

СКОРОСТНАЯ СТРУКТУРА И ПЛОТНОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ БЕЛОГО МОРЯ

Н. В. Шаров, Л. И. Бакунович, Б. З. Белашев, М. Ю. Нилов

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

Статья поступила в редакцию 24 июля 2020 г.

Районом исследований являются бассейн Белого моря и прилегающие территории. Актуальность проводимых здесь работ определяют активная геодинамика, кимберлитовый магматизм, перспективы поиска углеводородов. Цель статьи – моделирование скоростной структуры земной коры региона с использованием данных инструментальных наблюдений и программного комплекса «Интегро».

Проведена комплексная интерпретация гравиметрических, магнитометрических, сейсмических, петрофизических и геологических данных. С помощью 2D-моделей, опирающихся на глубинное сейсмическое зондирование, профили и цифровые карты геофизических полей, уточнены плотностные структуры локальных участков земной коры. Общую картину глубинного строения земной коры региона дает разработанная 3D-плотностная модель. В ее рамках определены пространственные положения слоев скоростной опорной модели, установлены их связи с плотностными неоднородностями, геофизическими аномалиями.

Ключевые слова: *Фенноскандинавский щит, Белое море, литосфера, сейсмическая, скоростная, плотностная модели, скоростные слои, граница Мохоровичича, программный комплекс «Интегро».*

Введение

Предметом исследования являются бассейн Белого моря и прилегающие территории. Расположенный в зоне сочленения двух крупных тектонических элементов Восточно-Европейского кратона Фенноскандинавского щита и Русской плиты, данный регион постоянно испытывает динамические нагрузки, вызванные продолжающимся поднятием Фенноскандинавского щита. Его первоначальные, сформировавшиеся в архее структуры земной коры частично трансформировались в процессах протерозойского рифтогенеза и последующей тектономагматической активизации. В регионе актуальны исследования геодинамики, тектоники, эволюции вещественного состава литосферы. Его характерной особенностью являются проявления кимберлитового магматизма,

месторождения алмазов и других полезных ископаемых. Считается, что занимающая второе место в России по добыче алмазов после Якутии Архангельская провинция далеко не исчерпала свой алмазный потенциал. Проводимые здесь в последнее время геологические исследования нацелены на поиск углеводородов. Постановке и решению теоретических и прикладных проблем способствует изучение глубинного строения региона.

Инструментальные данные о глубинном строении акватории Белого моря и его обрамления получены в сейсмических, гравиметрических, магнитометрических исследованиях [1—9]. Важным этапом этих работ явились глубинные сейсмические исследования на опорных профилях Суша-Море 4В и 3-АР (Калевала — Кемь — Белое море — Канин Нос) [10; 11].

Интерпретацию геолого-геофизических данных ведут в рамках 2D- и 3D-моделей, использующих

петрологические характеристики горных пород, такие как плотность и намагниченность. Для региона Белого моря известен ряд геолого-геофизических моделей глубинного строения [12—15]. Для многих из них характерны неполнота используемой информации, неравномерность покрытия участков, различия в локальных объемах данных. Отдельные модели представляют геолого-геофизическую среду цилиндрическими блоками, размеры и положения которых подбирают, решая прямую задачу, добываясь близости измеряемых и расчетных геофизических полей. Этот подход, недавно считавшийся традиционным, в настоящее время пересматривается, поскольку современные методы моделирования позволяют решать прямые и обратные задачи геофизики, не прибегая к идеализации форм и границ геологических объектов.

Один из таких инструментов — программный комплекс «Интегро», разработанный во Всероссийском научно-исследовательском институте геологических, геофизических и геохимических систем для решения прогнозно-диагностических задач и задач тематического районирования территорий [16]. Аналитический аппарат комплекса автоматизирует решение прямых и обратных задач геофизики, позволяет оформлять цифровые карты, выполнять картографические привязки, проводить обработку, визуализацию и хранение 3D-данных. Алгоритмы комплекса работают с регулярными и нерегулярными сетями данных, проводят пространственный анализ векторов и поверхностей, строят необходимые разрезы и сечения объектов. Полученные модели отличаются детальностью, визуализируют геологические структуры, дают возможность устанавливать их связи с геофизическими полями. В рамках комплекса удобно проводить объединение разнородных данных и комплексирование геофизических методов.

Настоящая статья продолжает цикл работ авторов, посвященных глубинному строению Беломорского региона [17; 18]. Ее цель — моделирование скоростной структуры земной коры региона на основе данных инструментальных наблюдений с использованием программного комплекса «Интегро». Задачами исследования являются построение скоростных слоев земной коры, изучение их связей с плотностными неоднородностями и геофизическими полями.

Плотностные модели разрабатывались на основе опорной скоростной модели кристаллической коры, хорошо зарекомендовавшей себя в ряде исследований [19—21].

Первичные данные сейсмических профилей о строении земной коры уточняются в рамках 2D-плотностных моделей, а благодаря 3D-модели распространяются на земную кору всего региона. Связи, обнаруженные в процессе моделирования, применимы при установлении соответствия разнотелостных структур, разработке минерагениче-

ских критериев поиска месторождений полезных ископаемых.

Материалы и методы

Использованы цифровые карты масштаба 1:1 000 000, построенные на основе данных гравиметрических и магнитных съемок, и известные сейсмические материалы [9; 22—28]. Моделирование литосферы региона опирается на результаты геофизических исследований (рис. 1) вдоль геотраверсов 3-AP, 1-EB, KBAPЦ, АГАТ и др., сводные геолого-геофизические карты и схемы [4—6; 10; 11; 29]. Указанные профили покрывают исследуемую территорию неравномерно.

Трехслойная скоростная модель земной коры [11; 19; 20] устанавливает соответствие скорости продольных упругих волн V_p плотностям горных пород ρ уравнением регрессии $\rho = 0,25V_p + 1,2$. Связи плотностных слоев, скорости продольных упругих волн и глубин отражает табл. 1.

Методика моделирования комплексом «Интегро» включает выбор модели среды, ее геометрического каркаса, построение по сейсмическим профилям 2D-плотностных моделей, переход к 3D-плотностной модели земной коры региона. Геометрический каркас и модель среды выбирали, основываясь на блочной структуре профиля, выявленной по сейсмическим данным, и значениях плотностей блоков, вычисленных по опорной скоростной модели в качестве начальных приближений.

2D-плотностную модель профиля дает решение прямой задачи, реализующее минимум различий значений расчетного и наблюдаемого аномального гравитационного полей по профилю. Значения плотностей отдельных блоков варьировали в заданных пределах. При необходимости улучшения оптимизации проводили дальнейшее разбиение блоков с введением дополнительных неоднородностей.

