обобщение данных о средней скорости волн в земной коре, временные карты для ПМ) явилась объективной основой для определения относительных изменений глубин интересующей нас подошвы коры. Они позволили создать опорную сеть абсолютных глубин ПМ и привести к ней все остальные сейсмические данные – ГСЗ, МОВ, МОВЗ [Sharov, 2017].

На рис. 3 представлена схема рельефа ПМ для щита и его обрамления, учитывающая последние результаты сейсмических исследований. Сечение изогипс рельефа ПМ принято равным 5 км, и лишь на юго-западе сохранены дополнительные горизонталы через 2 км. Выбранное сечение в значительной мере сгладило указанные выше неопределенности схемы и облегчило взаимную увязку авторских разрезов [EUGENO-S Working Group, 1988; Luosto et al., 1989; Guggisberg et al., 1991; Babel Working Group, 1993; Grad, Luosto, 1993; Sharov, 2017; Tiira et al., 2020].

Из рис. 3 видно, что мощность земной коры изменяется в широких пределах – от 30 до 65 км. Максимальная мощность установлена под Латвией (60 км), Ладожско-Ботнической зоной (65 км), в зоне сочленения Беломорского мегаблока с Карельским (48 км), под Центральной и Южной Швецией (55 км). Минимальная толща коры зафиксирована в Норвежском море (15 км), где тектонический уступ разделяет континентальный и океанический типы коры, а также под Данией (26–35 км), юго-западной частью ФЩ (30–35 км), в Баренцевоморской шельфовой зоне и по восточному обрамлению ФЩ (35–40 км).

Приведенная схема ПМ отражает ее строение лишь в самых общих чертах. Она может быть построена гораздо сложнее, так как в отдельных сечениях поднятия и погружения имеют довольно большие амплитуды. Плотность систем наблюдений большей частью была недостаточной, эти локальные участки требуют дополнительного изучения.

В пределах ФЩ располагается Ладожско-Ботническая зона (шириной до 100 км), хорошо прослеженная геолого-геофизическими методами, с большой мощностью коры – до 60–65 км. Она представляет собой одну из наиболее важных структур щита, которая возникла в зоне причленения Свекофеннского блока к архейскому. В рамках мобилистских представлений о развитии ФЩ это сочленение рассматривается как результат субдукции свекофеннской океанической коры под континентальную архейскую Лапландско-Кольско-Карельскую провинцию. В геофизических полях Ладожско-Ботническая зона во многом подобна линии Тейсейра-Торнквиста. Эта зона контролирует размещение различных месторождений полезных ископаемых.

Следует отметить, что строение земной коры ФЩ является чрезвычайно сложным. С одной стороны, существует различие в строении блоков разного возраста, с другой – значительная контрастность разных тектонотипов проявляется и в рамках разновозрастных провинций. При выявлении полезных ископаемых необходимо обратить внимание на шовные зоны, расположенные между крупнейшими блоками и прослеживаемые на всю мощность земной коры.

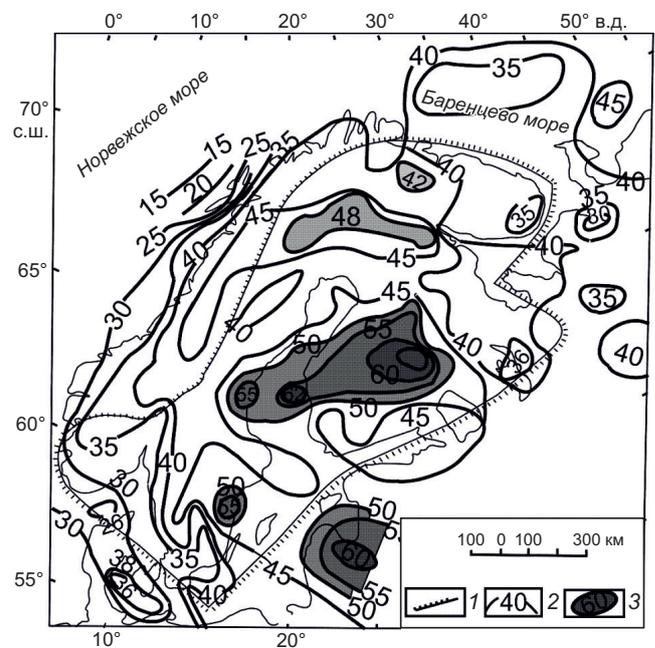


Рис. 3. Структурная схема поверхности Мохоровичича. 1 – границы щита; 2 – изогипса раздела М, км (в абс. глубинах); 3 – области с утолщенной корой.

Fig. 3. A structural scheme of M-discontinuity. 1 – shield boundaries; 2 – a contour line of M-section, km (in absolute depths); 3 – areas with a thickened crust.

4. ВЕРТИКАЛЬНОЕ И ЛАТЕРАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ УПРУГИХ ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ

4.1. Литосферные профили Феннолора и Кварц (сейсмология взрывов)

Крупнейшим экспериментом, позволившим охарактеризовать упругие свойства литосферы ФШ на всю ее мощность, явились международные исследования в Швеции на профиле Феннолора (Баренцево море – Балтийское море), с базой регистрации до 1935 км (сейсмология взрывов). Схема наблюдений представляла собой систему первых вступлений продольных волн из восьми пунктов взрыва (В...I) с встречными и нагоняющими годографами. Расстояние между основными пунктами варьировалось от 150 до 400 км (см. рис. 2). Всего сделано 28 взрывов с зарядами от 0.5 до 8.2 т [Guggisberg et al., 1991]. Сводный редуцированный годограф первых вступлений приведен на рис. 4, а [Sharov, 1993]. Расхождение во временах первых вступлений продольных волн для одинаковых удалений от пункта взрыва прослежено на расстоянии: 200–600 км (2 с), 700–900 км (1 с), 1000–1600 км (1.5 с).

Основным результатом работ на профиле Феннолора явилась двухмерная скоростная модель литосферы до глубины 230 км [Guggisberg et al., 1991; Windley, 1992; Sharov, 1993]. Модель построена путем интерпретации

временного годографа и амплитуд волн монтажей для девяти пунктов взрыва. Мощность земной коры вдоль профиля варьируется в пределах 35–55 км. Граница кора – мантия содержит переходный слой мощностью 5–10 км, характеризующийся относительно высокой скоростью. Имеет место общее правило: чем мощнее кора, тем меньше контраст скорости на границе М. В верхней мантии скорость продольных волн возрастает от 7.85 км/с на глубине 35 км до 8.30 км/с на глубине 60 км.

Нижняя литосфера состоит из пяти-семи слоев, характеризующихся повышенной и пониженной скоростью. Градиент скорости верхней мантии зависит от мощности литосферы. На юге при толщине литосферы 110 км градиент составляет 0.006 с⁻¹, а на севере при мощности 230 км снижается до 0.003 с⁻¹. Максимальная скорость продольных волн в литосфере достигает 8.8 км/с на глубине 230 км.

