

ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПОД БАЛТИЙСКИМ ЩИТОМ

© 2023 г. А. И. Филиппова^{1, 2, *}, С. В. Филиппов^{1, **}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

²Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

*e-mail: aleirk@mail.ru

**e-mail: sfilip@izmiran.ru

Поступила в редакцию 30.01.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

В работе представлены результаты исследования глубин залегания литосферных магнитных источников под Балтийским щитом и прилегающими к нему территориями Русской плиты и Скандинавских каледонид. Расчеты глубин проведены с помощью метода центроида по глобальной модели аномального геомагнитного поля EMAG2v3. Минимальные значения глубины нижней границы магнитоактивного слоя литосферы (30–35 км) получены под обрамлением Балтийского щита – Русской плитой, северной и южной частями Скандинавских каледонид, максимальные (>45 км) – под Скандинавским полуостровом – на западе Свекофеннского орогена и кратоном Норрботтен. Остальная территория Балтийского щита характеризуется промежуточными значениями глубин (38–45 км). Из сопоставления полученных нами оценок глубины нижней границы литосферных магнитных источников с имеющимися в настоящий момент моделями распределения глубины Мох под исследуемой территорией видно, что для большей части Балтийского щита магнитоактивный слой литосферы расположен в пределах земной коры, за исключением двух областей под Свекофеннским орогеном и восточной частью Кольского полуострова, что свидетельствует в пользу гипотезы о том, что верхняя мантия обладает магнитными свойствами в регионах, где наблюдаются положительные длинноволновые аномалии геомагнитного поля на спутниковых высотах. Полученные результаты показывают, что западная и восточная части Кольского полуострова могут различаться не только по скоростному строению коры и верхней мантии, что было установлено ранее различными сейсмологическими методами, но и по магнитным свойствам слоя верхней мантии, расположенного непосредственно под корой.

Ключевые слова: аномальное геомагнитное поле, модель EMAG2v3, метод центроида, Балтийский щит

DOI: 10.31857/S0016794023600059, EDN: KTRYOG

1. ВВЕДЕНИЕ

Балтийский щит занимает восточную часть Скандинавского полуострова, Кольский полуостров и Карелию и представляет собой наиболее крупный и стабильный на протяжении позднедокембрийско-фанерозойской истории выступ кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы (рис. 1) [Слабунов и др., 2021]. На северо-западе он граничит со складчатыми сооружениями Скандинавских каледонид, а на юго-востоке полого погружается под рифейские и более молодые отложения Русской плиты. Структура щита в основном была сформирована в результате свекокарельского тектогенеза 1900–1700 млн лет назад [Хаин, 2001]. Формирование восточной части Балтийского щита было завершено в позднем архее, а в ее состав вошли четыре

крупных сегмента континентальной коры: Карельская гранит-зеленокаменная провинция, Беломорская провинция, Кольская гранулитогнейсовая провинция и Мурманский кратон [Козлов и др., 2006]. На северо-западе к ним примыкает кратон Норрботтен, также сложенный корой архейского возраста. Центральное положение в структуре щита занимает палеопротерозойский Свекофеннский ороген, а на его юго-западной окраине расположен Свеконорвежский ороген, сформировавшийся в конце палеопротерозоя и в мезопротерозое [Минц, 2017].

Результаты исследований строения земной коры и мантии Балтийского щита по сейсмическим данным свидетельствуют о том, что большая часть рассматриваемой территории характеризуется мощной корой (40–60 км), достигающей своей

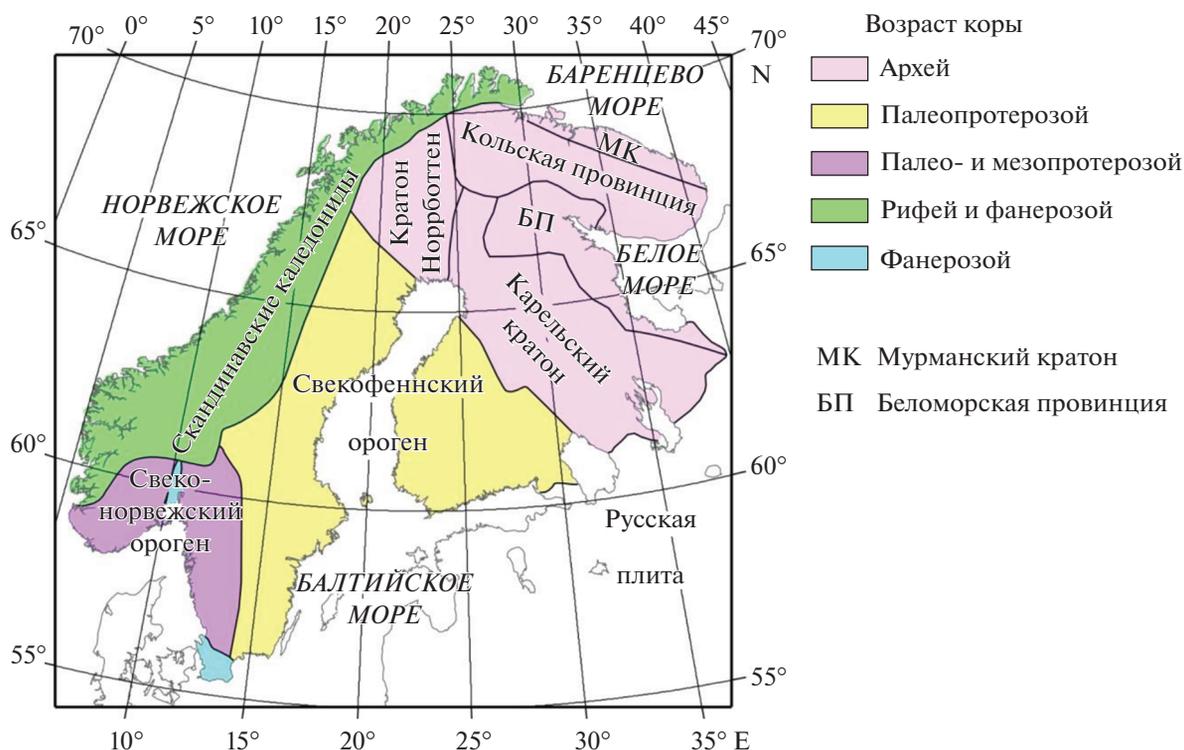


Рис. 1. Тектоническая схема исследуемой территории по [Слабунов и др., 2021].

максимальной толщины на востоке Свекофеннского орогена [Artemieva and Thybo, 2013; Гоев и др., 2021; Шаров и Лебедев, 2022; и др.]. Скорости сейсмических волн в верхней мантии под щитом в целом повышенные, а литосфера — мощная (до 200 км и более по различным оценкам), при этом наблюдается увеличение скоростей и мощности литосферы в восточном направлении [Levshin et al., 2007; Pedersen et al., 2013; Lebedev et al., 2017; Artemieva, 2019; Priestley et al., 2019; Seredkina, 2019; Филиппова и Соловей, 2022; и др.].

Результаты региональных исследований магнитных аномалий под Балтийским щитом, выполненные с использованием различных методов и данных, демонстрируют большой разброс значений глубин залегания литосферных магнитных источников. Минимальные глубины их нижней границы (менее 10 км, верхняя кора), противоречащие пониженным значениям поверхностного теплового потока под рассматриваемой территорией [Fuchs et al., 2021 a] (см. далее), были получены путем анализа отдельных аномалий геомагнитного поля на юге Карельского кратона [Булина, 1976]. Согласно более поздним исследованиям источники региональных магнитных аномалий над Балтийским щитом и отдельными его частями сосредоточены в средней части коры [Крутиховская и др., 1986] или распределены практически по всему ее объему [Пашкевич и др., 1990,

2015; Федорова, 1997; Глазнев, 2003; Шаров и др., 2004, 2020; Нилов и др., 2021; Середкина и Филиппов, 2021]. Также существенно противоречат друг другу наиболее актуальные на текущий момент глобальные модели распределения нижней границы магнитоактивного слоя литосферы [Gard and Hasterok, 2021; Li et al., 2017] и региональная модель для всей Арктики [Lu et al., 2022]. Согласно [Li et al., 2017; Lu et al., 2022] под щитом глубина нижней границы изменяется от 10 до 30 км, в то время как результаты [Gard and Hasterok, 2021] свидетельствуют о ее более глубоком положении — 30–50 км.

