

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ БЕЛОГО МОРЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Н. В. Шаров

Институт геологии ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (Петрозаводск, Российская Федерация)

В. А. Журавлев

ОАО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 25 января 2019 г.

Предполагается, что континентальная кора в рассматриваемом регионе была сформирована в архее, и структура докембрийских блоков сохранилась до настоящего времени. Позднее земная кора подверглась существенным преобразованиям лишь в ареалах тектоно-магматической активизации рифтогенной или плюмовой природы. Подтверждением этому служит совпадение в плане источников крупных аномалий гравитационного и магнитного полей на Фенноскандинавском щите и несовпадение формы и планового положения аномалий в северо-восточной части Мезенской синеклизы, что, очевидно, связано с проявлениями в раннем и позднем протерозое рифтогенеза и последующих активных тектоно-магматических процессов, наложенных на северо-восточный край Восточно-Европейской платформы. Структурно-вещественные особенности блоков проявляются в геофизических полях, а наиболее крупные прослеживаются на большую глубину. Линейные аномалии потенциальных полей протяженностью в сотни километров подтверждают делимость коры на крупные блоки. Геолого-геофизические данные, результаты определения возраста и степени метаморфизма пород, слагающих вещественные комплексы, свидетельствуют о том, что блоки сформировались в различных геодинамических условиях.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит, Белое море, литосфера, геофизические поля, сейсмическая модель, граница Мохоровичича.

Введение

Район акватории Белого моря расположен в северной части Восточно-Европейской платформы на восточном склоне Фенноскандинавского щита. Белое море является здесь центральным и ключевым объектом исследований, в связи с чем эта территория, куда входит и прилегающая к морю суша, носит название Беломорье или Беломорский регион. Несмотря на то что Белое море является единственным полностью внутренним морем России, геологическая изученность дна его акватории до последнего времени оставалась весьма слабой, и только в последние годы в бассейне Белого моря выполнены комплексные геофизические исследования [1—6]. Результаты этих и других работ, выполненных

на территории Беломорья, значительно меняют сложившиеся представления о строении земной коры региона. В монографии [7] рассмотрено тектоническое строение акватории Белого и южной части Баренцева морей и прилегающие к ним территории суши. Фактически она представляет собой объяснительную записку к тектонической карте региона, изданной в 2010 г., и синтезирует накопленные данные исследований последних лет.

В связи с развитием работ по освоению арктических территорий актуальным является получение новых и уточнение имеющихся данных о глубинном строении литосферы региона. Зона сочленения Фенноскандинавского щита и Русской плиты представляет большой интерес и важна в этом отношении. На сегодня Архангельская алмазоносная провинция (ААП) является второй после Якутии тер-

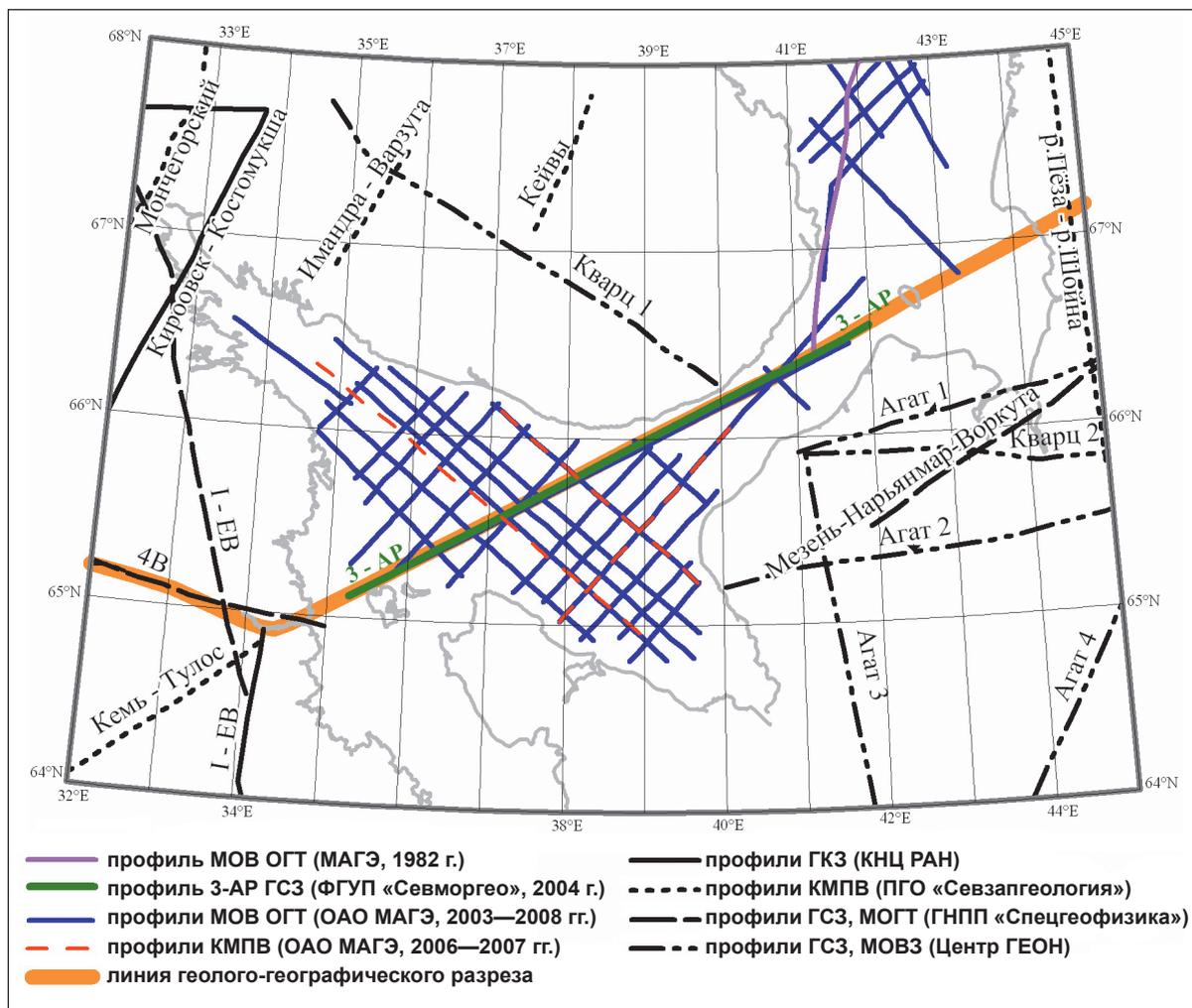


Рис. 1. Схема расположения сейсмических профилей в акватории Белого моря и на прилегающих территориях
 Fig. 1. The layout of seismic profiles in the White Sea waters and adjacent territories

риторией Российской Федерации с разведанными запасами коренных месторождений алмазов. На территории ААП кроме двух коренных месторождений алмазов (им. М. В. Ломоносова и им. В. В. Гриба) известно около 90 трубок и силлов щелочных ультраосновных пород. Последнее промышленное месторождение открыто более двадцати лет назад, но в регионе сохраняется потенциал открытия новых месторождений.

