

## Модели глубинного строения земной коры палеорифтовой системы Белого моря по результатам комплексного анализа глубинных сейсмических профилей

А. С. Балувев<sup>1</sup>, Ю. В. Брусиловский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7, e-mail: albaluev@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, 117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36, e-mail: brusilovsky60@gmail.com

Поступила в редакцию 05.03.2025 г., принята к печати 22.08.2025 г.

**Объект исследований.** Глубинная структура консолидированной земной коры палеорифтовой системы Белого моря и Мезенской синеклизы. **Материалы и методы.** Двумерные сейсмоплотностные модели строения земной коры, построенные на базе опорных сейсмических профилей 3-АР (Кемь–Белое море–п-ов Канин), Агат-2, Агат-3, Кварц-2. Для интерпретации состояния глубинных слоев земной коры использовались распределение эффективной плотности субстрата и модель распределения источников магнитных аномалий, для построения которой применена методика двумерной инверсии аномального магнитного поля. Основой для анализа магнитного поля послужила схематическая карта аномалий магнитного поля, синтезированная авторами по материалам магнитных съемок, выполненных в акваториях Баренцева и Белого морей в разное время и предоставленных для их дальнейшей интерпретации. Главной задачей построения геолого-геофизических моделей глубинного строения консолидированной земной коры палеорифтовой системы Белого моря и Мезенской синеклизы стало установление генетических связей приповерхностных геологических структур с глубинными элементами строения земной коры. **Результаты.** По материалам комплексной интерпретации перечисленных выше материалов с учетом данных близповерхностного строения земной коры построены геолого-геофизические модели земной коры до уровня кора–мантия по четырем опорным сейсмическим профилям 3-АР, Агат-2, Агат-3, Кварц-2, пересекающим структуру Мезенской синеклизы в разных направлениях. Кроме того, в восточной части Мезенской синеклизы представлена серия магнитных профилей, демонстрирующих приуроченность источников АМП к двум гипсометрическим уровням на территории, где ранее описано позднепалеозойское Мезенское траппово-дайкиное поле, располагающееся в осадочном чехле. **Заключение.** Совместная интерпретация сейсмоплотностных моделей и моделей распределения источников магнитных аномалий дала возможность установить связи между физическими параметрами моделей и геологическими структурами или телами и создать обобщенные геолого-геофизические модели исследуемых участков земной коры. На 2D моделях глубинного строения земной коры Мезенской синеклизы земная кора имеет сложное и неоднородное строение. Сложная мозаичная картина, представленная на полученных моделях, отражает слоисто-блоковое строение литосферы. Блоковую структуру фундамента Мезенской синеклизы создают в основном рифтогенные разломы, ограничивающие грабены и горсты палеорифтовой системы Белого моря и разделяющие блоки с разными плотностными свойствами. Главные структурообразующие разломы имеют листрический характер и выходящие к основанию верхней или средней коры, приобретая на глубине свойства детачмента. Отмечается определенная корреляция рельефа поверхности Мохо со структурами поверхностного слоя земной коры. Распределение глубинных источников аномального магнитного поля в формате 2D для низкочастотной составляющей магнитного поля также отражает строение земной коры западной части Мезенской синеклизы. Интенсивные длиннопериодные магнитные аномалии отражают здесь, скорее всего, насыщенность продуктами основного-ультраосновного магматизма в верхнем гранитометаморфическом слое земной коры.

**Ключевые слова:** Мезенская синеклиза, Палеорифтовая система Белого моря, опорные сейсмические профили 3-АР, Агат-2, Агат-3, Кварц-2, источники аномалий магнитного поля, комплексная интерпретация

### Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 123032400061-6 “Тектоника, эволюция и геодинамические режимы формирования континентальной коры подвижных зон, расположенных в пределах структур с платформенным типом строения и эпиплатформенных орогенов” и № FMWE-2024-0019 “Геоморфология, геофизика и биогеохимия морского дна с учетом особенностей литосферы арктического бассейна, переходной зоны от Тихого океана к Евразии, отдельных районов Атлантического и Индийского океанов, морей России”

**Для цитирования:** Балувев А.С., Брусиловский Ю.В. (2026) Модели глубинного строения земной коры палеорифтовой системы Белого моря по результатам комплексного анализа глубинных сейсмических профилей. *Литосфера*, 26(1), 5-28. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-5-28>. EDN: LEAMMD

**For citation:** Baluev A.S., Brusilovsky Yu.V. (2026) Models of the deep structure of the White Sea paleorift crust system based on a comprehensive analysis of deep seismic profiles. *Lithosphere (Russia)*, 26(1), 5-28. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-5-28>. EDN: LEAMMD

# Models of the deep structure of the White Sea paleorift crust system based on a comprehensive analysis of deep seismic profiles

Aleksandr S. Baluev<sup>1</sup>, Yurii V. Brusilovsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geological Institute, RAS, 7 Pyzhevsky lane, Moscow 119017, Russia, e-mail: albaluev@yandex.ru

<sup>2</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, 36 Nakhimov av., Moscow 117997, Russia, e-mail: brusilovsky60@gmail.com

Received 05.03.2025, accepted 22.08.2025

**Research subject.** Deep structure of the earth's consolidated crust of the paleorift system of the White Sea and the Mezen syncline. **Materials and methods.** Two-dimensional seismic density models of the earth's crust structure were constructed on the basis of the 3-AP (Kem–White Sea–peninsula Kanin), Agat-2, Agat-3, and Quartz 2 reference seismic profiles. The state of the deep layers of the earth's crust was interpreted using the distribution of the effective density of the substrate and a model of distribution of magnetic anomalies sources. The latter model was constructed using the technique of two-dimensional inversion of an anomalous magnetic field. The magnetic field was analyzed based on a schematic map of magnetic field anomalies (AMP), synthesized by the authors based on the materials of magnetic surveys carried out in the waters of the Barents and White Seas at different time points and provided for their further interpretation. The main objective of constructing geological and geophysical models of the deep structure of the earth's consolidated crust of the White Sea paleorift system and the Mezen syncline was to establish genetic relationships between near-surface geological structures and deep elements of the earth's crust structure. **Results.** The conducted analysis of the abovementioned materials, taking into account the data on the near-surface structure of the earth's crust, allowed geological and geophysical models of the earth's crust to be constructed to the crust-mantle level along four reference seismic profiles – 3-AP, Agat-2, Agat-3, and Quartz-2 – crossing the structure of the Mezen syncline in different directions. In addition, in the eastern part of the Mezen syncline, a series of magnetic profiles is presented, demonstrating the confinement of the AMF sources to two hypsometric levels in the territory where the Late Paleozoic Mezen trap-dyke field, located in the sedimentary cover, was previously described. **Conclusions.** Joint interpretation of seismic density models and those of distribution of magnetic anomaly sources made it possible to establish connections between physical parameters of models and geological structures or bodies and to create generalized geological and geophysical models of the studied areas of the earth's crust. According to the constructed 2D models of the deep structure of the earth's crust of the Mezen syncline, the earth's crust has a complex and heterogeneous structure. The complex mosaic picture presented in the obtained models reflects the layered-block structure of the lithosphere. The block structure of the Mezen syncline basement is mainly formed by riftogenic faults that limit grabens and horsts of the paleorift system of the White Sea and separate blocks with different density properties. The main structure-forming faults are listric in nature and flatten out toward the base of the upper or middle crust, acquiring detachment properties at depth. A certain correlation of the Moho surface relief with the structures of the surface layer of the earth's crust is noted. The distribution of deep sources of the anomalous magnetic field in 2D format for the low-frequency component of the magnetic field also reflects the structure of the earth's crust in the western part of the Mezen syncline. Intense long-period magnetic anomalies here most likely reflect the saturation of the products of basic-ultramafic magmatism in the upper granite-metamorphic layer of the earth's crust.

**Keywords:** Mezen syncline, White Sea paleorift system, reference seismic profiles 3-AP, Agat-2, Agat-3, Quartz-2, sources of magnetic field anomalies, complex interpretation

## Funding information

The work was carried out within the framework of state assignments from the Laboratory of Consolidated Crust Tectonics of the GIN RAS (No 123032400061-6) "Tectonics, evolution and geodynamic regimes of formation of the continental crust of mobile zones located within the structures with a platform type of structure and epiplatform orogens". Laboratory of Geophysical Fields of the Institute of Oceanology RAS (No. FMWE-2024-0019) "Geomorphology, geophysics and biogeochemistry of the seabed, taking into account the features of the lithosphere of the Arctic basin, the transition zone from the Pacific Ocean to Eurasia, individual areas of the Atlantic and Indian Oceans, and the seas of Russia"

## Acknowledgements

The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, which allowed the authors to significantly improve the quality of the article.

## ВВЕДЕНИЕ

В статье освещаются результаты исследований глубинного строения Беломорско-Баренцево-морского региона. Районом исследования являются

ся бассейн Белого моря и прилегающие территории Мезенской синеклизы. Изучаемый район расположен в зоне сочленения двух крупных тектонических элементов Восточно-Европейского кратона: Фенноскандинавского щита и Русской плиты.

Данный регион в современную эпоху испытывает динамические нагрузки, вызванные продолжающимся поднятием Фенноскандинавского щита, а также геодинамическим воздействием со стороны Арктической и Северо-Атлантической зон спрединга. В среднем-позднем рифее кристаллический фундамент этого региона испытал глубинную деструкцию земной коры с формированием палеорифтовой системы Белого моря (Балуев, 2006). В позднем венде–начале кембрия тиманская пассивная окраина Балтики (древнего основания Восточно-Европейского кратона) при столкновении с палеоконтинентом Арктидой испытала коллизионный орогенез с образованием Тимано-Печорского орогена (Кузнецов, 2006; 2008).

В среднем палеозое произошла реактивация земной коры региона с мощным проявлением внутриплитного магматизма ультраосновного-основного состава, в том числе и кимберлитового. В связи с этими событиями особый интерес вызывает глубинное строение земной коры этого участка Беломорского региона, о котором можно судить лишь по геофизическим данным, которые иногда противоречат друг другу. Кроме того, не утихают дискуссии относительно перспектив на нефтегазонасность синрифтовых толщ Мезенского бассейна (Геодинамика и возможная нефтегазонасность..., 2006; Цыганов, 2006; Шельфовые осадочные бассейны..., 2020; Строение и динамика..., 2022). В работе предлагаются варианты моделей глубинного строения земной коры Мезенской синеклизы и, в частности, Архангельской алмазонасной провинции, основанные на материалах комплексного анализа геофизических данных. Для этой цели привлечены региональные сейсмические профили АР-3, Агат-2, Агат-3, Кварц-2 и ряд профилей, отражающих модель двумерной инверсии аномального магнитного поля (рис. 1).

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕЗЕНСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Территория Мезенской синеклизы, занимающая северо-восточную часть Русской плиты Восточно-Европейской платформы, изучена достаточно хорошо методами сейсморазведки. К настоящему времени накоплен обширный сейсмический материал, характеризующий глубинное строение земной коры Мезенской синеклизы. Судя по картам аномального магнитного поля (АМП) и поля силы тяжести территории Мезенской синеклизы, ее кристаллический фундамент представляет собой продолжение тех крупных структурно-вещественных комплексов пород раннего докембрия, которые слагают Балтийский щит. Породы фундамента Беломорского пояса вскрыты серией скважин: гранатовые гнейсы, амфиболиты с гранатом (скв. Усть-Пинега) и биотитовые гнейсы с эпидо-

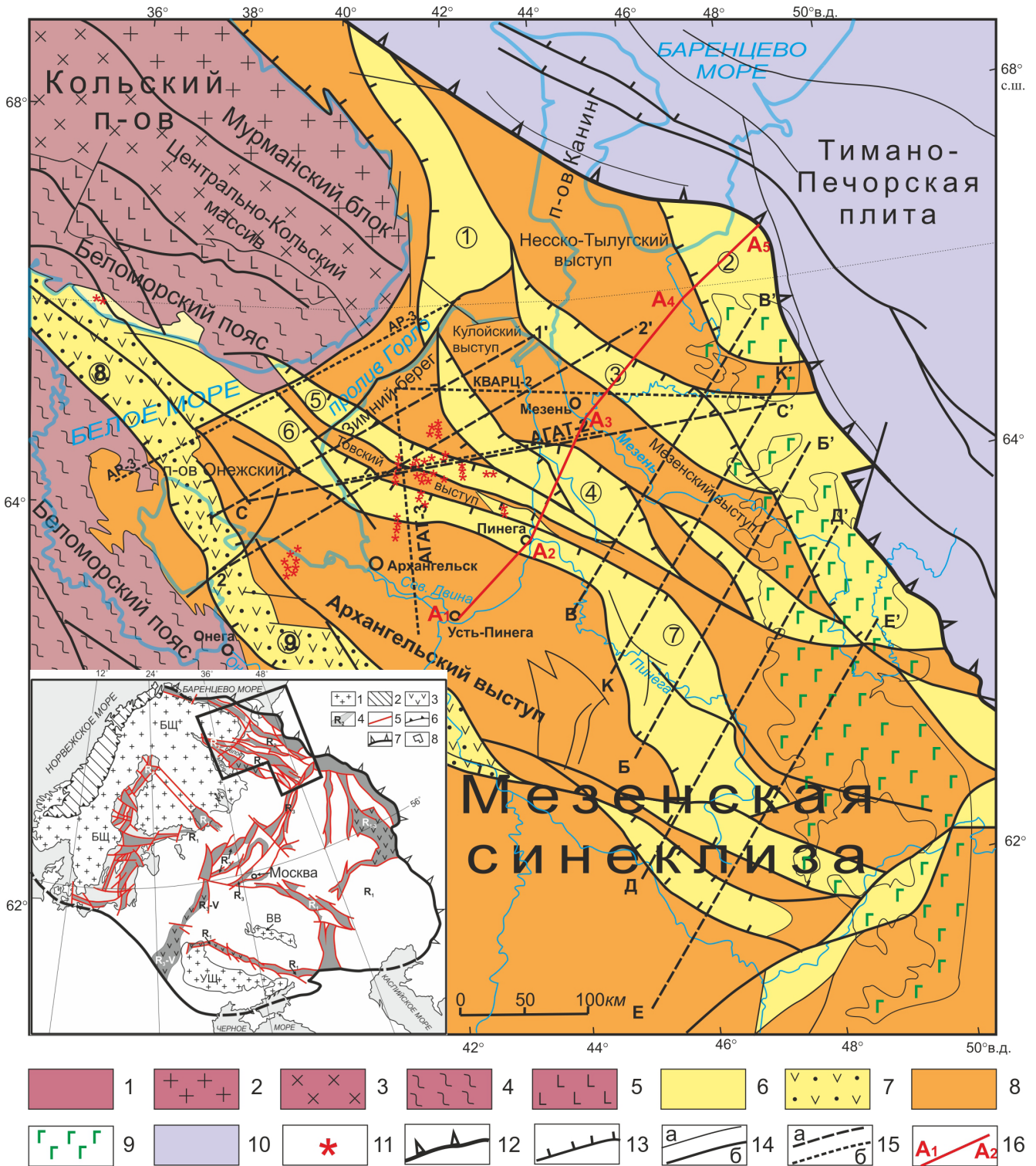
том (скв. Пушлахта). В других скважинах вскрыты мигматизированные гнейсы и гранитогнейсы, омоложенный возраст которых составляет 1860–1940 млн лет (Чамов, 2016).