3D-плотностную модель получали путем решения обратной задачи гравиметрии [21]. При ее создании предполагалось, что плотностные неоднородности присущи земной коре, а вещество мантии является гомогенным. 3D-модель удобна для построения сечений и расчета вкладов отдельных элементов в аномальное гравитационное поле. В данной работе модель использована для определения пространственного положения и визуализации границ скоростных слоев земной коры.

При построении граничных поверхностей слоев скоростной модели на сейсмических разрезах профилей отмечали координаты участков с соответствующими значениями скоростей продольных упругих волн. Полученные векторные данные интерполировали в рамках 2D-моделей, а затем переносили на 3D-модель, применяя многоуровневую интерполяцию B-сплайнами [21]. Проблемные участки пересечения поверхностей разных слоев корректировали, после чего повторяли интерполяцию данных.

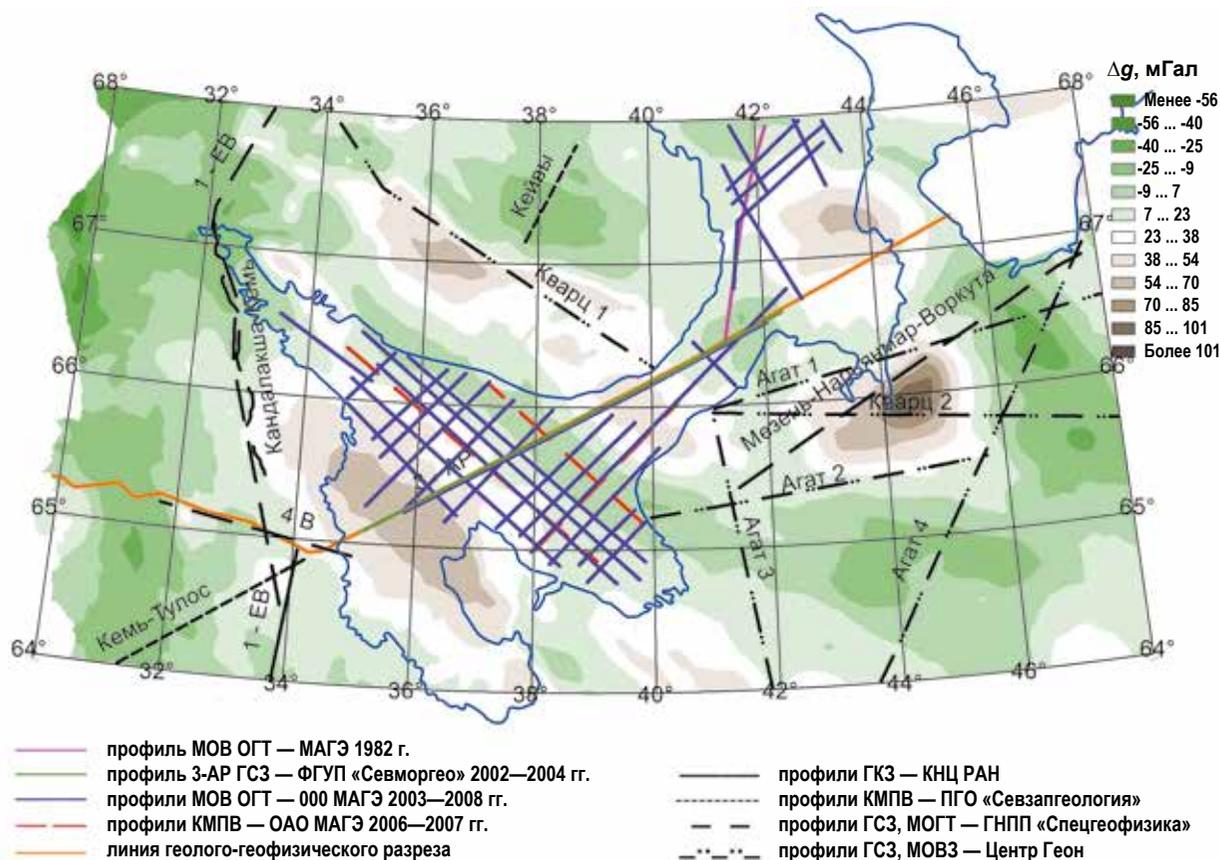


Рис. 1. Схема расположения сейсмических профилей и региональная составляющая гравитационного поля в акватории Белого моря и на прилегающих территориях

Fig. 1. Layout of seismic profiles and the regional constituent of the gravity field in the White Sea and adjacent areas

Таблица 1. Трехслойная скоростная модель земной коры Беломорского региона

Слой земной коры	V_p , км/с	ρ , г/см ³	Диапазон глубин, км
Осадочный, К1	3,4—5,7	1,90—2,60	0—10
К2	5,8—6,2	2,60—2,75	0—20
К3	6,3—6,8	2,75—3,00	20—32
Верхняя мантия	8,0—8,2	3,40	32—44

Результаты

На рис. 2 приведена 2D-плотностная модель фрагмента геотраверса Агат 3 (Усть Пинега — Белое море), демонстрирующая слоисто-блоковое строение земной коры [18].

Фрагмент ориентирован поперек главных глубинных разломов на контакте восточной части Кольского и Карельского геоблоков, пересекает с юга на север Архангельский выступ, Керецко-Пинежский грабен, Полтинско-Елькибский горст, Лешуковский грабен. Поведение гравитационного поля, распределение плотности горных пород 2D модели отражают границы этих образований. На сейсмическом профиле выделяют границы фундамента (глубина 1—4 км, $V_p = 6,0—6,3$ км/с) и Мохоровичича (глубина 36—40 км, $V_p = 8,0—8,2$ км/с). Неоднородности, проявленные в геофизических полях, относятся к верхней и средней коре. Нижняя кора со скоростью продольных волн 6,8—7,1 км/с характеризуется близким к однородному распределением петрофизических параметров.

Границы слоев трехслойной скоростной модели на рис. 2 выделены красным цветом. Такие границы определены для всех рассматриваемых профилей. Соответствующие каждому слою границы создают каркас его 3D-поверхности.