В данной работе представлены результаты изучения литосферы Беломорского региона, основанные на комплексном анализе материалов многолетних геолого-геофизических исследований, дополненных новейшими данными, что позволило выявить детали глубинного строения литосферы, уточнить ее состав и провести сопоставление этих неоднородностей с поверхностными структурами. Предложен опорный четырехслойный разрез земной коры, который может применяться для построения трехмерных комплексных геофизических моделей изучаемой среды Беломорья.

Характеристика морских геофизических работ

В 2003—2008 гг. в Воронке, Горле и Бассейне Белого моря ОАО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ) выполнила морские комплексные геофизические работы (МОВ ОГТ, гравиметрия, магнитометрия, непрерывное сейсмоакустическое профилирование), явившиеся по существу первыми исследованиями, позволившими охарактеризовать структуру осадочного чехла (рис. 1) и дать оценку нефтегазоносности Белого моря [2].

В 2004 г. ОАО МАГЭ выполнила 1700 км МОВ ОГТ на 11 профилях в Белом море и на одном профиле в Чешской губе. Длина активной части цифрового приемного устройства составляла 3000 м, количество сейсмических каналов — 240, расстояние между центрами групп сейсмических каналов — 12,5 м, кратность наблюдений — 60, длина записи — 6 с, шаг дискретизации — 2 мс. В качестве источника упругих колебаний использовалась линия из 10 пневмоисточников Bolt-1900LL-XT-AT

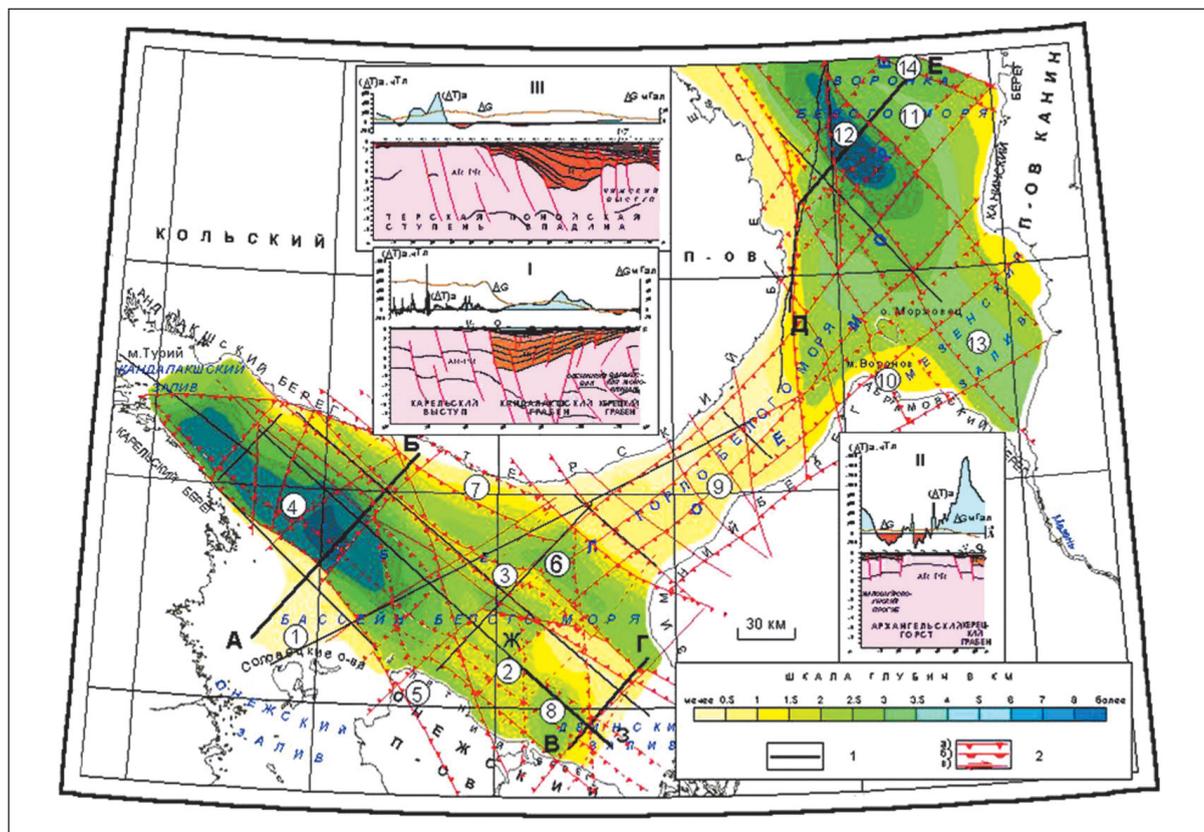


Рис. 2. Структурная схема поверхности гетерогенного фундамента [2]: I, II и III – геолого-геофизические разрезы по линиям А-В, В-Г и Д-Е; 1 – профили МОВ ОГТ; 2 – тектонические нарушения: а – сбросы, б – надвиги, в – сдвиги. Цифрами в кружках обозначены основные структурные элементы фундамента: 1 – Карельский выступ, 2 – Архангельский горст, 3 – Оленийский вал, 4 – Кандалакшский грабен, 5 – Онежский грабен, 6 – Керецкий грабен, 7 – Варзугская моноклинали, 8 – Малошуйско-Унский прогиб, 9 – Терская ступень, 10 – Кулойский выступ, 11 – Чижский выступ, 12 – Понойская впадина, 13 – Мезенский грабен, 14 – Шойнинский прогиб

Fig. 2. Structural diagram of the heterogeneous basement surface [2]: I, II and III – geological and geophysical sections along lines A-B, C-D and E-F; 1 – the RM CDP profiles; 2 – tectonic dislocations: a – faults, б – thrusts, в – shifts. Numbers in circles indicate the main structural units of the basement: 1 – Karelian scarp, 2 – Arkhangelsky horst, 3 – Olenitsky bar, 4 – Kandelaksha graben, 5 – Onega graben, 6 – Keretsky graben, 7 – Varzuga monocline, 8 – Maloshiysko-Unsky downwarp, 9 – Terskaya step, 10 – Kuloy projection, 11 – Chizhsky projection, 12 – Ponoys depression, 13 – Mezen graben, 14 – Shoininsky downfold

общим объемом 1500 куб. дюймов. Интервал возбуждения упругих колебаний — 25 м. Одновременно ФГУП «Севморгео» выполнило работы методом ГСЗ на профиле 3-AP. Расстояние между донными станциями — 5—10 км. Длина годографов — до 300 км [3; 4].