Наиболее примечательной особенностью представленной модели является выделение области, предположительно связанной с астеносферой, но характеризующейся слабым контрастом физических параметров. Кровля астеносферы выделяется в виде области понижения скорости с 8.8 до 8.5 км/с в интервале глубин 220–230 км на севере и с 8.55 до 8.40 км/с – на глубине

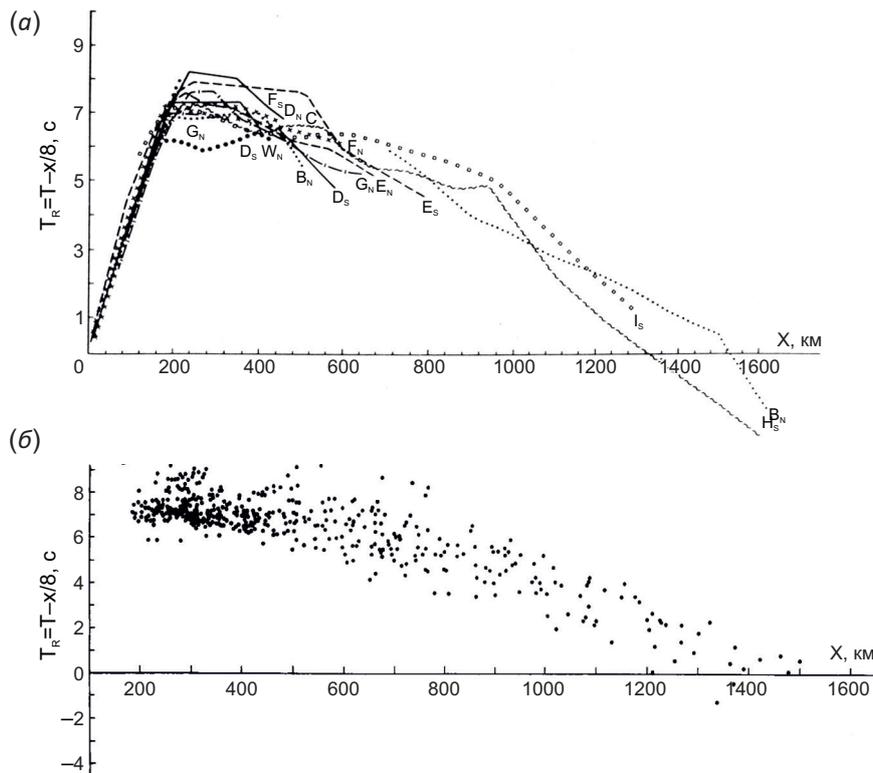


Рис. 4. Сводный редуцированный годограф первых вступлений мантийных Р-волн. (а) – вдоль профиля Феннолора, буквами обозначены пункты взрыва и направления прослеживания север (N), юг (S); (б) – по данным ГСЗ и материалам регистрации крупных химических и ядерных взрывов сейсмологическими станциями на Фенноскандинавском щите.

Fig. 4. A composite reduced curve for the first arriving mantle P-waves. (a) – along the Fennolora profile, letters indicate blasting sites and tracing directions: north (N) and south (S); (b) – based on the DSS data and large-scale chemical and nuclear explosion records from seismological stations on the Fennoscandian Shield.

110 км на юге. Нижняя граница астеносферного слоя отмечается на глубине 270 км в виде повышения скорости до 9.0 км/с. По отраженным волнам на глубине 450 км отмечена граница мантийной переходной зоны, где скорость возрастает до 9.7 км/с. Таким образом, вопрос о том, где кончается литосфера и начинается астеносфера, остается неоднозначным.

К опорным профилям восточной части ФЩ относят участки профилей (см. рис. 2) Кварц (Печенга – Умбозеро – Ручьи) и Рубин (Костомукша – Плесецк). Профиль Кварц длиной 550 км пересекает Кольский полуостров в юго-восточном направлении от Кольской сверхглубокой скважины до горловины Белого моря. На профиле осуществлялась трехкомпонентная регистрация взрывов и землетрясений 55 станциями «Черепаша», расположенными через 8–10 км. Расстояние между восемью пунктами взрыва составляло 60–90 км при максимальной длине годографа 250 км. Зарегистрированы также записи от 50 землетрясений с магнитудой 4.9–6.8 и трех ядерных взрывов.

Проведена идентификация и увязка обменных, рефрагированных и отраженных границ вдоль опорных профилей. Получена двухмерная скоростная структура мантии до глубины 700 км [Schueller et al., 1997]. Глубина ПМ уменьшается в юго-восточном направлении

от 43 до 35 км. В центральной части профиля отмечается сложное строение зоны перехода кора – мантия. Глубина залегания ПМ в пределах этого участка изменяется от 43 до 39 км. Самая верхняя мантия до глубины 100 км характеризуется сильным горизонтальным изменением скорости Р-волн от 7.7 до 8.7 км/с. Под северной частью профиля существует низкоскоростная зона ($V_p=8.0-8.2$ км/с) на глубине 100–130 км. Вдоль литосферно-астеносферной границы, которая варьируется на глубине 190–210 км под северной частью профиля и 150–160 км под южной частью, изменение скорости незначительно – от 9.0 до 8.7 км/с. Кроме известных мантийных границ на глубине 410 и 660 км выделена промежуточная на глубине около 530 км с перепадом скорости от 9.7 до 9.9 км/с.

Данные о временах пробега Р-волн, полученные на профилях Кварц и Рубин (их положение приведено на рис. 2) от удаленных землетрясений, сравнивались со стандартной моделью IASP91. Полученные в результате решения обратной задачи двухмерные скоростные томографические модели [Zolotov et al., 2000] до глубины 250 км представлены на рис. 5. Поле скоростных аномалий в верхней мантии региона изменяется относительно IASP91 вдоль этих профилей в пределах от –1.5 % для пониженной скорости до +2 % для

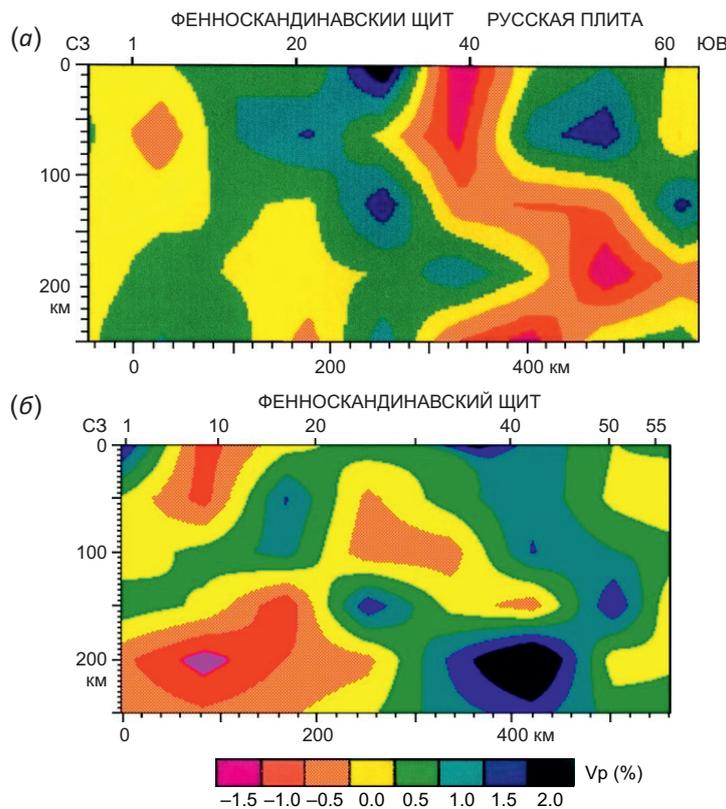


Рис. 5. Двухмерные скоростные томографические модели вдоль участков профилей [Zolotov et al., 2000].

