УДК 550.346

Сейсмогеологический разрез земной коры по профилю ГСЗ—ОГТ "Суша — море" Калевала — Кемь — горло Белого моря

© Н. В. Шаров[1], А. И. Слабунов[1], Э. В. Исанина[2], Н. А. Крупнова[3], Ю. В. Рослов[3], Н. И. Щипцова[1], 2010

[1]Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск, Россия
[2]РГЭЦ — филиал ФГУГП "Урангео", Санкт-Петербург, Россия
[3]ФГУ НПП "Севморгео", Санкт-Петербург, Россия

Поступила 11 июня 2009 г.

Представлено членом редколлегии В. Д. Омельченко

Досліджено модель будови земної кори у східній частині Феноскандінавського щита на основі комплексного аналізу геологічних даних, вібросейсмічних спостережень МСГТ із залученням даних ГСЗ на суходолі, морських комплексних сейсмічних спостережень ГСЗ, МВХ—СГТ. Глибинні дослідження СГТ, ГСЗ і побудовані сейсмотомографічні розрізи за профілями 4В на південній ділянці геотраверсу 3-АР (Калевала — Кемь — гирло Білого моря) дали змогу вперше у межах східної частини Феноскандінавського щита детально вивчити будову кори під Білим морем. Виявлено і простежено на глибину зони тектонічних порушень, які досягають поверхні поділу Мохо. Профіль Калевала — Кемь — Біле море перетинає східну частину Карельської, Біломорську, південну частину Кольської провінцій щита (в тому числі зони їх зчленування) та Онезько-Кандалакський палеорифт Білого моря. У верхній частині розрізу суходільної ділянки профілю у зоні зчленування Біломорської та Карельської провінцій виявлено Шамбозерську структуру протяжністю 70 км, з високою швидкістю поширення поздовжніх хвиль (V_P = 6,1 ÷ 6,2 км/с) і додатним градієнтом швидкості, а в зоні зчленування Біломорської та Кольської провінцій — Умбинсько-Колвицький тектонічний ансамбль. Верхні частини розрізу кори Біломорської та Карельської провінцій мають понижені значення швидкості (V_P = 5,7 ÷ 5,9 км/с). У нижній корі цих провінцій відзначено збільшення швидкостей (V_P = 7,5 ÷ 8,9 км/с). Потужність кори регіону змінюється від 35 до 46 км.

The main goal of the studies was to develop a seismogeological model of the earth crust structure in the eastern Fennoscandinavian Shield by integrated analysis of geological data, vibroseismic CMP observation, using DSS on land, integrated sea seismic DSS and reflection survey-CMP monitoring. CMP and DSS and seismotomographic sections along 4B profiles; the southern portion of geotraverse 3-AR (Kalevala — Kem′ — White Sea neck) have made it possible for the first time to study in detail the earth crust under the White Sea within the limits of the eastern part of Phennoscandinavian shield. Tectonic dislocation zones, extending to M-discontinuity, were delineated and traced downwards. The profile Kalevala — Kem′ — White Sea extends across the Karelian, Belomorian, the southern part of the Kola province of the shield (including their joint zone) and Onega-Kandalaksha paleorift of the White Sea. In the upper part of the section on land portion of the profile within the joint zone of Belomorian and Karelian provinces the Shombozero structure of 70 km long with high velocity V_P = 6,1 ÷ ÷ 6,2 km/s which has a positive velocity gradient and within the joint zone of Belomorian and Kola provinces — Umbinsko-Kolvitskiy tectonic ensemble. The upper parts of the Earth's crust sections of the Belomorian and Karelian provinces have decreased velocity values of 5,7 ÷ ÷ 5,9 km/s. In the lower crust of the Belomorian and Kola provinces the increase of velocities V_P = 7,5 ÷ 8,9 km/s is noticed. The thickness of the Earth's crust of the region varies from 35 to 46 km.

Введение. Восточная, сложенная главным образом архейскими образованиями, часть Фенноскандинавского щита (рис. 1, *а*) в районе Белого моря является ключевой для познания фундаментальных закономерностей эволюции литосферы от архея до наших дней. Цель данной статьи — анализ и комплексная интерпретация результатов геофизических и геологических исследований морской и сухопутной частей региона для решения проблем соотношения разнотипных структур (провинций, мегаблоков, террейнов) земной коры древней части Фенноскандинавского щита, а также выяснение закономерностей эволюции земной коры в раннем докембрии.

По профилю Калевала — Кемь — горло Белого моря (рис. 1, *б*), являющегося юго-западным окончанием геотраверса 3-АР, за основу приняты сейсмические материалы, полученные в 2003 г. ФГУ НПП "Севморгео" и СЗФ "Невскгеология" ФГУ НПП "Севморгео" выполнил морские работы по 400-километровому профилю ОГТ, ГСЗ, включающие возбуждение сигналов пневмоисточником и регистрацией автоматическими донными сейсмическими многокомпонентными станциями. Наблюдение на 200-километровом сухопутном участке было обеспечено СЗФ "Невскгеология". Эти материалы дополнены временами первых вступлений продольных волн, полученных под руководством И.В. Литвиненко в 1958 г. на профиле ГСЗ Кемь — Ухта (Калевала) [Глубинное ..., 2001]. Главной целью исследований было создание сейсмогеологической модели строения земной коры восточной части Фенноскандинавского щита (см. рис. 1, *а*, *б*) на основе комплексного анализа вибросейсмических наблюдений МОГТ с привлечением данных ГСЗ на суше и морских комплексных сейсмических наблюдений ГСЗ, МОВ—ОГТ.

Геологический очерк. Фенноскандинавский (Балтийский) щит — самый крупный в Европе выход на поверхность докембрийских комплексов Восточно-Европейского кратона. Его континентальная кора имеет мозаичную (блоковую, террейновую) структуру и состоит из семи провинций (см. рис. 1, *а*). При этом восточная его часть сложена, главным образом, архейскими (3,5—2,5 млрд лет), а западная — ювенильными протерозойскими образованиями. Архейские структурно-вещественные комплексы составляют большую часть Карельской, Мурманской, Беломорской, Кольской (в ее составе установлены фрагменты ювенильной палеопротерозойской коры), Норрботтен провинций (см. рис. 1, *а*). Каждая из них имеет свои особенности формирования коры в архее и переработки в протерозое [Daly et al., 2006; Slabunov et al., 2006]. Две первые структуры рассматриваются как неоархейские кратоны, Беломорская — как докембрийский подвижный пояс, Кольская — как коллаж террейнов, а провинция Норрботтен пока изучена слабо, но, по-видимому, также является коллажем террейнов. Земная кора щита в восточной (древней) части расколота неопротерозойскими палеорифтами Онежско-Кандалакшской системы [Балуев и др., 2000], пронизана среднепалеозойскими интрузиями Кольской щелочной провинции и кимберлитовыми трубками (см. рис. 1, *б*).

Карельская провинция (или неоархейский кратон) составляет ядро щита [Gaál, Gorbatschev, 1987] и сложена, главным образом, архейскими гранитоидными, зеленокаменными и парагнейсовыми комплексами, менее распространены высокометаморфизованные (гранулитовые) комплексы [Слабунов и др., 2006а, б; Slabunov et al., 2006]. Первые занимают более 80 % современного эрозионного среза и формировались на всем протяжении развития коры: от 3,5 до 2,5 млрд лет. Зеленокаменные и парагнейсовые комплексы с возрастом от 3,1 до 2,6 млрд лет слагают, соответственно, зеленокаменные и парагнейсовые пояса.

В составе кратона выделяется несколько террейнов [Слабунов и др., 2006а и ссылки там], которые различаются возрастом и составом слагающих их пород, рассматриваемый профиль пересекает самый молодой и западный среди них — Центрально-Карельский, а с учетом материалов по профилю 4В — также восточную часть террейна Кианта.

Архейские образования кратона перекрываются слабодислоцированными палеопротерозойскими осадочными и вулканогенными образованиями, которые сохранились в ряде структур, а также секутся роями базитовых даек, расслоенными интрузиями [Слабунов и др., 2006б].

Около 2,5 млрд лет назад Карельская провинция прошла стадию кратонизации и в протерозое реагировала на тектонические события как относительно жесткий блок.