В связи с противоречивостью имеющихся оценок в данной работе была поставлена задача: основываясь на современных данных, выполнить с высоким пространственным разрешением расчеты глубин залегания литосферных магнитных источников под Балтийским щитом и граничащими с ним складчатыми сооружениями Скандинавских каледонид (рис. 1) и провести анализ полученных результатов. При этом предполагалось, что основным магнитным минералом в литосфере является магнетит, т.е. полученное распределение глубины нижней границы литосферных магнитных источников может быть отождествлено с глубиной изотермы 578°C (температура точки Кюри магнетита [Langel and Hinze, 1998]).

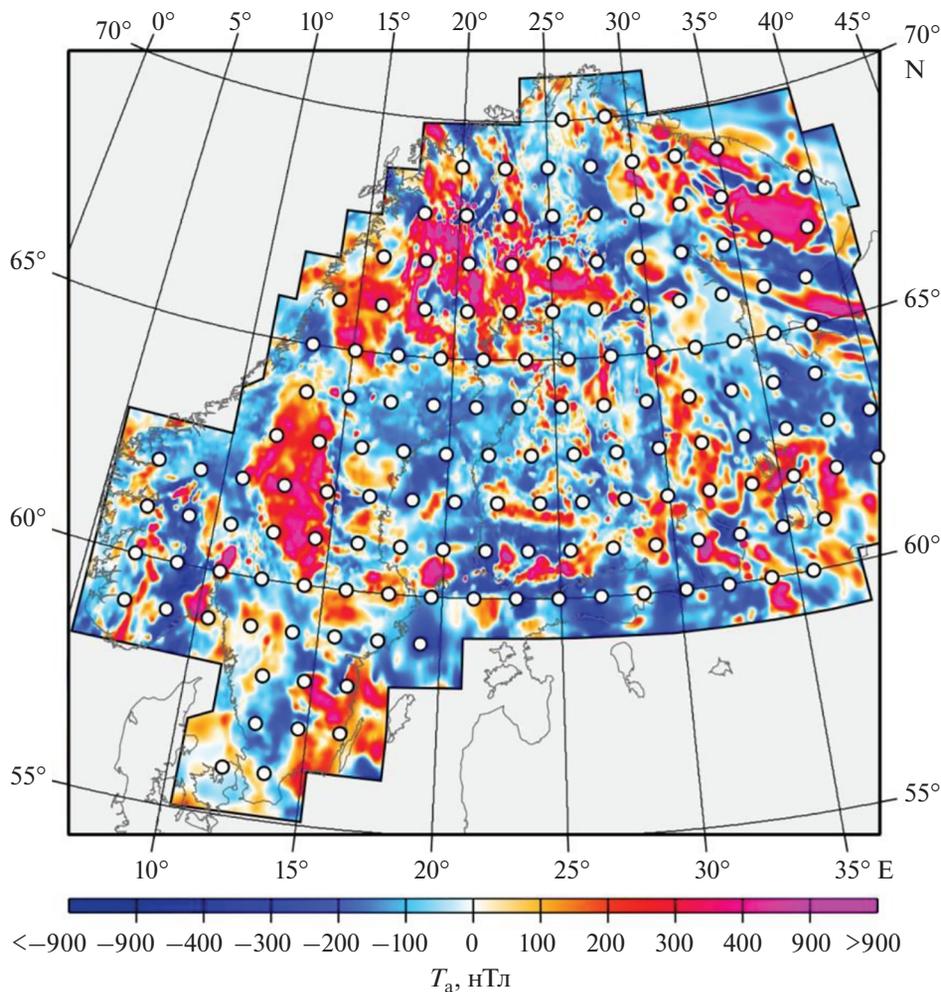


Рис. 2. Аномальное геомагнитное поле на высоте 4 км согласно модели EMAG2v3 [Meyer et al., 2017] в пределах исследуемой территории. T_a (нТл) — модуль полного вектора аномального геомагнитного поля. Белыми точками обозначены центральные точки блоков 200×200 км, для которых вычислялись азимутально-усредненные Фурье-спектры мощности аномального геомагнитного поля.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве исходного материала для расчетов использовалась наиболее актуальная на текущий момент времени глобальная модель аномального магнитного поля Земли EMAG2v3 [Meyer et al., 2017]. Модель основана на данных разновысотных магнитных съемок, приведена к высоте 4 км над уровнем моря и имеет горизонтальное разрешение 2 угловые минуты (рис. 2). Одним из ее несомненных достоинств является использование спутниковых наблюдений (данные спутника CHAMP), благодаря которым обеспечивается более надежное выделение нижней границы литосферных магнитных источников [Wen et al., 2019]. Согласно EMAG2v3 в пределах рассматриваемой территории модуль полного вектора аномального геомагнитного поля (T_a) изменяется примерно от -890 до $+2500$ нТл, а области, где

данные ненадежны или их нет, отсутствуют (рис. 2). Распределение положительных и отрицательных аномалий геомагнитного поля не имеет строго упорядоченного характера, что соответствует предположению о случайном по горизонтали распределении намагниченности в магнитоактивном слое, принятом в используемом нами методе центроида [Tanaka et al., 1999].

Подготовка данных была выполнена аналогично нашим предыдущим исследованиям Восточно-Сибирского моря [Филиппова и Филиппов, 2022a] и северо-восточного фланга Байкальского рифта [Filippova et al., 2021]: данные выбирались в квадратных блоках 200×200 км, перекрывающихся между собой по долготе на 100 км и по широте на 1° (рис. 2). Размер блоков был задан с учетом того, что он должен от 3 до 10 раз превышать глубину нижней границы магнитных источников [Husseini et al., 2013; Ravat et al., 2007]. Затем для

Таблица 1. Результаты расчетов глубины нижней границы литосферных магнитных источников в зависимости от размеров блоков, в пределах которых выполняются оценки

Размер блока, км	Координаты центральных точек		
	60° N, 15.9° E	65° N, 17.2° E	67° N, 34.3° E
	$Z_b \pm \epsilon$, км		
300 × 300	55.8 ± 2.4	50.1 ± 3.0	43.1 ± 3.2
250 × 250	55.4 ± 2.0	50.0 ± 2.5	43.2 ± 3.2
200 × 200	54.1 ± 2.5	49.5 ± 3.3	43.1 ± 3.5
150 × 150	41.5 ± 2.4	45.1 ± 2.9	40.5 ± 3.5

Примечание. ϵ – погрешность оценки глубины.

каждого из блоков были вычислены азимутально-усредненные Фурье-спектры мощности аномального геомагнитного поля с помощью программы Fourpot 1.3b [Pirttijärvi, 2015]. По полученным спектрам в соответствии с методом центраоида [Okubo et al., 1985; Tanaka et al., 1999], в котором принимается, что намагниченность в бесконечном в горизонтальных направлениях слое является случайной функцией горизонтальных координат и не зависит от глубины, рассчитывались искомые значения глубин: центра масс (Z_0), верхней (Z_t) и нижней границ (Z_b) литосферных магнитных источников. Отметим, что в случае, если распределение намагниченности будет отличаться от указанной выше модели (например, при увеличении намагниченности с глубиной или ее фрактальном распределении), оценки, полученные с помощью используемого метода, очевидно, будут искажены. Корректность применения метода центраоида для рассматриваемой территории показана в работе [Филиппова и Филиппов, 2022б].

