

## 3D МАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ БЕЛОГО МОРЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

М. Ю. Нилов, Л. И. Бакунович, Н. В. Шаров, Б. З. Белашев  
Институт геологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (Петрозаводск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 5 марта 2021 г.

*Для региона Белого моря, второй крупной алмазодобывающей провинции России, важной задачей остается выполняемый магниторазведкой поиск магматических тел, перекрытых осадочным чехлом. В интерпретации результатов поиска важную роль играют модели, связывающие локальные и региональные магнитные аномалии с их источниками. Цель исследования – построение трехмерной магнитной модели земной коры региона Белого моря с использованием аэромагнитных данных и технологий моделирования программного комплекса «Интегро». Основу моделирования составляет цифровая карта редуцированного к полюсу аномального магнитного поля. Источники магнитных аномалий считаются расположенными в земной коре. 3D-распределение относительной магнитной восприимчивости горных пород получено путем решения обратной задачи магниторазведки. Для разделения магнитных источников по пространственным частотам и глубине применены пересчет магнитного поля модели вверх, вычисление TDR производных, определяющих латеральные границы источников положительных аномалий магнитного поля. Проанализированы 2D-распределения магнитных источников модели для вертикальных и горизонтальных разрезов с глубинами 10, 15 и 20 км. Показана связь поверхностных и глубинных структур магнитных источников земной коры региона.*

**Ключевые слова:** Белое море, земная кора, аномальное магнитное поле, эффективная магнитная восприимчивость, 3D-модель, программный комплекс «Интегро».

### Введение

Районом исследования является регион Белого моря, находящийся в зоне сочленения поднимающегося Фенноскандинавского щита и перекрытой осадочными отложениями Русской плиты. Проявления кимберлитового магматизма на территории региона активно разрабатываются алмазодобывающей промышленностью. Важной задачей экономического развития является поиск кимберлитовых трубок и других месторождений полезных ископаемых.

При наличии мощного осадочного чехла основным методом поиска остается аэромагниторазведка, обладающая высокой производительностью при работе на больших площадях. Ограничения метода связаны с трудностями выделения аномалий в сложных магнитных полях на фоне помех и определения размеров и глубин залегания источников аномалий.

Решать эти и другие проблемы помогают модели, оценивающие параметры источников аномалий по компонентам аномального магнитного поля. Петромагнитные модели связывают аномальное магнитное поле с магнитными свойствами слагающих недра горных пород. Интерес к этим моделям связан со способностью изверженных горных пород сохранять в намагниченности сведения о геомагнитном поле, синхронном моменту кристаллизации. Временное измерение моделей позволяет реконструировать прошлые состояния геомагнитного поля и литосферы.

Большое количество публикаций касается методики выделения магнитных аномалий, их математической интерпретации, истолкования природы источников [1]. Распространены модели, представляющие распределение источников в земной коре серий разрезов. Модели, изначально разрабатываемые как трехмерные [2], ориентируются на упрощенную геологическую картину строения недр и формаль-

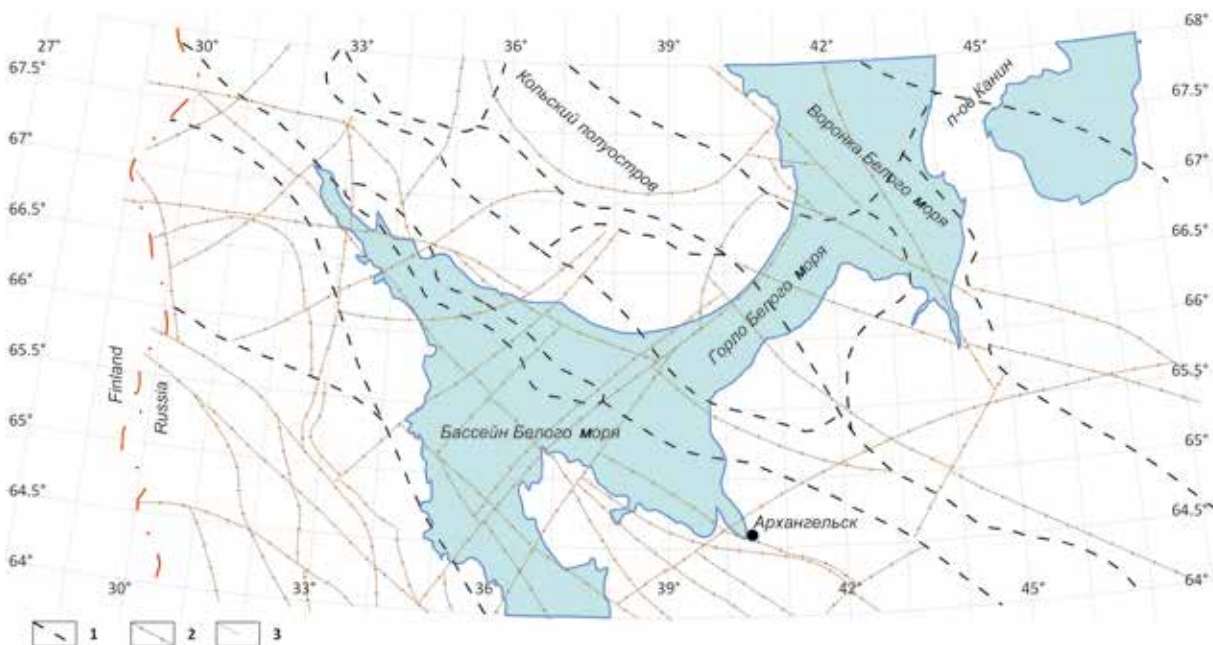


Рис. 1. Схема Белого моря и прилегающих территорий с расположением основных тектонических линейментов земной коры: 1 – тектонические границы блоков, 2 – внутриблоковые тектонические нарушения, 3 – государственная граница  
 Fig. 1. Scheme of the White Sea and adjacent territories with the location of the main tectonic lineaments of the earth's crust: 1 – tectonic boundaries of blocks, 2 – intrablock tectonic faults, 3 – state border

ные процедуры выделения компонент аномального магнитного поля.