Традиционно регион Мезенской синеклизы рассматривался как область развития континентального рифейского рифтогенеза, предшествовавшего началу общего прогибания и формирования осадочного чехла синеклизы. Мезенская синеклиза сформировалась над системой палеорифтов (рифейских авлакогенов), возникших за счет растяжения земной коры на континентальной окраине Восточно-Европейской платформы (Балуев, 2006). Рифты представлены системой субпараллельных грабенообразных прогибов северо-западного простирания в кристаллическом фундаменте, выполненных рифейскими терригенными отложениями. По результатам U-Pb изотопного датирования зерен детритового циркона из песчаников терской свиты, выполняющих Кандалакшский и Керецкий грабены, определено, что часть разреза терской свиты, залегающая выше изученного уровня, не может быть древнее  $1145 \pm 20$  млн лет, т.е. конца среднего рифея (Кузнецов и др., 2021), но не ограничивает нижнюю возрастную границу накопления синрифтовых отложений названных грабенов, так как ниже опробованного слоя залегает еще мощная 5–6-километровая толща терригенных образований.

На территории Мезенского бассейна, по данным бурения и сейсморазведки, рифейские отложения распространены практически повсеместно. Кроме рифтовых впадин, они встречаются и на горстовых участках, где они представлены преимущественно косослоистыми пестроокрашенными песчаными породами, имеющими, вероятно, аллювиальный генезис. Мощность отложений верхнего рифея колеблется от нескольких метров на поднятиях до более 3 км в рифтовых впадинах (Геодинамика и возможная нефтегазонасность ..., 2006; Строение и динамика ..., 2022).

Северо-восточная часть Мезенской синеклизы рассматривается как перикратонная часть Восточно-Европейской платформы (Притиманский перикратон) (Егоркин, 1991; Сейсмогеологическая модель ..., 1998). В пределах Мезенской синеклизы платформенный чехол, который перекрывает палеорифтовую систему Белого моря, делится на два комплекса – синеклизный и плитный (Гаврилов и др., 2000).

*Синеклизный комплекс.* Отложения синеклизного комплекса, плащеобразно перекрывающие рифтогенные структуры в материковой части Русской плиты, развиты преимущественно в пределах Мезенской синеклизы и залегают трансгрессивно с видимым несогласием на размытой поверхности рифея и кристаллического основания (рис. 2). Они представлены терригенными образованиями верх-



**Рис. 1.** Тектоническая схема северо-восточного сегмента Восточно-Европейской платформы, по (Тектоническая карта..., 2010) и (Буш, Калмыков, 2015).

1 – Балтийский щит; 2, 3 – Кольский массив неархейской консолидации: 2 – Мурманский блок, 3 – Центрально-Кольский блок; 4 – Беломорский подвижный пояс палеопротерозойской консолидации; 5 – Имандра-Варзугский проторифтогенный палеопротерозойский пояс; 6–8 – плитная часть платформы, перекрытая венд-палеозойским осадочным чехлом (Мезенская синеклиза): 6, 7 – палеорифтовая система Белого моря (6 – грабены в кристаллическом фундаменте платформы, выполненные среднерифтовыми терригенными комплексами, 7 – то же с участием продуктов магматизма), 8 – выступы кристаллического фундамента, разделяющие рифтогенные впадины; 9 – позднепалеозойские

трапповые поля в осадочном чехле платформы по данным (Буш, Калмыков, 2015); 10 – Тимано-Печорская плита (тиманиды); 11 – кимберлитовые трубки; 12 – граница ВЕП (надвиг тиманид на ВЕП); 13 – главные сбросы, формирующие рифтогенные грабены; 14 – прочие разломы, ограничивающие рифтогенные впадины: а – незначительные, б – основные; 15 – геолого-геофизические профили, представленные в работе: а – магнитные; б – сейсмические; 16 – геолого-геофизический профиль на рис. 2. Цифры в кружках – рифтогенные впадины: 1 – Понойская, 2 – Пешская (Предтиманский прогиб), 3 – Усть-Мезенский-Сафоновский прогиб, 4 – Лешуконская, 5 – Чапомская, 6 – Керецкая, 7 – Пинежская, 8 – Кандалакшская, 9 – Онежская.

Вкладка: 1 – щиты, 2 – норвежские каледониды, 3 – проявления основного вулканизма, 4 – рифейские палеорифты, 5 – рифтогенные разломы, 6 – граница Восточно-Европейской платформы, 8 – контур приведенной Тектонической схемы.

**Fig. 1.** Tectonic diagram of the northeastern segment of the East European Platform, based on materials from (Tectonic Map ..., 2010) and (Bush, Kalmykov, 2015).

1 – Baltic Shield; 2, 3 – Kola massif of the Neo-Archean consolidation: 2 – Murmansk block, 3 – Central Kola block; 4 – White Sea mobile belt of Paleoproterozoic consolidation; 5 – Imandra-Varzug protoripthogenic Paleoproterozoic belt; 6–8 – plate part of the platform overlain by the Vendian-Paleozoic sedimentary cover (Mezen syncline): 6, 7 – paleorift system of the White Sea (6 – grabens in the crystalline basement of the platform formed by the Middle-Upper Riphean terrigenous complex, 7 – the same with the participation of magmatism products), 8 – protrusions of the crystalline basement separating rift basins; 9 – Late Paleozoic trap fields in the sedimentary cover of the platform according to data (Bush, Kalmykov, 2015); 10 – Timan-Pechora plate (Timanids); 11 – kimberlite pipes; 12 – VEP boundary (Timanid thrust on VEP); 13 – main discharges forming rift grabens; 14 – other faults limiting rift basins: a – minor, б – major; 15 – geological and geophysical profiles presented in the work: a – magnetic; б – seismic; 16 – geological and geophysical profile in Fig. 2. Figures in circles – riftogenic depressions: 1 – Ponoyskaya, 2 – Peshskaya (Predtimansky trough), 3 – Ust-Mezensky-Safonov trough, 4 – Leshukonskaya, 5 – Chapomskaya, 6 – Keretskaya, 7 – Pinezhskaya, 8 – Kandalaksha, 9 – Onega.

Symbols on the tab: 1 – shields, 2 – Norwegian Caledonides, 3 – manifestations of the main volcanism, 4 – Riphean paleorifts, 5 – riftogenic faults, 6 – boundary of the East European Platform, 8 – contour of the above Tectonic scheme.

него венда и нижнего кембрия (?). Образования вендского комплекса обнажаются вдоль восточного края Балтийского щита в долинах рек, “прорезающих” Онежскую гряду (рр. Лямца, Пурнема), западную часть Двинского уступа (рр. Нижма, Агма, Сюзьма и др.) и западную часть Беломорско-Кулойского плато (рр. Золотица, Торожма), а также в обрывах Онежского, Летнего и Зимнего берегов Белого моря, где обнаружена разнообразная биота эдиакарского типа (Федонкин, 1981; Kolesnikov, 2019). На северо-востоке, востоке и юго-востоке вендские отложения погружаются на значительную глубину под палеозойские отложения Мезенской синеклизы.

В юго-восточном Беломорье мощность глинисто-песчаных отложений вендского комплекса, залегающих почти горизонтально, достигает 550 м. U-Pb возраст цирконов из вулканических туфов в основании верховской свиты этого комплекса составляет  $558 \pm 1$  млн лет, а цирконов из туфов в основании зимнегорской свиты, перекрывающей верховскую,  $-555 \pm 0.3$  млн лет (Гражданкин, 2003; Маслов и др., 2008). Верхневендские отложения слагают осадочную призму, которая достигает максимальных мощностей (более 1500 м) на северо-восточной окраине Восточно-Европейской платформы, вдоль зоны сочленения с Тимано-Печорской областью (см. рис. 2). В пределах Мезенской синеклизы венд-кембрийские (?) образования выклиниваются на склонах Балтийского щита в ее западной и северной частях, на юге граница распространения комплекса контролируется Сысольским сводом, на северо-востоке выклинивание происходит по подножию Тимана (Гаврилов

и др., 2000). Отложения вендского возраста распространены в восточной части акватории Белого моря и перекрывают рифейские образования. Породы этого комплекса отсутствуют в Кандалакшском грабене, вблизи побережья Кольского полуострова, и достигают мощности 1500 м в северо-восточной части Понойской впадины (Журавлев, 2007).

*Плитный комплекс.* До недавнего времени считалось, что между началом накопления плитного комплекса и завершением отложений синеклизного в северной части Восточно-Европейской платформы существовал значительный перерыв в осадконакоплении – 150–160 млн лет (Гаврилов и др., 2000). В пределах Мезенской синеклизы, как и в смежных областях платформы, к плитному комплексу относятся терригенные образования среднего и верхнего девона и каменноугольные-нижнепермские карбонатно-сульфатные породы. Генезис красноцветов верхней перми-триаса связан с орогенными движениями на Урале. Венчают весь разрез плитного комплекса маломощные континентально-морские осадки юры, мела, антропогена. Четвертичные осадки перекрывают эродированную поверхность разновозрастных пород осадочного чехла и фундамента. Мощность четвертичных отложений достигает 200 м и определяется в основном по глубине палеоврезов и мощности моренных образований. В пределах бассейна Белого моря к плитному комплексу относятся отложения среднего-верхнего палеозоя (девона, карбона и перми), которые отмечаются только в Воронке Белого моря, где их мощность не превышает 300 м.

Согласно результатам, полученным В.А. Цыгановым (2006) в результате геологической интер-

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ПО ЛИНИИ A<sub>1</sub>-A<sub>2</sub>-A<sub>3</sub>-A<sub>4</sub>-A<sub>5</sub>

Масштаб горизонтальный 1:1 000 000

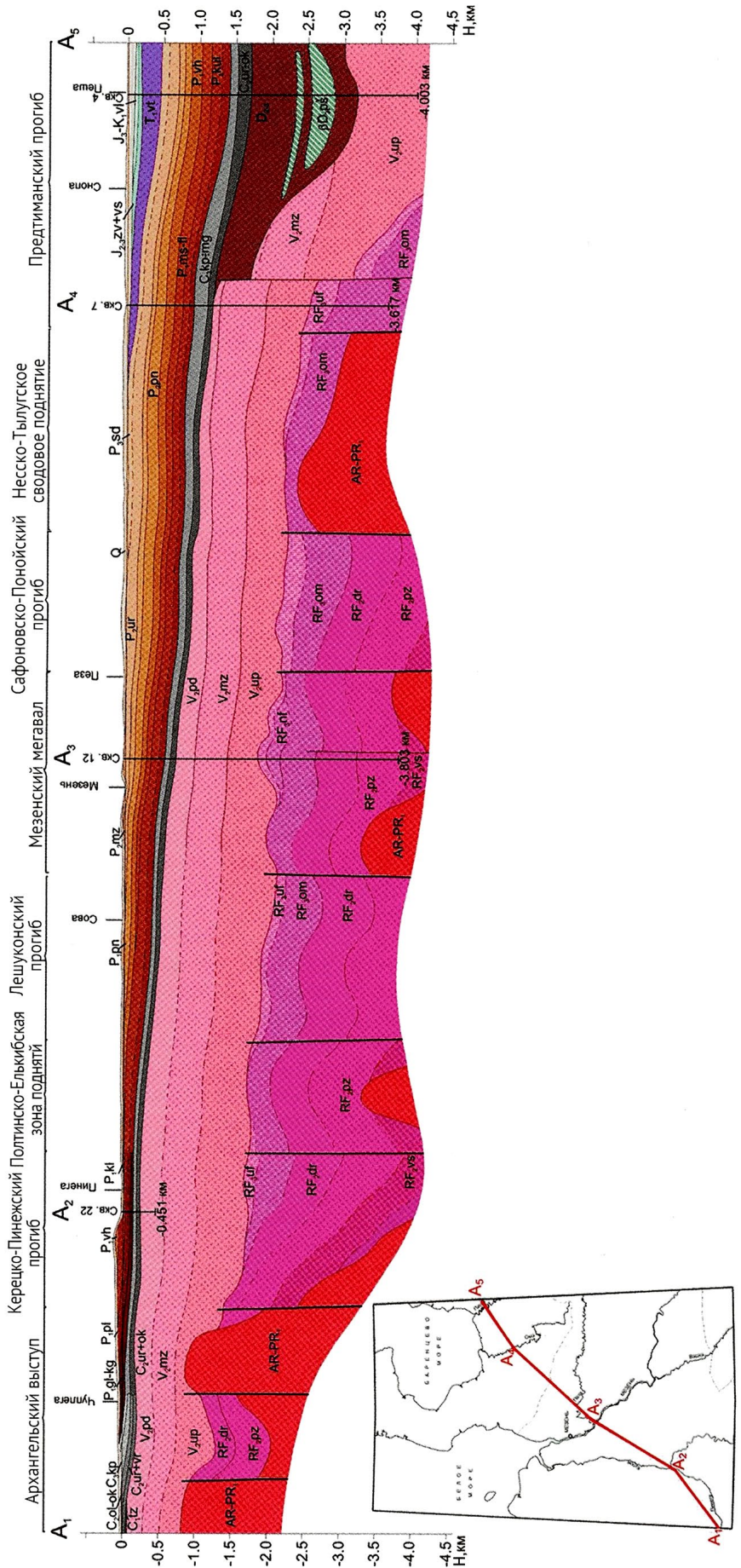


Рис. 2. Геологический разрез через Мезенскую синеклизу (Государственная геологическая карта..., 2012).

Положение разреза показано на рис. 1.

Fig. 2. Geological section through the Mezen syncline (State Geological Map..., 2012).

The position of the incision is shown in Fig. 1.

претации аэрогеофизических съемок, тектоническая структура верхней части разреза кристаллического фундамента палеорифтовой системы Белого моря в пределах Мезенской синеклизы представляет собой гетерогенное и гетерохронное образование, которое по генезису, составу и возрасту пород разделяется на нижнеархейские супракрустальные блоки, предположительно, беломорской серии саамского комплекса и верхнеархейские зеленокаменные пояса, сложенные породами лопийского комплекса. В разрезе осадочного чехла этим же автором предположительно установлено широкое развитие трапповых образований в виде даек и силлов.

