



## MODELING OF THE LITHOSPHERE IN THE WHITE SEA REGION USING DECOMPOSITION OF ANOMALOUS GRAVITATIONAL AND MAGNETIC FIELDS

B.Z. Belashev , L.I. Bakunovich ✉, N.V. Sharov

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

**ABSTRACT.** The research area includes the White Sea and adjacent land located in the junction zone of the eastern part of the Fennoscandian Shield and the Russian Plate. The purpose of the study is to construct a model of the lithospheric structure of the region using decomposition of anomalous gravitational and magnetic fields and inverse problem solving for components of gravity and magnetic fields, respectively. The decompositions of the fields were provided by the singular spectral method in the software package "R 4.3.1". The inverse problems were solved using the programs of the "Integro" complex. The components of the fields help to identify and analyze buried geological structures. The rift system of the White Sea is most clearly represented by the fourth component of the gravitational and magnetic fields. The positions of density and magnetic inhomogeneities of the Earth's crust corresponding the components of the fields have been determined. The component model is compared with the seismic density and magnetic models of the lithosphere along the 3-AP geotraverse (Kem – White Sea Throat).

**KEYWORDS:** White Sea; lithosphere; rift system; gravitational and magnetic fields; density; magnetic susceptibility; seismic density and magnetic models; singular value decomposition; "R 4.3.1" and "Integro" software products

**FUNDING:** The study was funded from the budget of KarRC RAS (Institute of Geology).



### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Lyubov I. Bakunovich, [luba5\\_89@mail.ru](mailto:luba5_89@mail.ru)

Received: February 17, 2023

Revised: May 10, 2023

Accepted: May 12, 2023

**FOR CITATION:** Belashev B.Z., Bakunovich L.I., Sharov N.V., 2023. Modeling of the Lithosphere in the White Sea Region Using Decomposition of Anomalous Gravitational and Magnetic Fields. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (5), 0720. doi:10.5800/GT-2023-14-5-0720

**English version:** see article page online

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТОСФЕРЫ РЕГИОНА БЕЛОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕКОМПОЗИЦИИ АНОМАЛЬНЫХ ГРАВИТАЦИОННОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ

Б.З. Белашев, Л.И. Бакунович, Н.В. Шаров

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

**АННОТАЦИЯ.** Район исследования включает акваторию Белого моря и прилегающую сушу, находящиеся в зоне сочленения восточной части Фенноскандинавского щита и Русской плиты. Цель исследования – разработка моделей строения литосферы региона с использованием декомпозиции аномальных гравитационного и магнитного полей и решения для компонент обратных задач соответственно грави- и магниторазведки. Декомпозиция поля выполнена методом сингулярного разложения в пакете программ «R 4.3.1». Обратные задачи решены программами комплекса «Интегро». Компоненты помогают выявлять и детально анализировать погребенные геологические структуры. Рифтовая система Белого моря наиболее четко представлена четвертой компонентой гравитационного и магнитного полей. Определены положения плотностных и магнитных неоднородностей земной коры региона, отвечающих компонентам. Выполнено сравнение компонентной модели с сейсмоплотностной и магнитной моделями литосферы по геотраверсу 3-AP (Кемь – Горло Белого моря).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Белое море; литосфера; рифтовая система; гравитационное и магнитное поля; плотность; магнитная восприимчивость; сейсмоплотностная и магнитная модели; сингулярное разложение; комплексы программ «R 4.3.1» и «Интегро»

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования КарНЦ РАН (Институт геологии).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В статье представлены результаты моделирования литосферы акватории Белого моря и прилегающей суши, находящихся в зоне сочленения восточной части Фенноскандинавского щита и перекрытой осадочными отложениями Русской плиты. Геодинамику региона определяет продолжающееся постледниковое поднятие щита, подтекание океанической мантии Баренцева моря под континентальную кору, влияние давления спрединга Срединно-Арктического и Срединно-Атлантического хребтов, изменение ротационного режима Земли [Kutinov, 2021]. Особенности строения и динамики литосферы способствуют изучению связей континентального рифтогенеза, внутриплитного, кимберлитового магматизма и нефтегазоносности [Kearey et al., 2009]. Проводимые в регионе геологические исследования ориентированы на поиск углеводородов, кимберлитовых трубок, других полезных ископаемых [Kazanin et al., 2006; Aplonov, Fedorov, 2006].

Решать фундаментальные и поисковые задачи помогают модели глубинного строения литосферы, использующие результаты сейсмических, гравиметрических и магнитометрических съемок [Kheraskova et al., 2006; Zhuravlev, 2007; Lisitsyn et al., 2017]. Априорная информация моделей задана главным образом данными сейсмопрофилирования. В сравнении затрат методов при работе на больших площадях эффективными считаются аэромагнито- и гравиразведка.

Статья продолжает цикл работ авторов по моделированию глубинного строения Беломорья [Sharov et al., 2020a, 2020b; Nilov et al., 2021]. Рассматриваются

модели литосферы, опирающиеся на данные грави- и магниторазведки, компоненты аномальных гравитационного и магнитного полей. Декомпозиция полей, решение для компонент обратных задач помогают полнее и глубже проанализировать структуру полей, соотнести компоненты полей с геологическими объектами, определить пространственное положение последних, оценить плотность и магнитную восприимчивость составляющих их горных пород.

Этапы построения моделей включают декомпозицию аномальных гравитационного поля в редукции Буге и магнитного поля, редуцированного к полюсу, нахождение и визуализацию отвечающих компонентам соответствующих распределений горных пород, сопоставление результатов с известными моделями.

Моделирование проводилось с применением компьютерных алгоритмов и технологий. Декомпозиция потенциальных полей проводилась методом сингулярного разложения [Gantmakher, 2010], минимально использующим априорную информацию, дающим высокое качество реконструкции симулированных сигналов и изображений.

### 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

#### 2.1. Исходные данные

Исходные гравиметрические данные представлены фрагментом цифровой карты гравитационного поля в редукции Буге масштаба 1:1000000, построенной по данным гравиметрических съемок [State Geological Map..., 2009a, 2009b]. Анализируемый фрагмент карты в масштабе 1:250000 с размерами 427×497×3 пикселей

приведен на рис. 1, а. Геотраверсы 4В (Костомукша – Кемь) и 3-АР (Кемь – Горло Белого моря) [Sharov et al., 2010] выделены черной линией. Аналогичный фрагмент выделен в цифровой матрице общей магнитной интенсивности (ячейка 500×500 м), построенной по данным базовых аэромагнитных съемок [State Geological Map..., 2009a, 2009b, 2009c], редуцированной к полюсу [Nilov et al., 2021] (рис. 2, а).

Фрагмент содержит палеорифты Онежско-Кандалакшский, Керещо-Пинежский, Чапомско-Лешуконский, Мезенский северо-западного простирания. Рифты разделены межвпадинными перемычками и выступами кристаллического фундамента, перекрыты водами Белого моря и платформенными осадочными образованиями [Baluev et al., 2009].

Геотраверс 3-АР пересекает рифты, гравитационные и магнитные аномалии. По результатам обработки его профилей МОВ ОГТ, МОГТ, ГСЗ, а также методом сейсмоакустического профилирования построены сейсмоплотностная и магнитная модели [Sharov et al., 2020a; Belashev et al., 2020].

### 2.2. Методы обработки данных

Декомпозиция гравитационного, магнитного полей фрагмента проводилась алгоритмом сингулярного разложения 2D-SSA. По исходному 2D-распределению поля, двумерному сканирующему окну L алгоритм формирует траекторную прямоугольную матрицу Ганкеля Н, для квадратной матрицы  $D=N \cdot N'$  находит собственные числа  $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$ , соответствующие им собственные