Согласно методу центраоида глубина верхней границы литосферных магнитных источников (Z_t) в коротковолновом приближении связана с азимутально-усредненным Фурье-спектром мощности аномалий геомагнитного поля ($\Phi_{\Delta T}$) следующим соотношением [Tanaka et al., 1999]:

$$\ln[\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2}] = \ln A - |k| Z_t, \quad (1)$$

где $|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ – модуль волнового числа; A – const.

Учитывая результаты синтетических тестов [Núñez Demarco et al., 2021], глубины Z_t вычислялись в интервале волновых чисел примерно от 0.25 до 0.5 рад/км.

Глубина центра масс магнитных источников (Z_0) определяется из спектра в длинноволновом приближении (от максимума спектра до 0.04–0.05 рад/км [Núñez Demarco et al., 2021]):

$$\ln[\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2}/|k|] = \ln B - |k| Z_0, \quad (2)$$

где B – const.

Линейная аппроксимация спектров проводилась методом наименьших квадратов. Глубины нижней границы вычислялись по полученным значениям Z_0 и Z_t с помощью соотношения [Tanaka et al., 1999]:

$$Z_b = 2Z_0 - Z_t. \quad (3)$$

Погрешности определения глубин (ϵ) оценивались с помощью соотношения [Okubo and Matsunaga, 1994; Salazar et al., 2017]:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{|k_2| - |k_1|}, \quad (4)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение линейной аппроксимации от наблюдаемого спектра; $|k_2|$ и $|k_1|$ – верхняя и нижняя граница диапазона волновых чисел, в котором определялись искомые параметры.

Отметим, что соотношение (4) не учитывает погрешности исходных данных, которые согласно используемой модели EMAG2v3 [Meyer et al., 2017] могут достигать до ± 96 нТл южнее 60° N и до ± 167 нТл севернее 60° N. При этом проведенные ранее синтетические тесты показывают, что добавление случайно шума с амплитудой ± 167 нТл практически не влияет на определяемые значения глубин центра масс и нижней границы магнитных источников, но могут существенно (до 1–2 км) исказить оценки глубины верхней границы [Середкина и Филиппов, 2021].

Поскольку при использовании метода центраоида оценки глубин зависят от выбора размеров блоков, в пределах которых выполняется спектральный анализ [Ravat et al., 2007], для демонстрации устойчивости полученных результатов для трех различных точек в пределах исследуемого региона были проведены дополнительные расчеты для блоков с размерами 150×150 , 250×250 и 300×300 км (табл. 1). Из табл. 1 видно, что при увеличении размеров блоков от 200×200 до 300×300 км значения глубины нижней границы литосферных магнитных источников меняются незначительно с учетом ее погрешности. При этом в случае, если $Z_b > 50$ км, уменьшение размеров до

150 × 150 км приводит к существенному занижению рассчитываемой глубины. Как показано в [Oliveira et al., 2021] такие размеры блоков могут использоваться, если значения Z_b составляют около 34 км. Таким образом, выбранные нами размеры блоков 200 × 200 км являются достаточными для выявления областей с глубоким залеганием Z_b и оптимальными в плане горизонтально-го разрешения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных расчетов было получено, что глубина верхней границы литосферных магнитных источников (Z_t) под исследуемым регионом составляет 0.1–3.1 км, причем под большей частью она близка к своему среднему значению 1.2 км. Определенных закономерностей в распределении этой глубины не прослеживается, что может быть связано с высокими погрешностями ее определения (0.1–1.2 км). Принимая во внимание, что глубина Z_t может рассматриваться как нижняя граница осадочного слоя [Яновский, 1978], полученные результаты с учетом их погрешностей хорошо согласуются с другими независимыми геофизическими данными. В частности, согласно глобальной модели строения коры CRUST 1.0 [Laske et al., 2013] и модели строения коры для территории Европы EUNASEIS [Artemieva and Thybo, 2013], основанных на сейсмологических данных, осадки на большей части рассматриваемой территории отсутствуют или их мощность не превышает 1–2 км. Для Кольского полуострова отсутствие осадков также подтверждается результатами гравиметрических исследований [Gramberg et al., 1999].

Глубины центра масс (Z_0) и нижней границы (Z_b) изменяются в диапазонах 15.5–27.6 км и 30.4–54.3 км соответственно и имеют схожий характер распределения. Последнее ранее уже отмечалось нами для Восточно-Сибирского моря [Филиппова и Филиппов, 2022а] и является прямым следствием того, что в соотношении (3) $Z_0 \gg Z_t$. Погрешности определения глубин Z_0 и Z_b имеют случайный характер, а их средние значения составляют 1.8 км для Z_0 и 3.0 км для Z_b . Поскольку основной интерес для интерпретации представляет глубина нижней границы литосферных магнитных источников, далее рассмотрим основные особенности ее распределения (рис. 3).

Минимальные значения глубины нижней границы магнитоактивного слоя литосферы под рассматриваемой территорией (30–35 км) наблюдаются под обрамлением Балтийского щита – Русской плитой, северной и южной частями Скандинавских каледонид (рис. 1, 3). При этом в центральной части каледонид значения глубин Z_b составляют 42–48 км. Для Свеконорвежского оро-

гена характерно увеличение глубины Z_b в восточном направлении примерно от 30 до 40 км. Наибольшие вариации глубины нижней границы прослеживаются под Свеккофеннским орогеном. Под западной частью орогена, расположенной на Скандинавском полуострове, Z_b везде превышает 45 км и достигает своего максимума (примерно 54 км) для всей исследуемой территории. Под восточной частью орогена глубины Z_b существенно меньше (38–42 км), что подтверждает нашу предыдущую среднюю оценку [Середкина и Филиппов, 2021] и комплексные геофизические модели из работы [Глазнев, 2003]. Близкими значениями глубины нижней границы литосферных магнитных источников характеризуются Карельский и Мурманский кратоны, а также Беломорская провинция Балтийского щита. Под Кольской провинцией значения Z_b несколько глубже – около 45 км. Следует отметить, что для Мурманского кратона, имеющего поперечный размер менее 200 км, полученные оценки искажены влиянием соседних структур – Кольской провинции и Баренцева моря. Под кратоном Норрботтен Z_b изменяется примерно от 42 до 51 км.

Полученное нами распределение глубины нижней границы магнитоактивного слоя литосферы (рис. 3) свидетельствует о существенном занижении глубин в моделях [Li et al., 2017; Lu et al., 2022]. При этом оно в общих чертах согласуется с глобальной моделью [Gard and Hasterok, 2021]. Отметим, что в обеих моделях максимум глубины Z_b (>50 км) наблюдается под западной частью Свеккофеннского орогена (Скандинавский полуостров). С одной стороны, выявленные несоответствия между распределениями глубины нижней границы могут быть следствием использования различных исходных данных. Так, в [Li et al., 2017] аномальное геомагнитное поле задавалось моделью EMAG2v2 [Maus et al., 2009], в [Gard and Hasterok, 2021] для этого брались сферические гармоники 16–100 степени модели LCS-1 [Olsen et al., 2017], а распределение [Lu et al., 2022] построено на основе компиляции данных геомагнитных съемок для Арктики из работы [Gaina et al., 2011]. С другой стороны, такие расхождения могут быть связаны с применением различных методов инверсии, а именно с использованием единого фиксированного значением фрактального параметра β , существенно зависящего от геологического строения исследуемой области [Bouligand et al., 2009], в моделях, учитывающих фрактальный характер распределения намагниченности в магнитоактивном слое [Li et al., 2017; Lu et al., 2022].