Кольская провинция (см. рис. 1, *б*) — это сложный тектонический ансамбль, сформировавшийся в палеопротерозое в связи с развитием Лапландско-Кольского орогена [Балаганский, 2002; Балаганский и др., 1998, 2006; Daly et al., 2006]. Она состоит из террейнов с

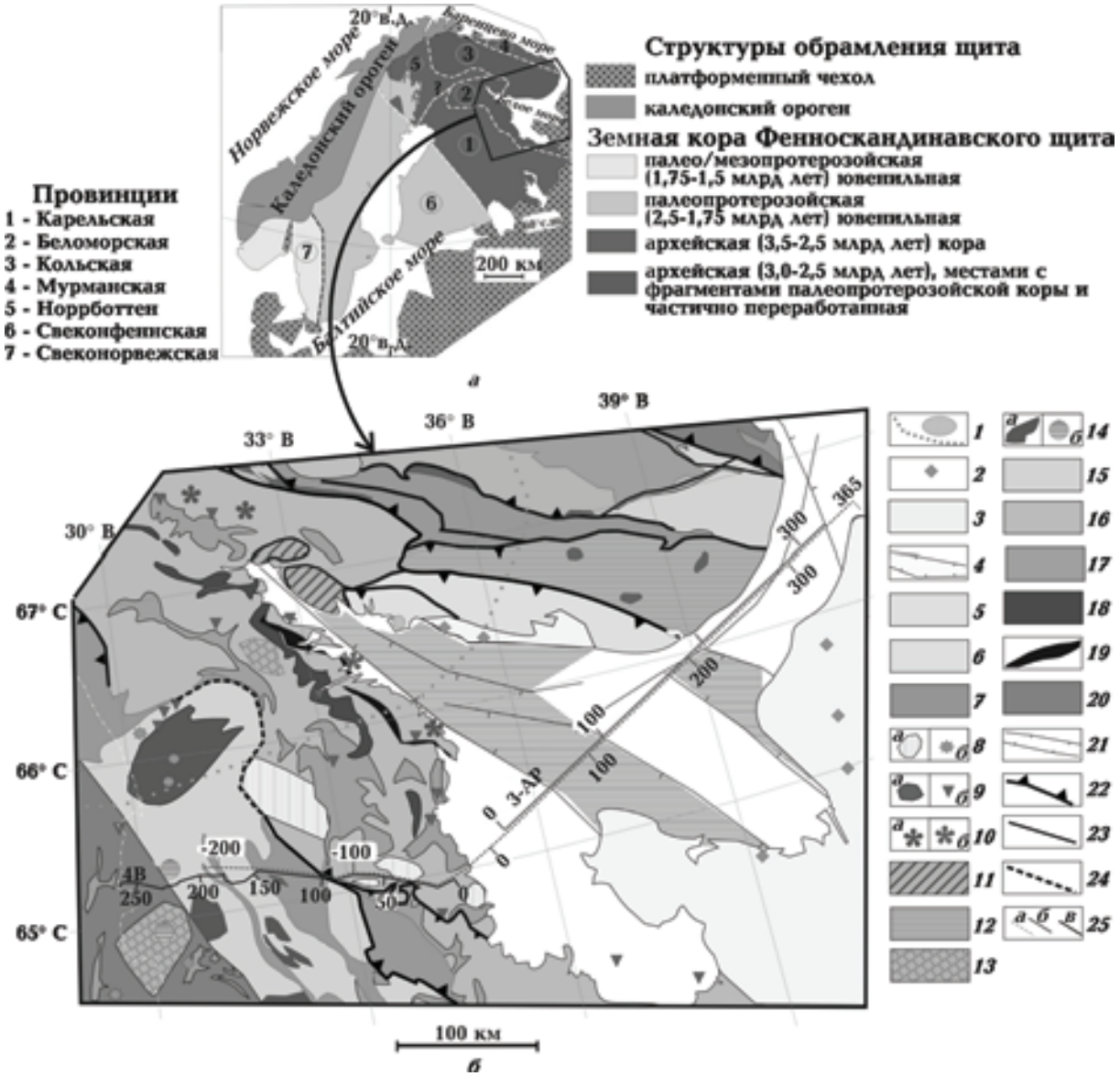

Рис. 1. Тектоническое районирование Фенноскандинавского щита [Слабунов, 2008 и ссылки там] (*а*), схема геологического строения района Белого моря [Слабунов, 2008 с дополнениями по: Балаганский и др., 2006; Балуев, 2006; Геологическая …, 2001; Казанин и др., 2006] (*б*) и расположения сейсмических профилей "Суша — море", 4В (Кемь — Калевала) и 3-АР (Кемь — горло Белого моря): *1* — палеозойские щелочные интрузии и ареал распространения данного комплекса; *2* — поля кимберлитов; *3*, *4* — палеозойские и неопротерозойские осадочные образования (*3* — на суше, *4* — в палеорифте Белого моря); *5—10* — палеопротерозойские образования (*5* — Умбинский гранулитовый (парагранулиты, эндербиты) комплекс; *6* — гранитогнейсы и метавулканиты Терского террейна; *7* — осадочные и вулканогенные образования Имандра-Варзугского пояса; *8* — гранитоиды (*а* — Топозерский комплекс метачарнокитов Беломорской провинции, *б* — Нуоруненского типа Карельской провинции); *9* — интрузии основного-ультраосновного состава, в том числе расслоенные (*а* — крупные массивы, *б* — вне масштаба); *10* — коровые эклогиты (*а* — неоархейские, *б* — палеопротерозойские)); *11* — Колвицкий меланж (с тектоническими пластинами архейских гранитогнейсов); *12* — тектоническая смесь палеопротерозойских мафических и неоархейских гранитогнейсовых комплексов Стрельнинского террейна; *13—19* — архейские образования (*13* — гранулитовые комплексы; *14* — комплекс высокомагнезиальных диорит-гранодиоритов (санукитоидов) (*а* — крупные массивы, *б* — мне масштаба); *15*, *16* — неоархейские гранитоиды ТТГ ассоциации (*15* — Карельского кратона и Сосновского террейна, *16* — переработанные в палеопротерозое); *17* — мезо- и неоархейские зеленокаменные комплексы; *18*, *19* — мезоархейские образования (*18* — парагнейсы, *19* — офиолитоиды)); *20* — мезо- и неоархейские гранитоиды ТТГ ассоциации; *21* — рифты Белого моря; *22* — надвиги, *23* — разломы; *24* — предполагаемые разломы; *25* — сейсмические профили (*а* — "Суша — море", *б* — 3-АР "Кемь — горло Белого моря", *в* — 4В "Кемь — Калевала").

различным строением и предысторией [Балаганский, 2002]. Профиль пересекает следующие из них: Колвицкий, Умбинский, Терский, Стрельнинский, Сосновский. Последний входит в состава Центрально-Кольского супертеррейна, в котором наиболее полно представлены архейские зеленокаменные, парагнейсовые, гранитоидные, дайковые комплексы. Он рассматривается либо как Кольская гранулит-зеленокаменная [Митрофанов и др., 1986], либо как гранит-зеленокаменная [Радченко и др., 1992] область, а его Кольско-Норвежский террейн — как архейская гранулито-гнейсовая область [Марков и др., 1987]. Беломорская провинция непосредственно граничит по системе палеопротерозойских (2,0—1,75 млрд лет) разломов с Лапландско-Кольской коллизионной сутурой [Балаганский и др., 2006; Daly et al., 2006; Geology ..., 1995], террейнами Терским, Стрельнинским (см. рис. 1, *б*), Центрально-Кольским. Два первых состоят как из неоархейских, так и из ювенильных палеопротерозойских образований.

В палеопротерозое в пределах провинции формируются многочисленные мафит-ультрамафитовые интрузии (например, расслоенные перидотит-пироксенит-габброноритовые интрузии Панских и Федоровских тундр), рифтогенная Имандро-Вазрзугская структура [Пожиленко и др., 2002].

Беломорский подвижный пояс располагается между Карельским кратоном и Кольской провинцией (см. рис. 1, *б*) и принципиально отличается от них тем, что это сложно и интенсивно складчатая структура полициклического развития, породы которой неоднократно метаморфизованы в условиях высокого (кианитовый тип) давления как в архее, так и в протерозое [Володичев, 1990; Глебовицкий и др., 1996; Сыстра, 1978]. Кольская и Беломорская провинции являются элементами Лапландско-Кольского палеопротерозойского орогена [Балаганский и др., 2006; Daly et al., 2001].

Структура Беломорского подвижного пояса — это сложный тектонический коллаж [Миллер, Милькевич, 1995], состоящий из отдельных пластин. Существенную, а возможно и решающую роль в формировании структуры провинции играют неоархейские (2,72—2,7 млрд лет) тектонические покровы [Глебовицкий и др., 1996; Миллер, Милькевич, 1995]. Структура пояса была существенно усложнена в ходе палеопротерозойских рифтогенных и коллизионных событий [Балаганский, 2002; Володичев, 1990; Колодяжный, 2006].