Позже в статье (Буш, Калмыков, 2015) авторы в значительной степени дополнили работу В.А. Цыганова, впервые получив и опубликовав сведения о магматических породах основного состава, располагающихся в осадочном чехле. Им же обнаружена и детально описана позднепалеозойская–раннетриасовая Мезенская трапповая провинция, состоящая из трапповых полей и дайкового пояса шириной до 200 км при протяженности свыше 500 км.

В свое время в Воронке Белого моря, в восточной части Мезенской синеклизы и устье р. Мезень, оконтурена Мезенская гравитационная аномалия, практически полностью коррелирующая с положением интенсивной магнитной аномалии. Согласно данным глубинной сейсморазведки, минимальная мощность земной коры проявлена в северо-восточной части Мезенской синеклизы, а глубина залегания поверхности Мохоровичича составляет 27–30 км, представляя наименьшие значения для Русской плиты. Обнаружение этой гравитационной аномалии подтверждает предположение об утонении земной коры в северо-восточной части Мезенской синеклизы. Утонение земной коры может вызывать внедрение мантийных диапиров, обладающих высокой намагниченностью и отражающихся в магнитном поле интенсивными положительными аномалиями.

Одной из последних моделей, описывающей строение Беломорского региона, является эволюционная модель магнитоактивного слоя палеорифтовой системы Белого моря, отражающая этапы тектонической активности – от среднего и позднего рифея до событий последнего четвертичного оледенения (Балуев и др., 2018).

В последние годы по нескольким сейсмическим профилям построены комплексные геофизические модели земной коры Беломорского региона, включая и территорию Мезенской синеклизы (Шаров и др., 2020; Строение и динамика ..., 2022). Исходным материалом для построения этих моделей послужили цифровые основы гравиметрических, магнитных и петрофизических карт, а также результаты глубинных сейсмических зондирований

как на акватории Белого моря, так и на суше. 2D модели, опирающиеся на региональные ГСЗ профили, позволили уточнить плотностные и магнитные структуры локальных участков земной коры, согласованные с выделенными сейсмическими границами. Сложная мозаичная картина, представленная на полученных моделях, отражает сложное строение литосферы.

Однако существенным недостатком как этих, так и предыдущих, моделей является их недостаточная “геологичность”, т. е. отсутствие видимых связей между физическими параметрами субстрата и геологическими структурами или телами. В представляемой работе предпринимается попытка компенсировать этот недостаток за счет привлечения информации, полученной другими методами исследований земной коры, в том числе и геологическими, а также современных концептуальных данных. Кроме того, известно, что структуры фундамента, а именно некоторые структуры северо-западной части палеорифтовой системы Белого моря, в настоящее время испытывают некоторую реактивацию, которая, вероятней всего, проявляется и в погребенной части фундамента Мезенской синеклизы.

Новая дополнительная информация о глубинном строении разнородных блоков, зон их сочленения и характере расслоенности литосферы в сочетании с блоковой делимостью, полученной в результате использования комплекса современных геофизических методов, несомненно, окажется полезным для обоснования главных закономерностей строения и динамики литосферы этого региона. С этой целью ниже приводятся геолого-геофизические модели разреза земной коры по сейсмическим профилям 3-АР, С-С' (включает в себя профиль Агат-2), Агат-3, Кварц-2 и ряд обработанных магнитометрических профилей в восточной части Мезенской синеклизы.

#### МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В работе представлены геолого-геофизические модели глубинного строения литосферы восточной части Белого моря и прилегающей части Мезенской синеклизы, полученные сотрудниками Института геологии КарНЦ РАН с использованием программного комплекса “Интегро” (Черемисина и др., 2018). Для моделирования использованы опорные сейсмические профили 3-АР (Кемь–Белое море–п-ов Канин), Агат-2, Агат-3, Кварц-2 (Строение и динамика..., 2022). На базе этих профилей проведено двумерное сейсмоплотностное моделирование строения земной коры, которое явилось основой для распознавания глубинных геологических структур и прогнозирования геотек-

тонических процессов формирования литосферы (Шаров, 2017; Шаров и др., 2020). Также для интерпретации состояния глубинных слоев земной коры использовались распределение эффективной плотности субстрата и модель распределения источников магнитных аномалий, для построения которой применена методика двумерной инверсии аномального магнитного поля, разработанная в лаборатории геофизических полей Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Пальшин и др., 2020), позволяющая находить устойчивые контрастные решения с привлечением доступной априорной информации в рамках двумерного подхода.

Основой для анализа магнитного поля послужила схематическая карта АМП (рис. 3), синтезированная авторами по материалам магнитных съемок, выполненных в акваториях Баренцева и Белого морей в разное время и предоставленных для их дальнейшей интерпретации. Использована цифровая матрица  $500 \times 500$  м восточной части листа Q-35 и листов Q-36–Q-38. Также авторами учитывались материалы высокоточной аэромагнитной съемки масштаба 1:50 000, выполненной в 2000–2001 гг. ЗАО ГНПП “Аэрогеофизика” в восточной части Мезенского бассейна, и материалы гидромагнитных съемок, выполненных в Баренцевом море в 2002–2007 гг. рядом научных и научно-производственных организаций. Использовались также и материалы гидромагнитных съемок Лаборатории геофизических полей в Белом и Баренцевом морях.

Структура магнитного поля (см. рис. 3) формируется за счет суперпозиции аномалий разного происхождения, обусловленных магнитными неоднородностями геологических тел. Они имеют разные латеральные размеры, разные контрасты магнитных свойств и разную глубину залегания источников поля. Именно эти факторы объясняют появление аномалий, которые принято называть или региональными, или локальными. Крупные региональные аномалии отражают глубинное строение земной коры, а характер, интенсивность и конфигурация локальных аномалий обусловлены источниками, расположенными в ее верхней части. Поэтому одной из основных задач, требующих решения в процессе интерпретации, является разделение полей по глубине до источников.

Анализ радиально осредненного спектра поля позволил установить приуроченность верхних кромок источников поля к нескольким структурным горизонтам (уровням). Выделение спектральной составляющей каждого предполагаемого горизонта позволило оценить глубину до его верхних и нижних кромок. Полосовая фильтрация в частотной области в соответствии с выделенными диапазонами глубин позволила эффективно разделить аномалии от разноглубинных источников. Дальнейшая интерпретация магнитного поля выполнялась для каждого горизонта в отдель-

ности, при этом авторами использовались независимые, взаимодополняющие методы количественной интерпретации, разработанные в лаборатории геофизических полей Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова (Иваненко и др., 2012). В трехмерном варианте это пакет программ Magdepth3D, который впервые использован при интерпретации детальных магнитных съемок на Каспии (Иваненко, Шишляев, 2013).

Для оценок глубин до верхних и нижних кромок источников аномалий в нем применяются различные методы – спектральный, работающий в частотной области, алгоритм “эйлеровской деконволюции”, а также параметрический подбор формы аналитического сигнала; два последних работают в пространственной области.

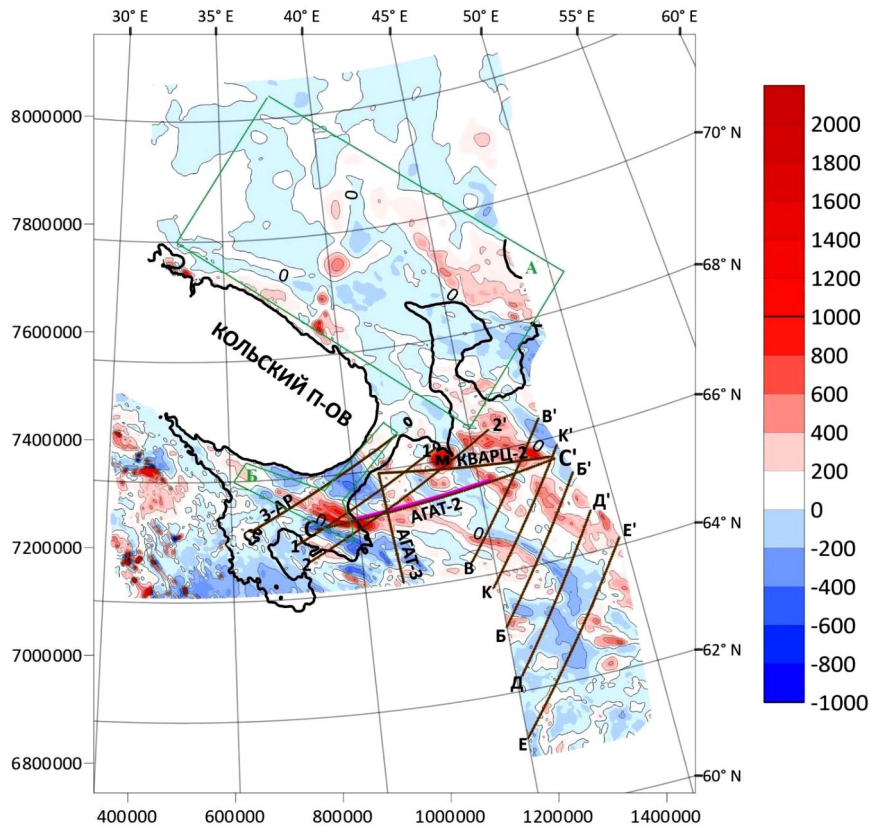
Для решения обратной задачи в плоском варианте использован комплекс Linverse2D, в котором реализовано большинство современных алгоритмов решения таких задач. При этом широко привлекалась априорная информация – данные о рельефе, учитывалась мощность осадков, сейсмические данные, глубина изотермы Кюри (Artemieva, 2006, 2009; Петрова и др., 2022; Филиппова, Филиппов, 2023) и результаты интерпретации другой геолого-геофизической информации. Эти модели дополнены результатами геолого-геофизического моделирования, выполненного для восточной части Мезенской синеклизы, и материалами анализа магнитного поля для южной части Баренцевоморского шельфа (Балуев и др., 2022).

Главной задачей построения геолого-геофизических моделей глубинного строения территории Мезенской синеклизы является установление генетических связей приповерхностных геологических структур с глубинными элементами строения земной коры. Поэтому для построения таких модельных разрезов использовались данные геологического строения верхних приповерхностных горизонтов земной коры, отраженной, в частности, на “Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий” (2010) (см. рис. 1) и объяснительной записке к ней (Балуев и др., 2012). Сделана попытка увязать глубинные источники магнитных аномалий, полученных в формате 2D для низкочастотной составляющей магнитного поля, с проявлениями внутриплитного магматизма.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Профиль 3-AP

Беломорский фрагмент профиля МОГТ-ГСЗ 3-AP расположен в пределах акватории бассейна Белого моря, протягивается от северной оконечности Соловецкого острова на северо-восток через прол. Горло примерно на 350 км (рис. 4). Профиль проходит через центральную часть палео-



**Рис. 3.** Схематическая карта АМП Беломорского региона с профилями, для которых выполнено геолого-геофизическое моделирование.

М – местоположение Мезенского гравитационного максимума. Зеленым цветом обозначены полигоны, ранее изученные авторами (по участку А – (Балуев и др., 2022), по участку Б – Балуев и др., 2018).

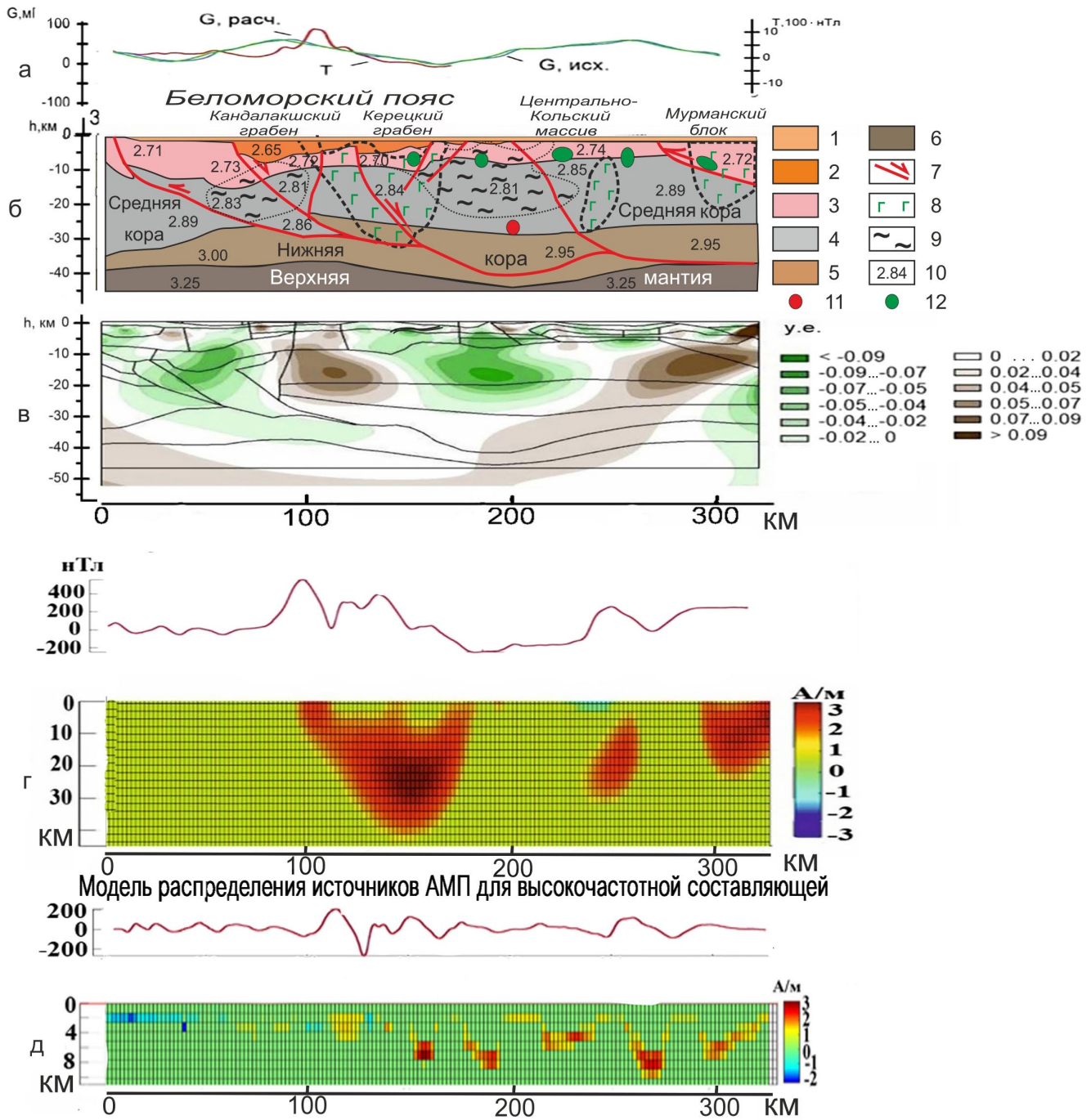
**Fig. 3.** Schematic map of the White Sea region AMP with profiles for which geological and geophysical modeling was performed.