В работах МОВ ОГТ, выполненных ОАО МАГЭ в 2007—2008 гг. в объеме 2000 км, использовалась цифровая сейсмическая коса «Sercel Fluid-filled streamer» с длиной активной части 6000 м. Количество каналов — 480, расстояние между центрами групп сейсмических каналов — 12,5 м, минимальная кратность наблюдений — 120, длина записи — 8 с, шаг дискретизации — 2 мс. Для возбуждения упругих колебаний использовался массив из 20 пневмоисточников (две линии) BOLT 1500/1900 LL-X суммарным объемом 3400 куб. дюймов.

Морские сейсмические исследования методом преломленных волн выполнены ОАО МАГЭ в 2006—

2007 гг. в объеме 400 км на 3 профилях. Использовались трехкомпонентные автономные донные сейсмические станции (АДСС). Расстояние между АДСС на профиле составляло 10 км. Параметры регистрации сейсмических записей: шаг дискретизации — 4 мс, длина сейсмической записи — 60 с.

Структура осадочного чехла

По результатам проведенных геофизических работ установлено, что выделенные ранее на сопредельной суше две системы позднепротерозойских (рифейских) рифтогенных прогибов — Беломорская и Мезенская — прослеживаются на акваторию Белого моря. К Мезенской рифтовой системе относятся Мезенский грабен и Понойская впадина, выделяемые в Мезенском заливе и Воронке. Грабены Беломорской рифтовой системы Кандалакшский, Керецкий и Онежский пространственно связаны с Бассейном Белого моря (рис. 2). Осадочный чехол по

Таблица 1. Усредненная скоростная модель земной коры региона

Слой коры	Средняя скорость, км/с	Диапазон глубин, км
Осадочный	4,55	0—10
Гранитно-метаморфический K_1	6,13	0—20
Гранулит-базитовый K_2	6,65	20—32
Переходный коромантийный K_3	7,21	30—44
Верхняя мантия	8,13	

мощности разделяется на три области, соответствующие частям акватории Белого моря: *Бассейн*, *Горло* и *Воронку*. *Горло* практически лишено осадочного покрова и с точки зрения перспектив нефтегазоносности не представляет интереса.

Выявленные структурные осадочные бассейны *Воронки* и *Бассейна* Белого моря, по-видимому, являются реликтами единого обширного рифейского седиментационного протобассейна. Современные структурные планы бассейнов сформировались в результате мощных предвендских и последующих тектонических перестроек. Осадочные разрезы рифейских структурных бассейнов *Воронки* и *Бассейна* сопоставимы по мощности и стратиграфическому диапазону, но имеют некоторые структурные различия, существенные для оценки перспектив нефтегазоносности. Структурный осадочный бассейн *Бассейна* более сложно построен и более обособлен по сравнению с осадочным бассейном *Воронки*.

В осадочной толще *Бассейна* Белого моря выделяются три пространственно обособленных структурных комплекса — *кандалакшский*, *малашуйско-унский* и *керецкий*, приуроченные к одноименным грабенообразным прогибам. Глубина погружения кристаллического фундамента в Кандалакшском грабене достигает 8 км, что вполне сопоставимо с современным Байкальским рифтом. Такие же глубины залегания кристаллического фундамента (8—10 км и более) наблюдаются в грабенах рифтовой системы Белого моря в пределах мезенской синеклизы [8; 9]. Структурная обстановка, характеризующая комплексы осадочного бассейна *Воронки* Белого моря, не выглядит такой сложной. Наиболее полно осадочная толща рифея представлена в *Понойской впадине*. Сейсмическая характеристика ее разреза в целом соответствует описанию толщ рифея в грабенах Беломорско-Лешуконско-Мезенской рифтовой системы, выделенных на суше [9]. Стратификация рифейских отложений выполнена по разрезам Усть-Няфтинской и Средне-Няфтинской скважин. По аналогии с сушей можно предположить, что нижний седиментационный комплекс *Понойской впадины* соответствует отложениям раннего-среднего рифея, а верхний — позднему рифею. Верхний (R_3) и нижний (R_{1-2}) комплексы пространственно со вмещены и перекрывают друг друга.

Осадочный чехол *Воронки* с резкими изменениями мощности перекрывает структуры фундамента: *Терскую ступень*, *Понойскую впадину* и *Чижский выступ*. Наибольшая мощность (более 8 км) осадочных образований связана с нижним (R_{1-2}) седиментационным комплексом, приуроченным к *Понойской впадине*.

Геолого-геофизическая изученность (прежде всего сейсморазведкой МОВ ОГТ) осадочных бассейнов Белого моря остается недостаточной. Необходимо дальнейшее геолого-геофизическое изучение региона с целью оценки перспектив его нефтегазоносности с последующим бурением параметрических скважин в *Бассейне* и *Воронке* [2].

Построение геолого-геофизических разрезов

Для изучения глубинного строения земной коры региона привлечены результаты гравиметрических и магнитных съемок, представленные в виде карт масштаба 1:1 000 000, а также сейсмические материалы разных лет [1; 10—13]. При построении геологической модели среды использовались результаты геофизических исследований (см. рис. 1) вдоль геотраверсов 3-AP, 1-EB, КВАРЦ, АГАТ и др., привлекались сводные геолого-геофизические карты и схемы [5].

При построении сейсмоплотностной модели консолидированной коры региона в качестве исходной информации выбрана ранее полученная четырехслойная скоростная модель земной коры [13; 14]. Эта модель имеет следующие характеристики: верхний слой (верхний этаж) — $V_p = 5,90—6,20$ км/с, $\rho = 2,60—2,75$ г/см³; средний — $V_p = 6,30—6,50$ км/с, $\rho = 2,75—2,90$ г/см³; нижний — $V_p = 6,60—6,80$ км/с, $\rho = 2,90—3,00$ г/см³; четвертый высокоскоростной слой — $V_p = 7,00—7,30$ км/с, $\rho = 3,00—3,20$ г/см³; мантия — $V_p = 8,00—8,20$ км/с, $\rho = 3,40$ г/см³.

Сводная характеристика слоев модели среды приведена в табл. 1, где наряду со значениями средних скоростей продольных волн в слоях показан диапазон глубинного положения геологических и сейсмических границ в коре изучаемого региона.