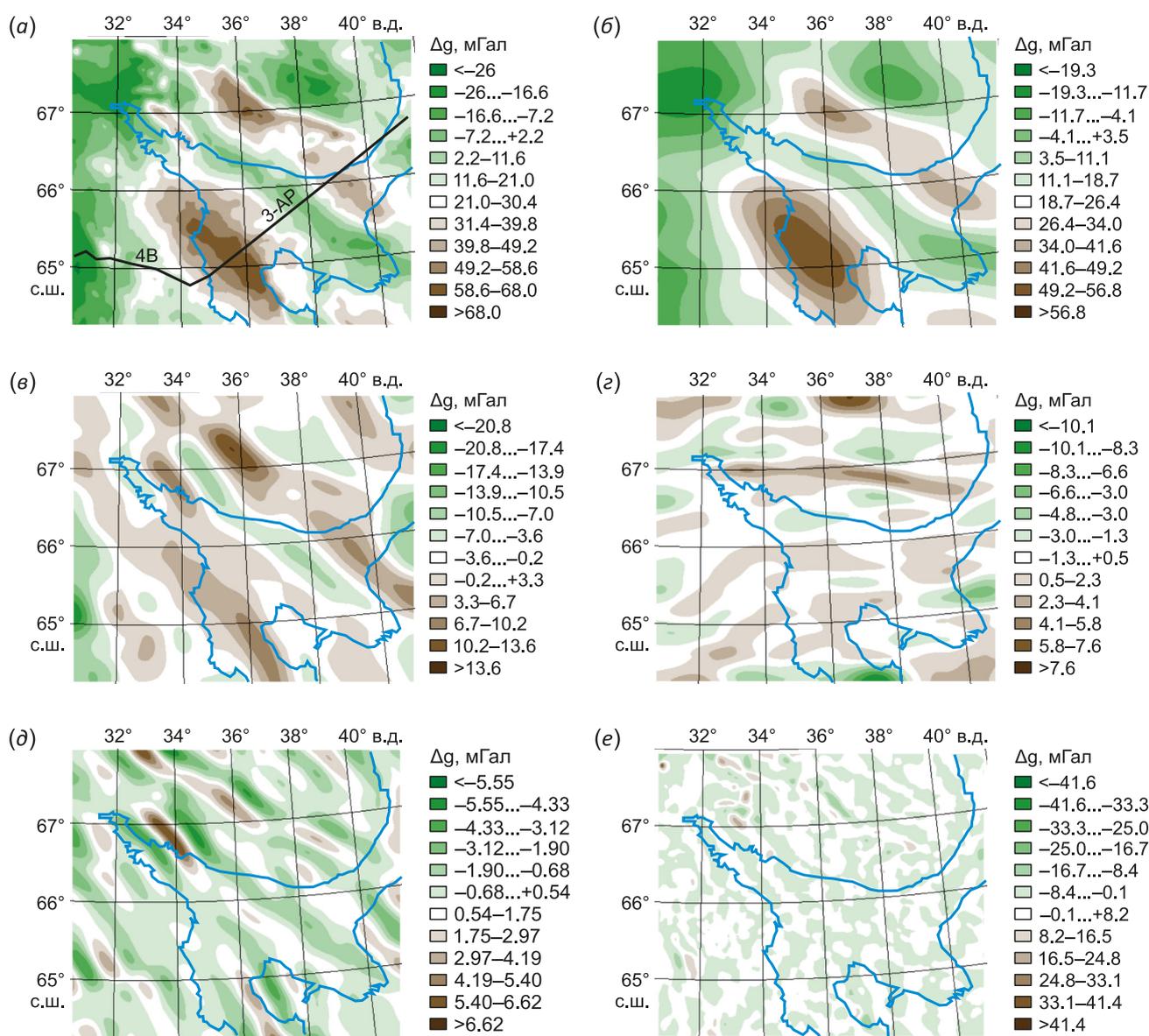
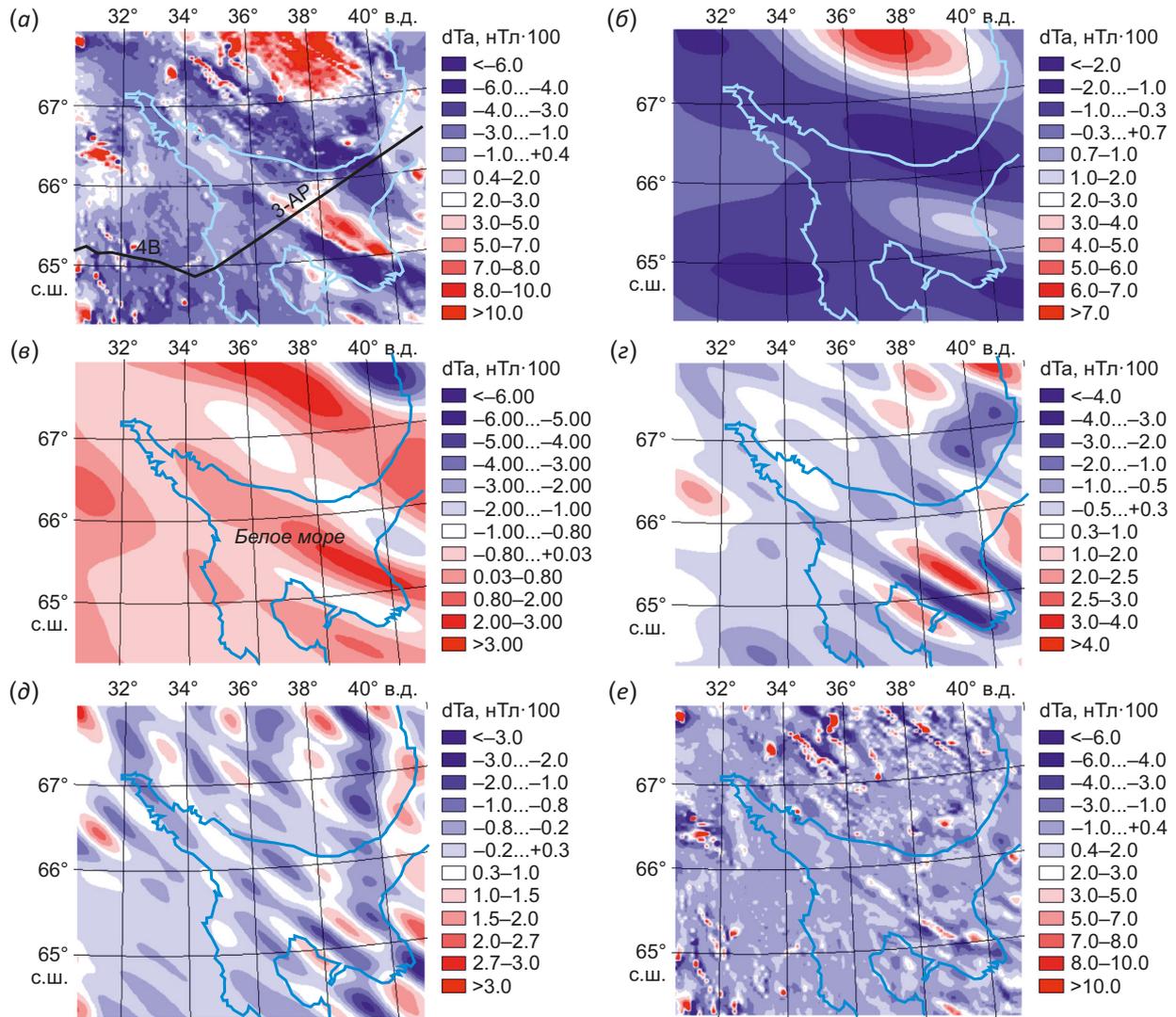


Рис. 1. Фрагмент цифровой карты аномального гравитационного поля (а) и первые пять компонент его сингулярного разложения (б-е).

Fig. 1. A fragment of the digital map of an anomalous gravity field (a) and the first five components of its singular value decomposition (b-e).



**Рис. 2.** Фрагмент цифровой карты аномального магнитного поля (а), первые четыре компоненты (б–д) и остаток (е) его сингулярного разложения.

**Fig. 2.** A fragment of the digital map of an anomalous magnetic field (a), the first four components (b–d) and the residue (e) of its singular value decomposition.

векторы  $U_1, \dots, U_d$ , где  $d = \max\{j: \lambda_j > 0\}$  и векторы  $V_j = H'U_j / \sqrt{\lambda_j}$ , по которым вычисляет компоненты сингулярного разложения поля  $X_j = \sqrt{\lambda_j} U_j V_j'$ .

Базис разложения определяется автоматически. Малое число положительных собственных чисел, вследствие низкого ранга матрицы D, позволяет эффективно сжимать данные, разделять сигнальные и шумовые компоненты полей.

Модуль «2D-SSA» входит в библиотеку «RSSA» свободно распространяемого пакета «R 4.3.1» [Golyandina et al., 2015]. Размеры сканирующего окна L составляли 75×75 пикселей.