В связи с высокой проникающей способностью магнитного поля разработка петромагнитных моделей глубинного строения недр являлась актуальной на протяжении всего периода активного геологического изучения региона. История формирования представлений о глубинном строении Белого моря и прилегающих территорий, в том числе с использованием аэромагнитных данных, описана в [3]. В этой работе предложена модель магнитоактивного слоя Беломорской рифтовой системы, рассматривающая структурные уровни слоя в связи с этапами тектонической активизации региона — от среднего и позднего рифея до событий последнего оледенения четвертичного периода.

Разработку новых магнитных моделей стимулируют компьютерные технологии, оперирующие большими базами данных, решающие задачи в условиях неопределенности, многопланово и разнообразно представляющие результаты исследований.

Современным инструментом моделирования является комплекс ГИС «Интегро», разработанный Отделением геоинформатики ВНИИгеосистем [4]. Этот комплекс, ориентирующийся на широкий круг проблем в науках о Земле, автоматизирует решение прямых и обратных геофизических задач, помогает строить и анализировать сложные модели, учитывать априорную информацию, проводить комплексирование методов.

Статья продолжает цикл работ авторов по изучению земной коры Белого моря и прилегающих территорий [5; 6].

Цель исследования — создание и анализ с помощью комплекса «Интегро» 3D магнитной модели земной коры Белого моря и прилегающих территорий.

### Материалы и методы

#### Исходные данные и положения

При построении 3D магнитной модели использованы:

- схема блокового строения региона;
- карты аномального магнитного поля ( $\Delta T_a$ ) в цифровом виде масштаба 1:1 000 000 [7; 8];
- 3D плотностная модель земной коры региона и схема глубины залегания раздела М [6];
- госгеолкарты России масштаба 1:1 000 000 и объяснительные записки к листам Q-35, 36, 37, 38 (третье поколение, 2009) [9];
- петрофизические и петромагнитная карты восточной части Фенноскандинавского щита масштаба 1:1 000 000 [10].
- схема распределения температур в разрезе коры [11];
- тектонические карты Белого моря и сопредельных территорий [12; 13].

На рис. 1 показано географическое положение региона, основные элементы его структуры, положения главных региональных разломов земной коры.

На рис. 2 приведена схема блокового строения региона. Обозначения блоков даны в табл. 1.

Для отображения неоднородностей в объеме земной коры региона и их сопоставления со структурами источников магнитных аномалий исполь-

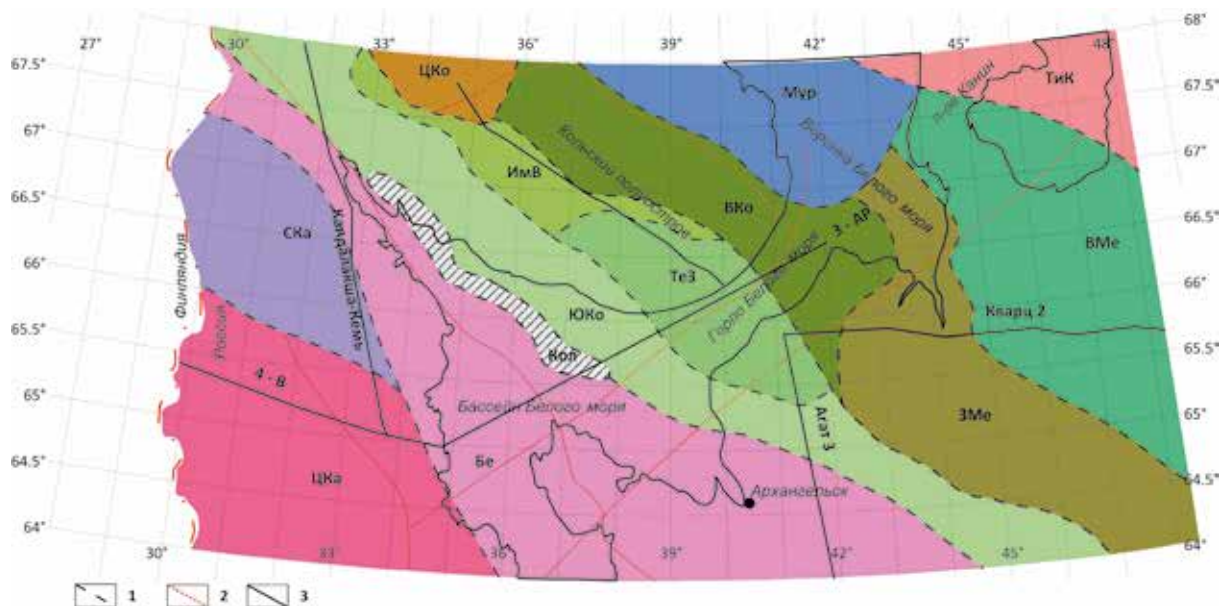


Рис. 2. Схема блокового строения региона: 1 – границы блоков, 2 – линии профилей комплексных глубинных исследований, 3 – государственная граница [5]

Fig. 2. Block structure diagram of the region: 1 – block boundaries, 2 – profile lines of complex depth studies, 3 – state border [5]

зована 3D плотностная модель [6]. Модель выделяет границы плотностных слоев земной коры осадочного, гранито-метаморфического, гранулито-базитового, раздела Мохоровичича (границы Мохо или поверхности М).

Базовые аэромагнитные данные для региона Белого моря, полученные в ходе съемок разных масштабов от 1:1 000 000 до 1:200 000 за 1958—1989 гг., преобразованы в цифровую матрицу с ячейкой 500×500 м восточной части листа Q-35 и листов Q-36—Q-38 в полном формате. Матрицу общей магнитной интенсивности редуцировали к полюсу. Полученная карта (рис. 3) представляет суперпозицию вкладов разноглубинных источников аномалий. Считается, что региональные аномалии магнитного поля определяют глубинные структуры земной коры, локальные аномалии связывают с источниками ее верхних этажей.