В результате обобщения сейсмических данных и сейсмогравитационного моделирования построен трехслойный разрез земной коры, где выделены:

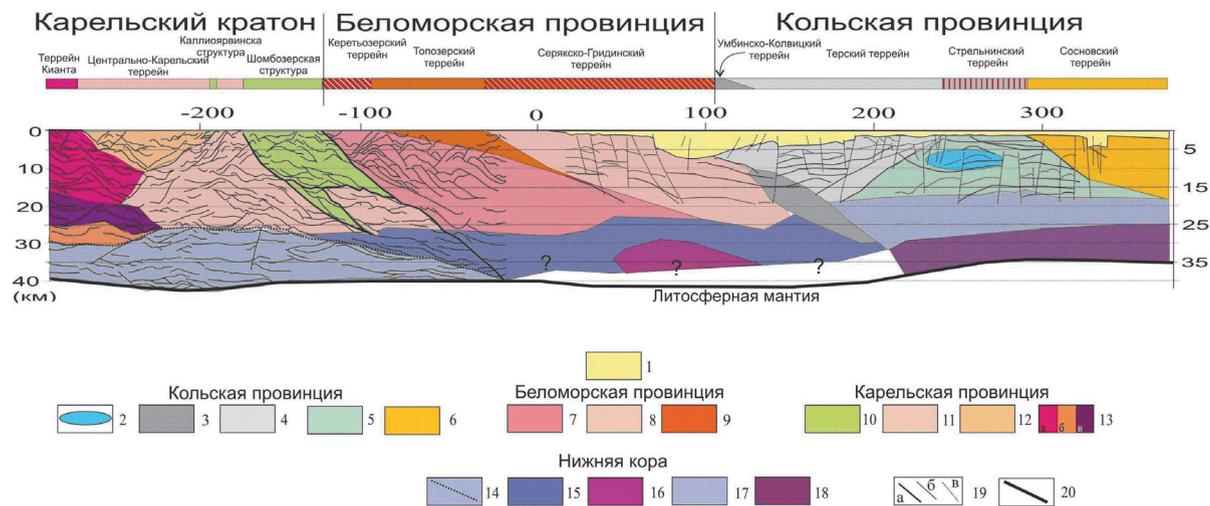


Рис. 3. Геолого-геофизический разрез земной коры по линии Калевала – Кемь – Горло Белого моря профилями 3-AP (Кемь – Горло Белого моря) и 4B (Кемь – Калевала) [15]: 1–13 – структуры верхней и средней коры: 1 – неопротерозойская палеорифтовая системы Белого моря; 2–6 – структуры Кольской провинции: 2 – палеопротерозойские высокоскоростные мафит-ультрамафитные массивы, 3 – Колвицкий и Умбинский террейны, 4 – Терский терреин, 5 – Стрельнинский терреин, 6 – Сосновский терреин; 7–9 – структуры (террейны) Беломорской провинции: 7 – Керетьозерский (гранит-зеленокаменный); 8 – Серакско-Гридинский (гранит-зеленокаменно-эколитовый), 9 – тодозерский (метачарнокитовый); 10–13 – структуры Карельской провинции: 10 – Палеопротерозойские палеорифтогенные (Шомбозерская, Каллиоярвинская); 11, 12 – Центрально-Карельский терреин: 11 – восточный фрагмент (неоархейские гранитоиды, санукитоиды, зеленокаменные комплексы), 12 – западный фрагмент (неоархейские гранитоиды, палеопротерозойские рои даек базитов); 13 – терреин 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 ($V_p > 7,5$ км/с) слой Беломорской провинции; 17 – нижнекоровый слой Кольской провинции; 18 – высокоскоростной ($V_p > 7,5$ км/с) слой Кольской провинции; 19 – сейсмоотражающие поверхности на профилях МОВ ОГТ: а – надвиги; б – границы сейсмически контрастных комплексов; в – разломы; 20 – граница Мохо

Fig. 3. Geological and geophysical crust cross-section along the line Kalevala – Kem – the White Sea outlet, profiles 3-AP (Kem – the White Sea outlet) and 4B (Kem – Kalevala) [15]: 1–13 – upper and middle crustal structures: 1 – the White Sea Neoproterozoic paleorift systems; 2–6 – the Kola Province structures: 2 – Paleoproterozoic high-velocity mafic-ultramafic massifs, 3 – Kolvitsa and Umba terrains, 4 – Tersky terrain, 5 – Strelina terrain, 6 – Sosnovsky terrain; 7–9 – the White Sea Province structures (terrains): 7 – the Keret Lake minerals (granite-greenstone); 8 – Seryak-Gridinsky (granite-greenstone-eclogite), 9 – the Topozero minerals (meta-Charnockite); 10–13 – the Karelian Province structures: 10 – Paleoproterozoic paleorift-related (Shombozerskaya, Kalliojärvinская); 11, 12 – Central Karelian terrain, 11 – eastern fragment (Neo-Archean granitoids, sanukitoids and greenstone complexes), 12 – western fragment (Neo-Archean granitoids, Paleoproterozoic basic dyke swarms); 13 – Kianta terrain: a – granitoids, greenstone complexes, granulites, b – granitoids, greenstone complexes, c – Archean oceanic crust; 14–18 – Lower crust structures: 14 – seismically contrasting layer of the Karelian Craton, dotted line – its upper boundary; 15 – seismically low-contrast layer of the White Sea Province and its craton-contact zone; 16 – high-velocity ($V_p > 7.5$ km/s) layer of the White Sea Province; 17 – the lower crustal layer of the Kola Province; 18 – high-velocity ($V_p > 7.5$ km/s) layer of the Kola Province; 19 – seismic reflecting surfaces on the RM-CDP profiles: a – thrusts; b – boundaries of seismically contrasting complexes; v – faults; 20 – M-discontinuity border

осадочный чехол, верхняя, средняя, нижняя коры. Подошва осадочного чехла показана на рис. 2 в виде изогипс поверхности дорифейского фундамента.

Граница K_1 , выделяемая по данным сейсмических наблюдений и условно связываемая с подошвой гранитно-метаморфического слоя, представляется границей, отделяющей этажи со скоростью продольных и поперечных волн 5,8—6,4 км/с и 3,5—3,8 км/с (верхняя кора), 6,3—6,8 км/с и 3,6—3,9 км/с (средняя кора). Но чаще эта граница отделяет верхний слой коры с резко меняющейся скоростью по латерали от ослабленного промежуточного, где скорость меняется в более узких пределах (6,2—6,4 км/с). Рельеф кровли средней коры прослежен на глубинах от 10 до 20 км. Изогипсы поверхности K_1 в основном

совпадают с простираением главных тектонических элементов.