В решении обратных задач задействованы программы комплекса «Интегро» [Cheremisina et al., 2018], использующие методы регуляризации, интерполяции и экстраполяции данных. Расчеты выполнены на двумерных, трехмерных сетках усовершенствованными спектральными алгоритмами быстрого преобразова-

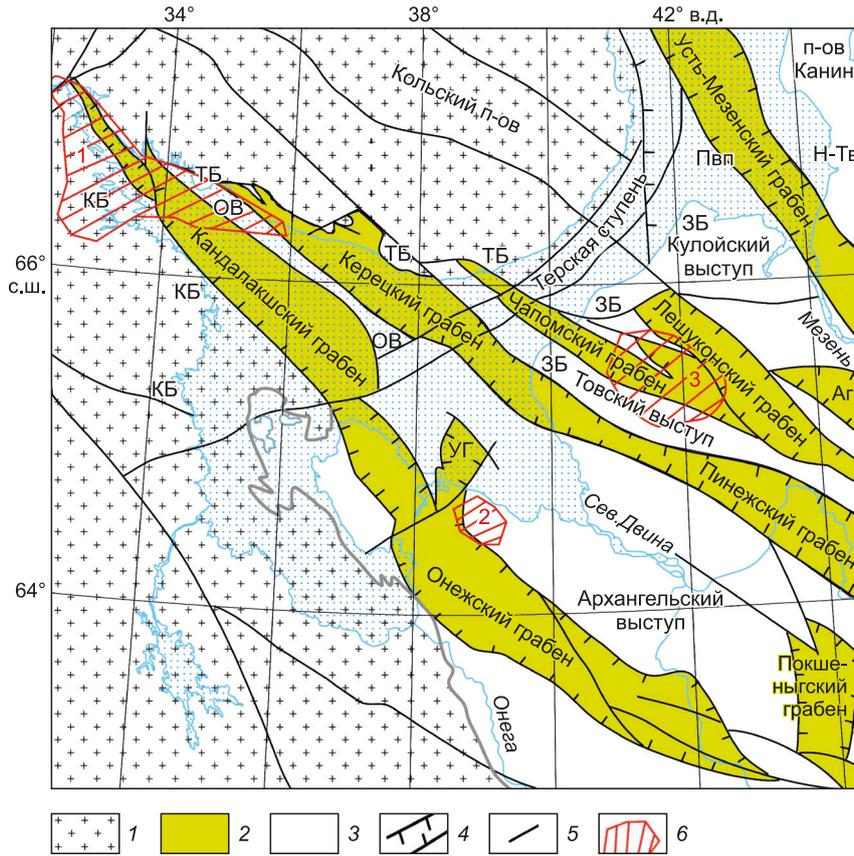
ния Фурье [Priezzhev, 2005], не дающими артефактов, вызванных латеральной ограниченностью и непериодичностью данных [Mitsyn, Ososkov, 2016].

Коэффициенты корреляции полей и их компонент вычислялись командой corr2 системы «MATLAB» [Statistics Toolbox..., 2005]. Для изображений с распределением данных, отличающихся по критерию  $\chi^2$  от нормального распределения, значимость коэффициентов корреляции матриц оценивалась по тесту Колмогорова – Смирнова kstest [Gavrilov, 2013].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 и 2 для аномальных гравитационного и магнитного полей показаны карты фрагмента (а) и компонент его сингулярного разложения для собственных чисел (б–е).

На рис. 3 приведена тектоническая схема палеорифтовой системы Белого моря.

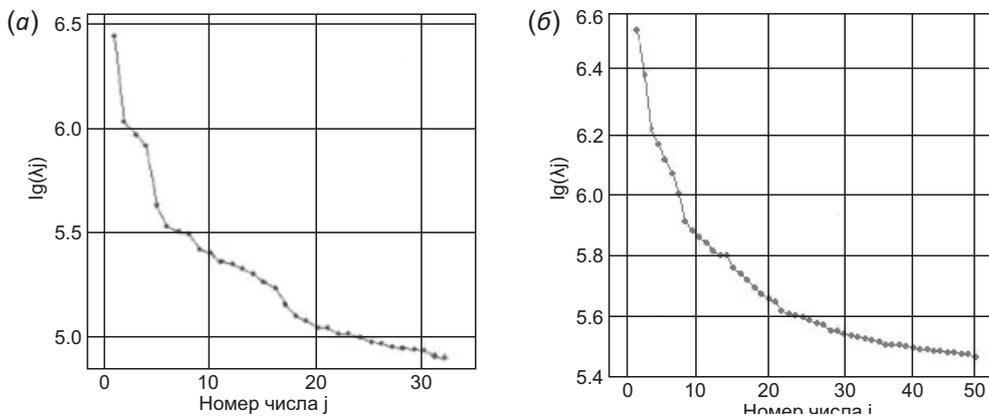


**Рис. 3.** Тектоническая схема палеорифтовой системы Белого моря (по [Sharov, 2022, с. 50, 68].

Пвп – Понойская впадина, Н-Тв – Несско-Тылугский выступ, Аг – Азопольский грабен, Уг – Унский грабен, ТБ – Терский берег, ЗБ – Зимний берег, ОВ – Оленицкий вал. 1 – раннедокембрийские комплексы Фенноскандинавского щита; 2 – терригенный комплекс пород рифейского возраста, выполняющий рифтовые впадины; 3 – венд-палеозойский платформенный чехол, перекрывающий рифтогенные впадины; 4 – разломные ограничения рифтогенных грабенов; 5 – прочие разломы; 6 (КБ) – ареалы проявлений среднепалеозойского щелочного магматизма трубочно-дайкового типа: 1 – Кандалакшский, 2 – Нёнокский, 3 – Зимнебережный.

**Fig. 3.** A tectonic scheme of the White Sea paleorift system [Sharov, 2022, p. 50, 68].

Пвп – Ponooy basin, Н-Тв – Nessko-Tylugsky horst, Аг – Azopol graben, Уг – Unsky graben, ТБ – Tersky Coast, ЗБ – Winter Coast (Zimniy Bereg), ОВ – Olenitsky bar. 1 – Early Precambrian complexes of the Fennoscandian Shield; 2 – terrigenous complex of the Riphean rocks which act to fill the rift depressions; 3 – Vendian-Paleozoic platform cover, overlapping the rift depressions; 4 – fault limitations of rift grabens; 5 – other faults; 6 (КБ) – areas of manifestations of the Middle Paleozoic alkaline magmatism of the tube-dike type: 1 – Kandalaksha, 2 – Nenoksky, 3 – Zimnerezhny.



**Рис. 4.** Собственные числа сингулярного разложения фрагментов аномальных гравитационного (а) (см. рис. 1, а) и магнитного поля (б) (см. рис. 2, а).

**Fig. 4.** Eigenvalues of the singular value decomposition of anomalous gravity (a) (see Fig. 1, a) and magnetic (b) (see Fig. 2, a) field fragments.

Рис. 4 отражает собственные числа сингулярного разложения обрабатываемых фрагментов гравитационного и магнитного полей, характеризующие энергию компонент. На первые пять компонент разложения гравитационного поля приходится около 70 % энергии поля.

В табл. 1 даны коэффициенты корреляции  $r$  гравитационного поля фрагмента и последовательно суммируемых пяти его первых компонент.

Компоненты аномального гравитационного поля разных собственных чисел (см. рис. 1, б–е) отличаются энергией и пространственными частотами. У первой компоненты (б) с наибольшей энергией выделяются две крупные положительные аномалии и разделяющая их отрицательная аномалия силы тяжести, приходящаяся на широкую зону в области Керещко-Пинежского рифта. Компоненты поля (в–д) собственных чисел с номерами 2–4 близки по энергии. В компонентах (в, г) преобладают положительные, в компонентах (д, е) – отрицательные аномалии силы тяжести. У компонент (в, д) аномалии ориентированы в северо-западном направлении, у компоненты (г) аномалии имеют восточную и северо-восточную ориентацию. Эти направления соответствуют простираниям Кандалакшско-Онежского и Зимнегорского разломов земной коры. Большинство мелких отрицательных гравитационных аномалий компоненты (е) ориентированы таким же образом.

В первой компоненте магнитного поля фрагмента (см. рис. 2, б) крупные положительные и отрицательные аномалии вытянуты в северо-западном и западном направлениях. Вторая компонента магнитного поля фрагмента представляет картину слившихся положительных магнитных аномалий северо-западной ориентации (в). В третьей компоненте вокруг магнитных аномалий появляются овальные структуры северо-западной ориентации, регулярно расположенные также в направлении на северо-восток (г). У этой и следующей компоненты преобладают отрицательные магнитные аномалии. Мелкие магнитные аномалии четвертой компоненты, как и аномалии силы тяжести, трассируют элементы рифтовой системы Белого моря, имеют регулярное расположение в направлении на север (д). В остатке разложения редкие положительные аномалии представлены точечно (е).

**Таблица 1.** Коэффициенты корреляции гравитационного поля фрагмента и его компонент

**Table 1.** Correlation coefficients for the gravity field of the fragment and its components

Компоненты	1	1+2	1+2+3	1+2+3+4	1+2+3+4+5	Остаток
$r$	0.82	0.91	0.94	0.95	0.96	0.32

Примечание. Последний столбец – коэффициент корреляции исходного поля и остатка разложения.

Note. Last column contains correlation coefficient for the initial field and decomposition residue.

На рис. 5, 6 даны соответственно 3D-распределения условной плотности первых пяти компонент разложения аномального гравитационного поля и условной магнитной восприимчивости четырех компонент, остатка разложения аномального магнитного поля.

Положения источников аномалий компонент полей в литосфере визуализированы разрезами на глубине 40 (а), 30 (б), 20 (в), 10 (г) и 5 (д) км.