На рис. 3 показаны 3D-плотностная модель Беломорского региона и положения в пространстве границ слоев опорной скоростной модели. Для

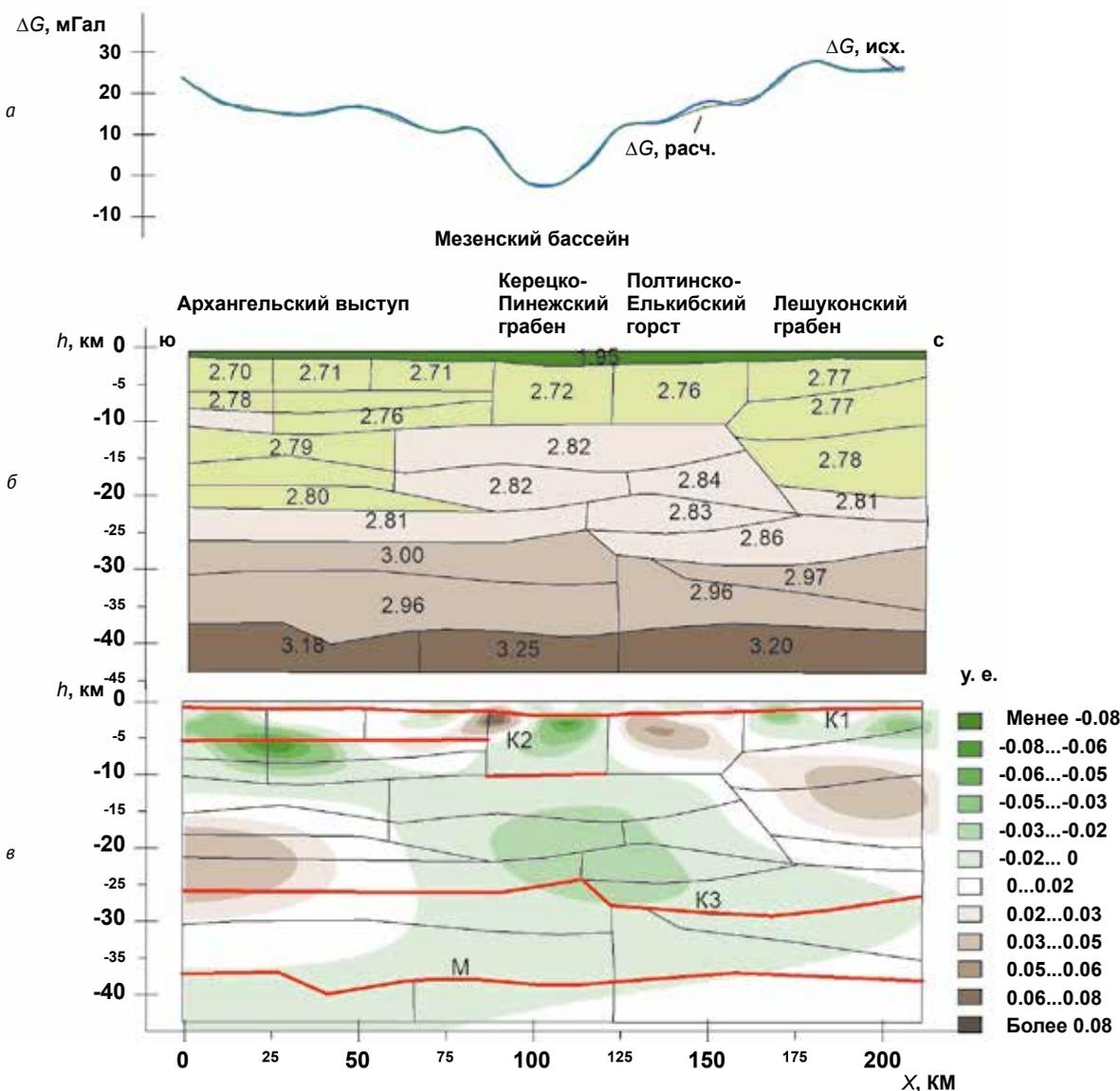


Рис. 2. 2D-плотностная модели по участку сейсмического профиля Агат 3 (Усть Пинега – Белое море): графики наблюдаемых и модельных полей (а), плотностная блоковая модель на основе сейсмических данных (б) и распределение эффективной плотности с определенными по сейсмическим данным границами скоростных слоев (показанными красным цветом) (в)
 Fig. 2. 2D density model for a section of the seismic profile Agat 3 (Ust Pinea – the White Sea): graphs of observed and model fields (a), density block model based on seismic data (b) and distribution of effective density with determined from seismic data, shown in red, boundaries of velocity layers (в)

упрощения картины положения границ слоев представлены в изолиниях глубины на рис. 4.

Как показывает схема глубины залегания поверхности K1 на рис. 4а, осадочный слой присутствует на части территории региона, прослеживается в основном в направлениях привноса осадочного материала реками Северной Двиной и Мезенью. В Онежском и Кандалакшском заливах, у Терского берега Белого моря этот слой отсутствует. Его максимальные мощности (6 км) наблюдаются в районе впадения Мезени в Белое море и в Воронке Белого моря.

Подстилающая поверхность «гранитно-метаморфического слоя K2» (см. рис. 4б) понижена в юго-западном и северо-восточном направлениях, в Ке-

рецком, Падунском, Лешуконском грабенах. В центральной части депрессия приурочена к бассейнам осадконакопления Северной Двины и Мезени. Подъемы поверхности связаны со структурами Карельского и Кольского мегаблоков. Алмазоносное Зимнебережное поднятие и Онежский полуостров соответственно Терского берега Белого моря и Карельского мегаблока.

Мощность «гранулит-базитового слоя с подстилающей поверхностью K3» (см. рис. 4в) меняется от значений, близких к нулю, до 30 км. Большую площадь занимает юго-западная депрессия его нижней границы.