При задании в модели интервала глубин источников магнитных аномалий во внимание приняты выводы работ [11; 14; 15]. Согласно им значения теплового потока в регионе 10—50 мВт/м<sup>2</sup> соответствуют холодной лито-

Таблица 1. Основные геоблоки Беломорского региона

Обозначение (индекс)	Название	Возраст
ЦКа	Центрально-Карельский блок	Поздний Архей
Ска	Северо-Карельский блок	Поздний Архей
Бе	Беломорский блок	Архей
Кол	Колвитский блок	Архей
Юко	Южно-Кольский блок	Архей
ТеЗ	Терско-Золотицкий блок	Архей
ИмВ	Имандра-Варзугский блок	Архей
ЦКо	Центрально-Кольский блок	Ранний Архей
Мур	Мурманский блок	Ранний Архей
Вко	Восточно-Кольский блок	Ранний Архей
ЗМее	Западно-Мезенский блок	Палеозой
ВМее	Восточно-Мезенский блок	Палеозой
Тик	Тимано-Канинский блок	Палеозой

сфере. Малый градиент температуры по данным измерений в скважинах указывает на изотерму Кюри (~580°C для магнетита), расположенную в мантии. Мантийные интрузии в нижней коре не вносят заметного вклада в наблюдаемое аномальное магнитное поле.

С учетом изложенного мантию региона будем считать немагнитной, источники аномалий располагать в земной коре, принимая за границу их нижних кромок раздел М. Аналогичные положения характерны для



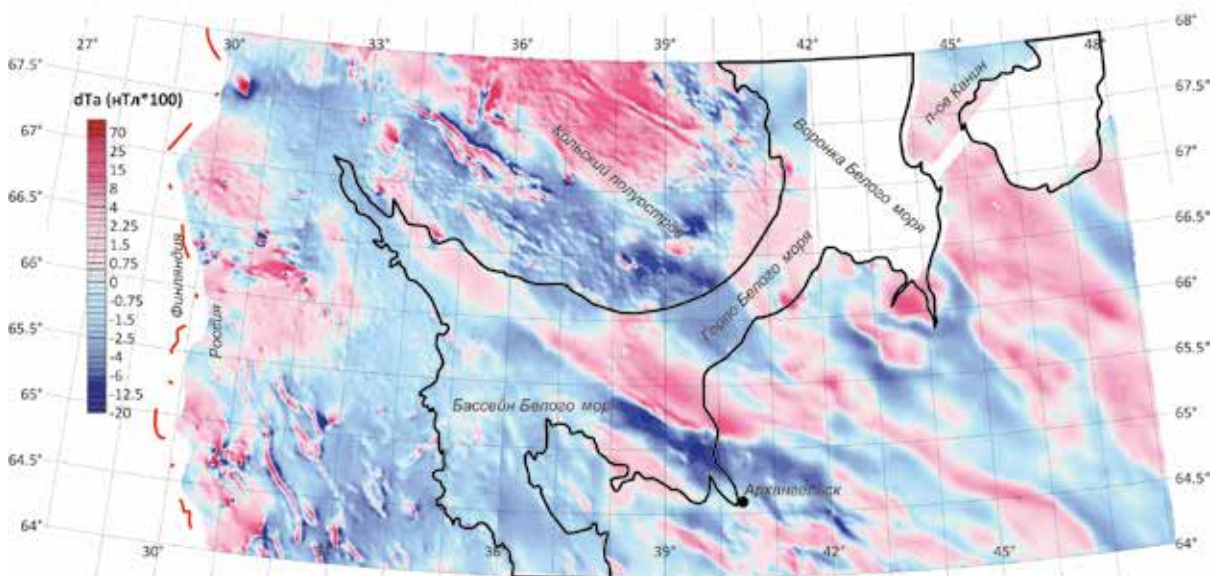


Рис. 3. Цифровая карта аномального магнитного поля, редуцированная к полюсу  
 Fig. 3. Digital map of the anomalous magnetic field reduced to pole

большинства известных петромагнитных моделей земной коры региона [16].

Другая проблема касается выбора значений магнитной восприимчивости для горных пород в магнитных моделях земной коры. В некоторых моделях используют табличные значения магнитной восприимчивости известных пород или рассчитывают их по плотности горных пород с помощью регрессионных уравнений. Коэффициенты уравнений вычисляют для определенных литологических групп горных пород [17]. Методику применяют для сравнительно небольших, однородных по составу пород территорий и скважинных данных. На больших площадях мозаичного строения она не работает.

При решении обратной задачи магниторазведки для региона Белого моря мы ориентировались не на абсолютные значения магнитной восприимчивости горных пород, а на условную величину — относительную магнитную восприимчивость, используемую в магнитных моделях пакета «Интегро» [4].

#### Технологии обработки данных и моделирования

Этапы построения и анализа 3D-модели комплексом «Интегро» включали подготовку цифровой карты аномального магнитного поля региона, ее редуциацию к полюсу, решение обратной задачи магниторазведки, получение вертикальных и горизонтальных разрезов модели, пересчет модельного аномального магнитного поля вверх, вычисление производных пересчитанного поля, латеральное оконтуривание источников положительных аномалий в горизонтальных разрезах модели.

Обратные задачи в пакете «Интегро» решают на трехмерной сетке методом регуляризации, используя усовершенствованные спектральные алгорит-

мы на основе быстрого преобразования Фурье [18]. В нашей модели шаг сетки составлял 1 км по осям. Применяемые алгоритмы отличались высоким быстродействием, устраняли краевые эффекты, возникающие из-за латеральной ограниченности и отсутствия периодичности данных.

Стандартные геофизические процедуры пакета «Интегро» включали редуциацию аномального магнитного поля к полюсу, пересчет поля вверх, вниз, вычисление его производных. Редуциация магнитного поля к полюсу дает магнитное поле вещества той же намагниченности, направленное вертикально вверх, уменьшает влияние широты, рельефа местности, разных направлений ориентации намагниченности горных пород [19]. Продолжение магнитного поля вверх использует разную скорость изменения поля от источников разных глубин, позволяет получить картины распределения источников разных пространственных частот, выделить компоненту поля от источников горизонтальных слоев с заданными глубинами [19].