Большая часть структуры сложена архейскими (2,9—2,65 млрд лет) мигматизированными разгнейсованными гранитоидами ТТГ ассоциации, менее развиты палеопротерозойские (около 2,4 млрд лет) гранитоиды — чарнокиты. Глубокометаморфизованные вулканогенные (среди которых велика роль базальтов, коматиитов, андезитов), осадочно-вулканогенные и осадочные образования с возрастом от 2,88 до 2,74 млрд лет слагают серию зеленокаменных поясов, а мезоархейские метаграувакки — Чупинский парагнейсовый пояс [Слабунов, 2008 и ссылки там]. Отдельно следует отметить Центрально-Беломорский зеленокаменный пояс, сложенный мезоархейским офиолитоподобным комплексом с телами метаперидотитов. Фрагменты неоархейских офиолитов описаны в Северо-Карельском зеленокаменном поясе. Кроме того, в составе Беломорской провинции известны архейские (2,82—2,72 млрд лет) коровые эклогиты, входящие, например, в состав гридинского меланжа.

Беломорская структура содержит многочисленные, как правило небольшие, интрузии, дайки, их фрагменты палеопротерозойских габброидов (друзитов). Среди них выделяются [Степанов, 1981] комплексы габбро-анортозитов (с возрастом около 2,45 млрд лет), лерцолитов-габброноритов (2,4—2,38 млрд лет), гранатовых (железистых) габбро (2,12 млрд лет).

Рифтовая система Белого моря состоит из серии палеорифтов (Онежско-Кандалакшского, Керецко-Пинежского и др.) северо-западного простирания. Глубина залегания фундамента в пределах, например, Онежско-Кандалакшского рифта достигает 8 км [Казанин и др., 2006]. Система сформировалась в условиях растяжения раннедокембрийской континентальной коры в рифее [Балуев и др., 2000; Балуев, 2006].

Методика и характеристика сейсмических данных. ***Методика сейсмических наблюдений.*** При проведении работ МОВ—ОГТ для возбуждения сигналов использовалась группа пневматических источников общим объемом 2280 дюйм. куб., взрывной интервал — 50 м. Регистрация осуществлялась 360-канальной буксируемой косой с шагом между каналами 12,5 м и максимальным выносом 4647,5 м, средняя кратность перекрытия составляла 45 [Строение ..., 2005]. Данные МОВ—ОГТ обработаны в системе *PROMAX*. В процессе обработки на различных этапах многократно использованы процедуры деконволюции, одноканальной полосовой и многока-

нальной f-k фильтрации, а также процедура DMO. Выполнено суммирование по ОГТ со средней кратностью 45. По разрезу произведена миграция во временной области с использованием алгоритма Кирхгоффа [Сакулина и др., 2003]. По результатам работ МОВ—ОГТ получены сейсмические временной и глубинный разрезы.

Работы МПВ—ГСЗ выполнены по обращенной системе наблюдений с расстановкой в 23 пунктах донных сейсмических станций и возбуждением упругих колебаний пневмоизлучателем, установленном на движущемся вдоль профиля корабле. Возбуждение колебаний осуществлялось пневмоисточниками большой мощности типа СИН (объемом 80 и 120 л) при взрывном интервале (по профилю) 250 м. Для приема сигналов использованы автономные самовсплывающие донные цифровые станции "Граница" и АДСР-М конструкции "Севморгео" с трехкомпонентной X, Y, Z на дне водоема и гидрофоном H на поверхности воды регистрацией. На сухопутной части профиля 3-АР регистрация сейсмических сигналов от пневмоисточника из акватории осуществлялась в 13 точках трехкомпонентными сейсмоприемниками (X, Y, Z) на цифровые станции "Дельта-Геон". Профили отработаны по достаточно плотной системе наблюдений. В морской части станции были установлены через 5—10 км, а на сухопутной части профиля — через 15 км.

Характеристика сейсмических материалов. *Сейсмические данные МПВ—ГСЗ.* Волновое поле характеризуется сильной изменчивостью вдоль профиля, что обусловлено блоковым строением разреза, где каждый блок соответствует крупной тектонической структуре. Наличие большого количества волн различной природы (преломленных, отраженных, кратных), а также появление изломов и разрывов в годографах свидетельствует о сложной слоистой структуре разреза. На сейсмических записях выделены волны, связанные с границами в осадочном чехле, фундаментом, границами внутри коры и мантией.

Анализ качества сейсмических материалов по зондированиям позволяет сделать следующие выводы:

— на сейсмических записях, полученных в Белом море, практически на всех зондированиях отмечается повышенный уровень шумов, связанный с течением;

— при наблюдениях на сухопутном продолжении профиля 3-АР устойчивая регистрация сейсмических сигналов отмечается на удалениях до 160—180 км, однако имеются записи и на больших расстояниях до 380—450 км.

Ближний к крайней точке наблюдений в море ПК0 находился ПК 1, дальний, соответственно, ПК 13. На рис. 2 представлен пример волнового поля записей пневмоизлучателей. На ПК 1 ввиду малого расстояния до источника (37—40 км) продольные и поперечные волны регистрируются с малым временем запаздывания (7—10 с), с удалением от берега внутрь континента возрастает разница $\Delta t_{S\text{-}P}$ и волны становятся более устойчивыми. С увеличением расстояния до источника и появлением интенсивной отраженной волны от границы Мохо записи становятся разрешенными, а вступления — более четкими. В отдельных случаях хорошо регистрируются P- и S-волны (см. рис. 2), что допускает возможность построения томографических разрезов по P- и S-волнам.

Обработка сейсмических материалов. Граф обработки данных МПВ—ГСЗ на опорных профилях, разработанный в "Севморгео", предусматривает различные виды обработки и интерпретации волновых полей [Сакулина и др., 2003], а именно:

— блок кинематической обработки данных метода преломленных волн (МПВ) и ГСЗ, включающий систему "Граница". В рамках этой системы выполняется считывание времен прихода всех волн и решение обратной кинематической задачи традиционными способами;

— пакет программ миграции сейсмических записей преломленных волн и построение динамических разрезов по отраженным и преломленным волнам;

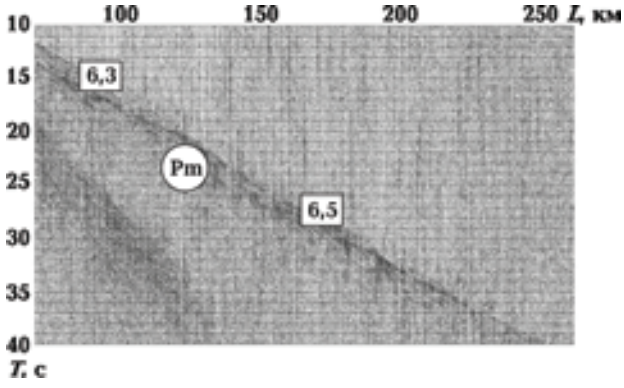

Рис. 2. Пример волнового поля при наблюдении на суше и возбуждении на море. Профиль 3-АР, зондирование 3, $x = 50$ км.

— пакет программ XTomo, который осуществляет томографическую обработку. Система XTomo служит мощным 2D-инструментом кинематической интерпретации сейсмических данных и, в отличие от предыдущей версии Firstomo, позволяет использовать криволинейную решетку, что удобно для моделирования сейсмических пластов и горизонтов.

По годографам первых вступлений продольных волн построен скоростной разрез по профилю (рис. 3, *а*). Эти материалы дополнены временами первых вступлений продольных волн, полученных на профиле ГСЗ Кемь — Ухта. При томографическом подходе определяются интегральные значения скоростей, реализующиеся в модели с плавным, но повсеместным изменением скорости. В качестве основы для выбора начального скоростного приближения использовались глубинные сейсмические разрезы ГСЗ, построенные вдоль этих профилей с учетом времен вступлений преломленных и отраженных волн [Глубинное ..., 2001].

Характеристика сейсмического волнового поля МОВ—ОГТ. Полученный сейсмический временной разрез МОВ—ОГТ (рис. 4, *а*) отражает геологическое строение котловины Белого моря. В целом характер волнового поля позволяет выделить три геолого-геофизических комплекса (ГГК) — *нижний, средний и верхний*.