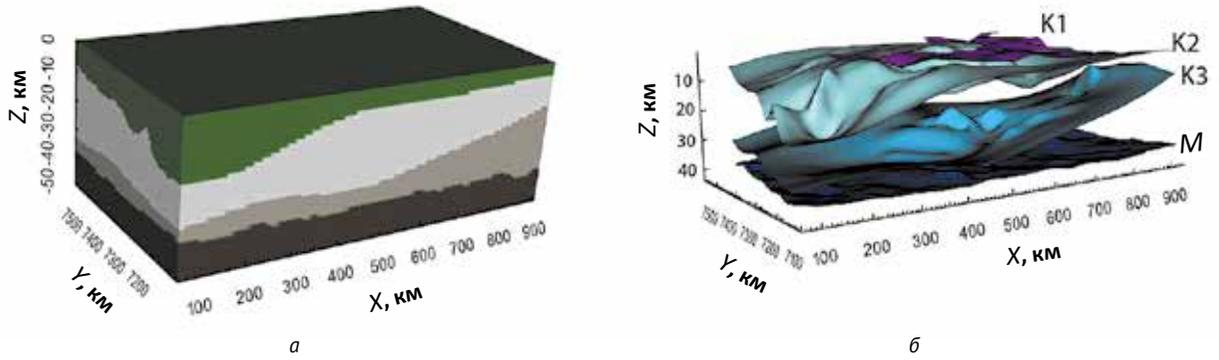


Рис. 3. 3D-модель распределения плотности земной коры Беломорского региона (а) и пространственное представление граничных поверхностей K1, K2, K3 и M скоростных слоев земной коры региона (б)
 Fig. 3. 3D model of the density distribution of the earth's crust in the White Sea region (a) and spatial representation of the boundary surfaces K1, K2, K3 and M of the velocity layers of the region's crust (б)

Зимнебережное поднятие представлено зоной разнонаправленных градиентов. На этой поверхности в Горле Белого моря намечена депрессия, которая контрастно проявится на поверхности M (см. рис. 4г).

На поверхности M депрессия в Горле Белого моря находится в окружении поднятий в районах Мезени, Терского берега Белого моря, полуострова Канин Нос. В геофизических полях максимумы поверхности Мохо соответствуют положительным, минимумы — отрицательным гравитационным аномалиям (см. рис. 1).

Обсуждение результатов

Структура земной коры 3D-модели региона в виде последовательно сменяющихся друг друга по глубине слоев с различными плотностями и скоростями распространения упругих волн (см. рис. 3б) является наглядной, отвечает традиционным геологическим представлениям. Качество интерполяции плотностных распределений 2D-моделей можно улучшить, включив в число опорных векторов скоростные границы дополнительных сечений 3D-модели. Необходимым этапом процедуры является проверка

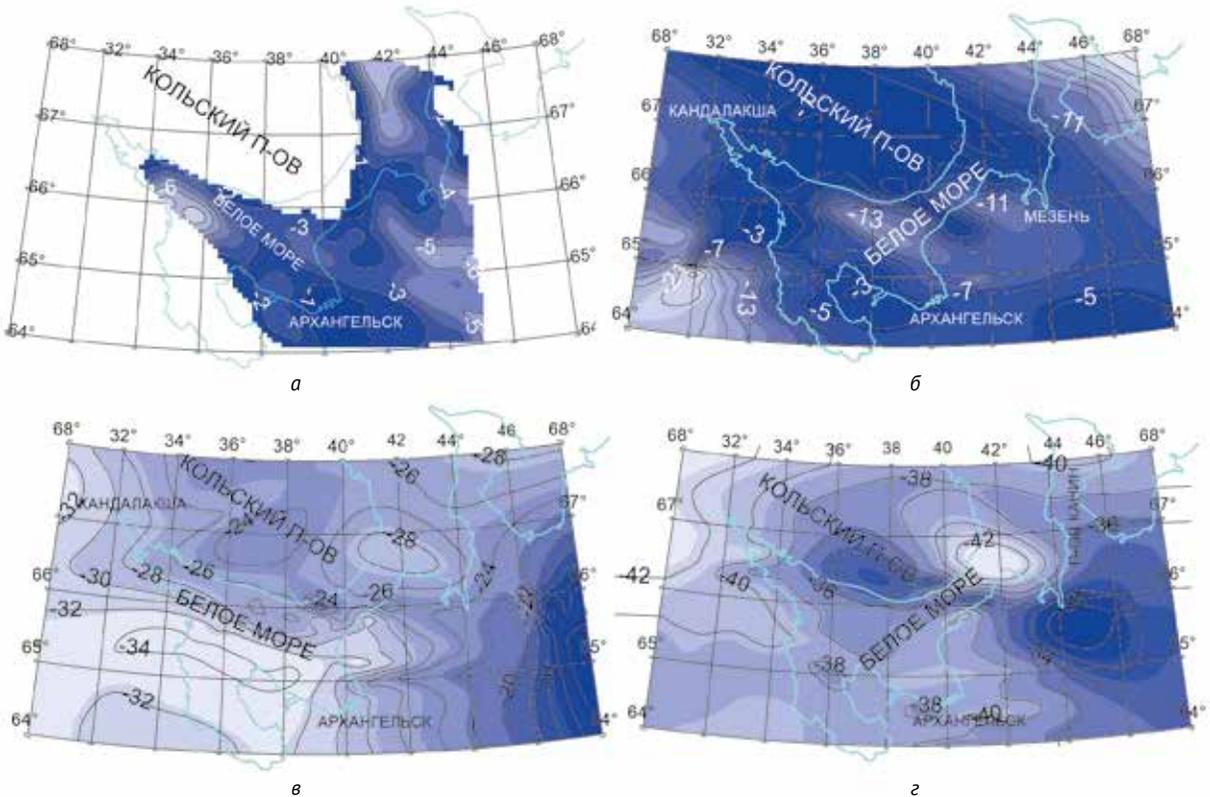


Рис. 4. Схемы глубин залегания поверхностей K1 (а), K2 (б), K3 (в) и M (г)
 Fig. 4. Surface depth schemes K1 (a), K2 (б), K3 (в) and M (г)