Глубокое положение глубины нижней границы литосферных магнитных источников под Балтийским щитом, полученное в данной работе подтверждается результатами независимых геофи-

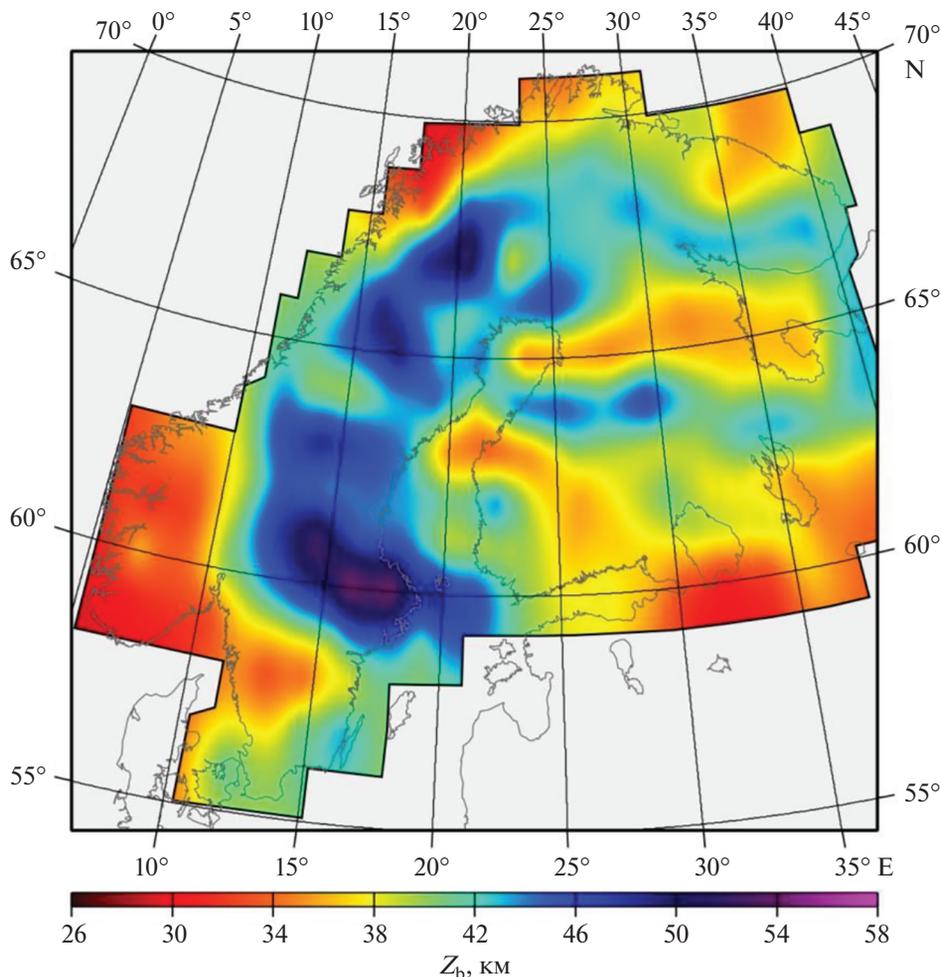


Рис. 3. Глубина залегания нижней границы литосферных магнитных источников (Z_b , км).

зических исследований. Согласно наиболее актуальной на текущий момент глобальной базе данных [Fuchs et al., 2021a, b] рассматриваемая территория характеризуется низкими поверхностными тепловыми потоками (рис. 4). Так, примерно в половине пунктов измерений значения потока не превышают 40 мВт/м^2 . Некоторое увеличение теплового потока наблюдается под восточной частью Свекофеннского орогена и на юго-востоке Скандинавского полуострова, что согласуется с менее глубоким залеганием под ними нижней границы литосферных магнитных источников (рис. 3). При этом пониженные значения потока под Карельским кратоном и юго-западной частью Скандинавского полуострова, напротив, противоречат полученному нами относительно неглубокому положению Z_b . С одной стороны, это может быть связано с качеством имеющихся оценок поверхностного теплового потока, погрешности которых во многих случаях неизвестны [Fuchs et al., 2021a]. При этом разброс значений потока в близких пунктах измерений

может достигать 60 мВт/м^2 (рис. 4). С другой стороны, выявленное несоответствие может быть связано с влиянием вечной мерзлоты на измеряемые значения потока, что ранее отмечалось нами для Сибирской платформы [Filippova et al., 2021].

Согласно глобальным температурным моделям, основанным на данных сейсмической томографии [Cammarrano and Guerri, 2017; Priestley et al., 2019] температура в верхней мантии под исследуемой территорией плавно уменьшается в восточном направлении. Однако результаты региональных томографических исследований [Lebedev et al., 2017], характеризующихся более высоким горизонтальным разрешением, свидетельствуют о более сложном распределении температуры под Балтийским щитом. Так, средние температуры в интервале глубин $80\text{--}150 \text{ км}$ составляют $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$ на юге Скандинавских каледонид и не превышают $900\text{--}1100^\circ\text{C}$ в их северной части. Это подтверждается результатами данной работы (рис. 3) и пониженными значениями мощности термической литосферы, нижняя граница кото-

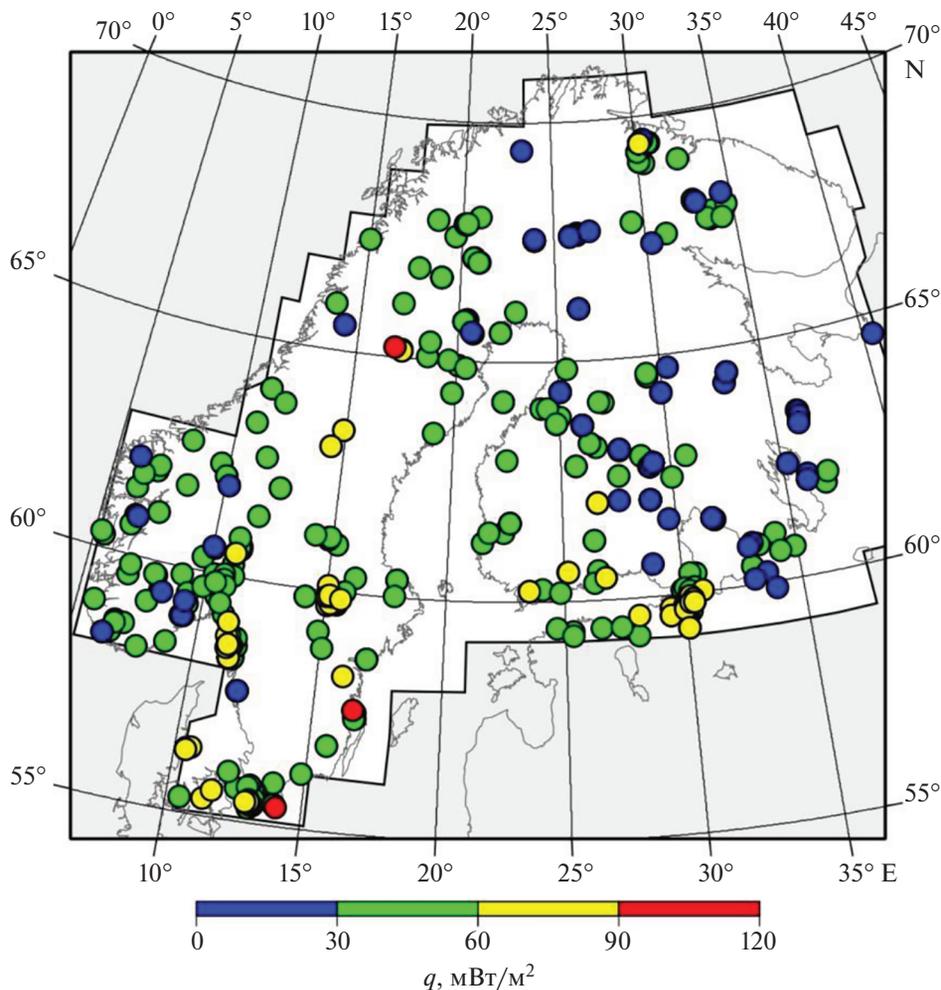


Рис. 4. Поверхностный тепловой поток (q , мВт/м²) по [Fuchs et al., 2021a].