Нижний ГГК в волновом поле характеризуется отражающими горизонтами группы С (рис. 4, *б*). В этом комплексе в западной части, соответствующей Беломорской провинции, наблюдаются пологопогружающиеся на северо-восток отражающие поверхности, в центральной части (Терский и Стрельнинский террейны Кольской провинции) эти поверхности погружаются на юго-запад, в восточной части (Сосновский террейн) вновь появляются поверхности, погружающиеся на северо-запад. Поверхность гетерогенного фундамента *F* регистрируется на временах от 3,5 до 0,2 с. Наиболее уверенно поверхность фундамента, как условная граница смены регулярной волновой картины на хаотичную, прослеживается там, где временная мощность среднего ГГК существенно сокращена. Положение поверхности фундамента в местах максимальной временной мощности среднего ГГК отождествляется с наиболее уверенно прослеживаемым отражающим горизонтом группы Rf_a, регистрируемым в низах соответствующего временного интервала.

Отражающие горизонты группы С регистрируются в широком временном диапазоне, до 6 с включительно, характеризуются динамически ярко выраженными, преимущественно криволинейными осями синфазности, ограниченной латеральной прослеживаемостью и резкими изменениями амплитудного уровня регистрации. По-видимому, эти отражающие горизонты характеризуют акустические неоднородности фундамента, природа которых может быть обусловлена, например, физико-химическими изменениями пород фундамента, присутствием интрузивных тел, тектоническими нарушениями и т. д.

Средний ГГК представляет собой рифейский осадочный чехол котловины Белого моря. Особенности волновой картины ГГК позволяют разделить его на три различных, латерально обособленных комплекса — кандалакшский, малошуйско-унский, керецкий.

Верхний ГГК, временная мощность которого не превышает 500 мс, характеризуется верхнерифейским, вендским и четвертичным комплексами.

Сопоставление данных ГСЗ и ОГТ. Что касается комплексирования ОГТ и ГСЗ, то здесь не выявлено каких-то противоречий, ОГТ позволил изучить разрез только до глубин 12 — 14 км. Осадочный чехол, особенно его верхняя часть, изучена более детально, чем это возможно по ГСЗ. Сопоставление с временным разрезом ОГТ позволяет уточнить корреляцию и разделение волн при интерпретации волновых полей ГСЗ. Это позволяет скорректировать результаты обработки ГСЗ в верхней части разреза и получить более достоверный разрез на больших глубинах. В свою очередь данные ГСЗ позволяют уточнить глубинное строение осадочного чехла при сложном его строении и потери отражающих горизонтов.

Структуры земной коры. Сейсмический профиль пересекает главные раннедокембрийские провинции восточной части Фенноскандинавского щита: Беломорскую, Карельскую и Кольскую, а также Онежско-Кандалакшский палеорифт.

Земная кора западной части сухопутного участка профиля отличается более однородным сейсмотомографическим разрезом с плавными пологими границами (см. рис. 3). На профиле МОВ — ОГТ она имеет четко выраженное слоистое трехчленное строение: верхняя, средняя и нижняя кора (рис. 5). Эта часть

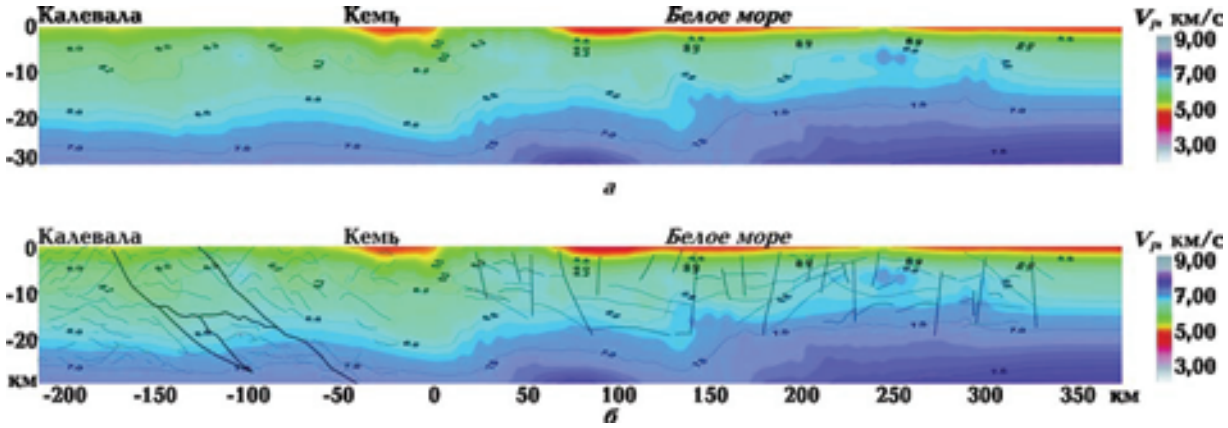

Рис. 3. Сейсмотомографический разрез по профилю "Суша — море" (Калевала — Кемь — горло Белого моря) (*а*) и сейсмотомографический разрез по профилю "Суша — море" и сейсмоотржающие поверхности с сейсмогеологического разреза по данному профилю (*б*).

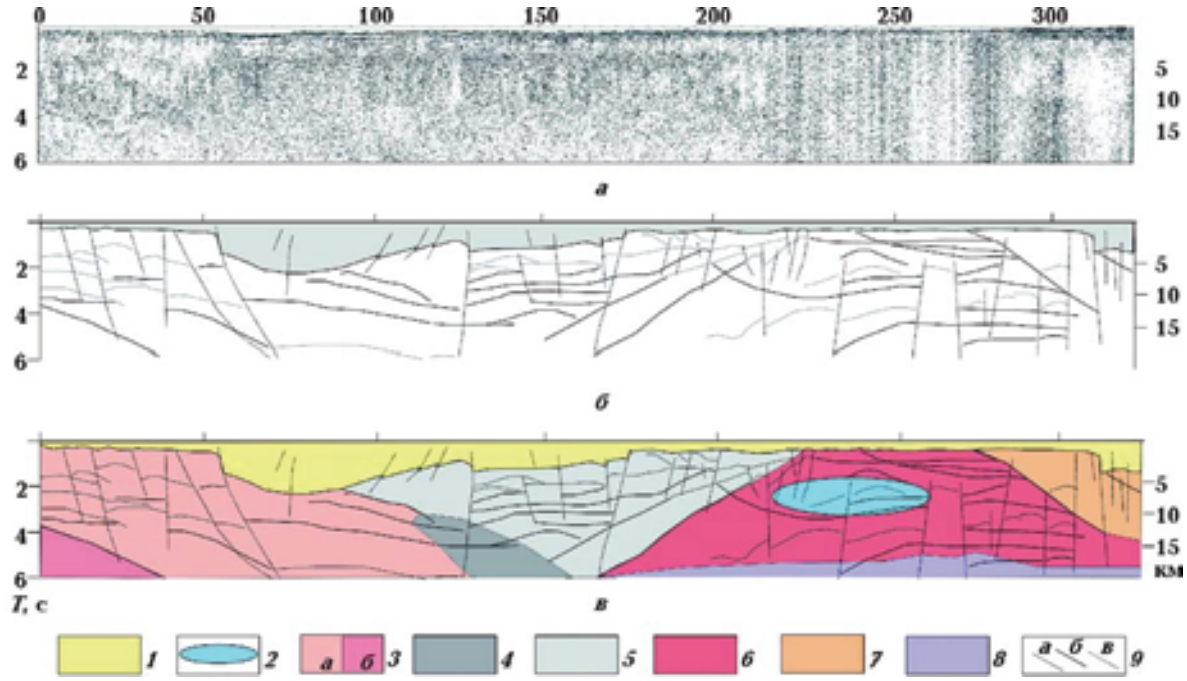

Рис. 4. Мигрированный временной разрез МОВ—ОГТ по профилю 3-АР "Кемь — горло Белого моря" (ОАО "МАГЭ") (*а*), сейсмогеологический разрез МОВ—ОГТ по профилю 3-АР (*б*) и геолого-геофизический разрез по профилю 3-АР (*в*): *1* — неопротерозойская рифтовая система Белого моря; *2* — палеопротерозойские интрузии мафит-ультрамафитового состава; *3* — архейские образования Беломорской провинции (*а* — гранит-зеленокаменные с редкими офиолитоидными и эклогитсодержащими комплексами, *б* — гранит-зеленокаменные комплексы); *4*—*7* — Кольская провинция (*4* — Колвицкий и Умбинский террейны, *5* — Терский террейн, *6* — Стрельнинский террейн, *7* — Сосновский террейн); *8* — нижняя высокоскоростная земная кора; *9* — сейсмоотражающие поверхности (*а*, *б* — границы контрастных сред по данным разных авторов, *в* — разломы).