Комбинацию производных пересчитанного вверх модельного магнитного поля использовали как детектор латеральных границ источников. Роль пространственного фильтра выполняло отношение вертикальной и горизонтальной производных поля, выраженное арктангенсом угла, обозначаемое как TDR производная или TDR угол [20]. TDR производная положительна над магнитным источником, близка к нулю вблизи его границ, отрицательна там, где источник отсутствует [21]. Аналогично [21] латеральные границы источников положительных магнитных аномалий получали, накладывая прозрачные окна положительной TDR производной на горизонтальные срезы 3D магнитной модели.

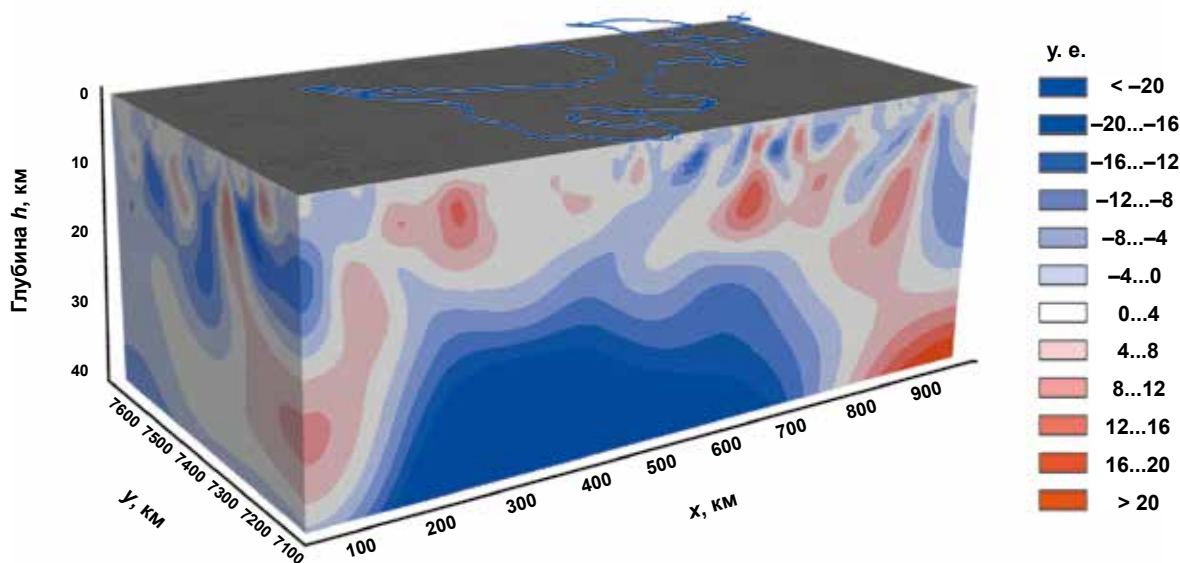


Рис. 4. Распределение относительной магнитной восприимчивости в объеме земной коры Беломорского региона  
 Fig. 4. Distribution of relative magnetic susceptibility in the volume of the Earth's crust of the Belomorsky region

### Результаты

На рис. 4 показано полученное решением обратной задачи магниторазведки объемное распределение относительной магнитной восприимчивости в земной коре Беломорского региона.

На рис. 5 это распределение представлено совокупностью вертикальных разрезов 3D магнитной модели (а) и изображениями отдельных разрезов (б—и).

Из рис. 4 и 5 видно, что крупные магнитные источники присутствуют на глубинах от 30 до 40 км, а на северо-западе региона — на глубинах от 10 до 40 км. Области намагниченности от источников на юго-востоке и северо-востоке региона поднимаются вверх, разветвляются в северо-западном и северо-восточном направлениях, распадаясь на тела меньших размеров. Малые тела сосредоточены в верхнем слое земной коры с глубинами от 0 до 10 км. Северо-западный источник высокой намагниченности, расположенный под Мурманским блоком (см. рис. 2 и 3), на глубине около 10 км образует две ветви, одна из которых почти достигает земной поверхности под Хибинским массивом.

На рис. 6 показаны результаты TDR фильтрации в горизонтальных разрезах модели с глубинами 10, 15 и 20 км. Большинство положительных источников разреза глубиной 10 км, протяженные в северо-западном направлении, трассируют Онежско-Кандалакшский, Керецкий, Мезенский грабены рифтовой системы Белого моря (рис. 6а). Для структур источников юго-западной и центральной частей региона характерно северо-восточное простирание. С глубиной разрезов структуры источников упрощаются, их тела увеличиваются в размерах, распадаются. В разрезе глубиной 15 км Онежский и Кандалакшский рифты представлены по отдельности (рис. 6б).

Керецкий рифт выглядит связанной структурой, но на разрезе глубиной 20 км распадается и он (рис. 6в).

В Горле Белого моря, Зимнебережном поднятии, на Онежском полуострове замыкания магнитных источников образуют кольцевые структуры. С ростом глубины разреза кольца структур расширяются, замыкания нарушаются.

Наложение горизонтальных разрезов рис. 6 с прозрачными окнами положительных TDR фильтров свидетельствует о близости латеральных проекций соответствующих разноглубинных источников.

### Обсуждение результатов

Из сравнения схемы блокового строения региона (см. рис. 2) и карты аномального магнитного поля (см. рис. 3) видно, что границы положительных и отрицательных аномалий магнитного поля трассируют границы литосферных блоков.

Распределение источников магнитных аномалий в объеме земной коры, представленное на рис. 4 и 5, подтверждает отнесение сравнительно небольших источников, определяющих локальные аномалии магнитного поля, к верхним этажам земной коры, более крупных источников региональных аномалий — к ее средним и нижним этажам. Распределение намагниченности земной коры не является хаотичным. Области намагниченности крупных источников, выявленных моделью в нижней коре, распространяются вверх, образуют разветвленные структуры, пронизывающие всю земную кору. В верхней коре ветви намагниченности выполаживаются, окончательно приобретают северо-западное и северо-восточное простирания в соответствии с наклоном земной коры, задаваемым поверхностью М [6].