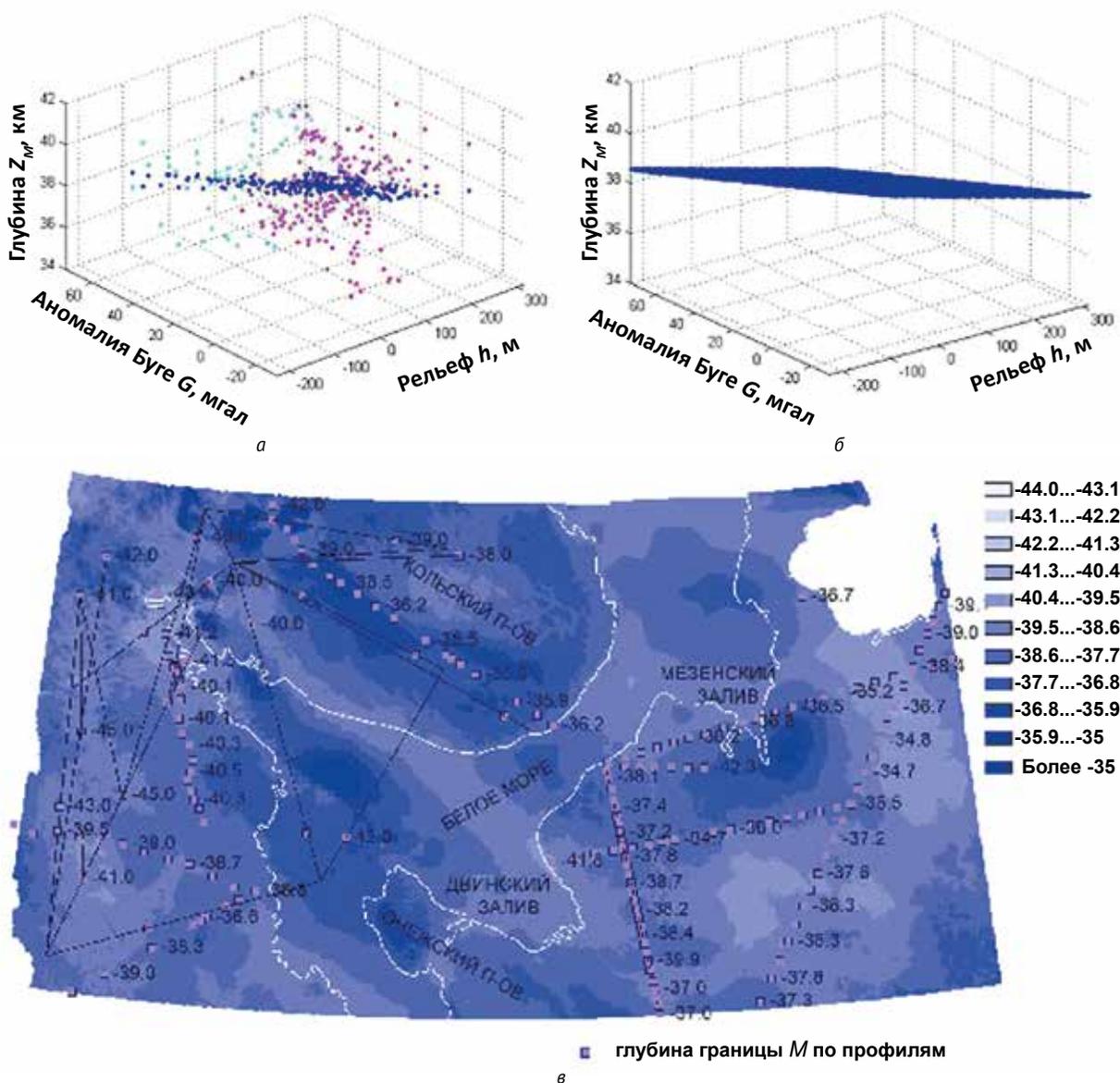


Рис. 5. Данные глубинных сейсмических разрезов и регрессионная модель, связывающая глубину залегания поверхности Мохо Z_M (км) с аномалией Буге ΔG (мГал) и отметкой рельефа h (м). Исходные данные, относящиеся к суше и морю, выделены соответственно розовым и голубым цветами, модельные результаты – синим цветом (а), положение регрессионной плоскости границы Мохо в заданной системе координат (б), карта глубин залегания поверхности Мохо, полученная на основе этого уравнения, совмещенная с данными по профилям глубинного сейсмического зондирования (в)

Fig. 5. Data from deep seismic sections and a regression model linking the depth of the Moho surface (Z_M , km) with the Bouger anomaly (ΔG , mGal) and relief elevation (h , m). The initial data related to land and sea are highlighted in pink and blue respectively, the model results in blue (a), the position of the regression plane of the Moho boundary in a given coordinate system (b), the depth map of the Moho surface, obtained on the basis of this equation, combined with data on deep seismic sounding profiles (c)

отсутствия пересечений граничных поверхностей друг с другом.

Особое значение придают моделированию поверхности M . Благодаря скачку плотности эту границу уверенно фиксируют на сейсмических профилях. Ее особенности проявляются в геофизических полях, вышележащих слоях земной коры, рельефе земной поверхности [30]. Альтернативное рис. 4г построение поверхности M на основе уравнения регрессии

$$Z_M = 39,54 - 0,0354\Delta G - 0,0071h,$$

связывающего глубину залегания Z (км) поверхности M на сейсмических профилях, значение аномально-го гравитационного поля в редукции Буге ΔG (мГал) и отметку рельефа h (м), показано на рис. 5.

Полученная таким способом поверхность M в целом верно отражает общий план строения при сглаженных локальных особенностях.

Реальная структура земной коры имеет сложное строение. Инструментальные измерения указывают на существование высокоскоростных пропласт-

ков в слоях малой плотности (например, на рис. 2в) или астеносферных линз на границе земной коры и мантии. Тем не менее полученные 3D-плотностная и скоростная структуры земной коры применимы для анализа глубинного строения региона.

Эмпирическое обобщение, следующее из результатов моделирования, состоит в существовании субвертикальных структур земной коры в областях Зимнего и Терского берегов, Горла и Воронки Белого моря, связанных с проявлениями кимберлитового магматизма. Диатремы, силы, трубки взрыва локализованы в участках архейско-раннепротерозойской коры с мозаичным типом геофизических аномалий и предрасположены к линейным тектоническим зонам.

Алмазоносная провинция Зимнего берега связана с древним выступом кристаллического фундамента, испытывающим постоянное поднятие. Зимнебережное поле кимберлитов размещается в рифейском авлакогене северо-западного простирания в зоне сопряжения Кольского кратона с Мезенской синеклизой. Гравитационное поле авлакогена — переходное от слабо отрицательных к положительным значениям. Значения магнитного поля повышенные. В условиях низкого теплового потока гравитационные и магнитные аномалии в нижних слоях коры указывают на глубинный источник генерации магмы. Региональные разломы, узлы пересечения тектонических зон характеризуются деформациями, затянками, крутыми поворотами изолиний гравиметрического и магнитного полей, геохимическими ореолами элементов Ni, Mn, Cr, Co, Zn. Трубки взрыва ультраосновного состава, находящиеся в кристаллическом фундаменте с высоким электрическим сопротивлением, характеризуются повышенной проводимостью [8; 15].

Депрессию поверхности Мохо в Горле Белого моря (см. рис. 4г), отражающую взаимодействие земной коры и мантии, также относят к критериям алмазоносности [31]. Близость ее локальных экстремумов указывает на взаимопроникновение, перемешивание, преобразование глубинного вещества в области сочленения поднимающегося Фенноскандинавского щита с Русской плитой. В геодинамическом плане такой процесс является обратным субдукции тектонических плит.