рой примерно соответствует изотерме 1300°C (рис. 5) [Artemieva, 2019]. Температурные минимумы ($T = 700\text{--}800^\circ\text{C}$) наблюдаются на западе Свекофеннского орогена (Скандинавский полуостров) и кратоном Норботтен [Lebedev et al., 2017], что в целом согласуется с увеличением глубины нижней границы литосферных магнитных источников (рис. 3) и моделью [Artemieva, 2019]. Локальный максимум температуры ($T = 900\text{--}1100^\circ\text{C}$) на востоке Свекофеннского орогена также сопровождается уменьшением глубины Z_b (рис. 3) и некоторым повышением значений поверхностного теплового потока (рис. 4) [Fuchs et al., 2021a]. При этом оценки мощности термической литосферы для этой территории, достигающие 300 км (рис. 5) [Artemieva, 2019], выглядят несколько завышенными. Например, в модели [Priestley et al., 2019] они не превышают 200 км.

Для востока исследуемой территории – Кольского полуострова и примыкающих к нему частей Беломорской провинции Балтийского щита и

Карельского кратона – имеющиеся данные о распределении глубинных температур более противоречивы. В модели [Artemieva, 2019] здесь наблюдается существенное утонение термической литосферы (рис. 5). За исключением Кольского полуострова, для большей части которого глубина Z_b превышает 40 км (рис. 3), это подтверждается результатами проведенных нами расчетов. Однако по данным [Lebedev et al., 2017] вся эта территория характеризуется пониженными значениями средних температур в литосфере ($T = 600\text{--}800^\circ\text{C}$). При этом оценить относительную степень прогрева литосферы исходя из поверхностного теплового потока для обсуждаемого региона практически невозможно из-за малого количества наблюдений (рис. 4) [Fuchs et al., 2021a].

В настоящее время остается дискуссионным вопрос о том, обладает ли верхняя мантия магнитными свойствами или нет (для обзора см. работу [Ferré et al., 2014] и ссылки в ней). В результате анализа аномалий геомагнитного поля было

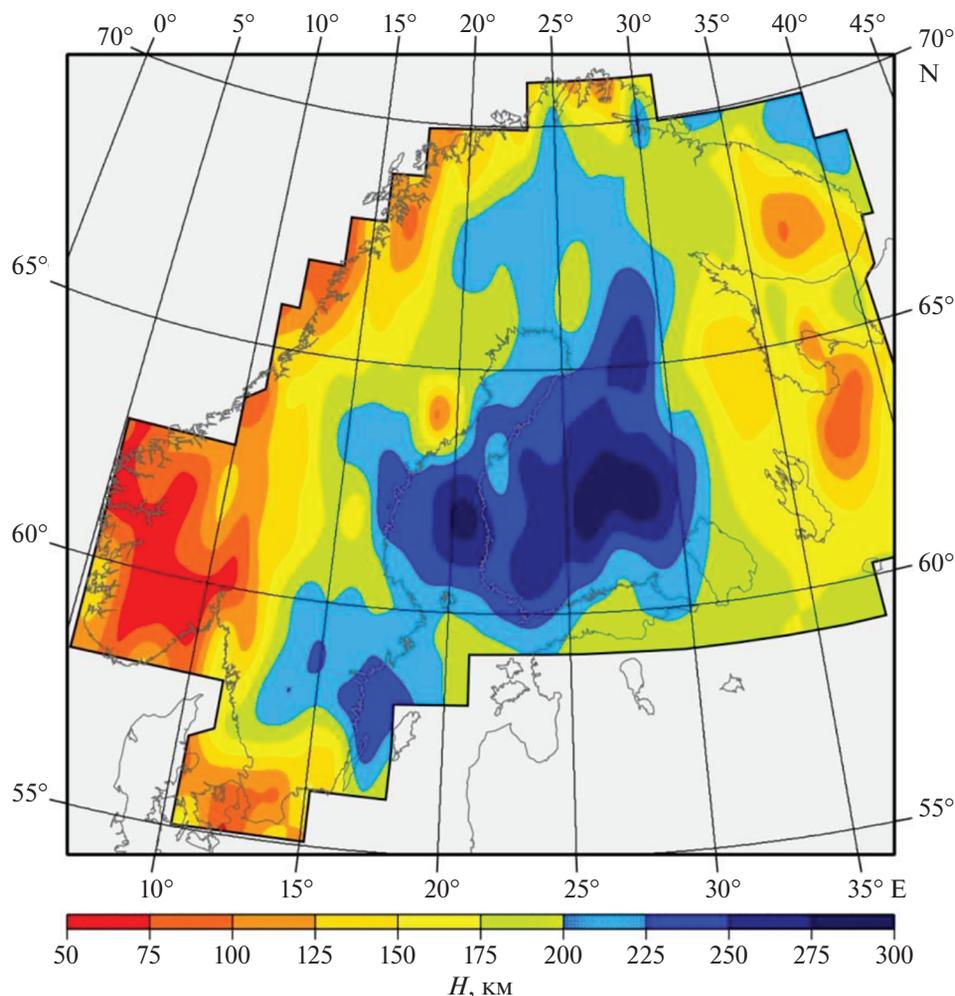


Рис. 5. Термическая мощность литосферы (H , км) по [Artemieva, 2019].

установлено, что в некоторых регионах Земли магнитоактивный слой литосферы полностью расположен в пределах земной коры [Bansal et al., 2013; Salem et al., 2014], в других — затрагивает верхнюю часть мантии [Andrés et al., 2018; Filippova et al., 2021; Kumar et al., 2021; Oliveira et al., 2021]. Рассмотрим вопрос о соотношении между глубинами Мохо и нижней границы литосферных магнитных источников для рассматриваемой территории. Для такого сопоставления использовались две различные модели земной коры: CRUST 1.0 [Laske et al., 2013] и EUNaseis [Artemieva and Thybo, 2013]. В качестве надежно выделенных областей, где верхняя мантия обладает магнитными свойствами, принимались только те области, для которых Z_b расположена ниже Мохо более чем на 3 км для обеих рассматриваемых моделей коры.

В результате было установлено, что для большей части Балтийского щита магнитоактивный слой литосферы расположен в пределах земной коры, за исключением двух областей под Свек-

фенским орогеном (61° N, 14° E и 66° N, 16° E) и восточной части Кольского полуострова (67° N, 38° E) (рис. 6). Кроме того верхняя мантия, вероятно, обладает магнитными свойствами за пределами щита, в районе 56° N, 12° E, находящемся на северной окраине Центрально-Европейской пространственно-временной магнитной аномалии с источником в верхней мантии, обсуждаемой в работе [Пашкевич и др., 2020]. На то, что в пределах этих областей, литосферные магнитные источники могут быть расположены в верхней мантии, также указывает глобальная модель [Gard and Hasterok, 2021], построенная методом эквивалентных источников магнитных диполей. Все выявленные области характеризуются положительными значениями аномалий геомагнитного поля на спутниковых высотах, в то время как регионы, где граница Мохо лежит ниже Z_b , — отрицательными (рис. 7). Интересно, что в обзоре [Ferré et al., 2014] была высказана гипотеза, что в регионах, в которых наблюдаются положитель-