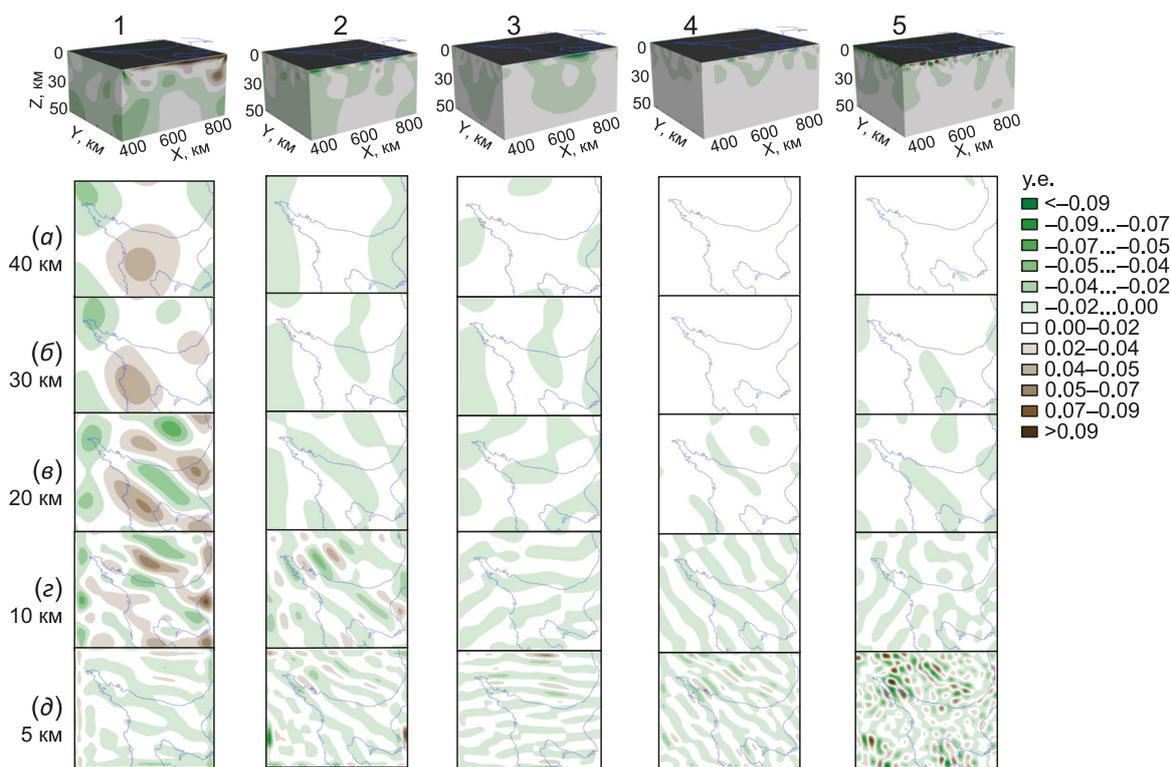
У первой компоненты разложения аномального гравитационного поля почти центрально-симметричное на глубине 40 км (1а) распределение плотности на глубине 30 км (1б) дополняется новым сгустком, становится асимметричным, слегка вытягивается в направлении северо-запада. На глубине 20 км (1в) растяжение в этом направлении усиливается: сгустки плотности множатся, разделяются, в области Керещко-Пинежского грабена закладывается зона растяжения земной коры. На глубине 10 км (1г) распределение плотности еще более детализируется. Продолжающееся растяжение в северо-западном направлении дополняет сдвиг по осевой линии Горла Белого моря, появляются области сжатия, растяжения, отвечающие горстам и грабенам рифтов Белого моря. На глубине 5 км (1д) присутствуют лишь зоны растяжения.

У компонент 2–5 области растяжения преобладают на всех разрезах. В компонентах 2 и 3 осесимметричные в направлении юг – север распределения плотности на глубинах 30–40 км на глубине 20 км поворачивают соответственно на северо-запад и северо-восток. На разрезе глубиной 10 км зоны разуплотнения разделяются и размножаются, вытягиваясь в этих направлениях и уменьшаясь в размерах в перпендикулярных направлениях.

У компоненты 3 преобладает северо-восточная, восточная ориентация зон растяжения. Для среза глубиной 5 км эта тенденция продолжается. Зоны растяжения все более ориентируются на запад и восток соответственно.

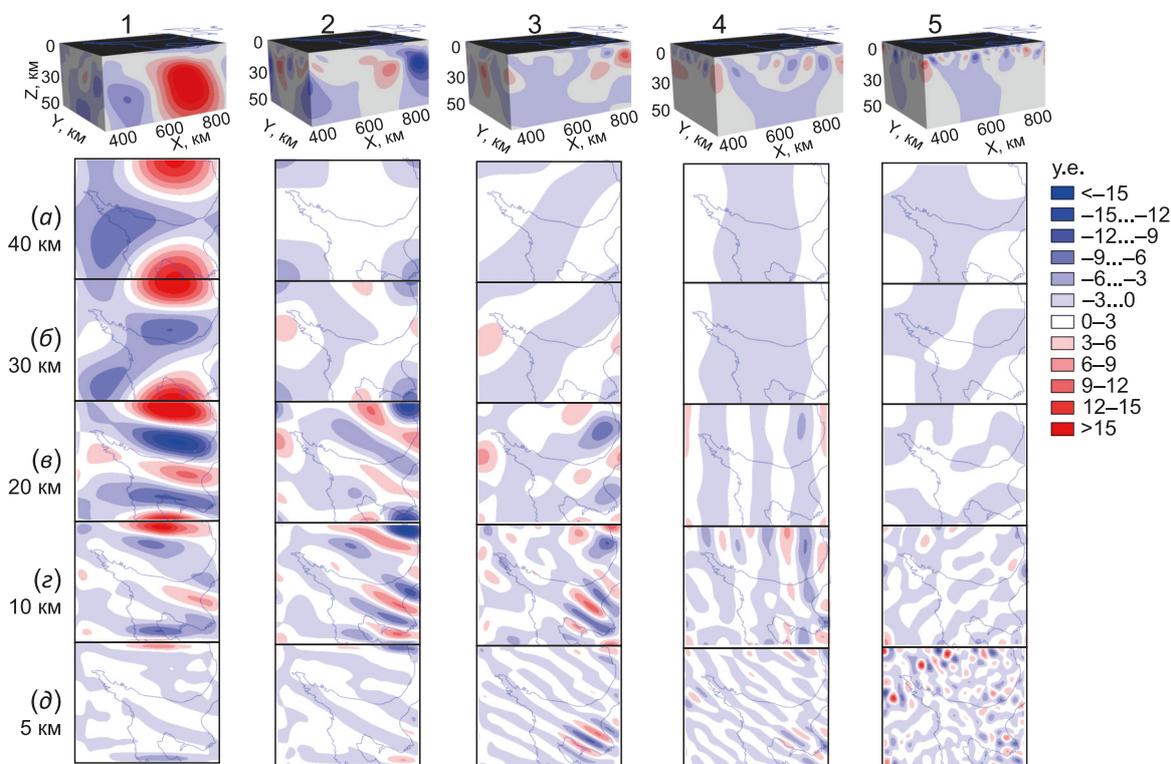
В нижних горизонтах земной коры у компонент 4 и 5 практически нет источников аномалий гравитационного поля. Массово они появляются на глубине не выше 20 км. На глубине 10 км в распределении плотности компоненты 5 преобладают зоны растяжения северо-восточной ориентации. На глубине 5 км распределение плотности становится мозаичным. Положительные, отрицательные отклонения плотности, перемежаясь, группируются в областях Костомукши, Онежского полуострова, вершины Кандалакшского грабена, вдоль шовной зоны Колмозеро-Воронья.

В распределении условной магнитной восприимчивости первой компоненты аномального магнитного поля проявились вертикальные юго-восточные и северо-восточные структуры намагниченности на глубине 20–40 км и 5–40 км соответственно и магнитная аномалия под Керещким грабеном на глубине 5–20 км (рис. 6, 1а–д). Для распределений второй и третьей компонент менее интенсивные и меньшие по размерам магнитные источники находятся на глубинах 10–30 км



**Рис. 5.** 3D-распределения условной плотности для первых пяти компонент (1–5) сингулярного разложения аномального гравитационного поля и его горизонтальные разрезы для глубины 40 (а), 30 (б), 20 (в), 10 (г) и 5 км (д).

**Fig. 5.** 3D conditional density distributions for the first five components (1–5) of the singular value decomposition of the anomalous gravitational field and its horizontal sections for depths of 40 (a), 30 (б), 20 (в), 10 (г) and 5 km (д).



**Рис. 6.** 3D-распределения условной магнитной восприимчивости первых четырех компонент (1–4), остатка (5) сингулярного разложения аномального магнитного поля и его горизонтальные разрезы для глубины 40 (а), 30 (б), 20 (в), 10 (г) и 5 км (д).