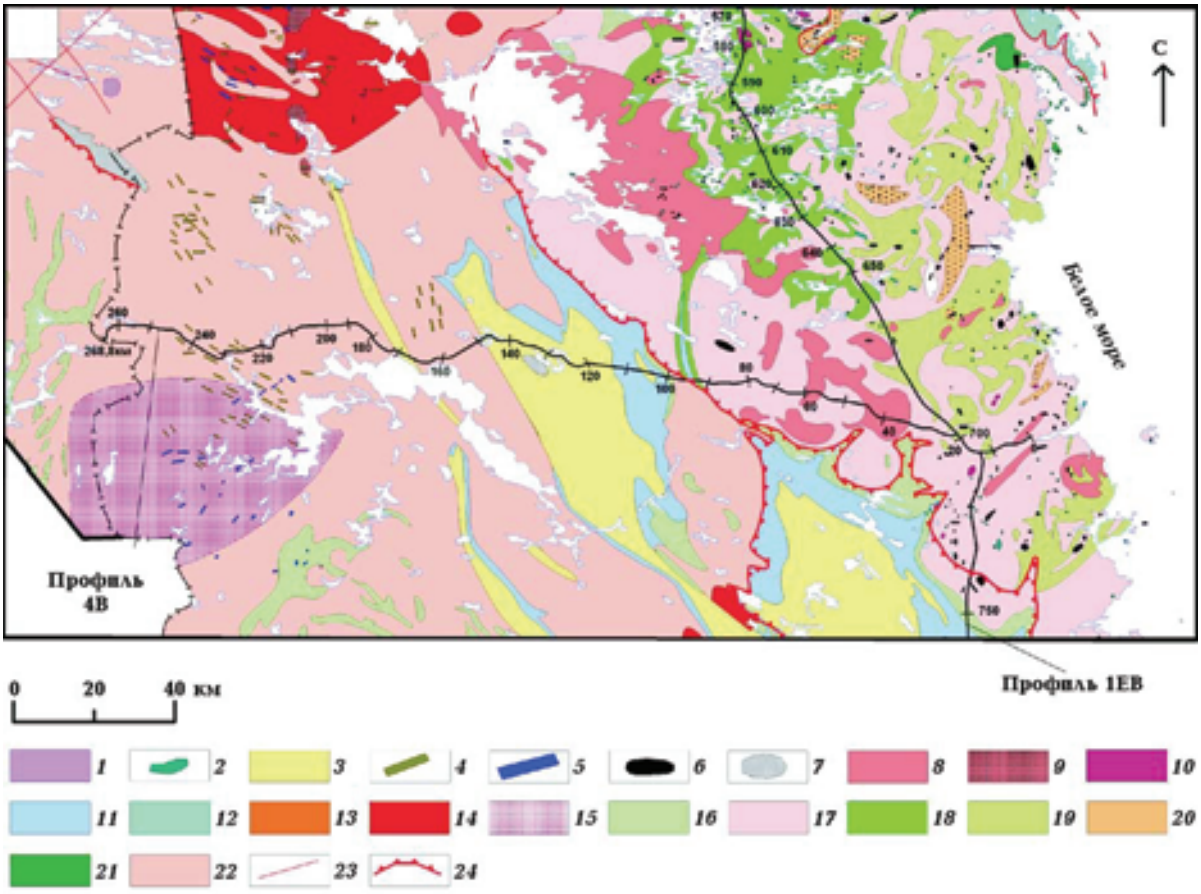

Рис. 5. Схема геологического строения Северной Карелии [Слабунов, 2008 и ссылки там, с дополнениями] и расположение сейсмического профиля 4В: *1* — фанерозойские щелочные комплексы; *2* — комплекс коронитовых (гранатовых) габбро; *3—8* — палеопротерозойские образования (*3* — ятулийские (2,3—2,0 млрд лет) вулканогенные и осадочные комплексы; *4* — дайки долеритов (Карельская провинция); *5* — дайки габброноритов (Карельская провинция); *6* — комплекс лерцолитов-габброноритов (Беломорская провинция); *7* — расслоенные интрузии; *8* — метачарнокиты топозерского типа); *9* — граниты нуоруненского типа; *10* — комплекс габброанортозитов; *11* — сумийские, сариолийские (2,5—2,3 млрд лет) вулканогенные и осадочные комплексы; *12* — неоархейский эклогитсодержащий комплекс; *13* — эндербиты; *14* — санукитоиды (2,74—2,72 млрд лет); *15* — гранулиты Вокнаволокского комплекса; *16* — неоархейские зеленокаменные комплексы; *17* — гранитоиды Беломорской провинции; *18* — мезоархейские зеленокаменные комплексы; *19* — глубокометаморфизованные зеленокаменные комплексы; *20* — мезоархейские парагнейсы; *21* — офиолитоиды; *22* — гранитоиды Карельского неоархейского кратона; *23* — разломы; *24* — палеопротерозойские надвиги.

профиля представляет собой устойчивую архейскую континентальную кору.

Кора восточной части сухопутного участка профиля имеет другое строение. Здесь отсутствует четкое слоистое строение земной коры. Верхняя часть разреза ОГТ состоит из наклоненных полого на восток границ, постепенно выклинивается контрастная нижняя кора и сменяется однородной. Эта часть профиля соответствует зоне надвига, по которому комплексы Беломорской провинции надвинуты на образования Карельского кратона.

По данным ГСЗ слабо изменяется скоростная модель земной коры. В верхней ее части до глубины 5 км скорость нарастает от 5,9 до 6,3 км/с, затем наблюдается зона инверсии скорости [Глубинное …, 2004]. Глубина до подошвы инверсионной зоны, до границы K_1, изменяется вдоль сухопутного участка профиля от 16 км на западе до 10 км на востоке. Скорость под указанной зоной также изменяется от 6,5 км/с на западе до 6,3 на востоке. На глубине 30 км выделена граница K_2 с предполагаемым скачком скорости от 6,7