Заключение

В рамках моделирования проведена комплексная интерпретация сейсмических, гравиметрических, магнитометрических, петрофизических и геологических данных для региона Белого моря. С помощью 2D-моделей, опирающихся на профили глубинного сейсмического зондирования и цифровые карты геофизических полей, уточнены плотностные структуры локальных участков земной коры. Общую картину глубинного строения земной коры региона дает разработанная 3D-плотностная модель. Установлены связи неоднородностей и геофизических анома-

лий, определены положения и характеристики слоев опорной скоростной модели региона.

Характерная особенность 3D-плотностной модели региона — субвертикальные структуры, пронизывающие всю земную кору. В верхней части коры с ними связаны проявления кимберлитового магматизма, диатремы, силлы, трубки взрыва. Причиной образования структур может быть взаимодействие мантийного вещества Фенноскандинавского щита и Русской плиты.

Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А18-118020290086-1 при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-05-00481 «Строение и динамика литосферы Беломорья» и № 20-35-90034 «Комплексирование геофизических методов для 2D- и 3D-моделирования земной коры Белого моря и прилегающих территорий».

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Геодинамика и возможная нефтегазоносность Мезенского осадочного бассейна / Ред. С. В. Апполонов, Д. Л. Федоров. — СПб.: Наука, 2006. — 319 с.
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. Балувев А. С., Журавлев В. А., Терехов А. Н., Пржиялговский 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.
7. Система Белого моря. — Т. 4: Процессы осадкообразования, геология и история. — М.: Науч. мир, 2017. — 1030 с.
8. Кутинов Ю. Г., Чистова Э. Б., Полякова Е. В., Минеев А. Л. Цифровое моделирование рельефа для прогноза площадей, перспективных на нефть и алмазы // Актуальные проблемы нефти и газа. — 2019. — Вып. 1 (24). — DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art8.
9. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Ред. Н. В. Шаров, Ф. П. Митрофанов, М. Л. Верба, К. Гиллен. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. — 318 с.
10. Шаров Н. В., Слабунов А. И., Исанина Э. В. и др. Сейсмический разрез земной коры по профилю ГСЗ-

ОГТ «Суша-море» Калевала-Кемь-горло Белое море // Геофиз. журн. — 2010. — Т. 32, № 5. — С. 21—34.

11. Глазнев В. Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. — Апатиты: ЗАО «КаэМ», 2003. — 252 с.

12. Glaznev V. N., Mints M. V., Muravina O. M. et al. Complex geological — geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian shield: nature of density layering of the crust and the crust — mantle boundary // *Geodynamics & Tectonophysics*. — 2015. — 6 (2) — P. 133—170. — URL: <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0176>.

13. Конанова Н. В. Объемные модели гравиметрического поля Тимано-Североуральского региона и сопредельных территорий // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2010. — № 9. — С. 3—5.

14. Краснопевцева Г. А., Шукин Ю. К. Объемная глубинная модель Восточно-Европейской платформы по данным региональных сейсмических исследований // Регион. геология и металлогения. — 2000. — № 10. — С. 75—85.

15. Поснеева Е. В., Витте Л. В. Особенности строения земной коры Беломорского и частично Карельского блоков по данным магнитотеллурических исследований // Геофизика. — 2011. — № 3. — С. 64—72.

16. Черемисина Е. Н., Финкельштейн М. Я., Любимова А. В. ГИС INTEGRO — импортозамещающий программно-технологический комплекс для решения геолого-геофизических задач // Геоинформатика — 2018. — № 3. — С. 8—17.

17. Шаров Н. В., Журавлев А. В. Строение земной коры Белого моря и прилегающих территорий // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 62—72. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-62-72.

18. Шаров Н. В., Бакунович Л. И., Белашев Б. З. и др. Геолого-геофизические модели земной коры Беломорья // Геодинамика и тектонофизика. — Принята к публикации.

19. 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.

20. Шаров Н. В. Литосфера по северной Европе по сейсмическим данным. — Петрозаводск: КарНЦ РАН. — 2017. — 173 с.

21. Пиманова Н. Н., Спиридонов В. А., Шаров Н. В. и др. Распределение плотностных неоднородностей

в земной коре и мантии юго-восточной части Фенноскандинавского щита по комплексу геолого-геофизических данных // Геоинформатика. — 2018. — № 1. — С. 43—51.

22. Сапожников Р. Б. Эффективность сейсморазведки МОВ ГТ при изучении геологического строения Мезенской синеклизы // Разведка и охрана недр. — 2003. — № 5. — С. 32—35.

23. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Ред. Н. В. Шаров. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. — 353 с.

24. Модель земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования / Ред. Ю. М. Эринчек. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. — 245 с.

25. Балувев А. С., Журавлев В. А., Пржиялговский Е. С. Новые данные о строении Центральной части палеорифтовой системы Белого моря // Докл. Акад. наук. — 2009. — Т. 427, № 2. — С. 891—896. — DOI: 10.1134/S1028334X09060014.

26. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Q-(35), 36 — Апатиты. Объяснительная записка. — Мурманск; Санкт-Петербург: Картограф. ф-ка ВСЕГЕИ, 2009. — 487 с.

27. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Q-37 — Архангельск. Объяснительная записка. — Мурманск; Санкт-Петербург: Картограф. ф-ка ВСЕГЕИ, 2009. — 338 с.

28. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Мезенская. Лист Q-38 — Мезень. Объяснительная записка. — Мурманск; Санкт-Петербург: Картограф. ф-ка ВСЕГЕИ, 2009. — 350 с.

29. Valuev A. S., Brusilovskii Yu. V., Ivanenko A. N. The crustal structure of Onega-Kandalaksha paleorift identified by complex analysis of the anomalous magnetic field of the White Sea // *Geodynamics & Tectonophysics*. — 2018. — 9 (4). — P. 1293—1312. — DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0396.

30. Кашубин С. Н., Петров О. В., Андросов Е. А. и др. Карта мощности земной коры Циркумпольной Арктики // Регион. геология и металлогения. — 2011. — № 46. — С. 5—13.

31. Голубев Ю. К., Ваганов В. И., Прусакова Н. А. Принципы прогнозирования алмазоперспективных площадей на Восточно-Европейской платформе // Руды и металлы. — 2005. — № 1. — С. 55—70.

Информация об авторах

Шаров Николай Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, 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.

Бакунович Любовь Игоревна, аспирант, Институт геологии ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (185910, Россия, Республика Карелия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11), e-mail: luba5_89@mail.ru.

Белашев Борис Залманович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (185910, Россия, Республика Карелия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11), e-mail: belashev@krc.karelia.ru.