Профиль «Суша-Море» Калевала — Кемь — Горло Белого моря. 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. 3). Линия геолого-геофизического профиля показана на рис. 1. 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 [15].

В составе Карельской провинции с запада на восток выделяются четыре главных 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. Вероятно, в неогархее к относительно древнему (с возрастом коры 3,1—2,65 млрд лет) континентальному блоку Кианта был аккрецирован более молодой (с возрастом коры 2,8—2,65 млрд лет) Центрально-Карельский террейн. Неогархейский надвиг сохранился как погружающаяся на восток граница между террейном Кианта и западной пластиной Центрально-Карельского террейна (см. рис. 3).

В основании террейна Кианта отчетливо выделяются две составляющие: одна с обилием отражающих сейсмических поверхностей и другая, подстилающая ее, относительно однородная. 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. 3).

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 неогархейских и свекофенских коллизионных процессов.

Глубинное строение земной коры региона

К настоящему времени накоплен обширный сейсмический материал, освещающий глубинное строение сухопутной части Беломорья. Многосторонний опыт показал, что поверхность Мохоровичича (ПМ) представляет собой наиболее выдержанную сейсмическую границу, которая создает устойчивые отраженные, преломленные и обменные волны. Это обстоятельство дает возможность рассматривать данную поверхность в качестве опорного сейсмического репера и, следовательно, изображать ее на соответствующих картах системой специальных изогипс.

Схема мощности земной коры по сейсмическим данным представлена на рис. 4. Сечение изогипс рельефа принято равным 2 км. Мощность земной коры

в регионе изменяется от 30 до 50 км и отражает основные структурно-тектонические закономерности строения. Данные глубинной сейсморазведки и две крупные положительные гравитационные аномалии свидетельствуют о том, что в северо-восточной части Мезенской синеклизы земная кора утонена. Здесь зафиксирована минимальная мощность коры — 30 км. Мощность земной коры на западе Кольского полуострова составляет 40—45 км, на востоке — 35—38 км, в Белом море она достигает 38—42 км.

Подводя итог изложенному, следует подчеркнуть, что приведенная схема рельефа ПМ отражает ее строение лишь в самых общих чертах. Фактически данная поверхность может быть гораздо сложнее, так как в отдельных сечениях зоны ее поднятия и погружения имеют довольно большие амплитуды.

Проверка показала, что в области допустимых вариаций плотности общий характер поведения нижней границы меняется слабо. Взаимоположение внутрикоровых границ и поверхности М коррелировано и имеет широкую область эквивалентных решений. Для локальной составляющей, отражающей распределение плотностных неоднородностей в гранито-гнейсовом слое, существенные ограничения, приводящие к устойчивости модели, накладываются при комплексном использовании геолого-геофизических данных.

На построенной глубинной модели (см. рис. 4) выделяются тектонические области (геоблоки): Мурманская, Тимано-Канинская, Кольская, Мезенская и Карельская, а также ряд блоков. Мурманский геоблок на Кольском полуострове представляет северо-восточный край Фенноскандинавского щита. Тимано-Канинский геоблок представлен Канино-Северотиманским мегавалом, который входит в состав Тимано-Печерской плиты. Кольский, Мезенский и Карельский геоблоки представлены структурно-вещественными комплексами Мезенской синеклизы и относятся к Русской плите. Блоковое районирование по типам земной коры выполнено по геофизическим данным.

Мурманский геоблок на Кольском полуострове сложен гранито-гнейсами и гранитоидами с включениями супракрустальных пород и характеризуется как позднеархейский (2,7—2,8 млрд лет) кратон. Судя по геофизическим данным, его структуры составляют фундамент Понойского перикратонного прогиба, выделенного в Воронке Белого моря.

Тимано-Канинский геоблок расположен в северо-восточной части площади. Результаты сейсморазведки и моделирования свидетельствуют о том, что Тимано-Канинский геоблок имеет двухъярусное (складчатое и кристаллическое) строение верхней коры. Суммарная мощность верхней коры и осадочного чехла составляет 14—16 км. Мощность складчатых пород рифея оценивается в 8—9 км. Для подстилающего рифейские по-