Для источников, расположенных в слое земной коры глубиной 10—20 км, приуроченность к вер-

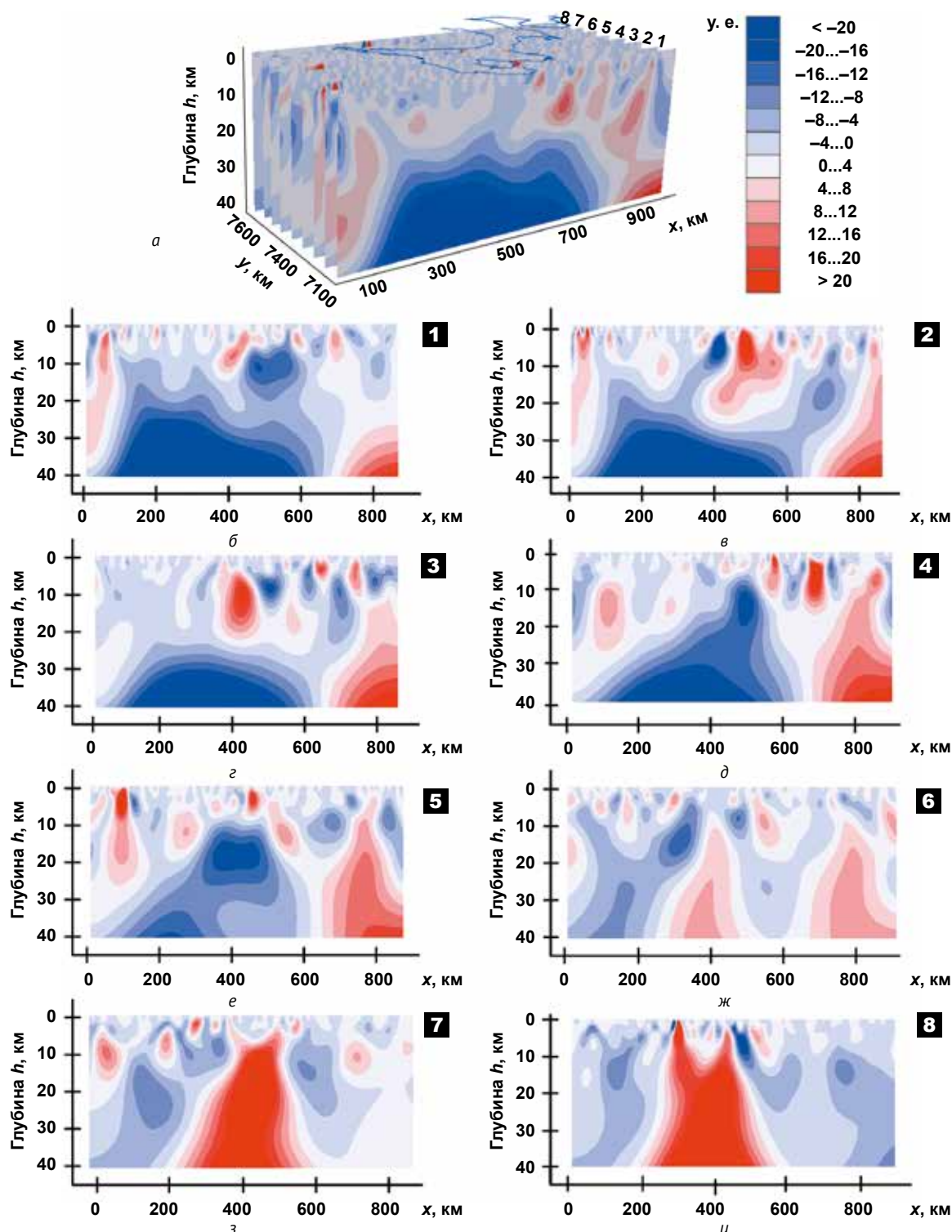


Рис. 5. Распределение относительной магнитной восприимчивости в объеме 3D магнитной модели представлено совокупностью вертикальных разрезов 1–8 (а), показанных на изображениях (б–и) соответственно  
 Fig. 5. The distribution of the relative magnetic susceptibility in the 3D magnetic model volume is represented by a set of vertical sections 1–8 (a) shown in images (б–и), respectively

тикальным структурам подтверждается близостью центров их латеральных проекций горизонтальных разрезов модели (см. рис. 5).

Распределение магнитных источников по глубине согласуется с представлениями об эволюции палеорифтовой системы Белого моря в ходе тектониче-

ской активизации региона, связанной с рифейско-вендским основным вулканизмом и среднепалеозойским (позднедевонским) щелочно-ультраосновным магматизмом [3]. Субвертикальные структуры намагниченности земной коры свидетельствуют об активности Беломорской шовной зоны, являющейся