(а) – Рубин (Костомукша – Плесецк), (б) – Кварц (Печенга – Умбозеро – Ручьи). Вариации скорости продольных волн показаны в процентах от стандартной модели IASP91.

Fig. 5. 2-D tomographic velocity models along the profile sections [Zolotov et al., 2000].

(a) – Rubine (Kostomuksha – Plesetsk), (b) – Quartz (Pechenga – Umbzero – Ruchyi). Variations in the longitudinal wave velocity are shown in percentages from standard IASP91.

повышенной, что свидетельствует о латеральном изменении скорости в мантии.

4.2. Регистрация крупных взрывов сетью сейсмологических станций

При изучении строения верхней мантии важно использовать записи стационарных сейсмологических станций. Очевидно, что записи землетрясений и взрывов такими станциями могут быть отнесены либо к точечной регистрации в случае, когда используются записи одного события разными станциями, расположенными вдоль профиля, либо к точечной прострелке при записи на одной станции различных событий вдоль профиля. Оба эти способа регистрации позволяют составить монтажи сейсмограмм и построить годографы. Но при интерпретации материалов землетрясений возникают дополнительные затруднения, связанные с незнанием точного момента возникновения землетрясений, глубины его залегания, с малой разверткой записи.

На рис. 6 приведена схема расположения литосферных сейсмических профилей на ФШ, сейсмологических станций, крупных сейсмических и ядерных взрывов (рис. 7) и проекции зарегистрированных лучей мантийных волн.

Для создания базы сейсмических данных собраны экспериментальные значения о временах прихода мантийных волн от 46 крупных взрывов на 22 сеймостанциях, неравномерно расположенных по площади, и их координаты. Регистрировались также взрывы на десяти длинных профилях ГСЗ общей протяженностью около 4000 км. Для построения годографа использованы продольные волны, зарегистрированные в первых вступлениях на спокойном фоне записи, и, следовательно, времена пробега этих волн для каждой станции определены с минимальной погрешностью. Сделано допущение, что годографы продольных волн, регистрируемых в первых вступлениях при эпицентральных расстояниях 250–1950 км, образуются рефрагированными волнами, заходящими в верхнюю мантию [Sharov, 1993].

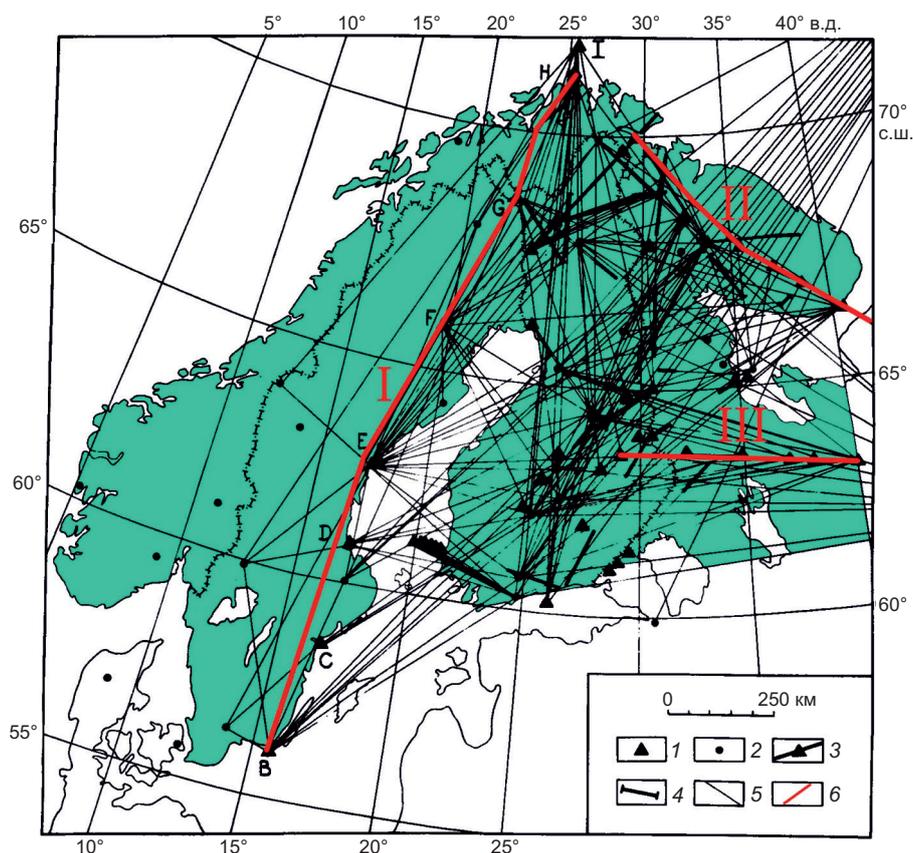


Рис. 6. Схема расположения длинных профилей ГСЗ, пунктов взрыва и сейсмологических станций на Фенноскандинавском щите.

1 – пункты взрыва; 2 – сейсмологические станции; 3 – длинные профили ГСЗ и пункты взрыва на них (буквами обозначены пункты взрыва на профиле Феннолора; 4 – участки профилей ГСЗ, на которых регистрировались мантийные волны от удаленных взрывов; 5 – проекции сейсмических лучей мантийных волн на дневную поверхность при площадных наблюдениях; 6 – профили: I – Феннолора, II – Кварц, III – Рубин.

Fig. 6. A scheme showing the location of long DSS profiles, blasting sites and seismological stations on the Fennoscandian Shield. 1 – blasting sites; 2 – seismological stations; 3 – longitudinal DSS profiles and blasting sites thereon (letters indicate LWs at Fennolora profile; 4 – DSS profile sites at which the mantle waves from distant explosions were recorded; 5 – projections of seismic beams from the mantle waves onto the day surface during areal monitoring; 6 – profiles: I – Fennolora, II – Quartz, III – Rubin.

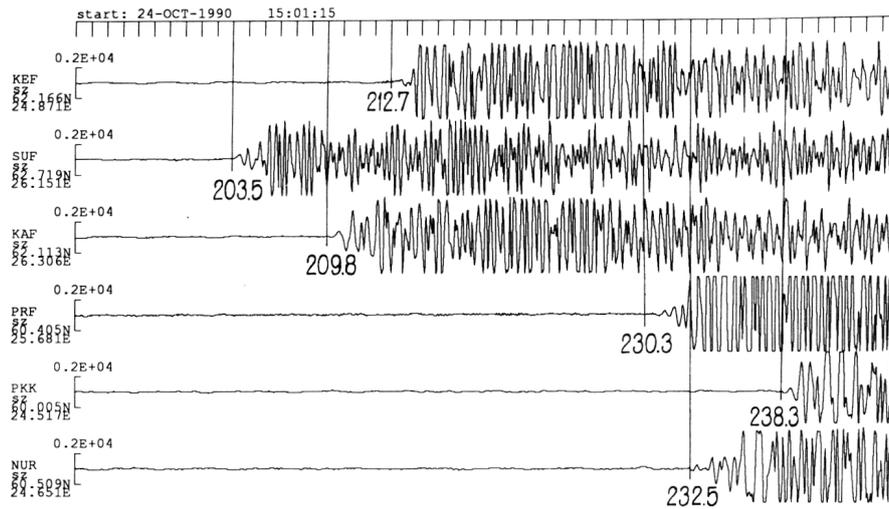


Рис. 7. Монтажи сейсмограмм ядерного взрыва на Новой Земле 24 октября 1990 г, записанные сейсмологической сетью Финляндии. Показано время первых вступлений в секундах на удалении 1632–1936 км от пункта взрыва [Sharov, 1993].