**Fig. 6.** 3D distributions of conventional magnetic susceptibility of the first four components (1–4) and residual singular value decomposition of the anomalous magnetic field (5) and its horizontal sections for depths of 40 (a), 30 (б), 20 (в), 10 (г) and 5 km (д).

и преимущественно ориентированы в северо-западном направлении (рис. 6, 2, 3б–г). Мелкие магнитные источники в распределении четвертой компоненты занимают глубины 5–10 км и ориентированы на север (рис. 6, 4г). В распределении остатка разложения точечные магнитные источники в срезе на глубине 5 км

сосредоточены преимущественно на северо-западе и юго-востоке (рис. 6, 5д).

Рис. 7, а, б, представляет сейсмоплотностную и гравитационную модели литосферы геотраверса 3-AP, построенные с учетом блочной структуры (а) и без нее (б) [Sharov et al., 2020a].

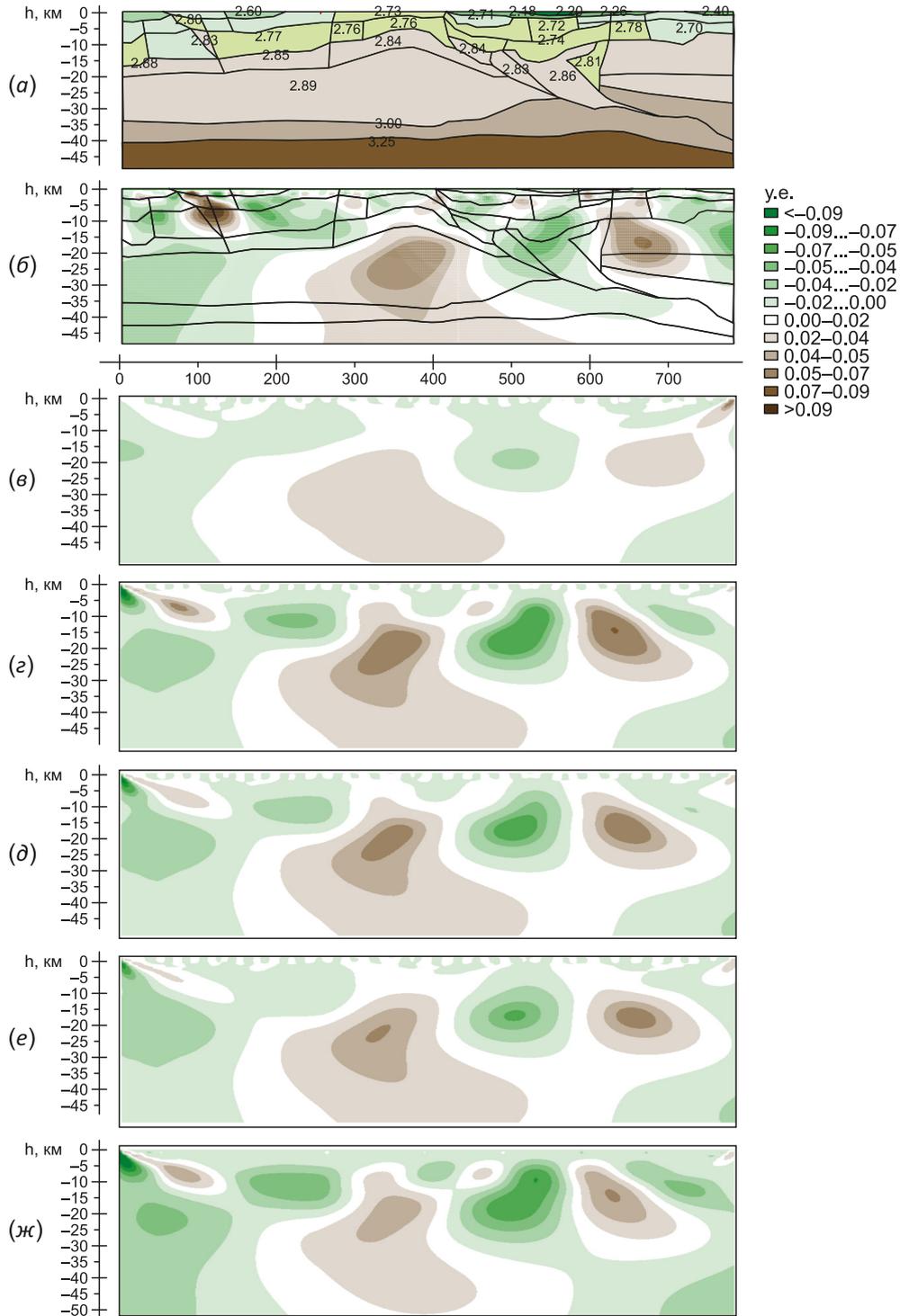
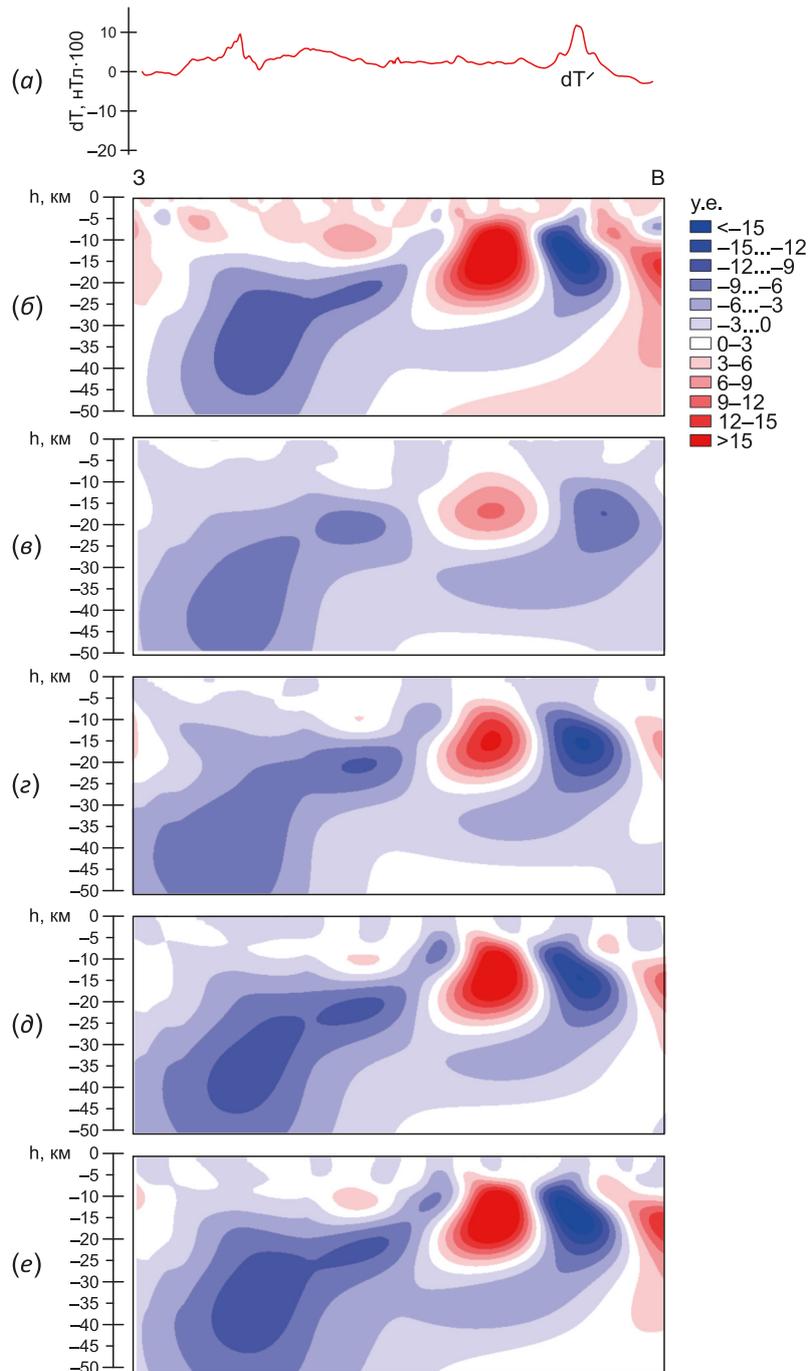


Рис. 7. Модели литосферы по геотраверсу 3-AP: (а) – сейсмоплотностная модель; (б) – гравитационная модель; (в–ж) – гравитационные модели последовательного суммирования пяти первых компонент гравитационного поля.

Fig. 7. Lithospheric models compiled along the 3-AP geotraverse: (а) – seismic density model; (б) – gravity model; (в–ж) – gravity models for successive summation of the first five gravity field components.



**Рис. 8.** Совпадающие исходное и модельное распределения аномального магнитного поля по геотраверсу 3-AP (а), 2D-распределение условной магнитной восприимчивости (б) в магнитной модели и аналогичные 2D-распределения для последовательно суммируемых компонент 1–4 разложения аномального магнитного поля соответственно (в–е).