M is the location of the Mezen gravitational maximum. The polygons previously studied by the authors are marked in green (for section A – the article was published (Baluev et al., 2022), for section B – (Baluev et al., 2018)).

рифтовой системы Белого моря и пересекает такие структуры фундамента, как Карельский выступ, Онежский грабен, Архангельский выступ, Керецкий и Лешуконский грабены и разделяющий их Товский выступ, а также Терскую ступень. По данным двумерного сейсмоплотностного моделирования, разрез консолидированной земной коры по профилю 3-АР расчленяется на верхнюю, среднюю и нижнюю кору, где средняя кора обладает повышенной мощностью, замещая как бы часть верхней коры (Шаров и др., 2020; Строение и динамика ..., 2022). Верхний слой коры мощностью 10–15 км имеет преимущественно гранитогнейсовый состав и представляет собой кристаллический фундамент платформы с плотностью субстрата, по данным сейсмоплотностного моделирования, 2.70–2.74 г/см<sup>3</sup>. И, наконец, сверху плащеобразно и фундамент, и грабены перекрываются осадочным

чехлом верхнего венда, содержащим, кроме богатого комплекса микрофитофоссилий, эдиакарскую фауну бесскелетных организмов (Федонкин, 1981). Породы верхнего венда вскрыты скважинами в акватории прол. Горло Белого моря и обнажаются в обрывистых берегах его восточного побережья.

Средняя кора по своим свойствам соответствует гранулит-базитовому составу и, в отличие от верхней, более пластичная. Согласно сейсмоплотностному моделированию, плотность ее субстрата колеблется в пределах 2.81–2.89 г/см<sup>3</sup>. Средняя кора имеет большую мощность в интервале глубин от 10 до 35 км. В центральной части средней коры, по данным распределения эффективной плотности, наблюдается область разуплотнения субстрата земной коры, которая приходится на тыловую часть палеорифтовой системы (см. рис. 4) и, вероятно, отражает современное растяжение зем-



**Рис. 4.** Геолого-геофизический разрез по сейсмическому профилю 3-АР.

Фрагменты “а”, “в” взяты авторами из (Строение и динамика ..., 2022).

а. Графики наблюдаемых и модельных полей.

б. Геолого-геофизическая модель земной коры по сейсмическому профилю 3-АР. 1 – терригенные образования платформенного чехла позднневендского возраста; 2 – синрифтовые терригенные образования среднепозднерифейского возраста; 3 – гранитогнейсовый фундамент (верхняя хрупкая кора); 4 – средняя пластичная кора; 5 – нижняя кора; 6 – верхняя мантия; 7 – разломы и относительное движение блоков земной коры по разломам (стрелки); 8 – участки земной коры, насыщенные продуктами основного магматизма, являющиеся источником локальных магнитных аномалий; 9 – участки земной коры с относительным разуплотнением; 10 – числа на разрезе – значения плотности субстрата, г/см<sup>3</sup>; 11 – гипоцентр землетрясения 2006 г.; 12 – проявления основного магматизма по данным профиля «д».

в. Плотностная блоковая модель на основе сейсмических данных на фоне распределения эффективной плотности (у. е.) по гравитационным данным. Условными единицами обозначена разность плотностей вмещающих пород и неоднородностей, создающих аномалию.

г. Модель распределения источников АМП для фрагмента профиля 3-АР.

д. Модель распределения источников АМП для высокочастотной составляющей профиля АР.

**Fig. 4.** Geological and geophysical section along seismic profile 3-AP.

Figures "a", "b" are taken by the authors from (The structure and dynamics ..., 2022).

a. Graphs of observed and model fields;

б. Geological and geophysical model of the earth's crust along seismic profile 3-AP. 1 – terrigenous formations of the platform cover of Late Vendian age; 2 – synrift terrigenous formations of Middle-Late Riphean age; 3 – granite-gneiss basement (upper brittle crust); 4 – middle plastic crust; 5 – lower crust; 6 – upper mantle; 7 – faults and relative movement of crustal blocks along faults (arrows); 8 – sections of the earth's crust saturated with products of basic magmatism; 9 – sections of the earth's crust with relative decompression; 10 – numbers on the section – values of substrate density in  $\text{g/cm}^3$ ; 11 – hypocenter of the 2006 earthquake; 12 – manifestations of basic magmatism according to profile "д".

в. Density block model based on seismic data against the background of the effective density distribution based on gravity data. The numbers on the scale indicate the effective density of the model in conventional units.

г. Distribution model of AMP sources for a fragment of profile 3-AP.

д. Distribution model of AMP sources for the high-frequency component of profile 3-AP.

ной коры. Подтверждением этому служит зафиксированное в 2006 г. землетрясение с магнитудой около 3 баллов в прол. Горло Белого моря, практически совпадающее с линией профиля (Строев и динамика ..., 2022). Рассчитанная глубина гипоцентра этого землетрясения (29 км) достигает подошву средней коры в пределах области разуплотнения ее субстрата. Эпицентр землетрясения 2006 г. в прол. Горло практически совпадает также с эпицентром исторического землетрясения 1912 г. Эти факты свидетельствуют о существовании здесь сейсмоактивной зоны, отражающей, по всей видимости, современные тектонические движения блоков земной коры, связанные с формированием современного грабена прол. Горло.

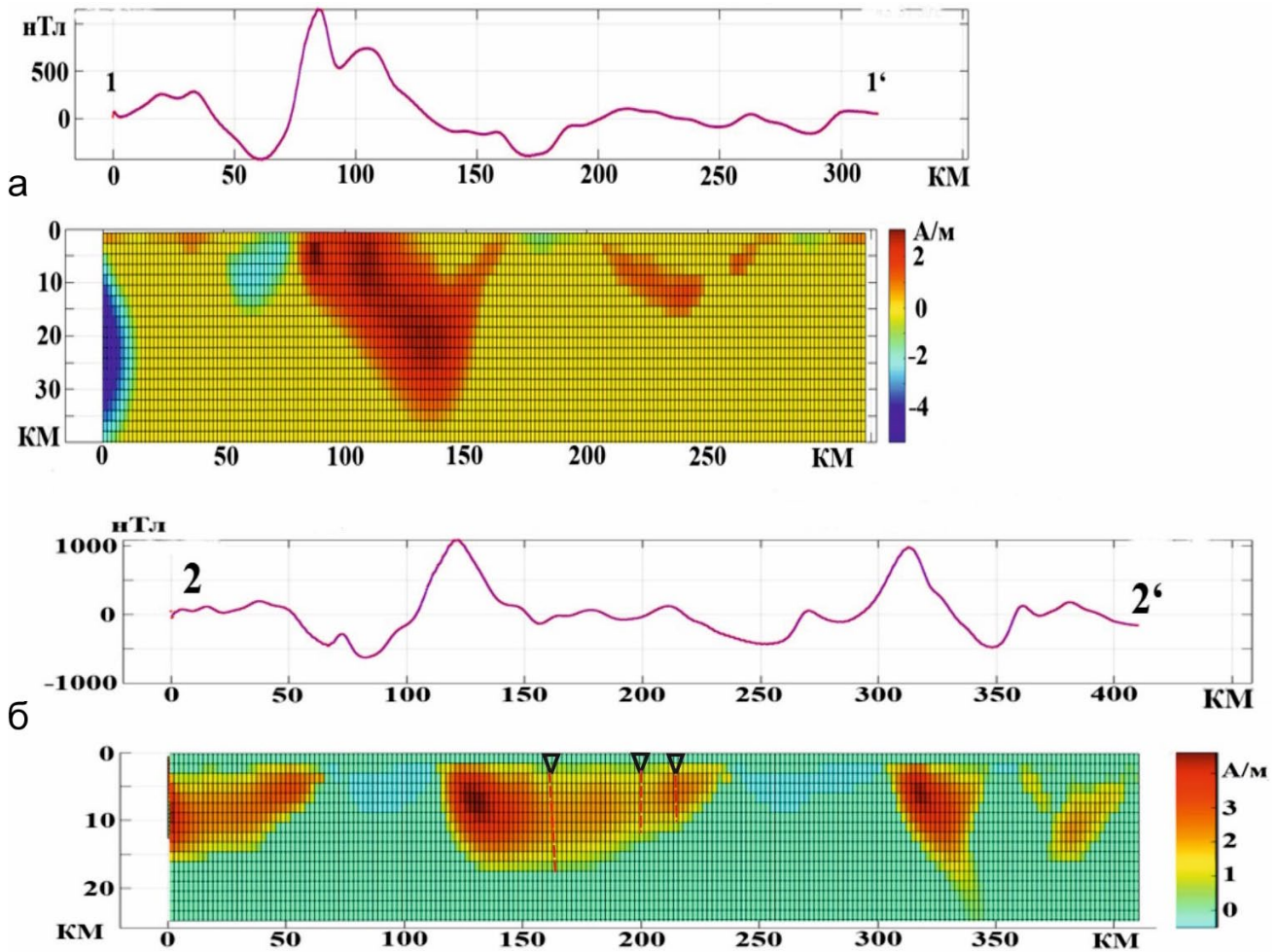
В юго-западной части профиля также фиксируется по данным распределения эффективной плотности несколько меньшая по объему область разуплотнения субстрата верхнего и среднего слоев коры под Кандалакшским грабеном (см. рис. 4). Очевидно, что эта область разуплотнения субстрата связана с современной тектонической реактивацией Кандалакшского грабена и зоной растяжения земной коры в пределах бассейна Белого моря (Балуев и др., 2009; Морозов и др., 2022).

Нижняя кора представляет собой слой земной коры, скорее всего, базит-ультрабазитового состава, ограниченный снизу границей Мохо. Плотность субстрата нижней коры, по данным сейсмоплотностного моделирования, достигает  $2.95\text{--}3.00 \text{ г/см}^3$ . Мощность этого слоя колеблется от 5 до 15 км. Под Кандалакшским и Керецким грабенами поверхность Мохо воздымается до 35 км, а мощность земной коры сокращается. В средней части разреза под областью разуплотнения субстрата средней коры в поверхности границы Мохо существует депрессия, в которой последняя погружается до отметки  $-45 \text{ км}$  с соответствующим увеличением мощности земной коры.

Строение земной коры здесь определено литострическими детачментами, которые выколаживаются к подошве нижней коры, а в верхней приповерхностной своей части являются грабенообразующими сбросами. Они же смещают поверхность, разделяющую среднюю и нижнюю кору.

Для этого участка профиля выполнено решение обратной задачи отдельно для низкочастотной и высокочастотной составляющих аномально магнитного поля. По результатам решения обратной задачи созданы модели распределения источников аномального магнитного поля для профиля 3-AP и его высокочастотной составляющей (см. рис. 4г, д). Результаты моделирования подтвердили существование глубинного магматического очага, локализованного в пределах Кандалакшского и Керецкого грабенов согласно В.А. Журавлеву (2007). В магнитном поле этот очаг магматизма выделяется интенсивной ( $1200\text{--}1400 \text{ нТл}$ ) магнитной аномалией в пределах Беломорской шовной зоны. Верхние кромки источника находятся на глубине  $0\text{--}8 \text{ км}$ , а нижние ограничиваются на глубине  $36\text{--}38 \text{ км}$  (см. рис. 4г), его эффективная намагниченность составляет  $2\text{--}3 \text{ А/м}$ . В отличие от модельного разреза, построенного В.А. Журавлевым (2007), на котором нижние кромки обрезаны глубиной в  $20 \text{ км}$ , на модели, представленной авторами, нижняя кромка находится на глубине в  $36\text{--}38 \text{ км}$ , что позволяет считать, что очаг магматизма прослеживается в нижнюю кору и, вероятно, связан с верхней мантией. В нашем случае контуры этой и других подобных аномалий, вынесенные на геолого-геофизический разрез, обозначают области земной коры, насыщенные продуктами основного-ультраосновного магматизма.

Параметры очага магматизма согласуются с оценками нижнего структурного горизонта, полученные авторами для Онежско-Кандалакшского палеорифта (Балуев и др., 2018) и отражающего рифтовый этап эволюции Беломорского подвижного пояса в позднем рифее (Балуев и др., 2012). Этот магматический очаг уверенно прослеживается на параллельных профилях 1-1' и 2-2' (рис. 5), расположенных к юго-востоку от 3-AP на расстоянии  $65$  и  $105 \text{ км}$  соответственно (см. рис. 3), но на профиле 2-2' глубина нижних кромок резко уменьшается до  $15\text{--}20 \text{ км}$ . На профиле 2-2' с этим очагом связано Верхотинское кимберлитовое поле, что подтверждает связь магнитной аномалии с проявлениями щелочно-ультраосновного магматизма связанного с мантийными источниками.



**Рис. 5.** Модели распределения источников АМП для низкочастотной составляющей по профилям 1-1' (а) и 2-2' (б), параллельных профилю 3-АР.

На профиле 2-2' треугольники фиксируют расположение кимберлитовых трубок относительно центральной аномалии магнитного поля.

**Fig. 5.** Models of distribution of AMP sources for the low-frequency component along profiles 1-1' (a) and 2-2' (б), parallel to profile 3-AP.