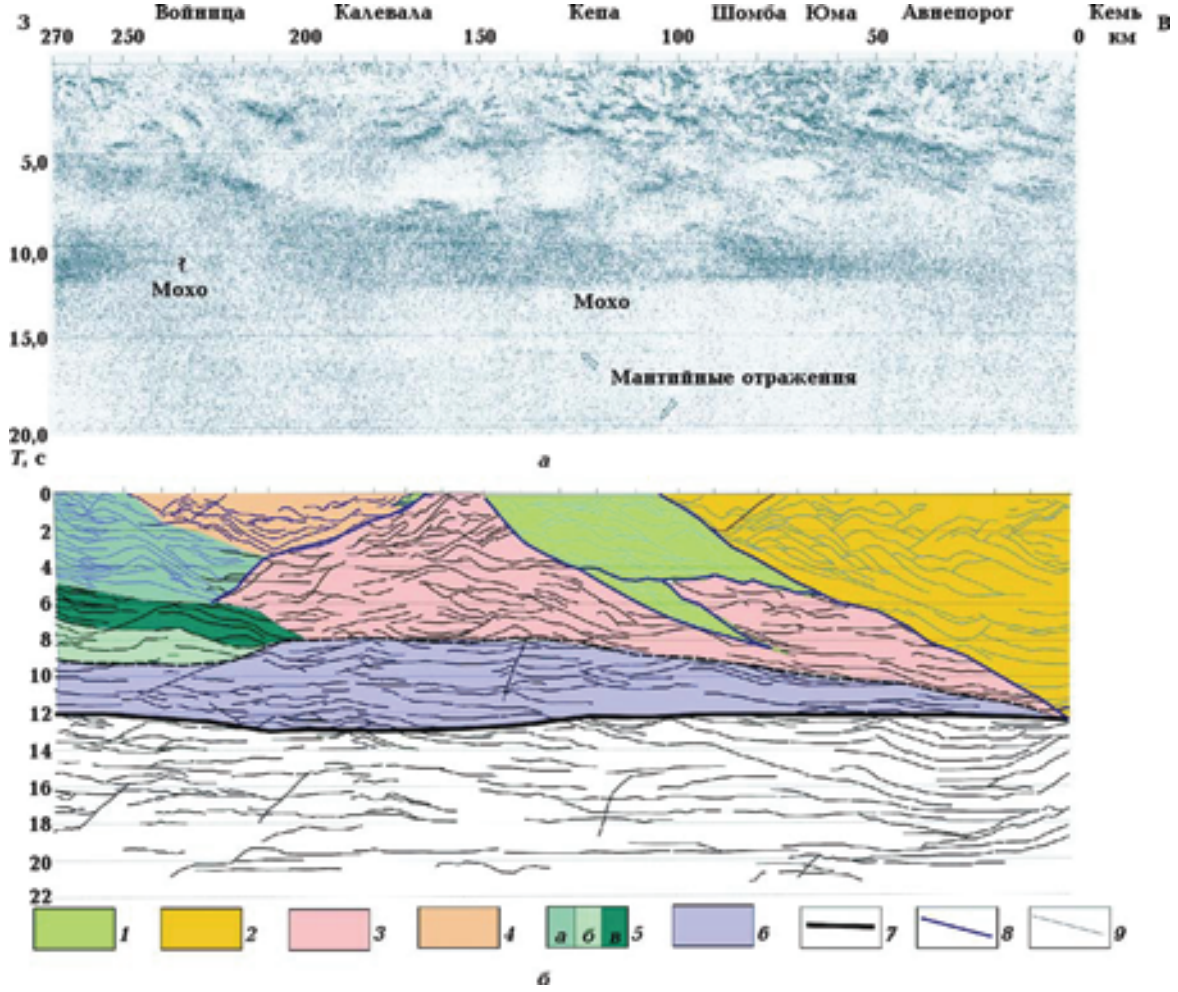

Рис. 6. Мигрированный временной разрез МОВ—ОГТ, профиль 4В [Глубинное ..., 2001] (*а*) и геолого-геофизический разрез по профилю 4В (*б*): *1* — палеопротерозойские вулканогенные и осадочные образования; *2* — тектонический ансамбль из пластин неоархейских гранитогнейсов, мезо- и неоархейских зеленокаменных комплексов и палепротерозойских метачарнокитов; *3*, *4* — неоархейские образования Центрально-Карелького террейна (*3* — гранитоиды, редкие зеленокаменные образования и санукитоиды, *4* — гранитоиды, рои даек базитов); *5* — мезо- и неоархейские образования террейна Кианта (*а* — гранитоиды, зеленокаменные комплексы, гранулиты, *б* — гранитоиды, зеленокаменные комплексы, *в* — архейская океаническая кора (?)); *6* — нижняя кора; *7* — граница Мохо; *8* — палеопротерозойские надвиги; *9* — сейсмоотражающие поверхности.

до 6,8 км/с. В низах коры скорость увеличивается до 7,0 км/с. Граница М прослежена как отражающий горизонт со скачком скорости на ней от 7,0 до 8,0 км/с. Мощность коры — 40 км, она практически не меняется вдоль всего сухопутного участка профиля.

В результате сейсмических работ МОГТ, ГСЗ, сейсмоакустического профилирования вдоль южной части профиля 3-АР были выделены основные горизонты в разрезе осадочного чехла и консолидированной коры. Результаты представлены на геолого-геофизическом разрезе (рис. 4, *в*). При построении геолого-геофизического разреза использованы результаты построений по данным ОГТ в Белом море (МАГЭ), обобщений комплексных геофизических данных о строении земной коры Беломорского региона [Строение ..., 2005]. Кроме того, использованы результаты работ глубинных сейсмических исследований по профилю 4В (рис. 6, *а*), выполненных ФГУ ГНПП "Спецгеофизика" в 1999—2000 гг. по линии Кемь — Калевала [Глубинное ..., 2001].

Рис. 7. Схема мощности земной коры по сейсмическим данным.

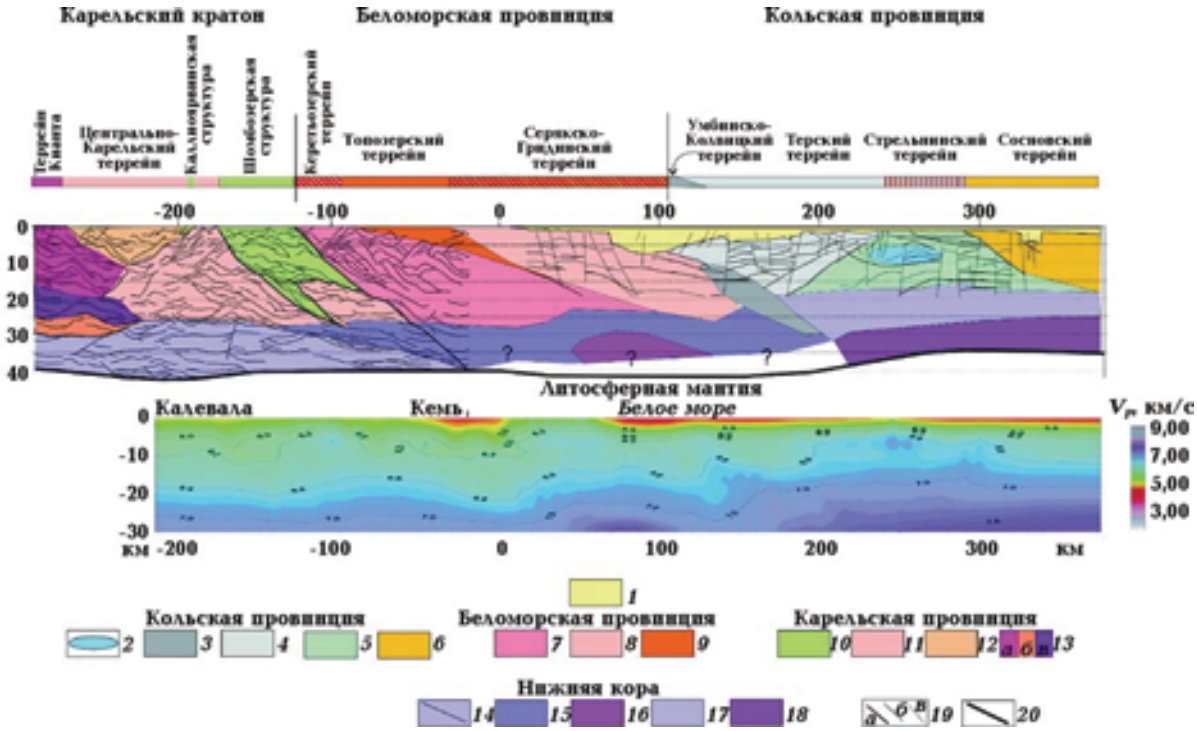

Рис. 8. Геолого-геофизический разрез земной коры по линии Калевала — Кемь — горло Белого моря по данным сейсмотомографического профиля "Суша — море" (показан на рисунке), профилей МОВ—ОГТ 3-АР (Кемь — горло Белого моря) и 4В (Кемь — Калевала): *1—13* — структуры верхней и средней коры (*1* — неопротерозойская палеорифтовая система Белого моря; *2—6* — структуры Кольской провинции (*2* — палеопротерозойские (?) высокоскоростные мафит-ультрамафитовые массивы, *3* — Колвицкий и Умбинский террейны, *4* — Терский террейн, *5* — Стрельнинский террейн, *6* — Сосновский террейн); *7—9* — структуры (террейны) Беломорской провинции (*7* — Керетьозерский (гранит-зеленокаменный), *8* — Серякско-Гридинский (гранит-зеленокаменно-эклогитовый), *9* — топозерский (метачарнокитовый)); *10—13* — структуры Карельской провинции (*10* — палеопротерозойские палеорифтогенные (Шомбозерская, Каллиоярвинская); *11, 12* — Центрально-Карельский террейн (*11* — восточный фрагмент (неоархейские гранитоиды, санукитоиды, зеленокаменные комплексы), *12* — западный фрагмент (неоархейские гранитоиды, палеопротерозойские рои даек базитов)); *13* — террейн Кианта (*а* — гранитоиды, зеленокаменные комплексы, гранулиты, *б* — гранитоиды, зеленокаменные комплексы, *в* — архейская океаническая кора (?))); *14—18* — структуры нижней коры (*14* — сейсмически контрастный слой Карельского кратона, пунктирная линия — его верхняя граница; *15* — сейсмически малоконтрастный слой Беломорской провинции и зона ее контакта с кратоном; *16* — высокоскоростной (V_P — более 7,5 км/с) слой Беломорской провинции; *17* — нижнекоровый слой Кольской провинции; *18* — высокоскоростной (V_P — более 7,5 км/с) слой Кольской провинции); *19* — сейсмоотражающие поверхности на профилях МОВ—ОГТ (*а* — надвиги; *б* — границы сейсмически контрастных комплексов; *в* — разломы); *20* — граница Мохо.