**Fig. 8.** Overlapping initial and model distributions of the anomalous magnetic field along the 3-AP geotraverse (a), 2D distribution of conventional magnetic susceptibility in the magnetic model (b) and similar 2D distributions for successively summed 1–4 anomalous magnetic field decomposition components, (c–e).

Рис. 7, в–ж, отображает условно-плотностные распределения при последовательном суммировании первых пяти компонент гравитационного поля.

На рис. 8 показано распределение аномального магнитного поля по геотраверсу 3-AP (а), 2D-распределения условной магнитной восприимчивости (б) магнитной модели [Nilov et al., 2021], аналогичные рис. 7, в–е,

распределения компонент 1–4 сингулярного разложения магнитного поля (в–е).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Сингулярное разложение выполняет декомпозицию распределений на эмпирические моды. Главное ее преимущество заключается в формировании базиса

разложения непосредственно из обрабатываемых данных. Такой базис автоматически учитывает особенности, внутреннюю структуру данных, придает разложению свойства полноты, ортогональности, локальности, адаптивности. Получаемые моды описывают изменчивость сигнала с определением их относительного вклада в сигнал. Селекция мод по собственным числам (пространственные частоты, энергия), группам собственных чисел позволяет выделять тренды, шум, другие особенности распределений. Благодаря этим свойствам декомпозиция способна сокращать размерность данных, упрощать их интерпретацию. Разложение на эмпирические моды применяют при анализе многомерных массивов данных в метеорологии, океанологии, физике атмосферы [Elsner, Tsonis, 1996; Navara, Simoncini, 2010]. В области геофизики, геоморфологии, геоинформатики исследований практической направленности пока мало [Korotchenko et al., 2013].

Разложение сигналов на эмпирические моды проводят также методом Гильберта-Хуанга [Huang, Samuel, 2005; Dolgal, Khristenko, 2017; Kalinin et al., 2019; Diuk et al., 2018]. Краевые погрешности, возникающие при реконструкции сигналов из-за использования сплайновой интерполяции [Dolgal, Khristenko, 2017], и отсутствие апробированных алгоритмов обработки 2D-распределений делают предпочтительным выбор сингулярного разложения для декомпозиции аномальных гравитационного и магнитного полей.

Из рис. 1 и 2, б–е, видно, что ранжированные по собственным числам компоненты разложения отличаются пространственными частотами, по-разному описывают размеры, направление, знак и связность аномалий. Положительные аномалии гравитационного поля в компонентах разложения относят к уплотненным участкам литосферы, отрицательные – к зонам растяжения, сдвигов, разуплотнения горных пород. Положительные аномалии магнитного поля отражают наличие в составе горных пород ферромагнетика, главным образом магнетита. С глубиной при росте температуры недр магнитная восприимчивость уменьшается. Для исследуемого региона с низким тепловым потоком геотерму Кюри магнетита 584 °C считают находящейся в мантии, а магнитоактивный слой располагают в пределах земной коры [Wasilewski, Mayhew, 1992].

Низкочастотные компоненты потенциальных полей принято связывать с глубинными структурами кристаллического фундамента, высокочастотные компоненты – с источниками верхних слоев земной коры.

Наиболее детально связь гравитационных аномалий и элементов рифтовой системы Белого моря выражена четвертой компонентой поля (см. рис. 1, д). Ее отрицательные аномалии трассируют Кандалакшский, Онежский, Керецкий, Пинежский, Унский, Лешуконский, Чапомский, Малоушуйский грабены, Панойскую впадину, положительные аномалии связаны с межвпадинными перемычками, выступами кристаллического фундамента. Аналогичную функцию выполняют

отрицательные аномалии четвертой компоненты разложения магнитного поля (см. рис. 2, д).

В строении рифтовой системы Белого моря проявлены общие черты континентального рифтогенеза: наличие постоянного источника мантийного вещества, протяженных трогов, формирующих рифты, аккомодационных перемычек, разделяющих грабены и полуграбены рифтов, смещение рифта относительно мантийного выступа, утонение континентальной коры под рифтами. Особенностью палеорифтовой системы Белого моря является длительный период ее развития – 1.3 млрд лет, связанный, согласно моделям тектоники плит [Baluev et al., 2000], с окраинно-континентальным положением системы и ее чувствительностью к геодинамическим преобразованиям.

В формировании рифтовой системы Белого моря выделяют позднепроторозойский этап 1.3–1.2 млрд лет образования континентальной окраины Балтики, познерифейский этап, отражающий растяжения тиманской окраины Балтики после распада Родинии и раскрытия палеоокеана Япетус, девонскую активацию системы, вызванную закрытием Япетуса, заложением Восточно-Баренцевского рифтогенного трога, позднекайнозойский этап образования современных тектонических впадин Белого моря, наследующих рифейские рифты, который относится по времени к формированию Североатлантического и Арктического океанов.

О наличии источника и канала поступления мантийного вещества в земную кору в анализируемых моделях свидетельствует центральная уплотненная область на рис. 5 (1а) и рис. 7. Каналы, связывающие ее с апофизами, на больших и средних глубинах не видны. На них указывают сходящиеся зоны разуплотнений на рис. 7. В приповерхностных областях с высоким пространственным разрешением каналы визуализированы.

Распределения условной магнитной восприимчивости рис. 6 частично согласуются с результатами модели магнитоактивного слоя Онежско-Кандалакшского палеорифта, Горла Белого моря с тремя структурными уровнями [Baluev et al., 2018]. Магнитные источники на глубине 10–30 км могут быть отнесены к нижнему уровню, связанному с рифтогенезом Беломорского подвижного пояса в среднем и позднем рифее, сопровождаемым проявлениями основного рифейско-вендского вулканизма. Источники в диапазоне глубин 1–10 км могут считаться результатом среднепалеозойской (позднедевонской) реактивации рифтовой системы Белого моря с проявлениями щелочно-ультраосновного магматизма. В верхней коре такие источники часто представлены роями щелочных даек, трубками взрыва. Сравнение для верхнего уровня магнитоактивного слоя с глубиной 0.2–1.0 км с данными моделирования не проводилось из-за шага дискретизации по глубине, выбранного в компонентной модели, 1 км.

На рис. 5, 6, 7, 8 видно несовпадение областей наибольших условных плотности и магнитной восприимчивости горных пород. Магнитные источники в

основном приурочены к областям средней и низкой плотности.

У центральной уплотненной области (см. рис. 7, г, д, ж) нижняя часть ориентирована на северо-запад, средняя – на северо-восток, малая верхняя часть – на северо-запад, промежуточные части имеют субширотное простирание. Если эти части отражают этапы формирования рифтовой системы Белого моря, по ним можно пытаться оценить объемы вещества, поступающего в земную кору на каждом этапе.

Уплотнение в одних областях литосферы сопровождается растяжениями, пластические, изгибные, хрупкие деформации в соседних участках (см рис. 7, а). Поступление порций мантийного вещества, образование в поверхностных слоях земной коры уплотненных участков ведет к появлению новых и углублению прежних зон разуплотнения, их слиянию и образованию рифтов. Механизмы рифтогенеза обсуждаются в работах [Tevelev, Fedorovsky, 2016; Kazmin, Vyakov, 1997; Baluev et al., 2021].

Рис. 7 и рис. 8 демонстрируют близость результатов сейсмоплотностной, магнитной и компонентной моделей по геотраверсу 3-AP, отражают связи глубинных и поверхностных структур литосферы региона. На рис. 7 проявлены черты континентального рифтогенеза: изгиб земной коры над центральной уплотненной областью, компенсационный подъем раздела Мохо в области Керещко-Пинежского рифта, утонение в ней континентальной коры. Выраженные на рис. 7, в–е связи поверхностных зон разуплотнения с нижележащими могут быть вызваны глубинной дегазацией через эти структуры.

Из рис. 8, а, б, видно, что выраженные положительные аномалии магнитного поля порождаются локальными приповерхностными магнитными источниками. Источники, расположенные глубже, дают вклад в региональную составляющую магнитного поля. Более резкий по сравнению с гравитационным полем спад индукции магнитного поля с расстоянием от источника затрудняет определение положений последних в литосфере. Особенно это касается положений нижних кромок магнитных источников. Магнитные и компонентные модели, использующие решения обратной задачи, справляются с этой проблемой. Примерные положения крупных магнитных источников в литосфере уверенно дает уже первая мода разложения. Увеличение числа последовательно суммируемых компонент принципиально картину расположения магнитных источников не меняет, но постепенно дополняет ее деталями.