Fig. 7. An ensemble of the seismograms of a nuclear explosion on Novaya Zemlya on October 24, 1990, recorded by the Finland seismological network. The time of the first arrivals in seconds at a distance of 1632–1936 km from the explosion site [Sharov, 1993].

Обобщенный годограф первых вступлений для выбранных профилей и лучей (см. рис. 4, 6) объединяет 490 значений времен прихода первых мантийных волн и служит основой создания банка сейсмических данных для построения трехмерной сейсмической модели региона. Расхождения во временах пробега продольных волн достигают для одинаковых удалений от пункта взрыва 5 с. Эти значения примерно на порядок превышают возможную погрешность определения времен пробега и свидетельствуют о наличии в верхней мантии существенной скоростной неоднородности. Самые большие различия между временами первых волн встречаются на расстоянии 250–330 км (7.3 с), 550–560 км (4 с), 650–760 км (5 с). Сопоставление годографов из различных районов ФШ указывает на большую дифференциацию времен прихода первых вступлений.

Полученные экспериментальные данные использованы для моделирования с применением различных пакетов программ сейсмотомографии. С материалами работали Ю.А. Бармаков (ИФЗ РАН), В.С. Гейко, В.С. Гобаренко (ИГ НАН Украины), З.Р. Мишенькина (ИГиГ СО РАН), И.А. Курилович («Рудгеофизика»), К.С. Осипов (СПбГУ), Н.В. Шаров (ИГ КарНЦ РАН). В процессе вычислений и построений скоростных моделей по временам пробега продольных мантийных волн учтено искажающее влияние земной коры с учетом ее сферичности и величины мощности. В результате построено несколько вариантов авторских моделей неоднородности верхней мантии ФШ до глубины 130 км [Mitrofanov, Sharov, 1998]. Модели отражают пространственное изменение скорости распространения продольных волн от 8.1 до 8.7 км/с.

На рис. 8 представлена вторая модель, полученная на основе единых исходных данных, приведено изменение скорости продольных волн в четырех слоях на

глубине, соответственно, 40–60, 60–80, 80–100, 100–130 км [Sharov, 2000]. В верхней мантии между границей кора – мантия и глубиной 130 км скорость распространения продольных волн изменяется от 8.0 до 8.7 км/с. Имеются различные скоростные неоднородности с вертикальными размерами 10–40 км и латеральной протяженностью от 50 до 500 км. Отсутствуют низкоскоростные аномалии, где скорость продольных волн снижалась бы до 8 км/с. Наоборот, выделяются высокоскоростные (8.4–8.7 км/с) тела. Аномалии скорости с глубиной не менее выражены, чем на верхних срезах. Преемственность расположения скоростных структур в I слое нарушается в слоях II, III и IV (глубина 60–80, 80–100, 100–130 км). Диапазон изменения скорости в них выше, чем в I слое, и составляет 8.2–8.6, 8.4–8.7 и 8.5–8.7 км/с. Отмечается несоответствие структурных планов изолиний скорости для разных глубинных срезов верхней мантии. Наибольшее изменение скорости в мантии на томографических срезах наблюдается в архейской части щита на востоке Кольского полуострова.

Совокупность результатов, полученных тремя способами обработки экспериментальных данных, позволяет судить как о геометрии сейсмических границ, так и о распределении скорости сейсмических волн. Характер поведения изолиний скорости может указывать на существование анизотропии; возможно также влияние модельных погрешностей интерпретации.

Анализ и интерпретация времен пробега первых вступлений мантийных волн от крупных промышленных (ядерных), а также обычных взрывов, записанных на длинных профилях аппаратурой ГСЗ и сетью сейсмологических станций, позволили получить новые сведения о строении верхней мантии. Уточнены особенности ее строения, проявляющиеся в чередовании линзовидных прослоев, через которые сейсмические

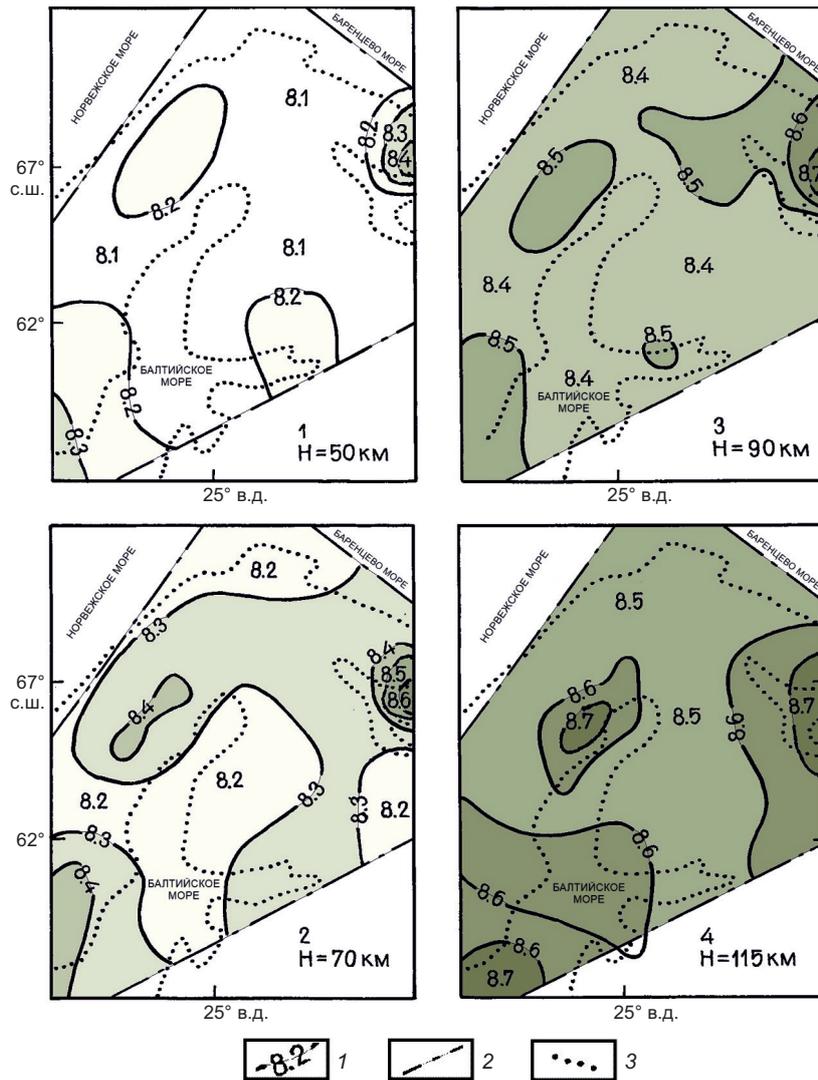


Рис. 8. Схема распределения скорости в литосфере на глубине 50, 70, 90, 115 км [Mitrofanov, Sharov, 1998]. 1 – изолинии скорости (км/с); 2 – контуры области определения скорости; 3 – контуры Скандинавии.

Fig. 8. A scheme of velocity distribution in the lithosphere at depths of 50, 70, 90 and 115 km [Mitrofanov, Sharov, 1998]. 1 – velocity isolines, km/s); 2 – contours of the area of velocity measurement; 3 – contours of Scandinavia.