Нилов Михаил Юрьевич, научный сотрудник, Институт геологии ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (185910, Россия, Республика Карелия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11), e-mail: mnilov@rambler.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Шаров Н. В., Бакунович Л. И., Белашев Б. З., Нилов М. Ю. Скоростная структура и плотностные неоднородности земной коры Белого моря // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 4 (40). — С. 43—53. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-43-53.

VELOCITY STRUCTURE AND DENSITY INHOMOGENEITIES OF THE WHITE SEA CRUST

Sharov N. V., Bakunovich L. I., Belashev B. Z., Nilov M. Yu.

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

The article was received on July 24, 2020

Abstract

The study area is the White Sea basin and adjacent territories. The relevance of the work carried out here is determined by active geodynamics, kimberlite magmatism, and prospects for the hydrocarbon search. The authors set the goal to model the velocity structure of the region's crust using data from instrumental observations and the Integro software package. A comprehensive interpretation of gravimetric, magnetometric, seismic, petrophysical and geological data has been carried out. With the help of 2D models based on the DSZ profiles and digital maps of geophysical fields, refined density structures of local sections of the earth's crust have been specified. The developed 3D density model gives a general picture of the deep structure of the region's crust. Within its framework, the spatial positions of the layers of the velocity reference model are determined and their connections with density inhomogeneities and geophysical anomalies are established.

Keywords: *The Fennoscandinavian shield, the White Sea, lithosphere, seismic, velocity and density models, velocity layers, Mohorovichich boundary, Integro software package.*

The work was performed within the framework of the research project AAAA-A18-118020290086-1 with the financial assistance of the RFBR within the framework of the scientific projects No. 20-05-00481 "Structure and dynamics of the White Sea lithosphere" and No. 20-35-90034 "Integration of geophysical methods for 2D and 3D modeling the Earth's crust of the White Sea and adjacent territories."

References

1. Kazanin G. S., Zhuravlev V. A., Pavlov S. P. Структура осадочного чехла и перспективы нефтегазонасности Белого моря. [The structure of the sedimentary cover and the White Sea's oil and gas potential]. *Burenie i neft'*, 2006, no. 2, pp. 26—28. (In Russian).
2. Kheraskova T. N., Sapozhnikov R. B., Volozh Yu. A., Antipov M. P. Геодинамика и история развития севера Восточно-Европейской платформы в позднем докембрие по данным регионального сейсмического профилирования. [Late Precambrian geodynamics and evolution of the northern East European Platform, as shown by regional seismic profiling]. *Геотектоника*, 2006, no. 6, pp. 33—51. (In Russian).
3. Геодинамика и возможная нефтегазонасность Мезенского осадочного бассейна. [Geodynamics and oil and gas potential of the Mezen sedimentary basin]. Red. S. V. Aplonov, D. L. Fedorov. St. Petersburg, Nauka, 2006, 319 p. (In Russian).
4. Zhuravlev V. A. Структура земной коры Беломорского региона. [Earth crust structure of the White Sea Region]. *Razvedka i ohrana neдр*, 2007, no. 9, pp. 22—26. (In Russian).
5. Zhuravlev V. A., Shipilov E. V. Строение бассейнов Беломорской рифтовой системы. [Structure of basins in the White Sea rift system]. *Океанология*, 2008, vol. 48, no. 1, pp. 123—131. (In Russian).