Сравнение рис. 7 и рис. 8 показывает, что протяженный магнитный источник приходится на широкую зону разуплотнения на глубине от 30 до 5 км. Заполняющими ее породами низкой плотности и высокой магнитной восприимчивости могут быть серпентиниты, образующиеся при действии воды на гипербазитовые породы дуниты [Komarov, 1965]. Получающийся из оливина дунитов магнетит дает серпентинитам магнитную восприимчивость около 0.15 при их средней

плотности около 2600 кг/м<sup>3</sup>. В процессе серпентинизации выделяется водород, восстанавливающий металлы, формирующий дегазационный и тепловой потоки. Неустойчивость серпентина при температуре выше 400 °C определяет верхнюю границу глубины его залегания в земной коре. По оценкам теплового потока 10–50 мВт/м<sup>2</sup> в изучаемом регионе и результатам 3D геотермального моделирования [Tsibulua, Levashkevich, 1992; Khutorskoy et al., 2013] изотерме 400 °C отвечают глубины 20–30 км. Свидетельством серпентинизации является каменный массив, находящийся в южной части Белого моря. Ультрабазиты Разострова представлены серпентинизированными дунитами и гарцбургитами [Stepanov, Stepanova, 2007].

Другой аспект серпентинизации связан с воздействием растворенной в воде углекислоты на мантийные перидотиты, выдавливаемые по разломам в земную кору. Образующиеся в ходе реакции метан и сложные углеводороды накапливаются в зонах серпентинизации, мигрируют по каналам дегазации [Raznitsin et al., 2020]. Подпитка зон новыми порциями мантийного вещества делает такой источник углеводородов возобновляемым. Как видно из рис. 7 и рис. 8, поиск таких зон удобно вести, сопоставляя 3D и 2D гравитационные и магнитные модели, а при получении количественных оценок положений и содержания источников – использовать компоненты сингулярного разложения геофизических полей.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная на основе данных аэросъемок 3D-компонентная модель литосферы региона Белого моря проводит декомпозиции аномальных гравитационного, магнитного полей алгоритмом сингулярно-спектрального анализа, решает для компонент полей обратные задачи грави- и магниторазведки, получая соответствующие компонентам распределения условных плотности и магнитной восприимчивости горных пород в объеме земной коры. Преимущество подхода заключается в совместимом с исследуемыми полями автоматически формируемом базисе разложения, обладающем свойствами полноты и ортогональности.

Компоненты сингулярного разложения адекватно отображают структуру аномальных гравитационного и магнитного полей, выявляют региональные и локальные аномалии, отличающиеся положением, знаком, формой, размерами, ориентацией. Крупные аномалии соответствуют первым, ранжированным по собственным числам, компонентам полей. Рифтовую систему Белого моря подробно описывают четвертые компоненты гравитационного и магнитного полей с аномалиями, трассирующими грабены, полуграбены, межвпадинные перемычки. Компоненты полей с большими номерами собственных чисел характеризуют мелкие аномалии верхних слоев земной коры, погрешности измерения и редукции полей.

Соответствующие компонентам аномальных полей распределения условных плотности и магнитной

восприимчивости горных пород локализуют неоднородности в объеме земной коры, позволяют оценить их размеры, форму, ориентацию, состав, связи геологических структур. Условно-плотностные распределения компонентной модели демонстрируют слоистоблочное строение земной коры региона, наличие под Керецким и Кандалакшским грабенами связанного с мантией магмоподводящего канала, ориентацию поступающих в земную кору интрузий, их связи, наследование поверхностными участками свойств нижележащих структур.

Компонентные распределения условной магнитной восприимчивости горных пород подтверждают стратифицированное строение магнитоактивного слоя земной коры региона. Распределения, относящиеся к трем первым компонентам разложения, дают вертикальные северо-восточную, юго-восточную структуры намагниченности, магнитную аномалию под Керецким рифтом на глубине 5–30 км. Распределения, отвечающие четвертой компоненте разложения аномального магнитного поля, описывают магнитные источники в слое 5–10 км, а распределения остатка разложения – источники на глубинах 5 км и менее. Приуроченность магнитных источников к областям разуплотнения земной коры региона указывает на связь процессов рифтинга, внутриплитного магматизма и серпентинизации.

3D-компонентная модель дает детальные сведения, касающиеся структур аномальных геофизических полей и их источников. Совместный анализ результатов плотностного и магнитного моделирования облегчает поиск в земной коре перспективных геологических структур, например зон серпентинизации – возможных возобновляемых источников глубинного нефте- и газообразования.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов и редколлегию журнала за проделанную работу по улучшению статьи и замечания, уточняющие ее отдельные положения.

## 7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Aplonov S.V., Fedorov D.L. (Eds), 2006. Geodynamics and Possible Oil and Gas Potential of the Mezensk Sedimentary Basin. Nauka, Saint Petersburg, 319 p. (in Russian)

[Геодинамика и возможная нефтегазоносность Мезенского осадочного бассейна / Ред. С.В. Аплонov, Д.Л. Федоров. СПб.: Наука, 2006. 319 с.]

Baluev A.S., Brusilovsky Yu.V., Ivanenko A.N., 2018. The Crustal Structure of Onega-Kandalaksha Paleorift Identified by Complex Analysis of the Anomalous Magnetic Field of the White Sea. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1293–1312 (in Russian) [Балуев А.С., Брусилковский 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]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0396>.

Baluev A.S., Kolodyazhny S.Yu., Terekhov E.N., 2021. Comparative Tectonics of the White Sea Paleorift System and Other Continental Rifting Systems. *Lithosphere* 21 (4), 469–490 (in Russian) [Балуев А.С., Колодяжный С.Ю., Терехов Е.Н. Сравнительная тектоника палеорифтовой системы Белого моря и других систем континентального рифтинга // Литосфера. 2021. Т. 21. № 4. С. 469–490]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-4-469-490>.

Baluev A.S., Moralev V.M., Glukhovskii M.Z., Przhivalgovskii E.S., Terekhov E.N., 2000. Tectonic Evolution and Magmatism of the Belomorian Rift System. *Geotectonics* 34 (5), 367–379.

Baluev A.S., Zhuravlev V.A., Przhivalgovskii E.S., 2009. New Data on Structure of the Central Part of the White Sea Paleorift System. *Doklady Earth Sciences* 427, 891–896. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09060014>.

Belashev B., Bakunovich L., Sharov N., Nilov M., 2020. Seismic Density Model of the White Sea's Crust. *Geosciences* 10 (12), 492. <https://doi.org/10.3390/geosciences10120492>.

Cheremisina Ye.N., Finkelstein M.Ya., Lyubimova A.V., 2018. GIS INTEGRO – Import Substitution Software for Geological and Geophysical Tasks. *Geoinformatics* 3, 8–17 (in Russian) [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].

Diuk V.A., Komashinsky V.I., Malygin I.G., 2018. Investigation of the Empirical Mode Decomposition Method in the Scenario of Acoustic Emission Signal Analysis. *Information and Space* 4, 50–55 (in Russian) [Дюк В.А., Комашинский В.И., Малыгин И.Г. Исследование метода эмпирической модовой декомпозиции в задаче анализа акустической эмиссии // Информация и космос. 2018. № 4. С. 50–55].

Dolgal A.S., Khristenko L.A., 2017. Application of Empirical Mode Decomposition in Processing Geophysical Data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 328 (1), 100–108 (in Russian) [Долгаль А.С., Христенко Л.А. Применение эмпирической модовой декомпозиции при обработке геофизических данных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 100–108].