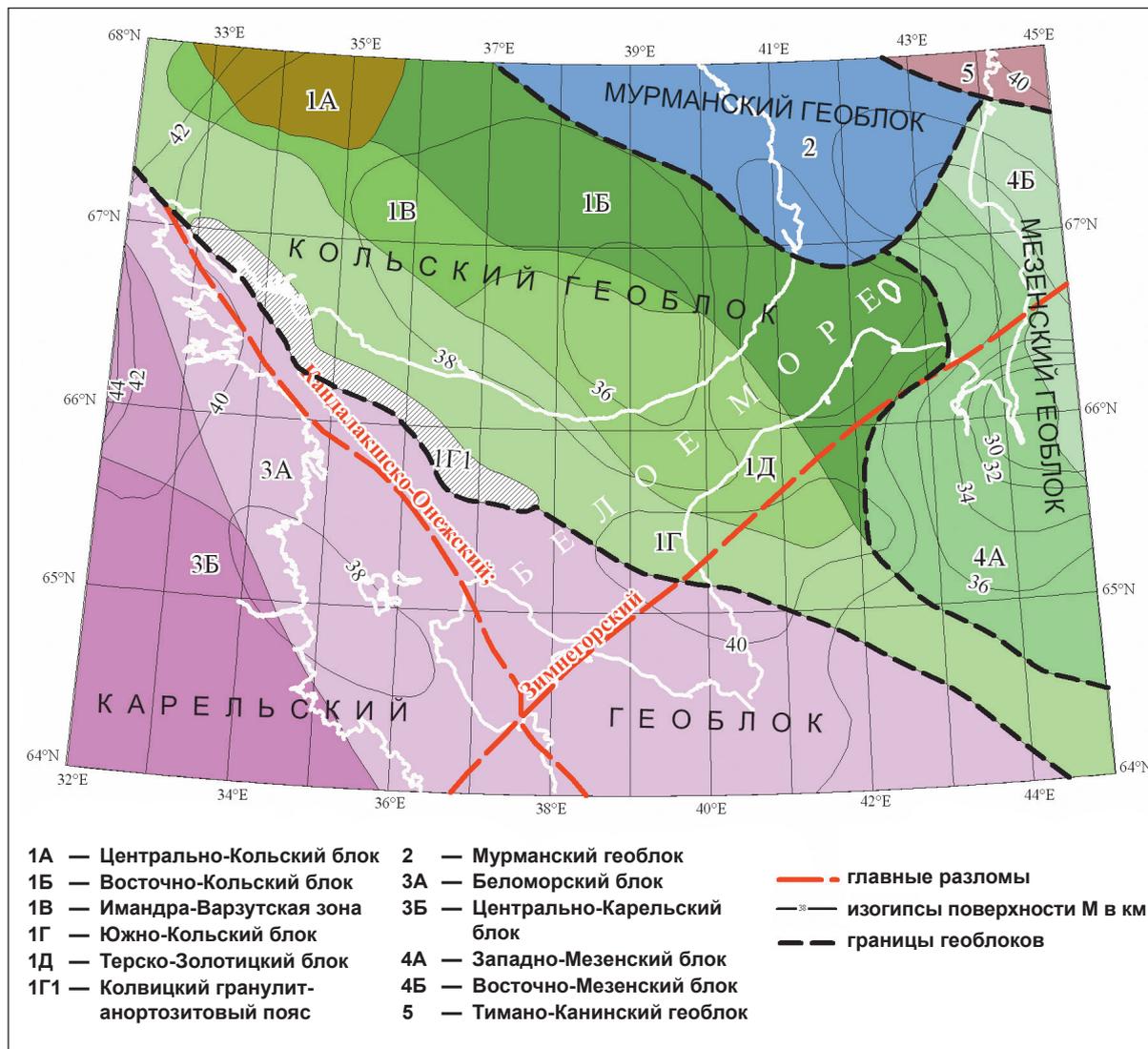


Рис. 4. Схема глубинного строения земной коры региона
Fig. 4. Scheme the region deep crustal structure

роды кристаллического фундамента характерны повышенные скорости продольных волн (6,15—6,35 км/с). Мощность земной коры здесь 38—40 км.

Мезенский геоблок расположен в пределах Мезенской синеклизы и рассматривается как перикратонная часть Восточно-Европейской платформы.

Мезенская синеклиза сформировалась над системой палеорифтов (рифейских авлакогенов), возникших за счет растяжения земной коры на континентальной окраине Восточно-Европейской платформы. Рифты представлены системой субпараллельных грабенообразных прогибов протяженностью в сотни километров. Грабены, как правило, асимметричны, сегментированы и выполнены образованиями рифея мощностью до 8—10 км. Сегменты разделены кулисообразными перемычками. Горсты, разделяющие грабены, прослеживаются в виде цепи разноуровневых поднятий.

Данные глубинной сейсморазведки и две крупные положительные гравитационные аномалии в Воронке Белого моря и устье реки Мезень — Мезенский и Конушенский гравитационные максимумы — свидетельствуют о том, что в северо-западной части Мезенской синеклизы земная кора утонена. Здесь сейсморазведкой зафиксирована наименьшая на Русской плите глубина залегания поверхности М — 27—30 км. Предполагается, что утонение коры связано с внедрением мантийных диапиров. На глубине 12—22 км выделяется зона пониженных (на 0,1—0,3 км/с) скоростей. При резком подъеме нижних границ коры появляются тела с высокой скоростью, которым соответствуют положительные аномалии магнитного поля [12].

Мезенский геоблок состоит из двух блоков: Западно-Мезенского и Восточно-Мезенского, выде-

ляемых по характерным аномалиям физических полей и мощности осадочного чехла.

Восточно-Мезенский блок, представляющий внешнюю часть перикратона, характеризуется большой мощностью (до 5—6 км) венд-фанерозойских осадков и высокими значениями граничной скорости продольных волн вдоль поверхности М (8,2—8,4 км/с).

Западно-Мезенский блок представляет внутреннюю часть перикратона, характеризующуюся мало-мощным (до 1 км) венд-палеозойским чехлом.

Кольский геоблок состоит из сложного ансамбля блоков с различным строением и геологической историей. На Фенноскандинавском щите он рассматривается как гранит-зеленокаменная (гранулит-зеленокаменная) область, претерпевшая структурно-метаморфические преобразования в архее и раннем протерозое. Геоблок представлен юго-восточной частью Восточно-Кольского и Южно-Кольского блоков [13].

Юго-восточная часть Восточно-Кольского блока на Кольском полуострове сложена гранитами и гранитогнейсами нижней части архейской коры. Структуры этого блока по характерным аномалиям потенциальных полей прослеживаются через Горло Белого моря, на Зимнем берегу представлены Кулойским выступом и служат фундаментом северо-западного замыкания Лешуконского грабена.

Южно-Кольский блок прослеживается на протяжении нескольких сотен километров от юго-восточного побережья Кольского полуострова на акваторию Белого моря, Зимний берег и далее на юго-восток, где представляет структуру Керецко-Пинежского грабена, выполненного породами рифея мощностью около 7 км. Фундамент Южно-Кольского блока на Кольском полуострове и Зимнем берегу сложен мигматит-анатектит-гранитами и гранитогнейсами архея, частично переработанными в раннем протерозое. Данные петрогеохимических и изотопных исследований свидетельствуют о том, что Южно-Кольский блок, вероятно, подвержен тектоно-термальной переработке в палеопротерозое и относится к Беломорскому подвижному поясу.

Граница между Карельской и Кольской тектоническими областями проходит по крупной тектонической зоне (см. рис. 4), которая прослежена на акватории Белого моря в результате морских геофизических исследований. Она отчетливо проявляется локальными положительными аномалиями на картах потенциальных полей. По мнению ряда авторов, раннепротерозойские эндербит-чарнокитовый и метаморфические комплексы Умбинский и Порьей губы, выделенные на южном побережье Кольского полуострова, представляют юго-восточное продолжение крупного коллизионного шва (1,95—1,90 млрд лет) Лапландско-Кольского орогена, расположенного между Карельским и Кольским архейскими кратонами.

Карельская тектоническая область в пределах площади представлена Беломорским блоком. Кандалакшско-Онежским разломом блок разделен

на две части. Данные сейсморазведки свидетельствуют о том, что с глубиной разлом выполаживается и, вероятно, уходит в нижнюю кору. Беломорский блок вместе с Южно-Кольским блоком многие авторы представляют в составе Беломорского подвижного пояса — позднеархейской коллизионной структуры, переработанной раннепротерозойскими процессами рифтогенеза и орогении. Среди архейских комплексов широко развиты зеленокаменные пояса, наиболее вероятный возраст которых оценивается в 2,7 млрд лет.

Заключение

Структура земной коры региона имеет сложное мозаично-неоднородное строение. Блоки ограничены зонами глубинных и других крупных разломов, рассекающих всю кору или отдельные ее слои и обуславливающие тем самым дискретность ее структуры в горизонтальном направлении. Ни одна из промежуточных границ в коре не прослеживается повсеместно, но это не значит, что региональной расслоенности не существует. Она проявляется в закономерном изменении физических свойств вещества с глубиной, в сохранении мощности отдельных скоростных этажей для одинаковых геоструктур.