волны проходят с разной скоростью. Не обнаружен мощный волновод в верхней мантии ФШ, с которым связывают традиционные понятия единой астеносферы. Линзовидная модель верхней мантии лучше соответствует характеру сложных тектонических движений, наблюдаемых на поверхности.

4.3. Проект SVEKALAPKO (сейсмология землетрясений)

С августа 1998 г. по май 1999 г. выполнялся международный сейсмический проект SVEKALAPKO Deep Seismics. Целью проекта являлось изучение взаимосвязи литосферы и астеносферы в низах ФШ, исследование связи между поверхностными и глубинными структурами [Sharov, 2004]. В проекте участвовали ученые 14 стран Европы. С российской стороны привлекались сейсмологи из городов Апатиты, Москва, Санкт-Петербург, Петрозаводск. На территории Финляндии

и Республики Карелия проведены синхронные трехкомпонентные сейсмологические наблюдения на сети из 143 цифровых трехкомпонентных сейсмостанций, установленных на площади 500×700 км (рис. 9), расстояние между станциями – 50 км. Данная сейсмологическая антенна впервые позволила по единообразным материалам изучить глубинное строение земной коры и верхней мантии до глубины 400 км, используя рефрагированные и отраженные волны от землетрясений и взрывов. За время регистрации антенной зафиксировано 1356 сейсмических событий, из них 701 телесеизмическое землетрясение, 75 местных землетрясений и 580 взрывов в карьерах и рудниках [Sharov, 2004].

Проектом предусмотрен трудоемкий этап сбора, систематизации, обработки сейсмических данных, численного моделирования и интерпретации результатов. Для этого создана международная рабочая группа

в составе: У. Ахауер, А. Алинади, Я. Анзорге, Г. Бок, М. Брунетон, М. Град, П. Хейккинен, С.-Е. Хьелд, Т. Хювонен, Э. Кислинг, К. Комминахо, А. Корья, Е. Козловская, Н.И. Павленкова, Х. Педерсон, Я. Пломерова, Р. Робертс, Э.В. Исанина, С. Сандовал, И.А. Санина, О.Ю. Ризниченко, Н.В. Шаров, Ю. Юлиниemi. В конце 2002 г. рабочей группой сформирована единая база полученных сейсмических данных, доступ к которой имеют только участники полевых работ по проекту.

Из базы данных отобрано 88 телесеизмических событий и выделено 5765 первых вступлений фаз продольных волн [Sandoval, 2002]. Для получения детального томографического изображения верхней мантии необходимо было исключить искажающее влияние разной мощности земной коры под каждой станцией. Для антенны установлен диапазон от +0.3 с до -0.4 с изменения времен пробега коровых продольных волн относительно стандартной модели IASP91. Исправленные за влияние земной коры телесеизмические времена пробега использованы при построении трехмерной томографической структуры верхней мантии под щитом до глубины 400 км (рис. 10).

Скоростные вариации показаны относительно стандартной модели IASP91: синие – высокоскоростные области, красные – низкоскоростные, белые полосы означают промежуточные значения. Истинные средние

скорости в слоях в данной томографической модели остаются неизвестными, так как при ее построении использован относительно IASP91 остаточный наблюдаемый годограф. На левой части рис. 10 показаны горизонтальные срезы мантии под щитом от 70 до 400 км глубины, а на правой – два вертикальных разреза под разными азимутами. Результаты усреднены после тринадцати итераций.

Томографическая модель юго-восточной части ФШ характеризуется вариациями скорости продольных волн 4 % в литосфере до глубины 100 км относительно IASP91 и 2 % – на глубине 150–400 км (рис. 10). В центральной части исследуемого района прослеживается положительная скоростная аномалия до глубины 400 км. Низкоскоростная аномалия (А) на разрезе ЮЗ-СВ до глубины 100 км, вероятно, связана с протерозойской Ладожско-Ботнической шовной зоной. Второй важной особенностью строения верхней мантии является установленная на разрезе СВ-ЮВ вертикальная граница до глубины 400 км, которая отделяет высокоскоростную западную зону (В) от низкоскоростной аномалии (С) на востоке в Ладожском районе. На скоростных срезах до глубины 150 км существуют другие скоростные аномалии, которые не увязаны с тектоническим строением региона. Не обнаружен по скорости продольных волн мощный волновод в верхней мантии

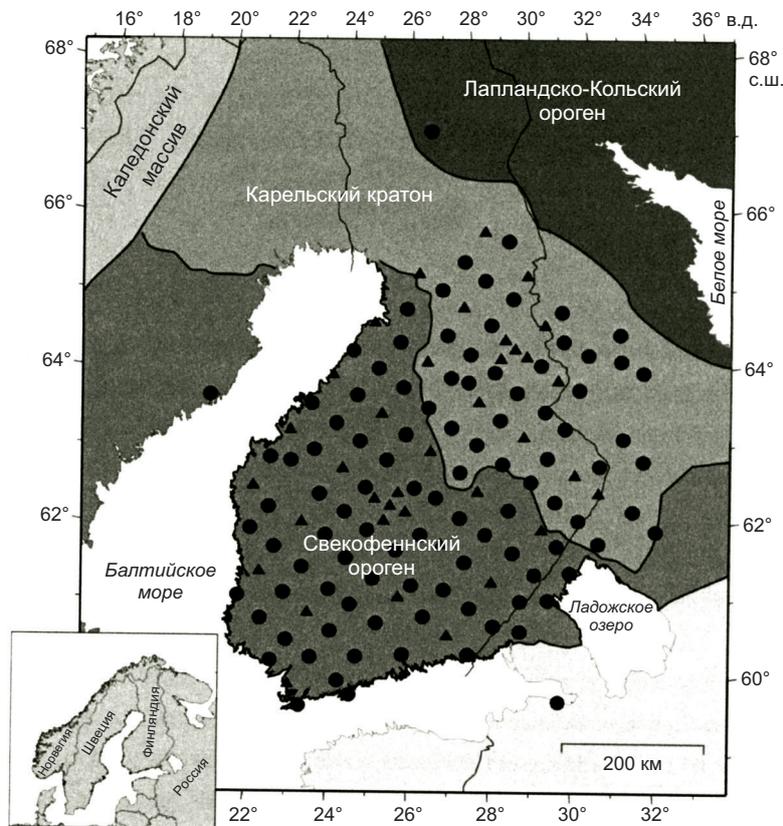


Рис. 9. Тектоническая схема центральной части Фенноскандинавского щита и сейсмологическая антенна Свекалапко. Кружками показано местоположение короткопериодных, а треугольниками – широкополосных сейсмостанций.

Fig. 9. A tectonic scheme of the central Fennoscandian Shield and the Svekalapko seismological antenna. Circles indicate the location of short-period seismic stations and triangles indicate wide-band stations.