6. *Baluev A. S., Zhuravlev V. A., Terekhov A. N., Przhiyalgovskii E. S.* Tektonika Belogo morya i prilgayushchikh territorii (Ob"yasnitel'naya zapiska k "Tektonicheskoi karte Belogo morya i prilgayushchikh territorii" masshtaba 1:500 000). [Tectonics of the White Sea and adjacent areas (Explanatory note to a "1 500 000 Tectonic map of the White Sea and adjacent areas" 1 500 000)]. Moscow, GEOS, 2012, 104 p. (In Russian).
7. *Sistema Belogo morya.* Vol. 4. Protsessy osadkobrazovaniya, geologiya i istoriya. [The White Sea system. Vol. 4. Sedimentation, geology and history]. Moscow, Nauch. mir, 2017, 1030 p. (In Russian).
8. *Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Polyakova E. V., Mineev A. L.* Tsifrovoye modelirovaniye rel'efa dlya prognoza ploshchadei, perspektivnykh na neft' i almazy. [Digital modelling of relief for forecasting of areas with oil and diamonds]. Aktual'nye problemy nefti i gaza, 2019, no. 1 (24). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art8. (In Russian).
9. Stroeniye litosfery rossiiskoi chasti Barents-regiona. [Lithospheric structure of the Russian Barents Sea Region]. Red. N. V. Sharov, F. P. Mitrofanov, M. L. Verba, K. Gillen. Petrozavodsk, KarNTs RAN, 2005, 318 p. (In Russian).
10. *Sharov N. V., Slabunov A. I., Isanina E. V., Krupnova N. A., Roslov Yu. V., Shchiptsova N. I.* Seismicheskii razrez zemnoi kory po profilu GSZ-OGT "Susha-more" Kalevala-Kem'-gorlo Beloe more. [Seismic section of the earth crust along the DSS-CDP profile "Land-Sea" Kalevala-Kem-White Sea Throat]. Geofiz. Zhurn, 2010, vol. 32, no. 5, pp. 21—34. (In Russian).
11. *Glaznev V. N.* Kompleksnyye geofizicheskie modeli litosfery Fennoskandii. [Integrated geophysical models of Fennoscandia's lithosphere]. Apatity, ZAO "KaeM", 2003, 252 p. (In Russian).
12. *Glaznev V. N., Mints M. V., Muravina O. M., Raevsky A. B., Osipenko L. G.* Complex geological — geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian shield: nature of density layering of the crust and the crust — mantle boundary. Geodynamics & Tectonophysics, 2015, no. 6 (2), pp. 133—170. Available at: <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0176>.
13. *Konanova N. V.* Ob"emnyye modeli gravimetricheskogo polya Timano-Severoural'skogo regiona i sopredel'nykh territorii. [Volumetric models of the gravimetric field of the Timan-North Uralian Region and adjacent areas]. Vestnik IG Komi NC UrO RAN, 2010, no. 9, pp. 3—5. (In Russian).
14. *Krasnopevtseva G. A., Shchukin Yu. K.* Ob"emnaya glubinnaya model' Vostochno-Evropeiskoi platformy po dannym regional'nykh seismicheskikh issledovaniy. [Volumetric deep model of the East European Platform based on regional seismic studies]. Region. geologiya i metallogeniya, 2000, no. 10, pp. 75—85. (In Russian).
15. *Pospeeva E. V., Vitte L. V.* Osobennosti stroeniya zemnoi kory Belomorskogo i chastichno Karel'skogo blokov po dannym magnitotelluricheskikh issledovaniy. [Structural characteristics of the earth crust of the White Sea block and part of the Karelian block, as shown by magnetotelluric studies]. Geofizika, 2011, no. 3, pp. 64—72. (In Russian).
16. *Cheremisina E. N., Finkel'shtein M. Ya., Lyubimova A. V.* GIS INTEGRO — importozameshchayushchii programmno-tekhnologicheskii kompleks dlya resheniya geologo-geofizicheskikh zadach. [GIS INTEGRO — an import-replacing software-technological complex for solving geologo-geophysical problems]. Geoinformatika, 2018, no. 3, pp. 8—17. (In Russian).
17. *Sharov N. V., Zhuravlev A. V.* Stroeniye zemnoi kory Belogo morya i prilgayushchikh territorii. [Crustal structure of the White Sea and adjacent areas]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2019, no. 3 (35), pp. 62—72. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-62-72. (In Russian).
18. *Sharov N. V., Bakunovich L. I., Belashev B. Z., Zhuravlev A. V., Nilov M. Yu.* Geologo-geofizicheskie modeli zemnoi kory Belomor'ya. [Geologo-geophysical models of the earth crust of the White Sea Region]. Geodinamika i tektonofizika. Accepted for publication. (In Russian).
19. *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.
20. *Sharov N. V.* Litosfera po severnoi Evrope po seismicheskim dannym. [Lithosphere of Northern Europe, as shown by seismic data]. Petrozavodsk, KarNC RAN, 2017, 173 p. (In Russian).
21. *Pimanova N. N., Spiridonov V. A., Sharov N. V., Lyubimova A. V., Senner A. E.* Raspredeleniye plotnostnykh neodnorodnostey v zemnoi kore i mantii yugo-vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo shchita po kompleksu geologo-geofizicheskikh dannykh. [Distribution of density heterogeneities in the earth crust and mantle of the southeastern Fennoscandian Shield, as shown by geological and geophysical data]. Geoinformatika, 2018, no. 1, pp. 43—51. (In Russian).
22. *Sapozhnikov R. B.* Effektivnost' seismorazvedki MOV GT pri izuchenii geologicheskogo stroeniya Mezenskoi sineklizy. [Efficiency of EWM DP seismic prospecting for the study of the geological structure of the Mezen syncline]. Razvedka i ohrana nedr, 2003, no. 5, pp. 32—35. (In Russian).
23. *Glubinnoye stroeniye i seismichnost' Karel'skogo regiona i ego obramleniya.* [Deep structure and seismicity of the Karelian Region and surrounding areas]. Red. N. V. Sharov. Petrozavodsk, KarNTs RAN, 2004, 353 p. (In Russian).
24. *Model' zemnoi kory i verkhnei mantii po rezul'tatam glubinnogo seismoprofilirovaniya.* [A model of the earth crust and the upper mantle based on deep seismic profiling]. Red. Yu. M. Erinchek. St. Petersburg, VSEGEI, 2007, 245 p. (In Russian).
25. *Baluev A. S., Zhuravlev V. A., Przhiyalgovskii E. S.* Novyye dannyye o stroenii Tsentral'noi chasti paleoriftovoi sistemy Belogo morya. [New data on the structure of the central paleorift system of the White Sea]. Dokl.

- Akad. nauk, 2009, vol. 427, no. 2, pp. 891—896. DOI: 10.1134/S1028334X09060014. (In Russian).
26. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Baltiiskaya. List Q-(35), 36 — Apatity. Ob'yasnitel'naya zapiska. [1:1 000 000 scale state geological map of the Russian Federation (third generation). Baltic series. Sheet Q-(35), 36 — Apatity. Explanatory note]. Murmansk; St. Petersburg, Kartograf. f-ka VSEGEI, 2009, 487 p. (In Russian)
27. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Baltiiskaya. List Q-37 — Arkhangel'sk. Ob'yasnitel'naya zapiska. [1:1 000 000 scale state geological map of the Russian Federation (third generation). Baltic series. Sheet Q-37 — Arkhangel'sk. Explanatory note]. Murmansk; St. Petersburg, Kartograf. f-ka VSEGEI, 2009, 338 p. (In Russian).
28. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Mezenskaya. List Q-38- Mezen'. Ob'yasnitel'naya zapiska. [1:1 00 0000 state geological map of the Russian Federation (third generation). Mezen series. Sheet Q-38- Mezen. Explanatory note]. Murmansk; St. Petersburg, Kartograf. f-ka VSEGEI, 2009, 350 p. (In Russian).
29. *Baluev A. S., Brusilovskii Yu. V., Ivanenko A. N.* The crustal structure of Onega-Kandalaksha paleorift identified by complex analysis of the anomalous magnetic field of the White Sea. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, 9 (4), pp. 1293—1312. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0396.
30. *Kashubin S. N., Petrov O. V., Androsov E. A., Morozov A. F., Kaminskii V. D., Poselov V. A.* Karta moshchnosti zemnoi kory Tsirkumpolyarnoi Arktiki. [A map of the crustal thickness of Circumpolar Arctic]. *Region geologiya i metallogeniya*, 2011, no. 46, pp. 5—13. (In Russian).
31. *Golubev Yu. K., Vaganov V. I., Prusakova N. A.* Printsipy prognozirovaniya almazoperspektivnykh ploshchadei na Vostochno-Evropeiskoi platforme. [Principles of forecasting diamondiferous areas on the East European Platform]. *Rudy i metally*, 2005, no. 1, pp. 55—70. (In Russian).

Information about the authors

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

Bakunovich Lyubov Igorevna, Postgraduate, Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (11, Pushkinskaya St, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, 185910), e-mail: luba5_89@mail.ru.

Belashev Boris Zalmanovich, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (11, Pushkinskaya St, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, 185910), e-mail: belashev@krc.karelia.ru.

Nilov Michail Yurevich, Researcher, Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (11, Pushkinskaya St, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, 185910), e-mail: mnilov@rambler.ru.

Bibliographic description of the article

Sharov N. V., Bakunovich L. I., Belashev B. Z., Nilov M. Yu. Velocity structure and density inhomogeneities of the White Sea crust. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 4 (40), pp. 43—53. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-43-53. (In Russian).