В целом сравнительный анализ волновых полей по всем профилям региона позволяет выбрать некую общую (базовую) модель земной коры, которую можно использовать как исходную для выявления общих тенденций изменения физических параметров кристаллической коры по площади. Такая модель является определенной формой аппроксимации реальной скоростной структуры коры, она позволяет представлять разрезы для всех профилей в единой форме и проводить построение трехмерной скоростной модели.

В качестве такой опорной модели для кристаллической коры исследуемого региона была выбрана четырехслойная модель со скоростями продольных волн 5,9—6,2 км/с в верхнем слое (верхний этаж), 6,3—6,5 км/с в среднем и 6,6—6,8 км/с в нижнем, в переходном коромантийном. Слои разделены отражающими горизонтальными K_1 , K_2 , K_3 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 следует, что 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 на юге востока Кольского полуострова

и в отдельных частях Белого моря, а также в северной части Архангельской области. В остальной части мощность верхней коры изменяется 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 AP-3 в Белом море и под Мезенской структурой до 25 км, а также на Кольском полуострове, на фоне средних глубин 28—30 км в других частях региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00481 «Строение и динамика литосферы Беломорья».

Литература

1. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Ред. Н. В. Шаров, Ф. П. Митрофанов, М. Л. Верба, К. Гиллен. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. — 318 с.
2. Казанин Г. С., Журавлев В. А., Павлов С. П. Структура осадочного чехла и перспективы нефтегазоносности Белого моря // Бурение и нефть. — 2006. — № 2. — С. 26—28.
3. Хераскова Т. Н., Сапожников Р. Б., Волож Ю. А., Антипов М. П. Геодинамика и история развития севера Восточно-Европейской платформы в позднем докембрии по данным регионального сейсмического профилирования // Геотектоника. — 2006. — № 6. — С. 33—51.
4. Журавлев В. А. Структура земной коры Беломорского региона // Разведка и охрана недр. — 2007. — № 9. — С. 22—26.
5. Журавлев В. А., Шипилов Э. В. Строение бассейнов Беломорской рифтовой системы // Океанология. — 2008. — Т. 48, № 1. — С. 123—131.
6. Система Белого моря. — Т. 4: Процессы осадкообразования, геология и история. — М.: Науч. мир, 2017. — 1030 с.
7. Балугев А. С., Журавлев В. А., Терехов Е. Н., Пржиляговский Е. С. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий (Объяснительная записка к «Тектонической карте Белого моря и прилегающих

территорий масштаба 1:500 000»). — М.: ГЕОС, 2012. — 104 с.

8. Сапожников Р. Б. Эффективность сейсморазведки МОВ ГТ при изучении геологического строения Мезенской синеклизы // Разведка и охрана недр. — 2003. — № 5. — С. 32—35.
9. Геодинамика и возможная нефтегазоносность Мезенского осадочного бассейна / Ред. С. В. Аглонов, Д. Л. Федоров. — СПб.: Наука, 2006. — 319 с.
10. Балугев А. С., Журавлев В. А., Пржиляговский Е. С. Новые данные о строении Центральной части палеорифтовой системы Белого моря // ДАН. — 2009. — Т. 427, № 3. — С. 348—353.
11. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Ред. Н. В. Шаров. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. — 353 с.
12. Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования // Материалы Международного научно-практического семинара 18—20 сентября 2007 г. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. — 245 с.
13. Шаров Н. В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. — 173 с.
14. Mitrofanov F. P., Sharov N. V., Zagorodny V. G. et al. Crustal Structure of the Baltic Shield Along the Pechenga-Kostomuksha-Lovisa Geotraverse // Intern. Geology Rev. — 1998. — Vol. 40, № 11. — P. 990—997. — DOI: 10.1080/00206819809465250.
15. Шаров Н. В., Слабунов А. И., Исанина Э. В. и др. Сейсмический разрез земной коры по профилю ГС3-ОГТ «Суша-море» Калевала-Кемь-горло Белое море // Геофиз. журн. — 2010. — Т. 32, № 5. — С. 21—34.
16. Балугев А. С., Брусиловский Ю. В., Иваненко А. Н. Структура земной коры Онежско-Кандалакшского палеорифта по данным комплексного анализа аномального магнитного поля акватории Белого моря // Геодинамика и тектонофизика. — 2018. — Т. 9, № 4. — С. 1293—1312. — DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0396.
17. Журавлев В. А., Шипилов Э. В. Новые данные о тектонике и структуре осадочного чехла Беломорской рифтовой системы // ДАН. — 2007. — Т. 417, № 6. — С. 786—791.

Информация об авторах

Шаров Николай Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (185910, Россия, Республика Карелия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11), e-mail: sharov@krc.karelia.ru.

Журавлев Виталий Алексеевич, начальник комплексной геолого-геофизической партии, ОАО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (183038, Россия, Мурманск, ул. Софьи Перовской, д. 26), e-mail: vitalyzh@mage.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Шаров Н. В., Журавлев В. А. Строение земной коры Белого моря и прилегающих территорий // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 62—72. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-62-72.

THE CRUSTAL STRUCTURE OF THE WHITE SEA AND ADJACENT TERRITORIES

Sharov N. V.

Federal Research Centre, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
Institute of Geology (Petrozavodsk, Russian Federation)

Zhuravlev V. A.

Marine Arctic Geological Expedition (Murmansk, Russian Federation)

The article was received on January 25, 2019

Abstract

It is assumed that the continental crust in the region under consideration was formed in the Archean, and the structure of the Precambrian blocks has survived to the present. Later, the crust underwent significant transformations only in the areas of tectono-magmatic activation of a rift or plume nature. This is confirmed by the coincidence in terms of the sources of large anomalies of the gravitational and magnetic fields on the Fennoscandinavian shield and the discrepancy between the shape and the planned position of the anomalies in the north-eastern part of the Mezen syncline, which is obviously associated with manifestations in early and late Proterozoic rifting and subsequent active tectonic-magmatic processes imposed on the northeast edge of the East European Platform.

Structural and compositional features of the blocks are manifested in geophysical fields, and the largest can be traced to great depths. Linear anomalies of potential fields extending over hundreds of kilometers confirm the crust split into large blocks. Geological and geophysical data, as well as the age dating and metamorphic grade of the rocks that constitute the rock complexes indicate that the blocks were formed in various geodynamic conditions.