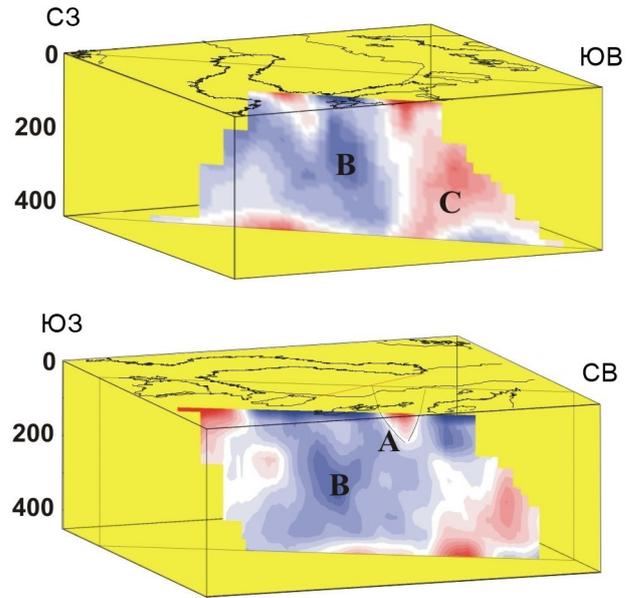
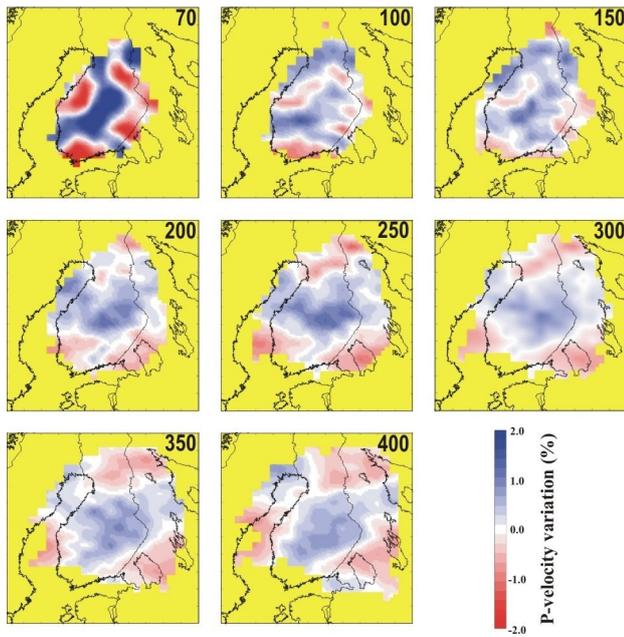


Рис. 10. Трехмерная скоростная модель глубинного строения верхней мантии по Р-волнам под юго-восточной частью Фенно-скандинавского щита, полученная с использованием метода телесеismic томографии [Sandoval, 2002]. Левая часть – горизонтальные срезы от 70 до 400 км глубины, правая – два разреза под разными азимутами.

Fig. 10. 3D velocity model of P-waves in the deep structure of the upper mantle beneath the southeastern Fennoscandian Shield constructed using the teleseismic tomography method [Sandoval, 2002]. Left part – horizontal cross-sections at a depth of 70 to 400 km, right part – two cross-sections at different azimuths.

юго-восточной части ФЩ, с которым связывают традиционное понятие единой астеносферы [Sharov, 1993; Zhamaletdinov, Petrishchev, 2015].

4.4. Трехмерная скоростная модель мантии

Общее представление о 3D скоростной модели мантии по Р-волнам под ФЩ, полученной согласно методу Тейлорового приближения, приведено в работе [Geyko, 2004]. В методе Тейлорового приближения решения задачи сейсмической томографии (обратной многомерной задачи кинематической сейсмоки) привлечены сейсмологические данные, представленные в бюллетенях ISC начиная с 1964 г. Независимо от метода решения, функция $V(x,y,z)$ положительная, достаточное число раз дифференцируемая, определенная в области $X_0 \leq x \leq X_k, Y_0 \leq y \leq Y_k, 0 \leq z \leq h$. Как правило, она может быть представлена в виде горизонтальных сечений функции по z с шагом h , а также широтных и долготных сечений с шагом 1° , которые представляют невязками скорости относительно некоторой референтной модели V_{ref} скорости: $\delta(x,y,z) = V(x,y,z) - V_{ref}(z)$.

Следует отметить, что в методе невязки не носят характер поправки к заданной референтной модели. По скоростным характеристикам мантия под щитом относится к мантии по стабильному типу [Pushcharovsky D., Pushcharovsky Yu., 2010, 2016]. Следовательно, относительно принятой референтной модели верхняя мантия (гр.М-410 км) характеризуется повышенной скоростью, зона Голицына-Гейко (ЗГГ – скоростная характеристика переходной зоны верхней мантии)

(410–650 км) – пониженной скоростью, зона раздела-1 (650–850 км) – повышенной скоростью, средняя мантия (850–1700 км) – пониженной скоростью. Граница между верхней мантией, ЗГГ, зоной раздела-1 и средней мантией определяется нулевой изолинией невязок скорости (δ).

Скоростное строение мантии ФЩ до глубины 1100 км представлено в работах [Tsvetkova et al., 2009, 2010, 2015]. Верхняя мантия характеризуется высокой скоростью, переходная зона верхней мантии – низкой скоростью, зона раздела-1 переходной зоны верхней мантии и средней мантии – высокой скоростью. Выходы пониженной скорости из нижней, средней мантии в верхнюю, возможно вплоть до коры включительно с последующим их «растеканием», будем называть доменами (ФД).

По скоростным характеристикам мантия в областях соответствующих доменов обладает повышенной расслоенностью. Характерна трехслойность ЗГГ, двух- или трехслойность верхней мантии. Мантийным колонкам в областях растекания присуща общая приподнятость границ начиная с кровли зоны раздела-1, а также повышенная расслоенность.

5. СОПОСТАВЛЕНИЕ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ДОКЕМБРИЙСКИХ ЩИТОВ

Скоростные модели литосферы ФЩ сравнивались с аналогичными моделями, полученными в пределах всех крупных платформ: Северо-Американской (Канадский щит), Сибирской, Африканской и Австралийской

[Vinnik et al., 1996; Zielhuis, Hilst, 1996; Bank et al., 1998; Simons et al., 1999; Pearson, 1999; Egorkin, 2001; Shustova, Rabinovich, 2003]. Общие колебания положения поверхности М на щитах варьируются в диапазоне от 30 до 65 км. Исключение составляет Индийский щит с относительно постоянной мощностью коры около 40 км и ее увеличением от центра и периферии. Многие утолщения коры связаны с вулканогенными протерозойскими поясами за счет увеличения мощности нижнего высокоскоростного этажа. На Канадском щите в нижней коре скорость меньше, чем на Фенноскандинавском и Украинском щитах.

Скоростные модели крупных платформ мало различаются между собой: всюду на глубинах 50–200 км выделяются слои с пониженными скоростями (7.9–8.0 км/с), среди них трудно выделить доминирующий, что затрудняет традиционное деление на литосферную и астеносферную части. Это согласуется с данными определения мощности литосферы на основании измерений теплового потока, которые показали, что мощность литосферы для большей части Земли не превышает 100 км, за исключением докембрийских щитов и платформ, где она повышается до 200–300 км. Все рассмотренные модели показывают резкое возрастание скорости на глубине 400 и 700 км. Расслоенность нижней части верхней мантии существенно меньше, чем верхней.

Полученные результаты указывают на глубинное заложение приповерхностных структур и свидетельствуют о влиянии происходящих в верхней мантии процессов на развитие земной коры. Однако связь между структурами земной коры и особенностями строения верхней мантии носит сложный характер. Выяснение закономерностей таких связей позволит понять причины и механизм тектонических процессов, происходящих в литосфере.