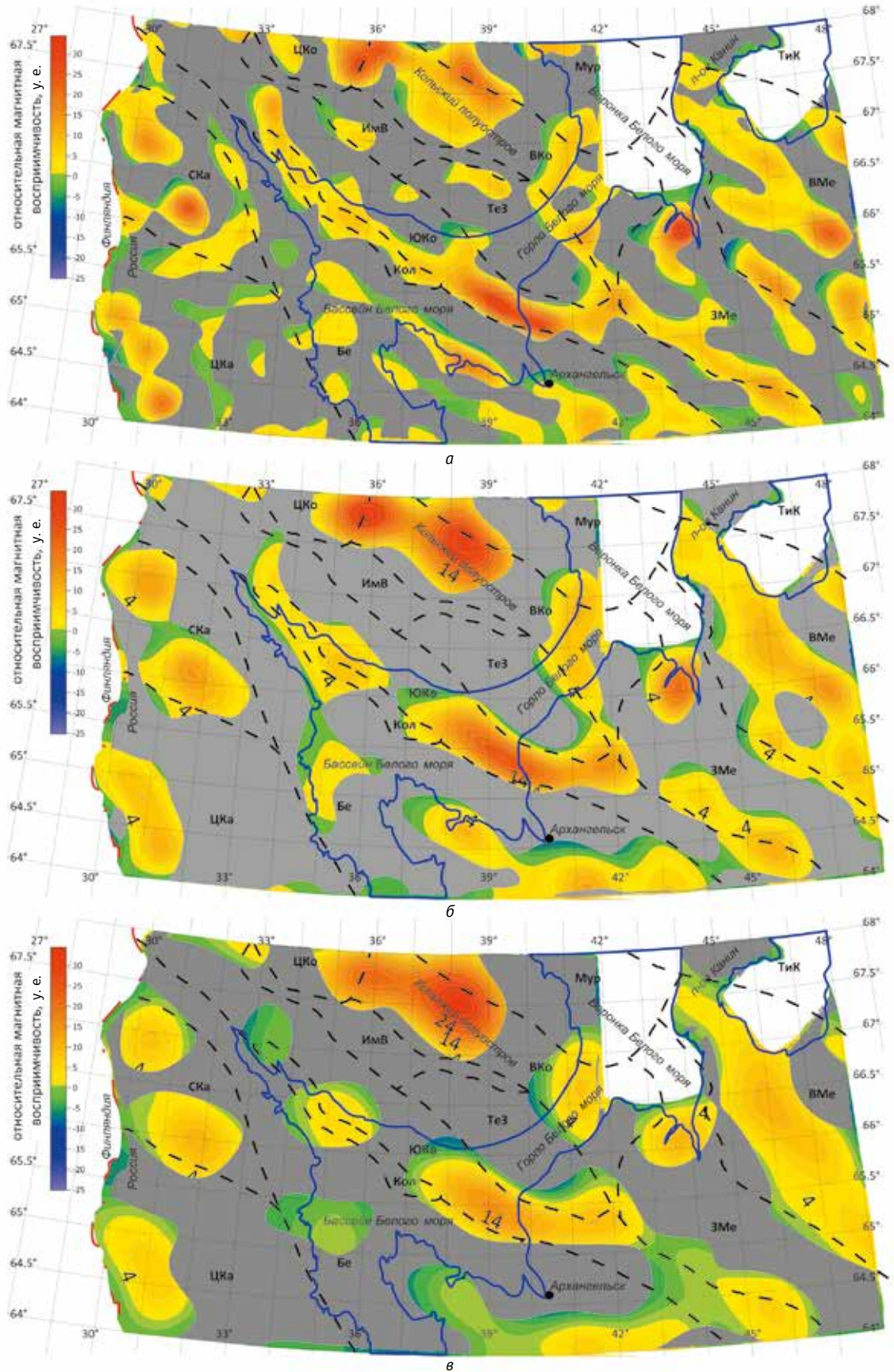


Рис. 6. Картины распределения источников положительных аномалий в срезах 3D-модели глубин 10 км (а), 15 км (б) и 20 км (в) в прозрачных окнах TDR фильтра

Fig. 6. Distribution patterns of positive anomaly sources in 3D model sections of depths of 10 km (a), 15 km (b) and 20 km (c) in transparent windows of TDR filter

магмо- и флюидоподводящим каналом с мантией. Интенсивные области намагниченности таких структур на средних глубинах указывают на стадийность магматизма.

Структуры магнитных источников северо-западного простирания верхней и средней коры трассируют основные рифтогенные грабены Белого моря. Накладываясь на структуры источников северо-восточного простирания, они вызывают замыкания магнитных тел, образуют кольца (см. рис. 5). Появление колец ожидаемо в тектонических узлах и в местах смены направлений главных разломов. Земная кора кольцевых структур является нарушенной и наиболее проницаемой. С верхними этажами колец в регионе связаны проявления кимберлитового магматизма и поля трубчатых тел.

В месте входа Горла Белого моря в Воронку сочленяются три рифтогенные структуры региона. Особенностью кольцевой структуры, выявленной здесь 3D магнитной и плотностной моделями [6], является депрессия границы М в окружении локальных поднятий. Такую топологию считают критерием алмазности [22]. Зимнебережная кольцевая структура находится на древнем выступе кристаллического фундамента. Алмазносное поле кимберлитов размещается в рифейском авлакогене северо-западного простирания в зоне сопряжения Кольского кратона и Мезенской синеклизы. С кольцевой структурой Онежского полуострова связано перспективное Ненокское поле развития трубчатых тел оливиновых мелилититов [3].

Касаясь вопроса о природе источников магнитных аномалий, отметим, что в самых верхних частях земной коры источниками интенсивных высокочастотных аномалий могут быть интрузии основного состава, флювио-гляциальные отложения позднего плейстоцена-голоцена — морены. В средних, нижних этажах земной коры преобладают слабомагнитные породы. Горные породы высокой магнитной восприимчивости относят к областям внедрения железистых флюидов, концентрации железистых вулканитов, интрузивных дифференциатов и продуктов их переработки. Такие области связывают с ядрами древнейшей консолидации коры, переработанными ядрами, шовными зонами, чарнокит-гранулитовыми поясами [23]. Основным носителем намагниченности горных пород является магнетит.

### Заключение

1. 3D магнитная модель земной коры Белого моря и прилегающих территорий разработана на основе данных аэромагнитных съемок, геолого-геофизических карт, схем, материалов, сейсмоплотностной модели земной коры Белого моря с применением технологий программного комплекса «Интегро».

2. Модель контрастно представляет блоковое строение региона и магнитные тела в объеме земной коры, позволяет оценить их положения, размеры, намагниченность, относит источники локальных

и региональных аномалий соответственно к верхним, средним и нижним этажам земной коры. Локализацию и визуализацию магнитных тел и структур облегчают разрезы 3D магнитной модели.

3. Модель наглядно демонстрирует связь поверхностных и глубинных структур земной коры региона. Субвертикальные структуры намагниченности начинаются от крупных источников в нижней коре и трансформируются по мере подъема путем разветвления и распада на отдельные тела в верхней коре.

4. Отвечающие разным пространственным частотам картины распределения источников горизонтальных разрезов 3D магнитной модели с глубинами 10, 15, 20 км выявляют протяженные структуры магнитных источников северо-западного простирания, трассирующие рифтогенные грабены Белого моря.

5. Кольцевые структуры магнитных источников могут представлять территории, перспективные для поиска полезных ископаемых.

Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А18-118020290086-1 при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 21-05-00481 «Строение и динамика литосферы Беломорья» и № 21-35-90034 «Комплексирование геофизических методов для 2D и 3D моделирования земной коры Белого моря и прилегающих территорий».

Авторы благодарны рецензентам и редколлегии журнала за полезные замечания, которые позволили уточнить ряд положений статьи.