В качестве опорной модели для кристаллической коры исследуемого региона выбрана трехслойная модель со скоростями продольных волн 5,8—6,4 км/с в верхнем слое (верхний этаж), 6,5—6,7 в среднем и более 6,8 км/с в нижнем. Слои разделены отражающими горизонтальными K_1 и K_2 и отделены от верхней мантии границей М со скоростью 8,0—8,2 км/с. Граница K_2, скорее всего, обусловлена изменением реологических свойств пород на больших глубинах и поэтому с ней не связано изменение плотности. Из опыта моделирования граница K_1, чаще всего, отражает изменение петрофизических свойств — увеличение основности пород разреза, что, как правило, отражается в увеличении плотности.

Граница K_1 залегает на различных глубинах, в верхней части коры имеются высокоскоростные внедрения и низкоскоростные пропластки мощностью 3—8 км в отдельных блоках. Отмечается общая тенденция уменьшения ее глубины до 13—15 км в юго-восточной части Кольской провинции, в меньшей степени в Беломорской и пограничной с ней части Карельской. На остальной территории мощность верхней коры изменятся от 17 до 20 км.

Граница K_2 описывает несколько иную картину, чем по вышележащему горизонту K_1. Локальный подъем этой границы до 18—20 км отмечается в районе геотраверса 3-АР в Белом море, под Мезенской структурой (до 25 км) и на Кольском полуострове на фоне средних глубин 28—30 км в других частях региона.

Следует также отметить, что в нижней коре Беломорской и Кольской провинций выделяются высокоскоростные ($V_P > 7{,}5$ км/с) слои начиная с глубин 26 км, в Карельской его верхняя граница, по-видимому, находится глубже (см. рис. 3, *а*).

Поверхность Мохоровичича. Известно, что совокупность различных сейсмических методов дает достаточно надежные сведения об изменении глубины залегания М на площади (рис. 7). Граничная скорость на М по продольным волнам изменяется в восточной части Фенноскандинавского щита от 7,9 до 8,3 км/с с преобладающими значениями 8,1—8,2 км/с. Мощность земной коры региона изменяется от 30 до 45 км. Максимальная мощность установлена в зоне сочленения Беломорской и Карельской провинций (до 46 км). Минимальная мощность коры зафиксирована в районе Мезени — 30 км. Мощность земной коры на западе Кольского полуострова составляет 40—45 км, на востоке — от 36 до 38 км, в Белом море она достигает 40—42 км, на юго-восточном склоне щита — от 45 до 50 км.

Геологическая и геодинамическая интерпретация сейсмотомографической модели профиля. Комплексный анализ геологических и сейсмических данных (с учетом вариаций гравиметрических и магнитных полей в регионе) позволяет построить геолого-геофизический разрез земной коры по профилю Калевала — Кемь — горло Белого моря (рис. 8). На разрезе удается проследить структуру земной коры на всю ее мощность, понять особенности строения отдельных блоков (террейнов), а также их соотношение.

На профиле отчетливо выделяются Карельская, Беломорская и Кольская провинции. Каждая состоит из отдельных блоков, которые будет правильно интерпретировать как террейны, так как границы их имеют тектоническую природу, а история развития соседних фрагментов коры, как правило, различается [Балаганский и др., 1998, 2006; Слабунов и др., 2006 а].

В составе Карельской провинции с запада на восток выделяются четыре главные структуры: западная часть террейна Кианта, два фрагмента Центрально-Карельского террейна, разделенные палеопротерозойской Каллиоярвинской структурой, и Шомбозерская структура, сложенная тектоническими пластинами из палеопротерозойских осадочных, вулканогенных и интрузивных пород. Последняя располагается на границе кратона с Беломорской провинцией. Представленная модель восточной части профиля, не повторяя полностью интерпретации других исследователей [Минц и др., 2001, 2007; Самсонов и др., 2001; Колодяжный, 2006], в целом согласуется с ними, отличаясь иными представлениями о соотношении террейнов. Вероятно, в неоархее к относительно древнему (с возрастом коры 3,1—2,65 млрд лет) континентальному блоку Кианта был аккретирован более молодой (с возрастом коры 2,8—2,65 млрд лет) Центрально-Карельский террейн. Неоархейский надвиг сохранился как погружающаяся на восток граница между террейнами Кианта и западной пластиной Центрально-Карельского (см. рис. 8). В основании террейна Кианта на профиле 4В отчетливо выделяются две составляющие: одна — с обилием отражающих сейсмических поверхностей, другая, подстилающая ее, — относительно однородная. Первая интерпретировалась, например, как

фрагмент архейской океанической коры [Самсонов и др., 2001], вторая — как внутрикоровый плутон [Минц и др., 2001]. С учетом данных по сейсмическому профилю FIRE 1 [Finnish ..., 2006], пересекающему также террейн Кианта, однородный фрагмент коры хорошо сопоставляется с крупной тектонической пластиной в средней части коры этой структуры. В раннем палеопротерозое сформировались рифтогенные структуры Шомбозерская и Каллиоярвинская. В ходе коллизионных процессов при формировании Свекофеннского и Лапландско-Кольского орогенов континентальная кора Беломорского сегмента была надвинута на Центрально-Карельский — по Шомбозерскому шву, а по Каллиоярвинской системе рифтогенных разломов Центрально-Карельский террейн был разбит на два (см. рис. 8).

Земная кора Беломорской провинции сформировалась, главным образом, в мезо- и неоархее, а ее структура оформилась в ходе коллизионных процессов [Слабунов, 2008]. Одним из проявлений последних было покровообразование, которое и предопределяет рисунок отражающих поверхностей в виде асимметричных дуг. В палеопротерозое кора Беломорья находится под воздействием мантийных плюмов, приведших к образованию многочисленных мелких интрузий основного состава и крупных гранитоидных в верхней и средней коре, а в нижней образовался слой, насыщенный телами базитов, что обусловило его высокоскоростные и акустически малоконтрастные характеристики (см. рис. 8). В ходе коллизионных процессов в Лапландско-Кольском орогене структура коры Беломорья осложнилась, именно в этот период ее фрагменты выведены на более высокие уровни и надвинуты на Карельский кратон. Эти процессы являются, по-видимому, причиной того, что U-Pb возраста сфенов [Бибикова и др., 1999] в Беломорской провинции — палеопротерозойские (1,9—1,75 млрд лет), а в кратоне — архейские (более 2,65 млрд лет).

Кольская провинция крайне гетерогенна и включает в рассматриваемом районе террейны [Балаганский и др., 2006], состоящие из ювенильного, в основном, палеопротерозойского вещества (Терский, Умбинский), тектонической смеси палеопротерозойских и архейских пород (Колвицкий, Стрельнинский), в основном из архейских образований (Сосновский).

Тектонический ансамбль из Колвицкого меланжа и Умбинских гранулитов выделяется на сейсмотомографическом разрезе в виде выступа относительно высокоскоростных пород, к этой зоне приурочено изменение ориентировки отражающих поверхностей с северо-восточного на юго-западное (см. рис. 4, *б*, *в*; 8). Следует также обратить внимание на то, что рассматриваемый ансамбль отчетливо отражается в виде положительной гравитационной аномалии и прослеживается от Колвицких тундр до Двинской губы Белого моря.

Умбинский и Колвицкий террейны являются основанием ядра Лапландско-Кольского орогена, а палеопротерозойские образования Терского террейна — частью ядра также, как более сложно построенный Стрельнинский террейн [Балаганский и др., 2006; Daly et al., 2006]. В структуре верхней части земной коры последнего выделяется ряд высокоскоростных выступов (областей), которые, по-видимому, являются крупными палеопротерозойскими мафит-ультамафитовыми интрузиями, аналогичными расслоенным, которые широко развиты в пределах Стрельнинского террейна, а также бортах Имандра-Варзугской структуры [Пожиленко и др., 2002]. Нижняя часть коры в Кольской провинции выделяется своими высокоскоростыми характеристиками, чем сходна с таковой в Беломорском подвижном поясе. Вероятно, такие особенности также связаны с воздействием палеопротерозойских плюмов, хотя определенное влияние могли оказать и палеозойские, маркирующиеся щелочным магматизмом. Следует иметь в виду, что земная кора восточной части Кольской провинции в целом относительно маломощная.

Сосновский террейн, сложенный, главным образом, архейскими комплексами, надвинут на Стрельнинский, что видно на сейсмическом профиле (см. рис. 8).

Следует также обратить внимание на то, что наиболее крупный Кандалакшский палеорифт рифейской рифтовой системы Белого моря развивается на границе Беломорской и Кольской провинций.

Таким образом, результаты сейсмического профилирования восточной части Фенноскандинавского щита хорошо согласуются с представлениями о террейновой природе многих ранее выделяемых структур.