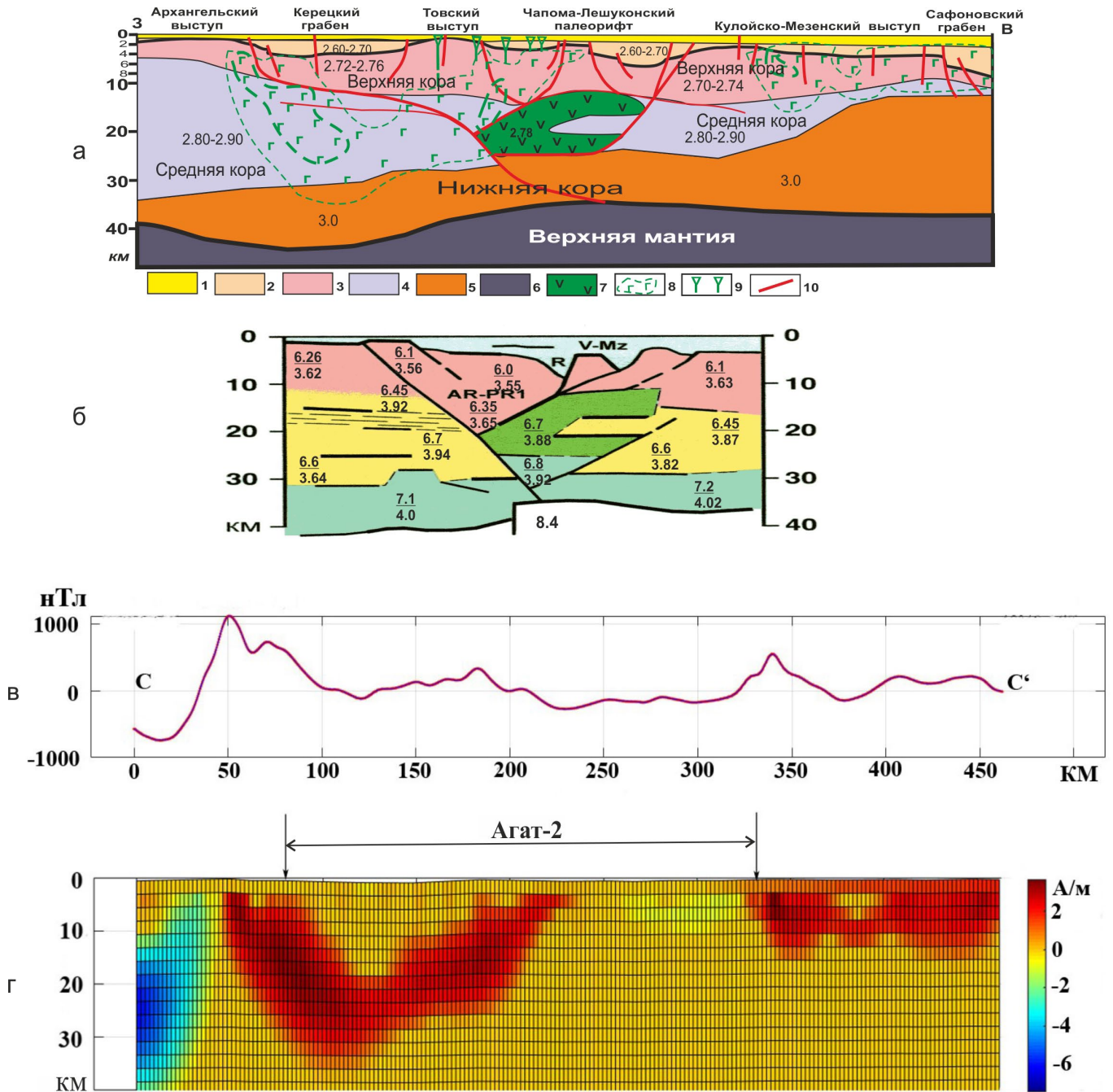
On profile 2-2', triangles fix the location of kimberlite pipes relative to the central anomaly of the magnetic field.

### Профиль С-С' (включает в себя Агат-2)

Профиль С-С' (рис. 6) протягивается в субширотном направлении, начинаясь западнее Керещко-Пинежского рифта и заканчиваясь восточнее Сафоновского грабена Мезенского палеорифта. Профиль включает в себя фрагмент сейсмического регионального профиля Агат-2 и на своем протяжении пересекает всю серию субпараллельных палеорифтовых грабенов и разделяющие их выступы кристаллического фундамента (см. рис. 2): Архангельский выступ, Керещкий грабен, Товский выступ, Чапома-Лешуконский палеорифт, Кулойско-Мезенский выступ и Сафоновский грабен. В то

же время профиль Агат-2 пересекает Золотицкое и Кепинское кимберлитовые поля. Следует отметить, что региональные профили Агат-2 и Агат-3, о котором речь пойдет ниже, пересекаются практически взаимно перпендикулярно с точкой пересечения в районе пос. Поморье.

По данным двумерного сейсмоплотностного моделирования, разрез земной коры по профилю Агат-2 расчленяется на верхнюю, среднюю и нижнюю кору. Верхняя кора соответствует раннедокембрийскому кристаллическому фундаменту платформы гранитогнейсового состава с рифейским терригенным проточехлом, выполняющим грабены, и венд-палеозойским осадочным чехлом. Мощ-



**Рис. 6.** Геолого-геофизический разрез по профилю С-С', включающий фрагмент сейсмического профилю Агат-2.

а. Геолого-геофизическая модель по профилю С-С', содержащий в центральной части разрез по профилю Агат-2 (составлен с использованием (Тектоническая карта..., 2010; Костюченко и др., 2012; Строение и динамика ..., 2022). 1 – поздневендский–палеозойский осадочный чехол; 2 – синрифтовые терригенные образования; 3 – гранитогнейсовый фундамент (верхняя кора); 4 – средняя кора; 5 – нижняя кора; 6 – верхняя мантия; 7 – магматическая камера (по данным (Костюченко и др., 2012)); 8 – участки земной коры, насыщенные магматическим материалом преимущественно основного состава; 9 – кимберлитовые трубки Зимнебережной алмазоносной провинции; 10 – разломы. Числа на разрезе обозначают плотность субстрата (г/см<sup>3</sup>) на разных уровнях земной коры.

б. Модель земной коры по сейсмическому профилю Агат-2 по данным ГСЗ и ОГТ (Костюченко и др., 2012). Числа на схеме: скорости продольных (в числителе) и поперечных (в знаменателе) упругих волн (км/с).

в. График АМП по профилю С-С' для низкочастотной составляющей магнитного поля.

г. Модель распределения источников АМП для профиля С-С' в формате 2D для низкочастотной составляющей магнитного поля.

**Fig. 6.** Geological and geophysical section along profile C-C', including a fragment of the seismic profile Agat-2.

- a. Geological and geophysical model along profile C-C', containing in the central part a section along profile Agat-2 (compiled using (Tectonic map..., 2010; Kostyuchenko et al., 2012; Structure and dynamics ..., 2022). 1 – Late Vendian-Paleozoic sedimentary cover; 2 – synrift terrigenous formations; 3 – granite-gneiss basement (upper crust); 4 – middle crust; 5 – lower crust; 6 – upper mantle; 7 – magmatic chamber (according to (Kostyuchenko et al., 2012)); 8 – sections of the earth's crust saturated with igneous material mainly of basic composition; 9 – kimberlite pipes of the Zimnaberezhnaya diamondiferous province; 10 – faults. The numbers on the section indicate the density of the substrate ( $\text{g/cm}^3$ ) at different levels of the earth's crust.
- б. Model of the earth's crust along the seismic profile Dvinskaya Bay – Mezen River based on deep seismic sounding and common point method data (Kostyuchenko et al., 2012). Numbers in the diagram: velocities of longitudinal (in the numerator) and transverse (in the denominator) elastic waves ( $\text{km/s}$ ).
- в. Graph of the AMP along the C-C' profile for the low-frequency component of the magnetic field.
- г. Model of the distribution of AMP sources for the C-C' profile in 2D format for the low-frequency component of the magnetic field.

ность верхней коры варьируется от 4–5 до 15 км, сокращаясь под рифтогенными грабенами и увеличиваясь в местах выступов фундамента. Плотность субстрата гранитоидного слоя земной коры находится в пределах  $2.70\text{--}2.76 \text{ г/см}^3$ . Ключевыми структурно-тектоническими элементами верхней коры здесь являются грабены палеорифтовой системы Белого моря и выступы кристаллического фундамента, разделяющие их (см. рис. 6).

Рифтогенные полуграбены ограничены наклонными разломами, имеющими в большинстве своем листрический характер и выполаживающимися с глубиной до субгоризонтальных разделов земной коры, возможно, вплоть до раздела кора–мантия. Под областью рифтогенеза наблюдается подъем поверхности Мохо с амплитудой до 10 км, а консолидированная кора в рифтовой зоне утонена до 27–30 км. Это может свидетельствовать о возможной декомпрессии, возникающей при растяжении земной коры, и, как следствие, частичном плавлении субстрата мантии в области ее подъема с формированием магматического очага в залегающих выше слоях земной коры.

По данным (Костюченко и др., 2012), на профиле Агат-2 (протягивающемся от Двинской губы до р. Мезень) в средней части коры в интервале глубин от 10–12 до 17–18 км высокие скорости сейсмических волн (до  $6.7 \text{ км/с}$ ) маркируют промежуточную камеру, заполненную магматическими скоплениями основного состава. Средняя кора, выделенная по данным двумерного сейсмоплотностного моделирования, имеет среднюю плотность субстрата  $2.8\text{--}2.9 \text{ г/см}^3$  и весьма переменную мощность от 30 км на западе под Архангельским выступом и до 2–3 км на востоке под Сафоновским грабеном. К востоку ее замещает нижняя кора с более высокими значениями плотности – около  $3.0 \text{ г/см}^3$ , соответствующими базит-ультрабазитовому составу субстрата.

Распределение глубинных источников аномального магнитного поля на профиле C-C' в формате 2D для низкочастотной составляющей магнитного поля (рис. бв, г) также отражает строение земной коры западной части Мезенской синеклизы.

Так, в диапазоне 50–90 км отчетливо выделяется источник АМП, соответствующий положе-

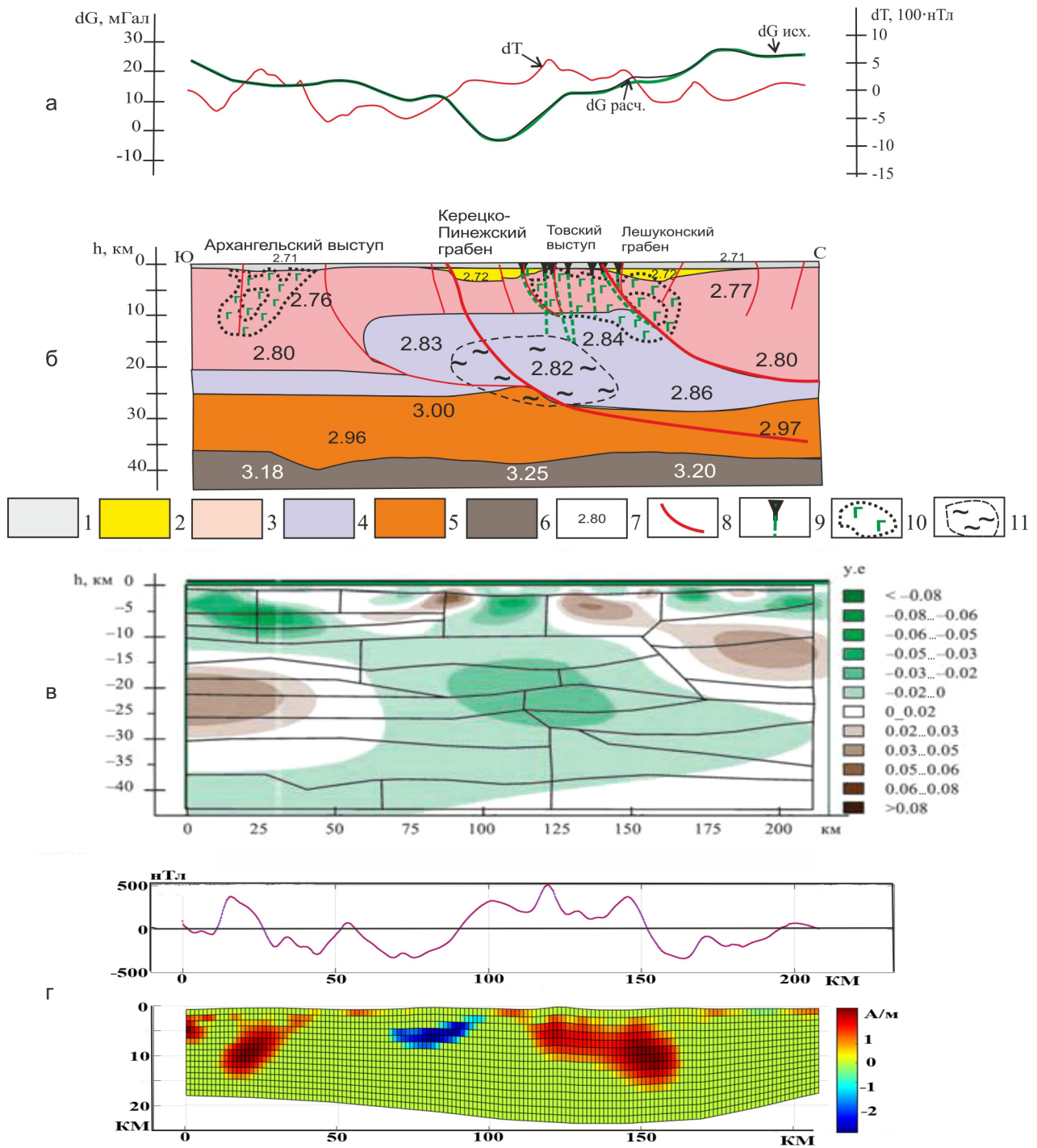
нию Керецкого рифта с расчетными параметрами, близкими к таковым моделям для профилей АР-3 и 1-1' (см. рис. 4, 5). Восточная ветвь этого источника АМП в диапазоне 170–240 км, имеющего на глубине 30 км единое основание, в верхней приповерхностной своей части накладывается на упомянутую выше промежуточную магматическую камеру, а над ней расположены Золотицкое и Кепинское кимберлитовые поля с алмазоносными трубками. Таким образом, на этом разрезе земной коры намечается определенная генетическая связь между источником глубинной аномалии АМП, корни которого имеют мантийное происхождение, промежуточной магматической камерой, выявленной по сейсмическим параметрам, и полями кимберлитовых алмазоносных трубок в осадочном чехле платформы.

Восточнее (130–200 км) выделяется источник АМП, положение которого соответствует положению Лешуконского грабена. В восточной части модельного профиля выделяется обширная приповерхностная область с повышенными значениями намагниченности 1–2 А/м и протяженностью порядка 100 км. Эта область соответствует положению Мезенского палеорифта и отражает его насыщенность очагами магматизма. Это так называемый Снопинский дайковый пояс, выявленный после проведения высокоточной магнитометрической и радиометрической аэросъемки масштаба 1:50 000 (Буш, Калмыков, 2015).

В верхней части разреза выделяется серия слабомагнитных локальных аномалий интенсивностью 0.5–1 А/м (100–200 км). Эта серия локальных аномалий приурочена к ареалу проявлений среднепалеозойского щелочного магматизма трубочно-дайкового типа (Строение и динамика..., 2022).