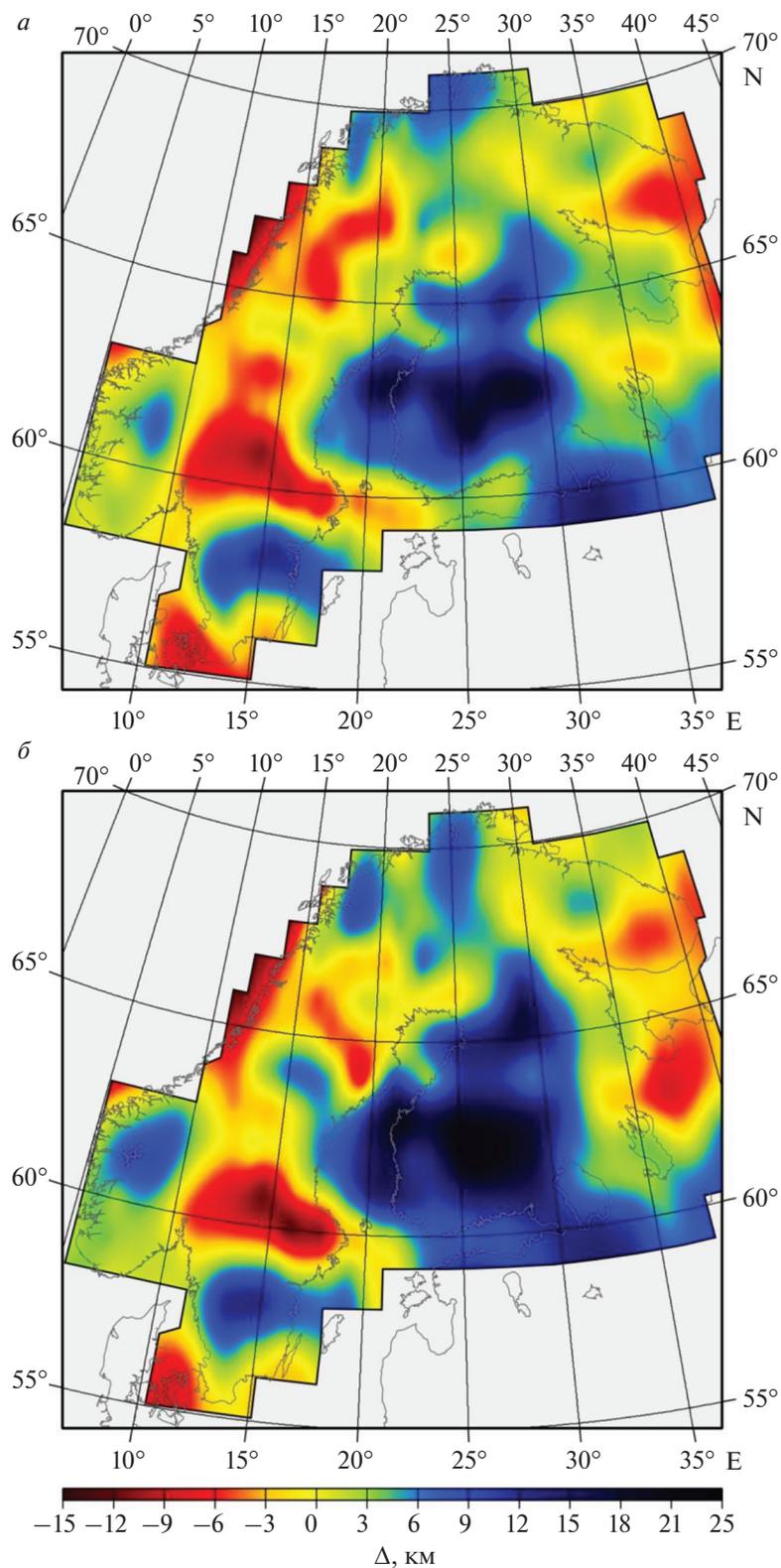


Рис. 6. Разница между глубинами Мохо и нижней границы литосферных магнитных источников (Δ , км) для моделей CRUST 1.0 [Laske et al., 2013] (а) и EUNaseis [Artemieva and Thybo, 2013] (б).

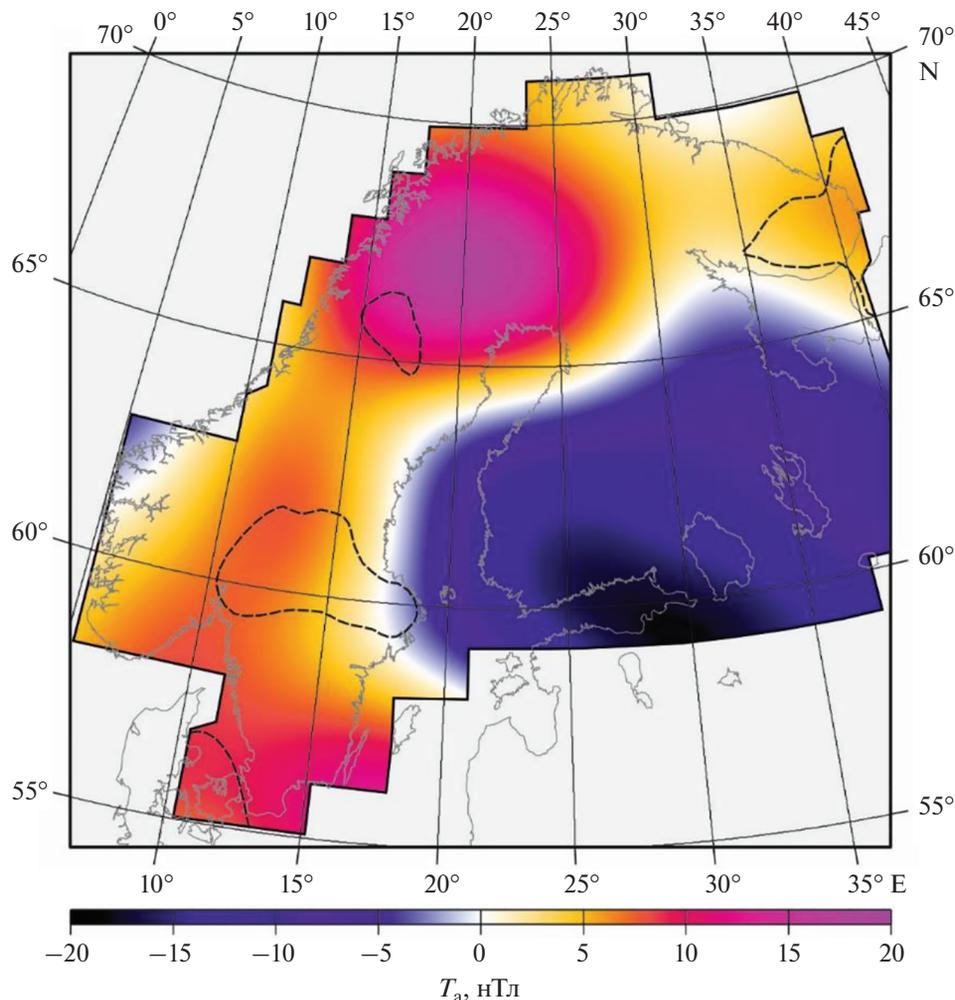


Рис. 7. Аномальное геомагнитное поле на высоте 350 км согласно глобальной модели MF6 [Maus et al., 2008]. T_a (нТл) – модуль полного вектора аномального геомагнитного поля. Пунктиром показаны границы областей, в пределах которых по полученным нами данным глубина нижней границы литосферных магнитных источников лежит ниже (>3 км) границы Мохо, заданной моделями CRUST 1.0 [Laske et al., 2013] и EUNASEIS [Artemieva and Thybo, 2013].

ные длинноволновые аномалии геомагнитного поля на спутниковых высотах, верхняя мантия, наиболее вероятно, является намагниченной. Сравнивая аномальное геомагнитное поле на высоте 350 км, заданное моделью MF6 [Maus et al., 2008] (рис. 7), с полученным соотношением между глубинами Мохо и Z_b (рис. 6), можно увидеть, что наши результаты свидетельствуют в пользу гипотезы [Ferré et al., 2014]: все выявленные в данной работе регионы, в которых Z_b лежит ниже границы Мохо, приурочены к областям с положительными значениями аномалий геомагнитного поля на спутниковых высотах. Отметим также, что они указывают на возможное различие западной и восточной частей Кольского полуострова не только в строении коры и величине радиальной анизотропии в верхней мантии, как это было отмечено ранее в работах [Адушкин и др.,

2021; Филиппова и Соловей, 2022], но и в магнитных свойствах слоя верхней мантии, расположенного непосредственно под корой.