### Литература

1. Блох Ю. И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. — М., 2009. — 231 с. — URL: <https://docplayer.ru/26469267-Yu-i-bloh-versiya-1-0.html>.
2. Starostenko V. I., Shuman V. N., Ivashenko I. N. et al. Magnetic fields of 3-D anisotropic bodies: Theory and practice of calculations // *Izv. Phys. Solid Earth*. — 2009. — Vol. 45. — P. 640—655. — DOI: 10.1134/S1069351309080047.
3. Балувев 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, вып. 4. — С. 1293—1312. — URL: <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0396>.
4. 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.
5. Шаров Н. В., Бакунович Л. И., Белашев Б. З. и др. Геолого-геофизические модели земной коры Беломорья // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2020. — Т. 11, вып. 3 — С. 566—582. — DOI: 10.5800/GT-2020-11-3-0491.



6. 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.
7. Карта аномального магнитного поля. — 1:1 000 000. — Q-35, 36 / Ред. Ю. В. Асламов; ВИРГ-Рудгеофизика. — СПб., 1999.
8. Карта аномального магнитного поля. — 1:1 000 000. — Q-37, 38 / Ред. Ю. В. Асламов; ВИРГ-Рудгеофизика. — СПб., 2000.
9. Государственная геологическая карта Российской Федерации. — 1:1 000 000. — Сер. Балтийская. — Л. Q-35, 36 (Апатиты): Объяснительная записка. — 487 с.; Л. Q-37 (Архангельск): Объяснительная записка. — 338 с.; Сер. Мезенская. — Л. Q-38 (Мезень): Объяснительная записка. — 350 с. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2009.
10. Петрофизические карты геологических формаций восточной части Балтийского щита (петроплотностная и петромагнитная). — 1:1 000 000: Объяснительная записка к картам / Науч. ред. Н. Б. Дортман. — М.; Л., 1980.
11. Цыбуля Л. А., Левашкевич В. Г. Тепловое поле Баренцево-морского региона. — Апатиты: КНЦ РАН, 1992. — 115 с.
12. Карта разломов в СССР и сопредельных странах. — 1:2 500 000 / Гл. ред. А. В. Сидоренко; ВСЕГЕИ. — Л., 1978.
13. 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.
14. Kimbell G. S., Stone P. Crustal magnetization variations across the Iapetus Suture Zone // Geological Mag. — 1995. — 132. — P. 599—609.
15. Wasilewski P. J., Mayhew M. A. The Moho as a magnetic boundary revisited // Geophysical Research Letters. — 1992. — Vol. 19. — P. 2259—2262.
16. Пашкевич И. К., Шаров Н. В., Савченко А. С., Старостенко В. И. Трехмерная геолого-геофизическая модель литосферы центральной части Карельского кратона // Геофиз. журн. — 2014. — Т. 36, № 6. — С. 58—78.
17. Меркулов В. П., Орехов А. Н., Волкова А., Коровин М. О. Разработка технологии поиска потенциально продуктивных объектов в отложениях доюрского комплекса Томской области. 3D моделирование гравитационных и магнитных полей / Petroleum Learning Center, Heriot Watt Univ., Том. политехн. ун-т. — [S. l.], 2019. — URL: <https://depneda.tomsk.gov.ru/uploads/ckfinder/277/userfiles/files/1045.pdf>.
18. Приезжев И. И. Построение распределений физических параметров среды по данным гравиразведки, магнитометрии // Геофизика. — 2005. — № 3. — С. 46—51.
19. Руководство пользователя ГИС «Интегро» — URL: <https://integro.ru/dl/ingeo/docs/>.
20. Miller H. G., Singh V. Potential field tilt — a new concept for location of potential field sources // J. of Applied Geophysics. — 1994. — Vol. 32. — P. 213—217.
21. Beamish D., Kimbell G., Pharaoh T. The deep crustal magnetic structure of Britain // Proceedings of the Geologists' Association. — 2016. — Vol. 127. — P. 647—663.
22. 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.
23. Крутиховская З. А. Глубинные магнитные неоднородности: миф или действительность? // Геофиз. журн. — 1986. — Т. 8, № 5. — С. 3—23.

### Информация об авторах

**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.

**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.

**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.

**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.

### Библиографическое описание данной статьи

Нилов М. Ю., Бакунович Л. И., Шаров Н. В., Белашев Б. З. 3D магнитная модель земной коры Белого моря и прилегающих территорий // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 375—385. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-375-385.

## 3D MAGNETIC MODEL OF THE EARTH'S CRUST OF THE WHITE SEA AND ADJACENT TERRITORIES

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

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

The article was received on March 5, 2021

### Abstract

An important task for the White Sea region, Russia's second largest diamond-producing province, is the search for magmatic bodies overlapped by sedimentary cover via magnetometer survey. The models, linking local and magnetic anomalies with their sources, are essential for interpretation of search results. The aim of the study is to build a 3D magnetic model of the Earth's crust for the White Sea region using aeromagnetic data and the modeling technologies of the Integro software package. The simulation is basing on a digital map of the pole-reduced anomalous magnetic field. The sources of magnetic anomalies are believed to be located in the Earth's crust. The researchers obtained 3D distribution of the relative magnetic susceptibility of rocks by solving the inverse problem of magnetic prospecting. To separate the magnetic sources by spatial frequencies and depth, the model magnetic field was recalculated upward, as well as the TDR derivatives, which determine the lateral boundaries of the sources of positive magnetic field anomalies, were calculated. The researchers further analyzed 2D distributions of the magnetic sources of the model for vertical and horizontal sections with depths of 10, 15 and 20 km, thus proving the relationship between the surface and deep structures of the magnetic sources of the Earth's crust in the region.

**Keywords:** *The White Sea, Earth's crust, anomalous magnetic field, effective magnetic susceptibility, 3D model, Integro software package.*

The work was carried out within the framework of the research and development project AAAA-A18-118020290086-1 with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the scientific projects No. 21-05-00481 "Structure and dynamics of the White Sea lithosphere" and No. 21-35-90034 "Integration of geophysical methods for 2D and 3D modeling of the Earth's crust of the White Sea and adjacent territories".