- Elsner J.B., Tsonis A.A., 1996. Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis. Plenum Press, New York, 164 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2514-8>.
- Gantmakher F.R., 2010. Matrix Theory. Fizmatlit, Moscow, 560 p. (in Russian) [Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Физматлит, 2010. 560 с.].
- Gavrilov A., 2013. Correlation Image Processing in Technical Vision Systems (in Russian) [Гаврилов А. Корреляционная обработка изображений в системах технического зрения, 2013]. Available from: <https://pandia.ru/text/79/389/25136.php> (Last Accessed November 15, 2022).
- Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K., 2015. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package. Journal of Statistical Software 67 (2), 1–78. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i02>.
- Huang N.E., Samuel S.S.P. (Eds), 2005. Hilbert–Huang Transform and Its Applications. World Scientific Publishing Co, Singapore, 323 p. <https://doi.org/10.1142/5862>.
- Kalinin D.F., Yanovskaya Yu.A., Dolgal A.S., 2019. Results of the Profile Complex Interpretation of Geopotential Fields through Empirical Mode Decomposition (EMD) Aimed at Oil-and-Gas Occurrence Prospects Assessment. Geophysics 1, 2–12 (in Russian) [Калинин Д.Ф., Яновская Ю.А., Долгаль А.С. Результаты профильной комплексной интерпретации геопотенциальных полей методом эмпирической модовой декомпозиции (ЕМД) с целью оценки перспектив нефтегазоносности // Геофизика. 2019. № 1. С. 2–12].
- Kazanin G.S., Zhuravlev V.A., Pavlov S.P., 2006. Structure of the Sedimentary Cover and Petroleum Capacities of the White Sea. Drilling and Oil 2, 26–28 (in Russian) [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].
- Kazmin V.G., Vyakov A.F., 1997. Continental Rifts: The Structural Control of Magmatism and Continental Breakup. Geotectonics 31 (1), 16–26.
- Kearey Ph., Klepeis K.A., Vine F.J., 2009. Global Tectonics. Wiley-Blackwell, 482 p.
- Kheraskova T.N., Sapozhnikov R.B., Volozh Yu.A., Antipov M.P., 2006. Geodynamics and Evolution of the Northern East European Platform in the Late Precambrian as Inferred from Regional Seismic Profiling. Geotectonics 6, 434–449. <https://doi.org/10.1134/S0016852106060021>.
- Khutorskoy M.D., Akhmetzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornykh L.V., Polyak B.G., Sukhoi E.A., Tsybulya L.A., 2013. Geothermy of the Arctic Seas. GEOS, Moscow, 238 p. (in Russian) [Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В., Леонов Ю.Г., Подгорных Л.В., Поляк Б.Г., Сухих Е.А., Цыбуля Л.А. Геотермия Арктических морей. М.: ГЕОС, 2013. 238 с.].
- Komarov A.G., 1965. Oceanic Ridges and Rift Structure. Geological Nature of Magnetic and Gravitational Anomalies above the Rift Valley. Priroda 7, 95–98 (in Russian) [Комаров А.Г. Океанические хребты и структура рифта. Геологическая природа магнитных и гравитационных аномалий над рифтовой долиной // Природа. 1965. № 7. С. 95–98].
- Korotchenko R.A., Semchenko A.N., Yaroshchuk I.O., 2013. Application of Multidimensional EOF Analysis in Geoinformatics. Digital Signal Processing 3, 17–20 (in Russian) [Коротченко Р.А., Семченко А.Н., Ярошчук И.О. Применение многомерного EOF анализа в геоинформатике // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 3. С. 17–20].
- Kutinov Yu.G., 2021. Modern Geodynamic Regime of the Arctic Crustal Segment and Oil Formation. Research and Publishing Center "Sociosphere", Penza, 281 p. (in Russian) [Кутинов Ю.Г. Современный геодинамический режим Арктического сегмента земной коры и нефтеобразование. Пенза: НИЦ Социосфера, 2021. 281 с.].
- Lisitsyn A.P., Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P., Vorontsova V.G., 2017. The White Sea System. Vol. 4. The Processes of Sedimentation, Geology and History. Nauchny Mir, Moscow, 1030 p. (in Russian) [Лисицын А.П., Немировская И.А., Шевченко В.П., Воронцова В.Г. Система Белого моря: Процессы осадкообразования, геология и история. М.: Научный мир, 2017. Т. 4. 1030 с.].
- Mitsyn S.V., Ososkov G.A., 2016. Finite Difference Method for Numerical Extrapolation of Grid Models of Geophysical Fields. Geoinformatics 3, 29–34 (in Russian) [Мицын С.В., Ососков Г.А. Экстраполяция сеточных моделей геофизических полей методом конечных разностей // Геоинформатика. 2016. №3. С. 29–34].
- Navara A., Simoncini V., 2010. A Guide to Empirical Orthogonal Functions for Climate Data Analysis. Springer, Dordrecht, 152 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3702-2>.
- Nilov M.Yu., Bakunovich L.I., Sharov N.V., Belashev B.Z., 2021. 3D Magnetic Crustal Model of the White Sea and Adjacent Areas. Arctic Ecology and Economy 11 (3), 375–385 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-375-385>.
- Priezzhev I.I., 2005. Constructing the Distribution of Physical Environment Parameters on the Basis of Gravity Prospecting and Magnetometric Data. Geophysics 3, 46–51 (in Russian) [Приезжев И.И. Построение распределений физических параметров окружающей среды по данным гравиразведки, магнитометрии // Геофизика. 2005. № 3. С. 46–51].
- Raznitsin Yu.N., Gogonenkov G.N., Zagorovsky Yu.A., Trofimov V.A., Fedonkin M.A., 2020. Serpentinization of Mantle Peridotites as the Main Source of Deep Hydrocarbons of the West Siberian Oil and Gas Basin. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences 45 (1), 66–88 (in Russian) [Разницин Ю.Н., Гогоненков Г.Н., Загоровский Ю.А., Трофимов В.А., Федонкин М.А. Серпентинизация мантийных перидотитов как основной источник глубинных углеводородов Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2020. Вып. 45. №1. С. 66–88]. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-66-88>.
- Sharov N.V. (Ed.), 2022. Lithospheric Structure and Dynamics of the White Sea Region. KarRC RAS, Petrozavodsk,

239 p. (in Russian) [Строение и динамика литосферы Беломорья / Ред Н.В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 239 с.].

Sharov N.V., Bakunovich L.I., Belashev B.Z., Nilov M.Yu., 2020a. Velocity Structure and Density Heterogeneities of the White Sea's Earth Crust. *Arctic: Ecology and Economy* 4 (40), 43–53 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-43-53>.

Sharov N.V., Bakunovich L.I., Belashev B.Z., Zhuravlev V.A., Nilov M.Yu., 2020b. Geological-Geophysical Models of the Crust for the White Sea Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (3), 566–582 (in Russian) [Шаров Н.В., Бакунович Л.И., Белашев Б.З., Журавлев В.А., Нилов М.Ю. Геолого-геофизические модели земной коры Беломорья. Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 566–582]. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0491>.

Sharov N.V., Slabunov A.I., Isanina E.V., Krupnova N.A., Roslov U.V., Chipzova N.I., 2010. Seismological Cross-Section of the Earth's Crust along the Profile DSS – CMP "Land – Sea" Kalevala – Kem' – the White Sea Neck. *Geophysical Journal* 32 (5), 21–34 (in Russian) [Шаров Н.В., Слабуннов А.И., Исанина Э.В., Крупнова Н.А., Рослов Ю.В., Щипцова Н.И. Сейсмический разрез земной коры по профилю ГСЗ-ОГТ «Суша-море» Калевала – Кемь – горло Белого моря // Геофизический журнал. 2010. Т. 32. № 5. С. 21–34].

State Geological Map of the Russian Federation, 2009a. Baltic Series. Scale 1:1000000. Sheet Q-(35), 36 (Apatity). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 487 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Балтийская. Масштаб 1:1000000. Лист Q-35, 36 (Апатиты): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 487 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2009b. Baltic Series. Scale 1:1000000. Sheet Q-37 (Arkhangelsk). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 338 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Балтийская. Масштаб 1:1000000.

Лист Q-37 (Архангельск): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 338 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2009c. Mezen series. Scale 1:1000000. Sheet Q-38 (Mezen). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 350 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Мезенская. Масштаб 1:1000000. Лист Q-38 (Мезень): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 350 с.].

Statistics Toolbox for Use with Matlab, 2005. User's Guide. Version 5. Math Works, 912 p.

Stepanov V.S., Stepanova A.V., 2007. Basic and Ultrabasic Rocks of the Razostrov Island, the White Sea. In: *Geology and Minerals of Karelia*. Vol. 10. KarRC RAS, Petrozavodsk, p. 16–26 (in Russian) [Степанов В.С., Степанова А.В. Основные и ультраосновные породы Разострова, Белое море // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. Вып. 10. С. 16–26].

Tevelev Ark.V., Fedorovsky A.S., 2016. Transfer Zones in the Baikal Rift Structure. In: *Tectonics, Geodynamics and Ore Formation of Fold Belts and Platforms*. Proceedings of XLVIII Tectonic Conference (February 1–6, 2016). Vol. 2. GEOS, Moscow, p. 214–218 (in Russian) [Тевелев Арк.В., Федоровский А.С. Трансферные зоны в структуре Байкальского рифта // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ: Материалы XLVIII тектонического совещания (1–6 февраля 2016 г.). М.: ГЕОС, 2016. Т. 2. С. 214–218].

Tsibulua L.A., Levashkevich V.G., 1992. Terrestrial Heat Flow in the Barents Sea Region. KSC RAS, Apatity, 115 p. (in Russian) [Цыбуля Л.А., Левашкевич В.Г. Тепловое поле Баренцевоморского региона. Апатиты: КНЦ РАН, 1992. 115 с.].

Wasilewski P.J., Mayhew M.A., 1992. The Moho as a Magnetic Boundary Revisited. *Geophysical Research Letters* 19 (2), 2259–2262. <https://doi.org/10.1029/92GL01997>.

Zhuravlev V.A., 2007. The Crustal Structure of the White Sea Region. *Prospect and Protection of Mineral Resources* 9, 22–26 (in Russian) [Журавлев В.А. Структура земной коры Беломорского региона // Разведка и охрана недр. 2007. № 9. С. 22–26].