Выводы. Полученные сейсмические данные по профилю Калевала — Кемь — горло

Белого моря характеризуют земную кору региона как слоисто-блоковую среду. Изменение скорости в горизонтальном направлении коррелируется с неоднородностями в разрезе коры, определяющими ее блоковое геологическое строение. Латеральная неоднородность коры предопределяется тем, что блоки представляют собой террейны, прошедшие эволюцию в различных геодинамических режимах и совмещенные в ходе неоархейских и свекофеннских коллизионных процессов.

При сопоставлении сейсмических разрезов ОГТ и ГСЗ с томографическими данными выявлено, что результаты заметно различаются, однако для геологической интерпретации важны данные всех методов, так как они подчеркивают различные физические свойства и особенности строения среды.

Список литературы

Балаганский В. В. Главные этапы тектонического развития северо-востока Балтийского щита в палеопротерозое: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минералог. наук. — Санкт-Петербург, 2002. — 32 с.

Балаганский В. В., Глазнев В. Н., Осипенко Л. Г. Раннепротерзойская эволюция северо-востока Балтийского щита: террейновый анализ // Геотектоника. — 1998. — № 2. — С. 16—28.

Балаганский В. В., Минц М. В., Дэйли Дж. С. Палеопротерозойский Лапландско-Кольский ороген //Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программам EUROPROBE / Под ред. А. Ф. Морозова, Н. И. Павленковой. — Москва: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. — С. 158—171.

Балуев А. И. Геодинамика рифейского этапа эволюции северной пассивной окраины Восточно-Европейского кратона // Геотектоника. — 2006. — № 3. — С. 23—38.

Балуев А. И., Моралев В. П., Глуховский М. З., Пржиялговский Е. С., Терехов Е. Н. Тектоническая эволюция и магматизм Беломорской рифтовой системы // Геотектоника. — 2000. — № 5. — С. 30—43.

Бибикова Е. В., Слабунов А. И., Богданова С. В., Шельд Т. Тектонотермальная эволюция земной коры Карельской и Беломорской провинций Балтийского щита в раннем докембрии по данным уран-свинцового изотопного исследования сфенов // Геохимия. — 1999. — № 8. — С. 842—857.

Володичев О. И. Беломорский комплекс Карелии (геология и петрология). — Ленинград: Наука, 1990. — 248 с.

Геологическая карта Кольского региона / Под ред. Ф. П. Митрофанова. — Апатиты, 2001.

Глебовицкий В. А., Миллер Ю. В., Другова Г. М., Милькевич Р. И., Вревский А. Б. Структура и метаморфизм Беломоро-Лапландской коллизионной зоны // Геотектоника. — 1996. — № 1. — С. 63—75.

Глубинное строение и эволюция земной коры в восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь — Калевала / Отв. ред. Н.В. Шаров. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. — 194 с.

Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Под ред. Н. В. Шарова. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. — 353 с.

Журавлев В.А., Казанин Г.С., Павлов С.П. Структура осадочного чехла и перспективы нефтегазоносности Белого моря // Бурение и нефть. — 2006. — № 2. — С. 26—28.

Колодяжный С. Ю. Структурно-кинематическая эволюция юго-восточной части Балтийского щита в палеопротерозое // Тр. Геолог. ин-та РАН. — Москва: ГЕОС, 2006. — Вып. 572. — 332 с.

Марков М. С., Авакян К. Х., Баржицкий В. В., Богданова М. Н., Добржинецкая Л. Ф., Ефимов М. М., Кацура И. К., Пожиленко В. И., Шлайфштейн Б. А. Позднеархейские структурно-формационные зоны Кольского полуострова (к созданию геодинамической карты Кольского полигона). — Апатиты: КФ АН СССР, 1987. — 44 с.

Миллер Ю. В., Милькевич Р. И. Покровно-складчатая структура Беломорской зоны и ее соотношение с Карельской гранит-зеленокаменной областью // Геотектоника. — 1995. — № 6. — С. 80—93.

Минц М. В., Берзин Р. Г., Заможняя Н. Г., Ступак В. М., Сулейманов А. К., Бабарина И. И., Конилов А. Н. Строение и эволюция коры и верхней мантии восточной части Балтийско-

го щита: геологическая интерпретация сейсморазведочных материалов по профилю 4В // Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь — Калевала. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. — С. 157—190.

Минц М. В., Сулейманов А. К., Заможняя Н. Г., Ступак В. М. Объемная модель глубинного строения Карело-Беломорской области Фенноскандинавского щита: профили 1-ЕВ, 4В, FIRE-1 // Модели земной коры и верхней мантии. Матер. Междунар. науч.-практ. семинара. — Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2007. — С. 115—119.

Митрофанов Ф.П., Хильтова В.Я., Вревский А.Б. Эволюция архейской литосферы // Тектоника и некоторые проблемы металлогении раннего докембрия. — Москва: Наука, 1986. — С. 135—144.

Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В. Геология рудных районов Мурманской области. — Апатиты: КНЦ РАН, 2002. — 359 с.

Радченко А.Т., Балаганский В.В., Виноградов А.Н., Галеонко Г.Б., Петров В.П., Пожиленко В.И., Радченко М.К. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (Объясн. зап. к тектонической карте масштаба 1:500 000). — Санкт-Петербург: Наука, 1992. — 110 с.

Сакулина Т.С., Рослов Ю.В., Иванова Н.М. Глубинные сейсмические исследования в Баренцевом и Карском морях // Физика Земли. — 2003. — № 6. — С. 5—20.

Самсонов А.В., Берзин Р.Г., Заможняя Н.Г., Щипанский А.А., Бибикова Е.В., Кирнозова Т.И., Конилов А.Н. Процессы формирования раннедокембрийской коры Северо-Западной Карелии, Балтийский щит: результаты геологических, петрологических и глубинных сейсмических (профиль 4В) исследований // Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь — Калевала. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. — С. 109—143.

Слабунов А.И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Феноскандинавского щита). — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. — 296 с.

Слабунов А. И., Лобач-Жученко С. Б., Бибикова Е. В., Балаганский В. В., Сорьонен-Вард П., Володичев О.И., Щипанский А.А., Светов С.А., Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Степанов В.С. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки // Геотектоника. — 2006а. — № 6. — С. 3—32.

Слабунов А.И., Лобач-Жученко С.Б., Сорьйонен-Вард П., Бибикова Е.В., Голубев А.И., Володичев О.И., Светов С.А., Чекулаев В.П., Арестова Н.А. Неоархейский Карельский кратон // Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программам EUROPROBE // Под ред. А.Ф. Морозова, Н.И. Павленковой. — Москва: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006б. — С. 133—142.

Степанов В.С. Основной магматизм докембрия Западного Беломорья. — Ленинград: Наука, 1981. — 216 с.

Строение российской части Баренц-региона / Под ред. Н.В. Шарова, Ф.П. Митрофанова, М.Л. Вербы, К. Геллена. — Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2005. — 318 с.

Сыстра Ю.Й. Структурная эволюция беломорид Западного Беломорья. — Ленинград: Наука, 1978. — 168 с.

Daly J. S., Balagansky V. V., Timmerman M. J. de Jond K., Guise P., Whitehouse M. J. Ion microprobe U-Pb zircon geochronology and isotopic evidence supporting a trans-crustal suture in the Lapland Kola Orogen, northern Fennoscandian Shield // Precambrian Res. — 2001. — **105**. — P. 289—314.

Daly J.S., Balagansky V.V., Timmerma M.J., Whitehous M. J. The Lapland-Kola Orogen: Paleoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere // European Lithosphere Dynamics. Memoirs, 32 / Eds D.G. Gee, R.A. Stephenson. — London: Geological Society, 2006. — P. 579—598.

Gaál G., Gorbatschev R. An outline of the Precambrian evolution of the Baltic Shield // Precambrian Res. — 1987. — **35**. — P. 15—52.

Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield) / Ed. F.P. Mitrofanov. — Apatity. — 1995. — 145 p.

Finnish Reflection Experiment FIRE 2001—2005 / Eds I. T. Kukkonen, R. Lahtinen. — Espoo, 2006. — 247 p.

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Sorjonen-Ward P., Balagansky V. V., Volodichev O.I., Shchipansky A.A., Svetov S.A., Chekulaev V.P., Arestova N.A., Stepanov V.S. The Archaean nucleus of the Fennoscandian (Baltic) Shield. The Archean nucleus of the Fennoscandian (Baltic) Shield // European Lithosphere Dynamics. Memoirs, 32 / Eds D.G. Gee, R.A. Stephenson. — London: Geological Society, 2006. — P. 627—644.