4. ВЫВОДЫ

В данной работе для Балтийского щита и прилегающих к нему территорий Русской плиты и Скандинавских каледонид выполнен спектральный анализ аномального геомагнитного поля, заданного глобальной моделью EMAG2v3. Оценки глубин центра масс, верхней и нижней границ литосферных магнитных источников проводились с помощью метода центроида, в котором принимается, что намагниченность в бесконечном в горизонтальных направлениях слое является случайной функцией горизонтальных координат и не зависит от глубины. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Минимальные значения глубины нижней границы магнитоактивного слоя литосферы (30–35 км) наблюдаются под обрамлением Балтийского щита – Русской плитой, северной и южной частями Скандинавских каледонид, а максимальные (>45 км) – под Скандинавским полуостровом – на западе Свекофеннского орогена и кратоном Норрботтен. Остальная территория Балтийского щита характеризуется промежуточными значениями глубины нижней границы (38–45 км).

2. Сопоставление полученных нами оценок глубины нижней границы литосферных магнитных источников с моделями распределения глубины Мохо под исследуемой территорией (CRUST 1.0 и EUNASEIS) показывает, что для большей части Балтийского щита магнитоактивный слой литосферы расположен в пределах земной коры, за исключением двух областей под Свекофенским орогеном и восточной частью Кольского полуострова, где верхняя мантия обладает магнитными свойствами. Эти области характеризуются положительными значениями аномалий геомагнитного поля на высоте 350 км, в то время как регионы, где граница Мохо лежит ниже Z_b , – отрицательными, что свидетельствует в пользу гипотезы из работы [Fergé et al., 2014] о том, что верхняя мантия обладает магнитными свойствами в регионах, где наблюдаются положительные длинноволновые аномалии геомагнитного поля на спутниковых высотах.

3. Показано, что западная и восточная части Кольского полуострова могут различаться не только по скоростному строению коры и верхней мантии, что было установлено ранее различными сейсмологическими методами, но и по магнитным свойствам слоя верхней мантии, расположенного непосредственно под корой.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование глубин залегания литосферных магнитных источников под Кольским полуостровом выполнено за счет гранта Российского научного фонда, грант № 21-17-00161, под остальной территорией Балтийского щита – по государственному заданию ИЗМИРАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Полученное распределение глубины нижней границы литосферных магнитных источников доступно по запросу aleirk@mail.ru.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Гоев А.Г., Санина И.А., Федоров А.В. Особенности глубинного скоростного строения центральной части Кольского полуострова методом функций приемника // Докл. РАН. Науки о Земле. Т. 501. № 2. С. 180–183. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S268673972112001X>
- Булина Л.В. Характерные черты распределения нижних кромок для территории СССР / Магнитные аномалии земных глубин. Ред. С.И. Субботин. Киев: Наукова думка, С. 137–151. 1976.
- Глазнев Н.В. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. КазМ: Апатиты, 244 с. 2003.
- Гоев А.Г., Санина И.А., Орешин С.И., Резниченко Р.А., Тарасов С.А., Федоров А.В. Скоростное строение литосферы Хибинского и Ловозерского массивов (северо-восточная часть Балтийского щита) методом функции приемника // Физика Земли. № 5. С. 30–40. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0002333721050069>
- Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев В.Н., Козлова Н.Е., Иванов А.А., Кудряшов Н.М., Мартынов Е.В., Тюрменов В.А., Матюшкин А.В., Осипенко Л.Г. Геология архея Балтийского щита. СПб. Наука, 345 с. 2006.
- Крутиховская З.А., Негруца В.З., Елисеева С.В. Историко-геологические предпосылки возникновения региональных магнитных аномалий восточной части Балтийского щита // Геофизический журнал. Т. 8. № 5. С. 67–78. 1986.
- Минц М.В. Мезозопротерозойский Гренвилл-Свеконорвежский внутриконтинентальный ороген: история, тектоника, геодинамика // Геодинамика и тектонофизика. Т. 8. № 3. С. 619–642. 2017.
<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0309>
- 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. Т. 11. № 3. С. 375–385. 2021.
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-375-385>
- Пашкевич И.К., Марковский В.С., Орлюк М.И., Елисеева С.В., Мозговой А.П., Таращан С.А. Магнитная модель литосферы Европы / Ред. Г.И. Каратаев. Киев: Наукова думка, 166 с. 1990.
- Пашкевич И.К., Савченко А.С., Старостенко В.И., Шаров Н.В. Трехмерная геофизическая модель земной коры центральной части Карельского кратона // Доклады Академии Наук. Геофизика. Т. 463. № 4. С. 1–5. 2015.
<https://doi.org/10.7868/S086956521522020X>
- Пашкевич И.К., Орлюк М.И., Марченко А.В., Романец А.А., Цветкова А.А., Бугаенко И.В. О возможной мантийной природе длинноволновой Центрально-Европейской магнитной аномалии // Геофизический журнал. Т. 42. № 6. С. 100–130. 2020.
<https://doi.org/10.028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222288>
- Середкина А.И., Филиппов С.В. Глубины залегания магнитных источников в Арктике и их связь с параметрами литосферы // Геология и геофизика. Т. 62. № 7. С. 902–916. 2021.
<https://doi.org/10.15372/GiG2020162>
- Слабунов А.И., Балаганский В.В., Щипанский А.А. Мезозархей-палеопротерозойская эволюция земной коры

- Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика. Т. 62. № 5. С. 650–677. 2021.
<https://doi.org/10.15372/GiG2021116>
- Федорова Н.В. Источники спутниковых магнитных аномалий над Северной Евразией // Физика Земли. № 8. С. 13–19. 1997.
- Филиппова А.И., Соловей О.А. Поверхностно-волновая томография Кольского полуострова и сопредельных территорий по данным групповых скоростей волн Рэлея и Лява // Доклады РАН. Науки о Земле. Т. 504. № 2. С. 61–66. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S2686739722060068>
- Филиппова А.И., Филиппов С.В. Глубины залегания литосферных магнитных источников и тепловой режим литосферы под Восточно-Сибирским морем // Физика Земли. № 4. С. 71–84. 2022а.
<https://doi.org/10.31857/S0002333722040032>
- Филиппова А.И., Филиппов С.В. Глубины залегания литосферных магнитных источников вдоль профиля “Ковдор – ГСЗ-76” (Балтийский щит–Баренцево море) // Геомagnetизм и Аэрономия. Т. 62. № 6. С. 781–792. 2022б.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022060049>
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Мир, 604 с. 2001.
- Шаров Н.В., Адушкин В.В., Андриященко Ю.Н., Ассиновская Б.А., Бекетова Е.Б., Берзин Р.Г., Вагин С.А., Варданыц И.Л., Виноградов О.В., Жданова Л.А. и др. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Ред. Н.В. Шаров. КарНЦ РАН: Петрозаводск, 353 с. 2004.
- Шаров Н.В., Бакунович Л.И., Белашев Б.З., Журавлев В.А., Нилов М.Ю. Геолого-геофизические модели земной коры Беломорья // Геодинамика и тектонофизика. Т. 11. № 3. С. 566–582. 2020.
<https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0491>
- Шаров Н.В., Лебедев А.А. Неоднородное строение литосферы Фенноскандинавского щита по сейсмическим данным // Геодинамика и тектонофизика. Т. 13. № 1. 0569. 2022.
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0569>
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Ленинградский университет, 592 с. 1978.
- Andrés J., Marzán I., Ayarza P., Martí D., Palomeras I., Torné M., Campbell S., Carbonell R. Curie point depth of the Iberian Peninsula and surrounding margins. A thermal and tectonic perspective of its evolution // J. Geophys. Res. Solid Earth. V. 123. P. 2049–2068. 2018.
<https://doi.org/10.1002/2017JB014994>
- Artemieva I.M. Lithosphere structure in Europe from thermal isostasy // Earth-Sci. Rev. V. 188. P. 454–468. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.11.004>
- Artemieva I.M., Thybo H. EUNaseis: a seismic model for Moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the North Atlantic region // Tectonophysics. V. 609. P. 97–153. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.004>
- Bansal A.R., Anand S.P., Rajaram M., Rao V.K., Dimri V.P. Depth to the bottom of magnetic sources (DBMS) from aeromagnetic data of Central India using modified centroid method for fractal distribution of sources // Tectonophysics. V. 603. P. 155–161. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.024>
- Bouligand C., Glen J.M.G., Blakely J. Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization // J. Geophys. Res. V. 114. B11104. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2009JB006494>
- Cammarano F., Guerri M. Global thermal models of the lithosphere // Geophys. J. Int. V. 210. P. 56–72. 2017.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggx144>
- Ferré, E.C., Friedman S.A., Martín-Hernández F., Feinberg J.M., Till J.L., Ionov D.A., Conder J.A. Eight good reasons why the uppermost mantle could be magnetic // Tectonophysics. V. 624–625. P. 3–14. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.01.004>
- Filippova A.I., Golubev V.A., Filippov S.V. Curie point depth and thermal state of the lithosphere beneath the northeastern flank of the Baikal rift zone and adjacent areas // Surv. Geophys. V. 42. № 5. P. 1143–1170. 2021.
<https://doi.org/10.1007/s10712-021-09651-7>
- Fuchs S., Norden B., Artemieva I. et al. The Global Heat Flow Data-base: Release 2021. GFZ Data Services. 2021a.
<https://doi.org/10.5880/figeo.2021.014>
- Fuchs S., Beardsmore G., Chiozzi P. et al. A new database structure for the IHFC Global Heat Flow Database // International J. Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. V. 4. № 1. P. 1–14. 2021b.
<https://doi.org/10.31214/ijthfa.v4i1.62>
- Gaina C., Werner S.C., Saltus R. et al. Circum-Arctic mapping project: new magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic // Geol. Soc. Lond. Mem. V. 35. P. 39–48. 2011.
<https://doi.org/10.1144/M35.3>
- Gard M., Hasterok D. A global Curie depth model utilizing the equivalent source magnetic dipole method // Phys. Earth Planet. Inter. V. 313. 106672. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2021.106672>
- Gramberg I.S., Verba V.V., Verba M.L., Kos’ko M.K. Sedimentary cover thickness map – sedimentary basins in the Arctic // Polarforschung. V. 69. P. 243–249. 1999.
- Hussein M., Mickus K., Serpa L.F. Curie point depth estimates from aeromagnetic data from Death Valley and surrounding regions, California // Pure Appl. Geophys. V. 170. P. 617–632. 2013.
<https://doi.org/10.1007/s00024-012-0557-6>
- Kumar R., Bansal A.R., Betts P.G., Ravat D. Re-assessment of the depth to the base of magnetic sources (DBMS) in Australia from aeromagnetic data using the defractal method // Geophys. J. Int. V. 225. № 1. P. 530–547. 2021.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaa601>
- Langel R.A., Hinze W.J. The magnetic field of the Earth’s lithosphere. Cambridge University, Cambridge, UK. 450 p. 1998.
- Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M. Update on CRUST1.0 – A 1-degree global model of Earth’s crust / Abstracts European Geoscience Union General Assembly. Vienna, Austria, 7–12 April, 2013. № EGU2013-2658. 2013.
- Lebedev S., Schaeffer A.J., Fullea J., Pease V. Seismic tomography of the Arctic region: inferences for the thermal structure and evolution of the lithosphere / Circum-Arctic lithosphere evolution / Geological Society, London, UK,

- Special Publications. V. 460. P. 419–440. 2017.
<https://doi.org/10.1144/SP460.10>
- *Levshin A.L., Schweitzer J., Weidle C., Shapiro N.M., Ritzwoller, M.H.* Surface wave tomography of the Barents Sea and surrounding regions // *Geophys. J. Int.* V. 170. P. 441–459. 2007.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03285.x>
- *Li C.-F., Lu Y., Wang J.* A global reference model of Curie-point depths based on EMAG2 // *Sci. Rep.* V. 7. 45129. 2017.
<https://doi.org/10.1038/srep45129>
- *Lu Y., Li C.-F., Wang J., Wan X.* Arctic geothermal structures inferred from Curie-point depths and their geodynamic implications // *Tectonophysics*. V. 822. 229158. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229158>
- *Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al.* EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements // *Geochem. Geophys. Geosyst.* V. 10. Q08005. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- *Maus S., Yin F., Lühr H., Manoj C., Rother M., Rauberg J., Michaelis I., Stolle C., Müller R.D.* Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements // *Geochem. Geophys. Geosyst.* V. 9. № 7. Q07021. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2008GC001949>
- *Meyer B., Chulliat A., Saltus R.* Derivation and error analysis of the earth magnetic anomaly grid at 2 arc min resolution version 3 (EMAG2v3) // *Geochem. Geophys. Geosyst.* V. 18. P. 4522–4537. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017GC007280>
- *Núñez Demarco P., Prezzi C., Sánchez Bettucci L.* Review of Curie point depth determination through different spectral methods applied to magnetic data // *Geophys. J. Int.* V. 224. № 1. P. 17–39. 2021.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaa361>
- *Okubo Y., Graf R.J., Hansen R.O., Ogawa K., Tsu H.* Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding areas, Japan // *Geophysics*. V. 50. P. 481–494. 1985.
- *Okubo Y., Matsunaga T.* Curie point depth in northeast Japan and its correlation with regional thermal structure and seismicity // *J. Geophys. Res.* V. 99. № B11. P. 22363–22371. 1994.
- *Oliveira J.T.C., Barbosa J.A., de Castro D.L., de Barros Correia P., Magalhães J.R.C., Filho O.J.C., Buarque B.V.* Precambrian tectonic inheritance control of the NE Brazilian continental margin revealed by Curie point depth estimation // *Annals. Geophys.* V. 64. № 2. GT213. 2021.
<https://doi.org/10.4401/ag-8424>
- *Olsen N., Ravat D., Finlay C.C., Kother L.K.* LCS-1: a high-resolution global model of the lithospheric magnetic field derived from CHAMP and Swarm satellite observations // *Geophys. J. Int.* V. 211. P. 1461–1477. 2017.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggx381>
- *Pedersen H.A., Debayle E., Maupin V. et al.* Strong lateral variations of lithospheric mantle beneath cratons – example from the Baltic Shield // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 383. P. 164–172. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.09.024>
- *Pirttijärvi M.* 2D Fourier domain operations, FOURPOT program. 2015. <https://wiki.oulu.fi/x/0oU7AQ/>
- *Priestley K., McKenzie D., Ho T.* A lithosphere-asthenosphere boundary – a global model derived from multimode surface-wave tomography and petrology / *Lithospheric Discontinuities* (eds. H. Yuan and B. Romanowicz) / AGU, Geophysical Monograph Series. Chapter 6. P. 111–123. 2019.
<https://doi.org/10.1002/9781119249740.ch6>
- *Ravat D., Pignatelli A., Nicolosi I., Chiappini M.* A study of spectral methods of estimating the depth to the bottom of magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data // *Geophys. J. Int.* V. 169. P. 421–434. 2007.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03305.x>
- *Salazar J.M., Vargas C.A., Leon H.* Curie point depth in the SW Caribbean using the radially averaged spectra of magnetic anomalies // *Tectonophysics*. V. 694. P. 400–413. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.023>
- *Salem A., Green C., Ravat D., Singh K.H., East P., Fairhead J.D., Morgen S., Biegert E.* Depth to Curie temperature across the central Red Sea from magnetic data using the defractal method // *Tectonophysics*. V. 624–625. P. 75–86. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.04.027>
- *Seredkina A.* S-wave velocity structure of the upper mantle beneath the Arctic region from Rayleigh wave dispersion data // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 290. P. 76–86. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.03.007>
- *Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O.* Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // *Tectonophysics*. V. 306. P. 461–470. 1999.
- *Wen L., Kang G., Bai C., Gao G.* Studies on the relationships of the Curie surface with heat flow and crustal structures in Yunnan Province, China, and its adjacent areas // *Earth Planets Space*. V. 71. 85. 2019.
<https://doi.org/10.1186/s40623-019-1063-1>