Keywords: *Fennoscandinavian Shield, the White Sea, lithosphere, geophysical fields, seismic model, M-discontinuity border.*

The study conducted in the frames of the Research Project 19-05-00481 “Lithospheric structure and dynamics of the White Sea Region” was funded by RFBR

References

1. Stroenie litosfery rossiiskoi chasti Barents-regiona. [Lithospheric structure of the Russian Barents region]. Red. N. V. Sharov, F. P. Mitrofanov, M. L. Verba, K. Gillen. Petrozavodsk, KarNTs RAN, 2005, 318 p. (In Russian).
2. Kazanin G. S., Zhuravlev V. A., Pavlov S. P. Struktura osadochnogo chekhla i perspektivy neftegazonosnosti Belogo morya. [Structure of the sedimentary cover and petroleum capacities of the White Sea]. *Burenie i neft'*, 2006, no. 2, pp. 26—28. (In Russian).
3. Kheraskova T. N., Sapozhnikov R. B., Volozh Yu. A., Antipov M. P. Geodinamika i istoriya razvitiya severa Vostochno-Evropeiskoi platformy v pozdnem dokembrii po dannym regional'nogo seismicheskogo profilirovaniya. [Late Precambrian geodynamics and evolution of the northern East European Platform, as shown by regional seismic profiling data]. *Geotektonika*, 2006, no. 6, pp. 33—51. (In Russian).
4. Zhuravlev V. A. Struktura zemnoi kory Belomorskogo regiona. [The crustal structure of the White Sea region]. *Razvedka i okhrana neдр*, 2007, no. 9, pp. 22—26. (In Russian).
5. Zhuravlev V. A., Shipilov E. V. Stroenie basseinov Belomorskoi riftovoi sistemy. [Structure of the Belomorian rift system basins]. *Okeanologiya*, 2008, vol. 48, no. 1, pp. 123—131. (In Russian).
6. Sistema Belogo morya. Vol. 4. Protsessy osadkobrazovaniya, geologiya i istoriya. [The White Sea System. Vol. 4. The processes of sedimentation, geology and history]. Moscow, Nauch. mir, 2017, 1030 p. (In Russian).
7. Baluev A. S., Zhuravlev V. A., Terekhov E. N., Przhivalgovskii E. S. Tektonika Belogo morya i priliegayushchikh territorii. (Ob'yasnitel'naya zapiska k “Tektonicheskoi karte Belogo morya i priliegayushchikh territorii masshtaba 1:500 000”). [Tectonics of the White Sea and Adjacent Areas. The Explanatory Notes to “The Tectonic Map of White Sea and Adjacent Areas”, at a Scale of 1:500000]. Moscow, GEOS, 2012, 104 p. (In Russian).
8. Sapozhnikov R. B. Effektivnost' seismorazvedki MOV GT pri izuchenii geologicheskogo stroeniya Mezenskoi sineklizy. [Efficiency of RM DP seismic prospecting for the study of the geological structure of the Mezen syncline]. *Razvedka i okhrana neдр*, 2003, no. 5, pp. 32—35. (In Russian).
9. Geodinamika i vozmozhnaya neftegazonosnost' Mezenskogo osadochnogo basseina. [Geodynamics and Possible Oil and Gas Potential of the Mezensk Sedimentary Basin]. Red. S. V. Aplonov, D. L. Fedorov. St. Petersburg, Nauka, 2006, 319 p. (In Russian).

10. *Baluev A. S., Zhuravlev V. A., Przhiyalgovskii E. S.* New data on structure of the central part of the White Sea paleorift system. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 427, no. 2. pp. 891—896. DOI: 10.1134/S1028334X09060014.
11. Glubinnoe stroenie i seismichnost' Karel'skogo regiona i ego obramleniya. [Deep structure and seismicity of the Karelian region and its margins]. Red. N. V. Sharov. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2004, 353 p. (In Russian).
12. Modeli zemnoi kory i verkhnei mantii po rezul'tatam glubinnogo seismoprofilirovaniya. Materialy Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminaru 18—20 sentyabrya 2007 g. [Models of the Earth's crust and upper mantle by deep seismic profiling. Papers of the International Symposium 18—20 September, 2007]. St. Petersburg, Izd-vo VSEGEI, 2007, 245 p. (In Russian).
13. *Sharov N. V.* Litosfera Severnoi Evropy po seismicheskim dannym. [Lithosphere of Northern Europe: seismic data]. Petrozavodsk, KarNTs RAN, 2017, 173 p. (In Russian).
14. *Mitrofanov F. P., Sharov N. V., Zagorodny V. G., Glaznev V. N., Korja A. K.* Crustal Structure of the Baltic Shield Along the Pechenga-Kostomuksha-Lovisa Geotraverse. *Intern. Geology Rev*, 1998, vol. 40, no. 11, pp. 990—997. DOI: 10.1080/00206819809465250.
15. *Sharov N. V., Slabunov A. I., Isanina E. V. et al.* Seismicheskii razrez zemnoi kory po profilyu GSZ-OGT "Susha-more" Kalevala-Kem'-gorlo Beloe more. [Seismic simulation of Earth Crust on the profiles DSS –CDP Kalevala-Kem'-White Sea]. *Geofiz. zhurn.*, 2010, vol. 32, no. 5, pp. 21—34. (In Russian).
16. *Baluev A. S., Brusilovskii Yu. V., Ivanenko A. N.* Struktura zemnoi kory Onezhsko-Kandalakshskogo paleorifta po dannym kompleksnogo analiza anomal'nogo magnetnogo polya akvatorii Belogo morya. [The crustal structure of Onega-Kandalaksha paleorift identified by complex analysis of the anomalous magnetic field of the White Sea]. *Geodinamika i tektonofizika*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1293—1312. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0396. (In Russian).
17. *Zhuravlev V. A., Shipilov E. V.* New data on the tectonics and structure of the sedimentary cover of the White Sea rift system. *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 417, no. 9, pp. 1337—1341. DOI: 10.1134/S1028334X07090103.

Information about the authors

Sharov Nikolay Vladimirovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Geophysics Laboratory, Federal Research Centre, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences Institute of Geology (11, Pushkinskaya St, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, 185910), e-mail: sharov@krc.karelia.ru.

Zhuravlev Vitaliy Alekseyevich, Head of the Integrated Geologo-Geophysical Survey, Marine Arctic Geological Expedition OJSC (26, Sofia Perovskaya St., Murmansk, Russia, 183038), vitalyzh@mage.ru.

Bibliographic description

Sharov N. V., Zhuravlev V. A. The crustal structure of the White Sea and adjacent territories. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 3 (35), pp. 62—72. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-62-72. (In Russian).

© Sharov N. V., Zhuravlev V. A., 2019