### Фрагмент профиля Агат-3 (Усть-Пинега–Белое море)

Эта часть профиля является фрагментом регионального геотраверса Агат-3 (рис. 7), пройденного в 1985 г. НПО «Нефтегеофизика». Работы выполнены методикой точечного профилирования с шагом между пунктами регистрации трех компонент сме-



**Рис. 7.** Геолого-геофизический разрез по фрагменту профиля Агат-3 (Усть-Пинега–Белое море).

Фрагменты “а” и “в” взяты из (Строение и динамика ..., 2022), “б” – интерпретированный разрез по профилю Агат-3.  
 а. Графики наблюдаемых и модельных полей.  
 б. Геолого-геофизическая модель земной коры по сейсмическому профилю Агат-3. 1 – венд-палеозойский платформенный чехол; 2 – терригенные образования неопротерозоя, выполняющие грабены Беломорской рифтовой системы; 3 – верхняя кора (2.70–2.80 г/см³); 4 – средняя кора (2.81–2.86 г/см³); 5 – нижняя кора (2.96–3.0 г/см³); 6 – верхняя мантия (3.18–3.20 г/см³); 7 – плотность субстрата по сейсмическим данным; 8 – разломы; 9 – кимберлитовые трубки; 10 – область насыщения коры магматическим материалом основного-ультраосновного состава; 11 – область разуплотнения субстрата земной коры, сопряженная с ее растяжением.  
 в. Плотностная блоковая модель по сейсмическим данным на фоне распределения эффективной плотности.  
 г. Модель распределения источников аномалий магнитного поля в земной коре, рассчитанной по методу двумерной инверсии АМП.

**Fig. 7.** Geological and geophysical section along a fragment of the Agat-3 profile (Ust-Pinega–White Sea).

Fragments “a” и “b” from (The structure and dynamics ..., 2022).

a. Graphs of observed and model fields;

б. Geological and geophysical model of the earth’s crust along the Agat-3 seismic profile. 1 – Vendian-Paleozoic platform cover; 2 – Neoproterozoic terrigenous formations filling the grabens of the White Sea rift system; 3 – upper crust (2.70–2.80 g/cm<sup>3</sup>); 4 – middle crust (2.81–2.86 g/cm<sup>3</sup>); 5 – lower crust (2.96–3.0 g/cm<sup>3</sup>); 6 – upper mantle (3.18–3.20 g/cm<sup>3</sup>); 7 – substrate density according to seismic data; 8 – faults; 9 – kimberlite pipes; 10 – area of crust saturation with magmatic material of basic-ultramafic composition; 11 – area of crustal substrate loosening associated with its extension.

в. Density block model based on seismic data against the background of effective density distribution.

г. Model of distribution of magnetic field anomaly sources in the earth’s crust calculated using the two-dimensional AMP inversion method.

щения почвы от 5 до 10 км и расстоянием между пунктами взрыва 30–120 км. Профиль расположен субмеридиально и пересекает поля кимберлитовых трубок, в том числе и алмазных. С юга на север профиль пересекает Архангельский выступ кристаллического фундамента, Керецко-Пинежский и Лешуконский грабены палеорифтовой системы Белого моря, выполненные рифейским терригенным комплексом пород, и разделяющий их Товский выступ фундамента. Все эти структуры перекрыты венд-палеозойским осадочным чехлом мощностью в несколько сот метров (см. рис. 7).

По данным двумерного сейсмоплотностного моделирования, разрез консолидированной земной коры по профилю Агат-3 расчленяется на верхнюю (2.76–2.80 г/см<sup>3</sup>), среднюю (2.82–2.86 г/см<sup>3</sup>) и нижнюю (2.96–3.00 г/см<sup>3</sup>) кору. Мощность верхней коры варьируется в пределах 10–20 км, резко сокращаясь в центральной части разреза под рифтогенными грабенами. Средняя кора в этом месте, наоборот, испытывает значительное увеличение мощности с 5 до 15 км. “Раздутие” средней коры контролируется листрическими detachmentами, выходящими к подошве средней коры, а в верхней своей части являющимися грабенообразующими сбросами. Такая структура могла образоваться в результате растяжения земной коры еще в рифее при формировании рифтовой системы. Косвенно на это указывает разуплотнение субстрата в центральной части раздува средней коры по данному распределению эффективной плотности субстрата. Мощность нижней коры примерно одинакова вдоль профиля (около 10 км), лишь в средней части происходит ее увеличение до 15 км в зоне контакта с листрическим detachmentом, что характерно практически для всех областей континентального рифтинга. Это область декомпрессии нижележащего более плотного субстрата и его плавления в результате декомпрессии, что могло являться источником основного-ультраосновного магматизма в среднем палеозое. Именно над этой областью разуплотнения субстрата и увеличения мощности средней коры расположены основные кимберлитовые поля Архангельской алмазоносной провинции.

В тоже время интенсивные длиннопериодные магнитные аномалии (см. рис. 7г) на этом профиле

отражают насыщенность продуктами основного-ультраосновного магматизма в верхнем гранитометаморфическом слое земной коры. Одна из них под Товским выступом в диапазоне 110–160 км отражает источник АМП среднепозднепалеозойского магматизма, выраженного в осадочном слое платформы полями алмазоносных кимберлитовых трубок.

В верхней же части модели распределения источников магнитных аномалий наблюдаются локальные, короткопериодные аномалии, связанные с магматическими телами, внедренными в осадочный чехол во время активизации среднепалеозойского (девонского) магматизма.

### Профиль Кварц-2

Рассматриваемый фрагмент регионального профиля Кварц-2 является частью геотраверса Мурманск–Кызыл (рис. 8) и пройден в 1983–1985 гг. Центром “Геон”. На базе этих профилей в 1991 г. проведено двумерное сейсмоплотностное моделирование земной коры, которое явилось основой для распознавания глубинных геологических структур и прогнозирования геотектонических процессов формирования литосферы.

Региональный профиль Кварц-2 (см. рис. 8) пересекает различные геотектонические зоны и блоки земной коры (с запада на восток): Терскую ступень, Лешуконский палеорифт, Кулойский выступ, Сафоновский грабен и Пешскую впадину, и ориентирован поперек главных структурообразующих глубинных разломов. Наиболее отчетливо в геофизических образах распознаются структуры латерального сжатия или растяжения и сопровождающие их крупные магматогенные проявления. Рифтогенные элементы сквозькорового растяжения выражаются грабенообразными погружениями фундамента, встречным подъемом поверхности Мохо и, как следствие, локальным утонением консолидированной коры. Амплитуда прогибания фундамента достигает 4–5 км, а подъем поверхности Мохо под грабенами составляет 2–4 км, а под областью обширного прогибания на севере Мезенской синеклизы достигает 5 км и больше.

На данном профиле фиксируется достаточно сложное внутреннее строение коры и в то же

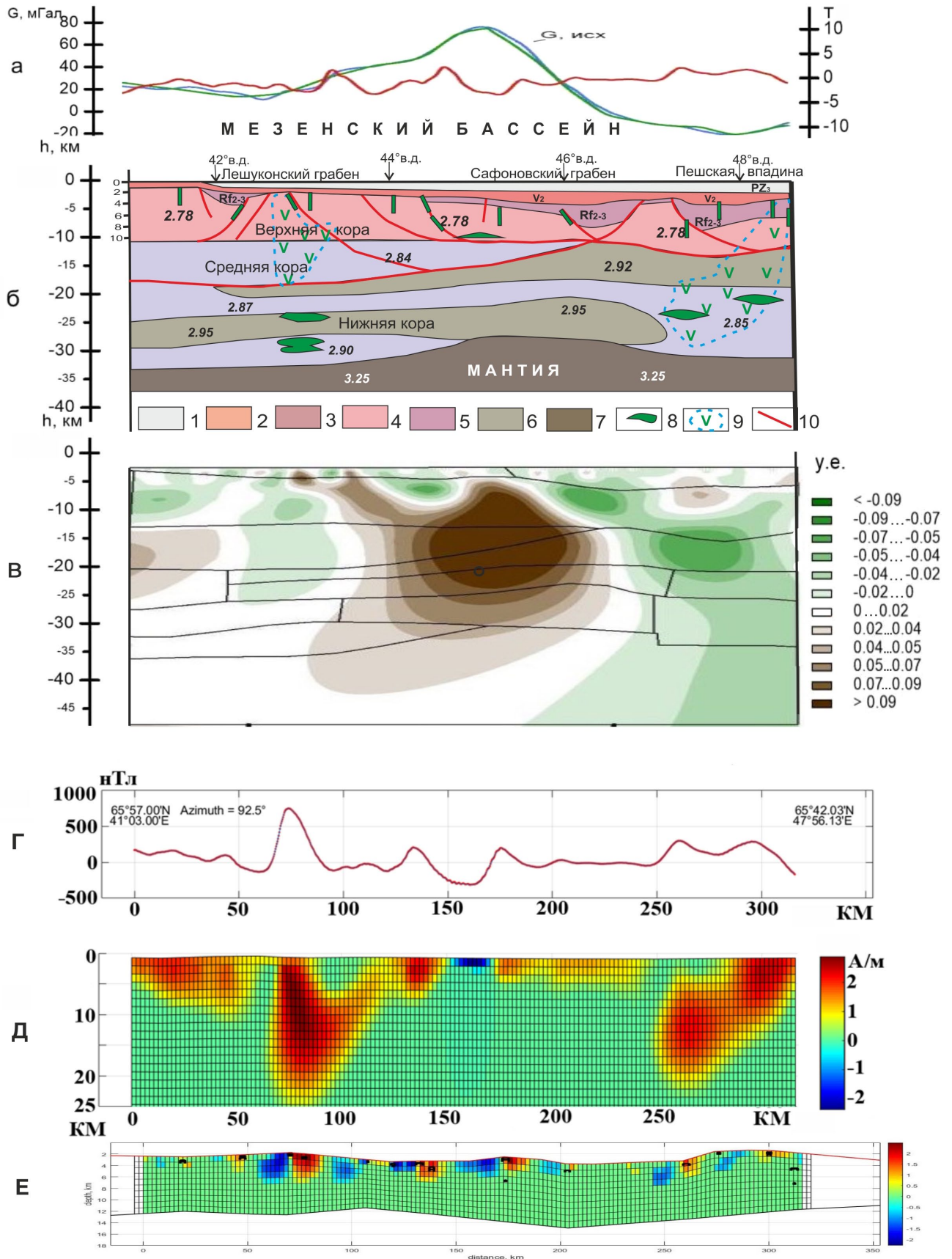


Рис. 8. Геолого-геофизический разрез по фрагменту сейсмического профиля Кварц-2.

- а. Графики наблюдаемых и модельных полей по профилю; фрагменты “а” и “в” взяты из (Строение и динамика ..., 2022).
- б. Геолого-геофизическая модель земной коры по сейсмическому профилю Кварц-2 (использована сейсмоплотностная модель из (Строение и динамика ..., 2022)). 1 – нижнепалеозойский комплекс платформенного чехла; 2 – верхневендский комплекс платформенного чехла; 3 – синрифтовые терригенные образования, выполняющие грабены Беломорской рифтовой системы; 4 – гранитогнейсовый комплекс фундамента (верхняя кора); 5 – средняя пластичная кора; 6 – нижняя кора; 7 – верхняя мантия; 8 – плито- и дайкообразные магматогенные тела основного-ультраосновного состава; 9 – контур области земной коры, насыщенной продуктами основного-ультраосновного магматизма; 10 – разломы. Числа на разрезе обозначают значения плотности субстрата в  $г/см^3$  в блоках, выделенных по данным сейсмопрофилирования.
- в. Плотностная блоковая модель на основе сейсмических данных на фоне распределения эффективной плотности по данным гравиметрии.
- г. Графики низкочастотной составляющей магнитного поля по профилю Кварц-2.
- д. Модель распределения источников АМП с элементами проявления межслойного магматизма (силлы) для профиля Кварц-2' в формате 2D для низкочастотной составляющей магнитного поля.
- е. Модель распределения источников АМП с элементами проявления дайкового магматизма в верхней части коры для профиля Кварц-2' в формате 2D для высокочастотной составляющей магнитного поля.

**Fig. 8.** Geological and geophysical section along a fragment of the Quartz-2 seismic profile.

Fragments “a” and “b” from (The structure and dynamics ..., 2022).

- a. Graphs of observed and model fields along the profile.
- б. Geological and geophysical model of the earth's crust along the Quartz-2 seismic profile. 1 – Lower Paleozoic complex of the platform cover; 2 – Upper Vendian complex of the platform cover; 3 – syn-rift terrigenous formations filling the grabens of the Belomorian rift system; 4 – granite-gneiss complex of the basement (upper crust); 5 – middle plastic crust; 6 – lower crust; 7 – upper mantle; 8 – plate- and dike-shaped magmatic bodies of basic-ultramafic composition; 9 – contour of the earth's crustal region saturated with products of basic-ultramafic magmatism; 10 – faults. The numbers on the section indicate the values of substrate density in  $g/cm^3$  in blocks identified using seismic profiling data.
- в. Density block model based on seismic data against the background of the effective density distribution according to gravimetry data.
- г. Graphs of the low-frequency component of the magnetic field along the Quartz-2 profile.
- д. Model of distribution of AMP sources with elements of interlayer magmatism (sills) for the Quartz-2' profile in 2D format for the low-frequency component of the magnetic field.
- е. Model of distribution of AMP sources with elements of dike magmatism in the upper crust for the Quartz-2' profile in 2D format for the high-frequency component of the magnetic field.

время подтверждается предположение о горизонтальной расслоенности коры по составу и физическим свойствам. Структурные особенности обусловлены изменениями скоростных и плотностных свойств. Физические свойства верхних горизонтов консолидированной коры в большинстве случаев изменяются в сторону уменьшения скорости на  $0.2$  км/с и плотности на  $0.1–0.3$   $г/см^3$ , свидетельствуя о тектоническом разрушении кристаллических комплексов. В низах коры происходит как уменьшение сейсмоплотностных параметров, так и их увеличение. Такое расслоение земной коры под областью развития рифтогенных структур, где более плотные горизонты переслаиваются с менее плотными, может косвенно свидетельствовать о возникновении здесь горизонтальных перемещений друг относительно друга слоев земной коры в режиме растяжения (транстензии?) при рифтогенезе. В этом случае предполагается проникновение в кору мантийного вещества по зонам разломов. Масштабные магматические насыщения косвенно подчеркиваются поведением сейсмических границ, которые испытывают локальные воздымания над областью тектономагматической переработки (Шаров и др., 2020; Строение и динамика..., 2022).

В некоторое противоречие с плотностной блоковой моделью земной коры, составленной на основе сейсмических данных, входит распределение эффективной плотности по данным гравиметрии.

На профиле В (см. рис. 8в) в диапазоне  $140–230$  км в средней части коры наблюдается довольно мощная аномалия эффективной плотности, которая, вероятно, является краевой частью Мезенского гравитационного максимума (Костюченко, Романюк, 1997). Компенсация этой неоднородности в земной коре возможна за счет выступа мантии под Сафоновским грабеном с уменьшением мощности земной коры и увеличения мощности более плотных слоев в пределах этого участка (см. рис. 8б).