The authors are grateful to the reviewers and the journal editorial board for useful comments, which help to clarify a number of the article provisions.

### References

1. Blokh Yu. I. Interpreting gravity and magnetic anomalies. Moscow, 2009, 231 p. Available at: <https://docplayer.ru/26469267-Yu-i-bloh-versiya-1-0.html>. (In Russian).
2. Starostenko V. I., Shuman V. N., Ivashenko I. N., Legostaeva O. V., Savchenko A. S., Skrinik O. Ya. Magnetic fields of 3-D anisotropic bodies: Theory and practice of calculations. *Izv. Phys. Solid Earth*, 2009, vol. 45, pp. 640—655. DOI: 10.1134/S1069351309080047.
3. Baluev A. S., Brusilovsky Yu. B., Ivanenko A. N. Crustal structure of the Onega-Kandalaksha paleorift based on combined analysis of the White Sea's anomalous magnetic field. *Geodinamika i tektonofizika*, 2018, vol. 9, iss. 4, pp. 1293—1312. Available at: <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0396>. (In Russian).
4. Cheremisina E. N., Finkelstein M. Ya., Lyubimova A. V. GIS INTEGRO — import substitution software for geological and geophysical tasks. *Geoinformatika*, 2018, no. 3, pp. 8—17. (In Russian).
5. Sharov N. V., Bakunovich L. I., Belashev B. Z., Zhuravlev A. V., Nilov M. Yu. Geologo-geophysical models of the earth crust of the White Sea Region. *Geodinamika i tektonofizika*, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 566—582. DOI: 10.5800/GT-2020-11-3-0491. (In Russian).
6. Sharov N. V., Bakunovich L. I., Belashev B. Z., Nilov M. Yu. Velocity structure and density inhomogeneities of the White Sea crust. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 4 (40), pp. 43—53. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-43-53. (In Russian).
7. Anomalous magnetic field map. Scale: 1:1 000 000 Q-(35), 36. Ed. Yu. V. Aslamov. WIRG-Rudgeophysics. St. Petersburg, 1999. (In Russian).
8. Anomalous magnetic field map. Scale: 1:1 000 000 Q-37, 38. Ed. Yu. V. Aslamov. WIRG-Rudgeophysics. St. Petersburg, 2000. (In Russian).
9. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000. Baltic Series. Sheet Q-35, 36 (Apatity). Explanatory note. 2009. 487 p. Sheet Q-37 (Arkhangelsk). Explanatory note. 2009. 338 p. Mezen Series. Sheet Q-38 (Mezen). Explanatory note 2009 p. 350 p. St. Petersburg, VSEGEI, 2009. (In Russian).
10. Petrophysical maps of geological formations in the eastern Baltic Shield (petrodensity and petromag-

- netic). Explanatory note to 1:1 000 000 scale maps, Science editor N. B. Dortman. Leningrad, 1980. (In Russian).
11. Tsybulya L. A., Levashkevich V. G. Thermal field of the Barents Sea Region. Apatity, KSC, RAS, 1992, 115 p. (In Russian).
  12. Map of faults in the USSR and adjacent countries. Scale: 1:2 500 000. Chief Editor A. V. Sidorenko. Leningrad, VSEGEI, 1978. (In Russian).
  13. Baluev A. S., Zhuravlev V. A., Terekhov A. N., Przhiyalgovsky E. S. Tectonics of the White Sea and adjacent areas (Explanatory note to a 1:500 000 scale Tectonic Map of the White Sea and Adjacent Areas). Moscow, GEOS, 2012, 104 p. (In Russian).
  14. Kimbell G. S., Stone P. Crustal magnetization variations across the Iapetus Suture Zone. *Geological Magazine*, 1995, 132, pp. 599—609.
  15. Wasilewski P. J., Mayhew M. A. The Moho as a magnetic boundary revisited. *Geophysical Research Letters*, 1992, vol. 19, pp. 2259—2262.
  16. Pashkevich I. K., Sharov N. V., Savchenko A. S., Starostenko V. I. 3D geologo-geophysical lithospheric model of the central Karelian Craton. *Geofiz. Zhurn.*, 2014, vol. 36, no. 6, pp. 58—78. (In Russian).
  17. Merkulov V. P., Orekhov A. N., Volkova A., Korovin M. O. Developing a technology for prospecting potentially productive units in the rocks of a pre-Jurassic complex, Tomsk Region. 3D modelling of gravity and magnetic fields. Petroleum Learning Center. Heriot Watt university. Tomsk Polytechnical University, 2019. Available at: <https://depneda.tomsk.gov.ru/uploads/ckfinder/277/userfiles/files/1045.pdf>. (In Russian).
  18. Priezzhev I. I. Constructing the distribution of the physical parameters of the medium on the basis of gravity prospecting and magnetometry. *Geofizika*, 2005, no. 3, pp. 46—51. (In Russian).
  19. Category GIS “Integro” User Guide. Available at: <https://integro.ru/dl/ingeo/docs/>. (In Russian).
  20. Miller H. G., Singh V. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *J. of Applied Geophysics*, 1994, vol. 32, pp. 213—217.
  21. Beamish D., Kimbell G., Pharaoh T. The deep crustal magnetic structure of Britain. *Proceedings of the Geologists’ Association*, 2016, vol. 127, pp. 647—663.
  22. Golubev Yu. K., Vaganov V. I., Prusakova N. A. Principles of forecasting diamond prospects in the East European Platform. *Rudy i metally*, 2005, no. 1, pp. 55—70. (In Russian).
  23. Krutikhovskaya Z. A. Deep-seated magnetic heterogeneities: a myth or reality? *Geofiz. Zhurn.*, 1986, vol. 8, no. 5, pp. 3—23. (In Russian).

### Information about the authors

**Nilov, Michail Yur'evich**, 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.

**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.

**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.

**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.

### Bibliographic description of the article

**Nilov, M. Yu., Bakunovich, L. I., Sharov, N. V., Belashev, B. Z.** 3D magnetic model of the Earth's crust of the White Sea and adjacent territories. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 375—385. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-375-385. (In Russian).

© Nilov M. Yu., Bakunovich L. I., Sharov N. V., Belashev B. Z., 2021