Новые сейсмические данные о глубинном строении докембрийских щитов подтвердили правомерность реконструкций глубинного строения, в которых основной объем литосферы представляется сформированным в архее, а структурно-формационным комплексам протерозоя отводится подчиненная роль. Структура крупных блоков земной коры докембрийского возраста в основном сохранилась до настоящего времени, подвергшись модификации лишь в ограниченных по размерам зонах тектономагматической активизации.

Объемные сейсмогеологические модели земной коры, полученные в работе, важны для понимания природы геофизических границ, разработки геодинамических и петрологических моделей и металлогенических оценок. Составленная карта мощности земной коры ФЩ и его обрамления представляет интерес для структурно-тектонических построений, изучения региональной сейсмичности и сейсмического районирования.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейсмические материалы по литосфере ФЩ дают основания сделать следующие выводы о ее структуре.

1. Характерной особенностью литосферы является ее слоисто-линзовидное строение. Это проявляется в чередовании тонких прослоев с разными сейсмическими скоростями, в закономерном изменении физических параметров с глубиной. Число инверсионных каналов зависит от мощности литосферы. Значение скорости в волноводах около 8.0 км/с, их мощность изменяется от 10 до 50 км.

2. Впервые построена трехмерная скоростная (Р-волны) от взрывов модель верхней мантии ФЩ. Выделены слои с аномально высокой скоростью, неоднородные по латерали. Скорость продольных волн возрастает с 8.1 км/с от границы Мохоровичича до 8.5 км/с на глубине 200 км и до 8.8 км/с на глубине 230 км.

3. Существует отчетливая зависимость мощности литосферы от возраста коры. В архейской части щита отмечена наиболее мощная и наиболее дифференцированная нижняя литосфера.

4. Многослойная структура верхней мантии затрудняет ее деление на традиционную литосферу, астеносферу и подастеносферный слой. Скоростной контраст между литосферой и астеносферой под щитом выражен значительно слабее, чем под Центрально-Европейским рифом и океанической литосферой.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны О.А. Есипко, Э.В. Исаниной, Н.Г. Заможней, А.А. Трипольскому за проведение совместных сейсмических исследований. Мы признательны рецензентам за полезные замечания, которые позволили улучшить статью.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

9. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Babel Working Group, 1993. Deep Seismic Reflection/Refraction Interpretation of Crustal Structure along Babel Profiles A and B in the Southern Baltic Sea. *Geophysical Journal International* 112 (3), 325–343. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb01173.x>.

Bank O.J., Bostock M.G., Ellis R.M., 1998. Lithospheric Mantle Structure beneath the Trans-Hudson Orogen and the Origin of Diamondiferous Kimberlites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 103 (B5), 10103–10114. <https://doi.org/10.1029/97JB03746>.

Egorkin A.V., 2001. The Structure of the Upper Mantle under the Daldyn-Altai Kimberlite Field According to Seismograms of Nuclear Explosions. *Geology of Ore Deposits* 43 (1), 24–37 (in Russian) [Егоркин А.В. Структура верхней мантии под Далдыно-Алтайским кимберлитовым полем по сейсмограммам ядерных взрывов // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 1. С. 24–37].

EUGENO-S Working Group, 1988. Crustal Structure and Tectonic Evolution of Transition between the Baltic Shield and the North German Caledonides (the EUGENO-S Project). *Tectonophysics* 150 (3), 253–348. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90073-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90073-X).

Gaal G., Gorbachev R., 1987. An Outline of the Precambrian Evolution of the Baltic Shield. *Precambrian Research* 35, 15–52. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(87\)90044-1](https://doi.org/10.1016/0301-9268(87)90044-1).

Geyko V.S., 2004. A General Theory of the Seismic Travel-Time Tomography. *Geophysical Journal* 26 (2), 3–32 (in Russian) [Гейко В. С. Общая теория сейсмической томографии времен пробега // Геофизический журнал. 2004. Т. 26. № 2. С. 3–32].

Glebovitsky V.A., 1993. Tectonics and Regional Metamorphism of the Early Proterozoic in the Eastern Part of the Shield. *Regional Geology and Metallogeny* 1, 7–24 (in Russian) [Глебовицкий В.А. Тектоника и региональный метаморфизм раннего протерозоя в восточной части щита // Региональная геология и металлогения. 1993. № 1. С. 7–24].

Grad M., Luosto U., 1993. Seismic Models of the Crust of the Baltic Shield along the SVEKA Profile in Finland. *Acta Geophysica Polonica* 41, 177–195.

Guggisberg B., Kaminski W., Prodehl C., 1991. Crustal Structure of the Fennoscandian Shield: A Traveltime Interpretation of the Long-Range FENNOLORA Seismic Refraction Profile. *Tectonophysics* 195 (2–4), 105–137. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90208-A](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90208-A).

Khain V.E., 1993. Evolution of Geological Settings in the History of the Earth. In: N.P. Laverov (Ed.), *Evolution of Geological Processes in the History of the Earth. Proceedings of the April 23–24, 1991 Moscow Conference*. Nauka, Moscow, p. 29–37 (in Russian) [Хаин В.Е. Эволюция геологических обстановок в истории Земли // Эволюция геологических процессов в истории Земли: Труды совещания, проведенного в Москве 23–24 апреля 1991 года / Ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 1993. С. 29–38].

Koistinen T., Stephens M.B., Bogatchev V., Nordgulen O., Wennerström M., Korhonen J., 2001. Geological Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2000000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia.

Korhonen J.V., Aaro S., All T., Elo S., Haller L.Ä., Kääriäinen J., Kulinich A., Skilbrei J.R., Solheim D., Säavuori H., Vaher R., Zhdanova L., Koistinen T., 2002a. Bouguer Anomaly Map of the Fennoscandian Shield 1:2000000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and Ministry of Natural Resources of Russian Federation.

Korhonen J.V., Aaro S., All T., Nevanlinna H., Skilbrei J.R., Säavuori H., Vaher R., Zhdanova L., Koistinen T., 2002b.

Magnetic Anomaly Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2000000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and Ministry of Natural Resources of Russian Federation.

Luosto U., Flueh E.R., Lund C.-E., Working Group, 1989. The Crustal Structure along the POLAR Profile from Seismic Refraction Investigations. *Tectonophysics* 162 (1–2), 51–85. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90356-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90356-9).

Mitrofanov F.P., Sharov N.V. (Eds), 1998. *Seismological Model of the Lithosphere of Northern Europe: Barents Region*. Vol. 1. Publishing House of KSC RAS, Apatity, 237 p. (in Russian) [Сейсмологическая модель литосферы Северной Европы: Баренцевский регион / Ред. Ф.П. Митрофанов, Н.В. Шаров. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. Ч. 1. 237 с.].

Pearson D.G. 1999. The Age of Continental Roots. *Lithos* 48 (1–4), 171–194. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00026-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00026-2).

Pushcharovsky D.Yu., Pushcharovsky Yu.M., 2010. *Geology of the Earth's Mantle*. GEOS, Moscow, 140 p. (in Russian) [Пушаровский Д.Ю., Пушаровский Ю.М. Геология мантии Земли. М.: ГЕОС, 2010. 140 с.].

Pushcharovsky D.Yu., Pushcharovsky Yu.M., 2016. New Insight into the Composition and the Structure of the Terrestrial Planet's Deep Seated Zones. *Moscow University Geology Bulletin* 1, 3–9 (in Russian) [Пушаровский Д.Ю., Пушаровский Ю.М. Новый взгляд на состав и строение глубинных оболочек планет земной группы // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2016. № 1. С. 3–9]. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-1-3-9>.