Упомянутые выше рифтогенные структуры отчетливо отражаются в аномальном магнитном поле вытянутыми аномалиями преимущественного северо-западного простирания. На модели (примерно  $80$  км) выделяется глубинный магматический очаг, отражающий периферийную область Мезенской аномалии (см. рис. 8д). Для центральной области Мезенской аномалии ( $\varphi = 66^{\circ}.00$  с.ш.,  $\lambda = 43^{\circ}.62$  в.д.) выполнен подбор эквивалентных моделей, соответствующих субвертикальным интрузивным телам. В качестве адекватной модели выбрана вертикальная призма с горизонтальными размерами  $16 \times 27$  км. Диапазон залегания верхней и нижней кромок модели составил  $5$  и  $17$  км соответственно, а эффективная намагниченность –  $9$  А/м. Подобранные параметры модели свидетельствуют, что источником Мезенской аномалии может являться мантийный диапир, обладающий высокой намагниченностью, сформировавшийся в среднепалеозойский (позднедевонский)

этап реактивации рифтовой системы Белого моря, характеризующийся в основном проявлением щелочно-ультраосновного магматизма.

В восточной части модели также выделяется глубинный магматический очаг, подобранный источником АМП с эффективной намагниченностью 2–4 А/м. Его верхние кромки определяются почти на поверхности, глубина нижних кромок достигает 28 км, а видимая протяженность вдоль профиля составляет почти 50 км. Этот магматический очаг локализован в пределах Мезенского и Сафоновского палеорифтов и отражает рифтовый этап эволюции Беломорской палеорифтовой системы в среднем и позднем рифее (Балуев и др., 2012).

В верхней части модели (см. рис. 8e), в диапазоне 0–10 км, наблюдается приповерхностный горизонт, насыщенный локальными источниками, с эффективной намагниченностью 1–2 А/м. Генетически эти локальные источники могли быть сформированы магматическими телами (дайками, силлами) во время активизации среднепалеозойского (девонского) магматизма или же отражать какие-либо источники, имеющие экзогенное происхождение.

#### Серия профилей восточной части Мезенской синеклизы

На рис. 9 представлена серия магнитных профилей, расположенных в восточной части Мезенской синеклизы. На своем протяжении представленные профили пересекают основные тектонические структуры, такие как Керецко-Пинежский рифт, Товский выступ, Лешуконский рифт, Мезенский рифт, Сафоновский рифт и Несско-Тылугский выступ. Подобранные для этих профилей модели демонстрируют приуроченность источников АМП к двум гипсометрическим уровням низкочастотной и высокочастотной составляющих аномального магнитного поля. Так, источники, аппроксимирующие длиннопериодные аномалии, имеют глубину нижних кромок до 15–30 км и протяженность вдоль профиля в десятки км. По своему пространственному положению они соответствуют простираниям палеорифтовым структурам (Лешуконскому, Мезенскому, Сафоновскому и Усть-Выйскому грабенам), локализованным в пределах Мезенской синеклизы. Вероятнее всего, эти глубинные источники АМП соответствуют очагам магматизма или магма-флюидным потокам, распространявшимся вдоль простирания Беломорской палеорифтовой системы “северо-запад–юго-восток” и, возможно, генетически связанных с заложением этих рифтогенных структур в среднем и позднем рифее.

Кроме глубинных источников АМП, на моделях выделяется серия локальных источников, дислоцированных в интервале 0–10 км, интенсивностью 0.5–2 А/м. Пространственно эти источники

выражены локальными аномалиями в пределах отдельных рифтогенных структур и, возможно, отражают внедрение магмы в осадочную толщу в среднепалеозойский (девонский) этап реактивации Беломорской рифтовой системы. Это подтверждается исследованиями В.А. Буша и Б.А. Калмыкова (2015): по результатам интерпретации данных аэромагнитных съемок этой же территории описано позднепалеозойское Мезенское траппово-дайковое поле, располагающееся в осадочном чехле.

Скорее всего, приповерхностные с глубиной до 10 км короткопериодные источники магнитных аномалий на профилях соответствуют элементам траппово-дайковому полю, описанному этими авторами, а длиннопериодные аномалии отражают глубинные уровни земной коры, содержащие магматические камеры, субстрат которых насыщен магматическим веществом. Во всяком случае, эти глубинные источники длинноволновых магнитных аномалий располагаются в земной коре как раз под дайковыми поясами и трапповыми горизонтами. В восточной части этой площади магматические образования основного состава (силлы долеритов) вскрыты скважинами (Буш, Калмыков, 2015).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья представляет вниманию читателей серию геолого-геофизических моделей глубинного строения литосферы восточной части Белого моря и прилегающей части Мезенской синеклизы. Модели основаны на совместной интерпретации выполненных ранее сейсмоплотностных моделей и моделей распределения источников магнитных аномалий. Для решения обратной задачи и построения модели распределения источников магнитных аномалий применена методика двумерной инверсии аномального магнитного поля (Пальшин и др., 2020).

В процессе интерпретации авторами выполнена процедура разделения аномального магнитного поля по глубине до источника и дальнейший анализ низкочастотной и высокочастотной составляющих аномального магнитного поля. Эта процедура позволила авторам построить модели распределения источников аномального магнитного поля как для глубинных горизонтов, отражающих глубинные уровни земной коры, так и для менее глубоких горизонтов (до 10 км), отражающих распределение источников поля, сформировавшихся в среднепалеозойский (позднедевонский) этап реактивации рифтовой системы Белого моря.

Совместная интерпретация сейсмоплотностных моделей и моделей распределения источников магнитных аномалий дала авторам возможность установить связи между физическими параметрами моделей и геологическими структурами

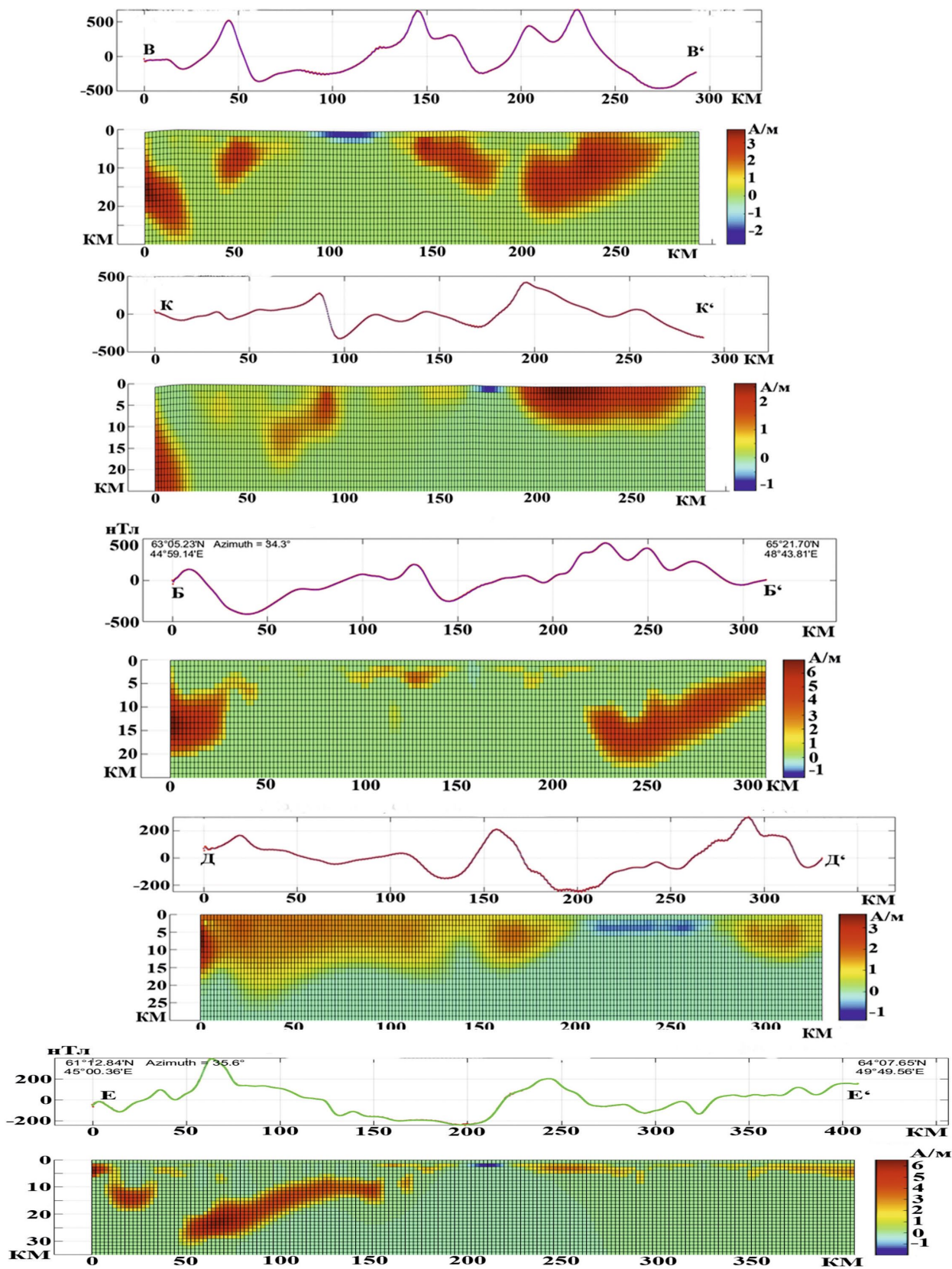


Рис. 9. Модели распределения источников АМП в формате 2D для низкочастотной составляющей магнитного поля для серии профилей восточной части Мезенской синеклизы.

Расположение профилей – см. рис. 1, 3.

**Fig. 9.** Models of distribution of AMP sources in 2D format for the low-frequency component of the magnetic field for a series of profiles of the eastern part of the Mezen syncline.

For the location of the profiles, see Fig. 1, 3.

или телами и создать обобщенные геолого-геофизические модели исследуемых участков земной коры. Как видно на построенных 2D моделях глубинного строения земной коры Мезенской синеклизы, земная кора имеет сложное и неоднородное строение. Во-первых, сложная мозаичная картина, представленная на полученных моделях, отражает слоисто-блоковое строение литосферы. Как правило, земная кора Мезенской синеклизы по своим плотностным свойствам разделяется на четыре слоя: *осадочный (местами вулканогенно-осадочный)* платформенный чехол неопротерозой-мезозойского возраста, перекрывающий *верхнюю консолидированную кору* гранитогнейсового состава, представляющую собой, по сути, раннедокембрийский кристаллический фундамент платформы, *средняя кора* гранулит-базитового состава и *нижняя*, ограниченная в основании разломом Мохо. Блоковую структуру фундамента Мезенской синеклизы создают в основном рифтогенные разломы, ограничивающие грабены и горсты палеорифтовой системы Белого моря. Они и разделяют блоки с разными плотностными свойствами. Главные структурообразующие разломы имеют листрический характер и выполаживаются к основанию верхней или средней коры, приобретая на глубине свойства детачмента, по которым может происходить проскальзывание отдельных горизонтов земной коры в условиях трансенсии. Мощность каждого слоя земной коры меняется относительно друг друга, но какой-то определенной закономерности относительно приповерхностных структур не наблюдается. Скорее, изменения мощностей различных горизонтов консолидированной коры имеют эндогенную природу.

Однако отмечается определенная корреляция рельефа поверхности Мохо со структурами приповерхностного слоя земной коры. Так, под Кандакшским грабеном наблюдается вытянутое вдоль простирания грабена поднятие в рельефе поверхности Мохо с отметками –38 км на северо-западе структуры до –35 км в центральной части грабена. Параллельно вдоль Керецкого рифта в рельефе поверхности Мохо отмечается линейная впадина с отметками от –39 км на северо-западе до –42 км на юго-востоке. Под Усть-Мезенским и Сафоновским грабенами выступ мантии достигает отметки –34 км. Под Чапома-Лешуконским палеорифтом также наблюдается выступ мантии с амплитудой до 8 км. Таким образом, можно отметить некоторую структурированность поверхности Мохо и адекватность ее поверхностным структурам земной коры Мезенской синеклизы.

Главное противоречие, с которым пришлось столкнуться в ходе геологической интерпретации приведенных выше разрезов, – это некоррелируемость данных сейсмоплотностных моделей с данными распределения эффективной плотности субстрата земной коры по данным гравиметрии. Часто эти данные, которые, казалось бы, отражают одно и то же свойство субстрата, а именно его плотность, вступали на одном разрезе в противоречие друг с другом. Поэтому в этом случае приходилось принимать решение, приемлемое с точки зрения логики. Иногда фиксируется, как на профилях 3-AP и Агат-3, в области увеличения мощности средней коры под рифтогенными впадинами разуплотнение субстрата по данным гравиметрии. А отмеченный гипоцентр землетрясения под областью разуплотнения субстрата земной коры в основании ее среднего слоя позволяет предполагать обстановку современного растяжения земной коры, которая наблюдается и в современном Кандакшском грабене (Балуев и др., 2012).

Распределение глубинных источников аномального магнитного поля на приведенных профилях в формате 2D для низкочастотной составляющей магнитного поля также отражает строение земной коры западной части Мезенской синеклизы. Интенсивные длиннопериодные магнитные аномалии отражают здесь, скорее всего, насыщенность продуктами основного-ультраосновного магматизма в верхнем гранитометаморфическом слое земной коры, но, возможно, имеющие генетическую связь с мантией, о чем свидетельствует их пространственная связь с полями кимберлитовых трубок, в том числе и алмазоносных. В верхней же части модели распределения источников магнитных аномалий фиксируются локальные, короткопериодные аномалии, связанные с магматическими телами, внедренными в осадочный чехол во время активизации средне-(девонского) и позднепалеозойского магматизма.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам за конструктивные замечания, способствовавшие значительному улучшению качества статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балуев А.С. (2006) Геодинамика рифейского этапа эволюции северной пассивной окраины Восточно-Европейского кратона. *Геотектоника*, (3), 23-28.  
Балуев А.С., Брусиловский Ю.В., Иваненко А.Н. (2022) Природа магнитных аномалий южной части Барен-

- цевоморского шельфа по результатам комплексного анализа. *Литосфера*, 22(5), 579-598. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-579-598>
- Балуев А.С., Брусиловский Ю.В., Иваненко А.Н. (2018) Структура земной коры Онежско-Кандалакшского палеорифта по данным комплексного анализа аномального магнитного поля акватории Белого моря. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(4), 1293-1312. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0396>
- Балуев А.С., Журавлев В.А., Пржиялговский Е.С. (2009) Новые данные о строении центральной части палеорифтовой системы Белого моря. *Докл. АН*, 427(3), 348-353.
- Балуев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н., Пржиялговский Е.С. (2012) Тектоника Белого моря и прилегающих территорий. (Объяснительная записка к "Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий" масштаба 1:500 000). М.: ГЕОС, 104 с.
- Буш В.А., Калмыков Б.А. (2015) Новые данные по домезозойскому внутриплитному магматизму Восточно-Европейской платформы. *Геотектоника*, 5, 43-61. DOI: 10.7868/S0016853X15050021
- Гаврилов В.П., Дворецкий П.И., Дунаев В.Ф., Пономарев В.А., Руднев А.Н. (2000) Геология и нефтегазоносность Московской и Мезенской синеклиз. М.: Недра, 144 с.
- Геодинамика и возможная нефтегазоносность Мезенского осадочного бассейна. (2006) СПб.: Наука, 319 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2012) М-6 1:1 000 000 (новая серия), лист Q-38 – Мезень. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ.
- Гражданкин Д.В. (2003) Строение и условия осадконакопления вендского комплекса в Юго-Восточном Беломорье. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, 11(4), 3-23.
- Егоркин А.В. (1991) Строение земной коры по сейсмическим геотраверсам. *Глубинное строение территории СССР*. (Ред. В.В. Белоусов, Н.И. Павленкова, Г.И. Кветковская). М.: Наука, 118-135.
- Журавлев В.А. (2007) Структура земной коры Беломорского региона. *Разведка и охрана недр*, 9, 22-26.
- Иваненко А.Н., Брусиловский Ю.В., Филин А.М., Шишкина Н.А. (2012) Современные технологии обработки и интерпретации магнитных данных при работах на морских месторождениях нефти и газа. *Геофизика*, (3), 60-71.
- Иваненко А.Н., Шишляев В.В. (2013) Автоматическое картирование источников потенциальных полей. *Школа по морской геологии*. Мат-лы XX Междунар. науч. конф. Т. 5. М.: ГЕОС, 116-119.
- Костюченко С.Л., Морозов А.Ф., Кременецкий А.А. (2012) Тиман-Урало-Пайхойская коллизионная область. М.: Геокарт-ГЕОС, 210 с.
- Костюченко С.Л., Романюк Т.В. (1997) О природе Мезенского гравитационного максимума. *Физика Земли*, 12, 3-22.
- Кузнецов Н.Б. (2006) Кембрийская коллизия Балтики и Арктиды, ороген Протоуралид-Тиманид и продукты его размыва в Арктике. *Докл. АН*, 423(6), 788-793.
- Кузнецов Н.Б. (2008). Кембрийский ороген протоуралид-тиманид: структурные доказательства коллизионной природы. *Докл. АН*, 423(6), 774-779.
- Кузнецов Н.Б., Балуев А.С., Терехов Е.Н., Колодяжный С.Ю., Пржиялговский Е.С., Романюк Т.В., Дубенский А.С., Шешуков В.С., Ляпунов С.М., Баянова Т.Б., Серов П.А. (2021) О времени формирования Кандалакшского и Керецкого грабенов палеорифтовой системы Белого моря в свете новых данных изотопной геохронологии. *Геодинамика и тектонофизика*, 12(3), 570-607. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0540
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. (2008). Состав питающих провинций и особенности геологической истории поздневендского Мезенского бассейна. *Литол. и полезн. ископаемые*, 3, 290-312.
- Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Е., Балуев А.С., Асминг С.В. (2022). Сейсмичность Беломорского региона. *Сейсмические приборы*, 58(1), 5-28. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49349146>
- Пальшин Н.А., Иваненко А.Н., Алексеев Д.А. (2020). Неоднородное строение магнитоактивного слоя Курильской островной дуги. *Геодинамика и тектонофизика*, 11(3), 583-594.
- Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А. (2022) Глубинное строение Арктики и Антарктики по магнитным аномалиям компонент и аномалиям силы тяжести. *Космич. Исследования*, 60(4), 331-347.
- Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Баренц-регион. (1998) (Ред. Ф.П. Митрофанов, Н.В. Шаров). Апатиты: КНЦ РАН. Ч. 1, 237 с.
- Строение и динамика литосферы Беломорья. (2022) (Отв. ред. Н.В. Шаров). Петрозаводск: Ин-т геологии КарНЦ РАН, 235 с.
- Тектоническая карта Белого моря и прилегающих территорий м-ба 1:1 500 000. (2010) (Гл. ред. М.Г. Леонов, Г.С. Казанин; отв. ред. А.С. Балуев). М.: Куна.
- Федонкин М.А. (1981) Беломорская биота венда (докембрийская бесскелетная фауна севера Русской платформы). М.: Наука, 100 с.
- Филиппова А.И., Филиппов С.В. (2023) Тепловой режим литосферы под полуостровом Таймыр по геомагнитным данным. *Геомагнетизм и аэрономия*, 63(3), 391-402.
- Цыганов В.А. (2006) Новые данные о геологическом строении территории Мезенской синеклизы и ее перспективах на углеводороды (по результатам высокооточной аэромагнитной съемки). *Георесурсы*, 1(18), 2-9.
- Чамов Н.П. (2016) Строение и развитие Среднерусско-Беломорской провинции в неопротерозое. *Тр. ГИН РАН*, вып. 609. М.: ГЕОС, 235 с.
- Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Любимова А.В. (2018). *Геоинформатика*, 3, 8-17
- Шаров Н.В. (2017) Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 173 с.
- Шаров Н.В., Бакунович Л.И., Белашев Б.З., Журавлев В.А., Нилов М.Ю. (2020) Геолого-геофизические модели земной коры Беломорья. *Геодинамика и тектонофизика*, 11(3), 566-582.
- Шельфовые осадочные бассейны Российской Арктики: геология, геоэкология, минерально-сырьевой потенциал. (2020) (Под ред. Г.С. Казанина) Мурманск: МАГЭ; СПб.: Реноме, 544 с. ISBN 978-5-00125-347-1
- Artemieva I.M. (2006). Global 1° × 1° thermal model TCl for the continental lithosphere: implications for litho-

sphere secular evolution. *Tectonophysics*, **416**, 245-277.

- Artemieva I.M. (2009) The continental lithosphere: Reconciling thermal, seismic, and petrologic data. *Lithos*, **109**, 23-46.
- Kolesnikov A.V. (2019) Stratigraphic correlation potential of the Ediacaran palaeopascichnids. *Estudios Geologicos*, **75**(2), e102. <https://doi.org/10.3989/egeol/43588.557>
- ### REFERENCES
- Artemieva I.M. (2006) Global 1° × 1° thermal model TC1 for the continental lithosphere: implications for lithosphere secular evolution. *Tectonophysics*, **416**, 245-277.
- Artemieva I.M. (2009) The continental lithosphere: Reconciling thermal, seismic, and petrologic data. *Lithos*, **109**, 23-46.
- Baluev A.S. (2006) Geodynamics of the Rifean stage of evolution of the northern passive margin of the East European craton. *Geotektonika*, **40**(3), 183-196 (In Russ.). DOI: 10.1134/S0016852106030034
- 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. *Geodinamika i Tektonofizika*, **9**(4), 1293-1312. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0396>
- Baluev A.S., Brusilovsky Yu.V., Ivanenko A.N. (2022) The nature of magnetic anomalies of the southern part of the Barents Sea shelf based on the results of a comprehensive analysis. *Lithosphere(Russia)*, **22**(5), 579-598. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-579-598>
- Baluev A.S., Zhuravlev V.A., Przhiyalgovskii E.S. (2009) New data on the structure of the central part of the paleorift system of the White Sea. *Dokl. Akad. Nauk*, **427**(3), 348-353. (In Russ.)
- Baluev A.S., Zhuravlev V.A., Terekhov E.N., Przhiyalgovskii E.S. (2012) Tectonics of the White Sea and adjacent territories. (Explanatory note to the "Tectonic map of the White Sea and adjacent territories" scale 1 : 1 500 000). Moscow, GEOS Publ., 104 p. (In Russ.)
- Bush V.A., Kalmykov B.A. (2015) New data on pre-Mesozoic intraplate magmatism of the East European platform. *Geotectonics*, **5**, 43-61. (In Russ.)
- Chamov N.P. (2016) The Structure and development of the Mid-Russian – White Sea Province in the Neoproterozoic. *Tr. GIN RAN*, вып. 609. Moscow, GEOS Publ., 235 p.
- Cheremisina E.N., Finkel'shtein M.Ya., Lyubimova A.V. (2018) *Geoinformatika*, **3**, 8-17.
- Egorkin A.V. (1991) The structure of the Earth's crust according to seismic geotraverses. The deep structure of the USSR territory (Eds V.V. Belousov, N.I. Pavlenkova, G.I. Kvetkovskaya). Moscow, Nauka Publ., 118-135. (In Russ.)
- Fedonkin M.A. (1981) White Sea Vendian biota (Precambrian non-skeletal fauna of the north of the Russian Platform). Moscow, Nauka Publ., 100 p. (In Russ.)
- Filippova A.I., Filippov S.V. (2023) Thermal regime of the lithosphere beneath the Taimyr Peninsula based on geomagnetic data. *Geomagnetizm i Aeronomiya*, **63**(3), 391-402. (In Russ.)
- Gavrilov V.P., Dvoret'skii P.I., Dunaev V.F., Ponomarev V.A., Rudnev A.N. (2000). Geology and oil and gas potential of the Moscow and Mezen synclises. Moscow, Nedra Publ., 144 p. (In Russ.)
- Geodynamics and possible oil and gas potential of the Mezen sedimentary basin. (2006) St.Petersburg, Nauka Publ., 319 p. (In Russ.)
- Grazhdankin D.V. (2003) Structure and conditions of sedimentation of the Vendian complex in the South-Eastern White Sea region. *Stratigrafiya. Geol. Korrel.*, **11**(4), 3-23. (In Russ.)
- Ivanenko A.N., Brusilovskii Yu.V., Filin A.M., Shishkina N.A. (2012) Modern technologies for processing and interpreting magnetic data during work at offshore oil and gas fields. *Geofizika*, (3), 60-71 (In Russ.)
- Ivanenko A.N., Shishlyaev V.V. (2013) Automatic mapping of sources of potential fields. *Schools in marine geology. Mater. XX Inter. Sci. Conf. V. 5*. Moscow, GEOS Publ., 116-119. (In Russ.)
- Kolesnikov A.V. (2019) Stratigraphic correlation potential of the Ediacaran palaeopascichnids. *Estudios Geologicos*, **75**(2), e102. <https://doi.org/10.3989/egeol/43588.557>
- Kostyuchenko S.L., Morozov A.F., Kremenetskii A.A. (2012) Timan-Ural-Paikhoi collision region. Moscow, Geokart-GEOS Publ., 210 p. (In Russ.)
- Kostyuchenko S.L., Romanyuk T.V. (1997) On the nature of the Mezen gravitational maximum. *Fizika Zemli*, (12), 3-22. (In Russ.)
- Kuznetsov N.B. (2006) The Cambrian Baltica–Arctida Collision, Pre-Uralide–Timanide Orogen, and Its Erosion Products in the Arctic. *Dokl. Earth Sci.*, **411** (9), 1375- 1380. (In Russ.) DOI: 10.1134/S1028334X06090091
- Kuznetsov N.B. (2008) The Cambrian Pre-Uralide–Timanide Orogen: Structural Evidence for Its Collisional Origin. *Dokl. Earth Sci.*, **423**(9), 1383-1387. (In Russ.) DOI: 10.1134/S1028334X08090122
- Kuznetsov N.B., Baluev A.S., Terekhov E.N., Kolodyazhnyi S.Yu., Przhiyalgovskii E.S., Romanyuk T.V., Dubenskii A.S., Sheshukov V.S., Lyapunov S.M., Bayanova T.B., Serov P.A. (2021) Constraints on the time of formation of the Kandalaksha and Keretsk grabens of the paleo-rift system of the White sea based on new isotopic-geochronological data. *Geodynam. Tectonofiz.*, **12**(3), 570-607.
- Maslov A.V., Grazhdankin D.V., Podkovyrov V.N., Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P. (2008). Composition of feeding provinces and features of the geological history of the Late Vendian Mezen Basin. *Litol. i Polezn. Iskop.*, **3**, 290-312. (In Russ.)
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Baluev A.S., Asming S.V. (2022) Seismicity of the White Sea region *Seismich. Pribory*, **58**(1), 5-28. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49349146>
- Pal'shin N.A., Ivanenko A.N., Alekseev D.A. (2020) Heterogeneous structure of the magnetoactive layer of the Kuril island arc. *Geodinamika i Tektonofizika*, **11**(3), 583-594. (In Russ.)
- Petrova A.A., Latysheva O.V., Kopytenko Yu.A. (2022) Deep structure of the Arctic and Antarctic based on magnetic anomalies of components and gravity anomalies. *Kosmich. Issled.*, **60**(4), 331-347. (In Russ.)
- Seismogeological Model of the Lithosphere of Northern Europe: the Barents Region. (1998) (Eds F.P. Mitrofanov, N.V. Sharov). Pt 1. Apatity, 237 p.
- Sharov N.V. (2017) Lithosphere of Northern Europe based on seismic data. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 173 p. (In Russ.)

- Sharov N.V., Bakunovich L.I., Belashev B.Z., Zhuravlev V.A., Nilov M.Yu. (2020) Geological and geophysical models of the Earth's crust in the White Sea region. *Geodinamika i Tektonofizika*, **11**(3), 566-582. (In Russ.)
- Shelf sedimentary basins of the Russian Arctic: geology, geoecology, mineral resource potential. (2020) (Ed. G.S. Kazanin). Murmansk, MAGE Publ.; St. Petersburg, Renome Publ., 544 p. (In Russ.)
- State Geological Map RF. (2012) L. Q-38. Esc. 1:1000000 (new series), Q-38-Mezen. St.Petersburg, VSEGEI Publ.
- Structure and dynamics of the lithosphere of the White Sea region. (2022) (Rep. ed. N.V. Sharov). Petrozavodsk, Institute of Geology KarNTs RAN Publ., 235 p. (In Russ.)
- Tectonic map of the White Sea and adjacent areas. At a scale of 1 : 1 500 000. (2010) (Chief eds M.G. Leonov, G.S. Kazanin; Managing ed. A.S. Baluev). Moscow, KUNA Publ. (In Russ.)
- Tsyganov V.A. (2006) New data on the geological structure of the Mezen syncline territory and its hydrocarbon prospects (based on the results of high-precision aeromagnetic survey). *Georesursy*, **1**(18), 2-9. (In Russ.)
- Zhuravlev V.A. (2007) Structure of the earth's crust of the White Sea region. *Razvedka i Okhrana Nedr*, **9**, 22-26. (In Russ.)