Rundqvist D.V., Mitrofanov F.P., 1988. *Precambrian Geology of the USSR*. Nauka, Leningrad, 440 p. (in Russian) [Рундквист Д.В., Митрофанов Ф.П. Докембрийская геология СССР. Л.: Наука, 1988. 440 с.].

Sandoval Castaño S., 2002. *The Lithosphere-Asthenosphere System beneath Fennoscandia (Baltic Shield) by Body-Wave Tomography*. PhD Thesis (Doctor of Natural Sciences). Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 191 p. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004422214>.

Schueller W., Morozov I.B., Smithson S.B., 1997. Crustal and Uppermost Mantle Velocity Structure of Northern Eurasia along Profile Quartz. *Bulletin of the Seismological Society of America* 87 (32), 414–426. DOI:10.1785/BSSA0870020414.

Sharov N.V., 1993. *Lithosphere of the Baltic Shield from Seismic Data*. KSC RAS Publishing House, Apatity, 145 p. (in Russian) [Шаров Н.В. Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным. Апатиты: КНЦ РАН, 1993. 145 с.].

Sharov N.V., 2000. Evolution of Views Concerning Models of Crystalline Crust Structure in the Baltic Shield. *Regional Geology and Metallogeny* 10, 32–43 (in Russian) [Шаров Н.В. Эволюция взглядов на модели строения кристаллической коры Балтийского щита // Региональная геология и металлогения. 2000. № 10. С. 32–43].

Sharov N.V. (Ed.), 2004. *Deep Structure and Seismicity of the Karelian Region and Its Margins*. KarRC RAS, Petrozavodsk, 353 p. (in Russian) [Глубинное строение и сейсмичность

Карельского региона и его обрамление / Ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 353 с.].

Sharov N.V., 2017. Lithosphere of Northern Europe: Seismic Data. KarRC RAS, Petrozavodsk, 173 p. (in Russian) [Шаров Н.В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 173 с.].

Sharov N.V., 2020. Superdeep Drilling and Its Impact on the Seismic Models of the Fennoscandian Shield. In: T.B. Yanovskaya, A. Kosterov, N.Yu. Bobrov, A.V. Divin, A.K. Saraev, N.V. Zolotova (Eds), Problems of Geocosmos-2018. Proceedings of the XII International Conference and School. Springer, 253–261. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_21.

Shcheglov A.D., Moskaleva V.N., Markovsky B.A., Kolbantsev L.R., Orlova M.P., Smolkin V.F., 1993. Magmatism and Metallogeny of Riftogenic Systems of the Eastern Part of the Baltic Shield. Nedra, Saint Petersburg, 244 p. (in Russian) [Щеглов А.Д., Москалева В.Н., Марковский Б.А., Колбанцев Л.Р., Орлова М.П., Смолькин В.Ф. Магматизм и металлогения рифтогенных систем восточной части Балтийского щита. СПб.: Недра, 1993. 244 с.].

Shustova L.E., Rabinovich G.Ya., 2003. Seismometry and Gravimetry in the Study of the Dynamics of the Precambrian Lithosphere. In: Studies of the Lithosphere in the Works of Saint Petersburg Geophysicists (Development of Academician G.A. Gamburtsev's ideas). VIRG-Rudgeofizika, Saint Petersburg, p. 170–176 (in Russian) [Шустова Л.Е., Рабинович Г.Я. Сейсмометрия и гравиметрия при изучении динамики литосферы докембрия // Исследования литосферы в работах петербургских геофизиков (Развитие идей академика Г.А. Гамбургцева). СПб.: ВИРГ-Рудгеофизика, 2003. С. 170–176].

Simons F.J., Zielhuis A., Hilst R.V.D., 1999. The Deep Structure of the Australian Continent from Surface Wave Tomography. Lithos 48 (1–4), 17–43. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00041-9).

Tiira T., Janik T., Skrzynik T., Komminaho K., Heinonen A., Veikkolainen T., Väkevä S., Korja A., 2020. Full-Scale Crustal Interpretation of Kokkola–Kymi (KOKKY) Seismic Profile, Fennoscandian Shield. Pure and Applied Geophysics 177, 3775–3795. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02459-3>.

Tripolsky A.A., Sharov N.V., 2004. Structure of the Precambrian Shields of the Northern Hemisphere of the Earth Lithosphere by Seismic Data. KarRC RAS, Petrozavodsk, 159 p. (in Russian) [Трипольский А.А., Шаров Н.В. Литосфера докембрийских щитов Северного полушария Земли по сейсмическим данным. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2004. 159 с.].

Tsvetkova T.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., 2015. Three-Dimensional P-Velocity Model of the Mantle of Fennoscandia. LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, 138 p.

(in Russian) [Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Трехмерная Р-скоростная модель мантии Фенноскандии. Саарбрюккен: LAMBERT Academic Publishing, 2015. 138 с.].

Tsvetkova T.A., Shumlyanskaya L.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., 2009. Seismic-Tomography of the East-European Platform: Three-Dimensional P-Velocity Model of the Mantle under Fennoscandia-I. Geophysical Journal 31 (1), 53–72 (in Russian) [Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная Р-скоростная модель мантии под Фенноскандией-I // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 1. С. 53–72].

Tsvetkova T.A., Shumlyanskaya L.A., Bugaenko I.V., Zaets L.N., 2010. Seismic-Tomography of the East-European Platform: Three-Dimensional P-Velocity Model of the Mantle under Fennoscandia-II. Geophysical Journal 32 (1), 60–77 (in Russian) [Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная Р-скоростная модель мантии под Фенноскандией-II // Геофизический журнал. 2010. Т. 32. № 1. С. 60–77].

Vinnik L.P., Green R.W.E., Nicolaysen L.O., Kosarev G.L., Petersen N.V., 1996. Deep Seismic Structure of the Kaapvaal Craton. Tectonophysics 262 (1–4), 67–75. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(96\)00012-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(96)00012-1).

Windley B.F., 1992. Precambrian Europe. In: D. Blandell, R. Freeman, S. Mueller (Eds), A Continent Revealed. The European Geotraverse. Cambridge University Press, 139–152. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608261.008>.

Zhamaletdinov A.A., Petrishchev M.S., 2015. A Quasi-Three-Dimensional Model of Lithosphere Electrical Conductivity of the Fennoscandian Shield Based on the Results of the BEAR and FENICS Experiments. Doklady Earth Sciences 463, 751–756. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15070235>.

Zielhuis A., Hilst R., 1996. Upper Mantle Shear Velocity beneath Eastern Australia from Inversion of Waverforms from SKIPPY Portable Arrays. Geophysical Journal International 127 (1), 1–16. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb01530.x>.

Zolotov E.E., Kostyuchenko S.L., Rakitov V.A., Kurilovich I.A., Mishenkina Z.R., Treusov A.V., Sharov N.V., 2000. Inhomogeneities of the Upper Mantle of the Baltic Shield According to Seismic Tomography Data. Exploration and Protection of Mineral Resources 2, 27–29 (in Russian) [Золотов Е.Е., Костюченко С.Л., Ракитов В.А., Курилович И.А., Мишенькина З.Р., Треусов А.В., Шаров Н.В. Неоднородности верхней мантии Балтийского щита по данным сейсмической томографии // Разведка и охрана недр. 2000. № 2. С. 27–29].