

УДК 550.38

ГЛУБИНА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛИТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ИСТОЧНИКОВ СЕВЕРО-ВОСТОКА ЕВРАЗИИ: ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЛИТОСФЕРЫ И СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

© 2024 г. А. И. Филиппова¹, *, С. В. Филиппов¹, **

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

*e-mail: aleirk@mail.ru

**e-mail: sfilip@izmiran.ru

Поступила в редакцию 14.08.2023 г.

После доработки 30.08.2023 г.

Принята к публикации 28.09.2023 г.

Для северо-востока Евразии (60—70° N, 90—180° E) получены оценки глубины нижней границы магнитоактивного слоя литосферы с помощью метода центроида, в основе которого лежит двумерный спектральный анализ аномального геомагнитного поля. Аномальное геомагнитное поле исследуемой территории задавалось с помощью глобальной модели EMAG2v3. Полученные оценки показали, что максимальных значений (более 50 км) глубина нижней границы литосферных магнитных источников достигает практически повсеместно под Сибирской платформой к северу от 65° N, а минимальных (<30 км) — под Корякско-Камчатским складчатым поясом и Охотско-Чукотским вулканогенным поясом. Под Верхояно-Колымским складчатым поясом прослеживается чередование максимумов (до 44 км) и минимумов (до 30 км) глубины. Исходя из предположения, что основным магнитным минералом в континентальной литосфере является магнетит, такое распределение глубины нижней границы свидетельствует об увеличении степени прогрева литосферы в восточном направлении — от Сибирской платформы к Корякско-Камчатскому складчатому поясу. Последнее подтверждается независимыми геофизическими данными. Сопоставление полученных в работе результатов с распределением эпицентров региональных землетрясений ($M \geq 4.0$, 1962—2020 гг.) показывает, что очаги большинства сильных землетрясений инструментального периода регистрации ($M \geq 6.0$) приурочены к зонам, в которых происходит резкое изменение глубины нижней границы литосферных магнитных источников.

Ключевые слова: аномальное геомагнитное поле, метод центроида, тепловой режим литосферы, сейсмичность, северо-восток Евразии.

DOI: 10.31857/S0016794024010155, EDN: GPARJI

1. ВВЕДЕНИЕ

Северо-восточная часть Евразийского материка (60—70° N, 90—180° E) сложена различными тектоническими структурами (рис. 1). Ее центральную часть занимает мезозойский Верхояно-Колымский складчатый пояс, граничащий на западе по Предверхоянскому краевому прогибу с докембрийской Сибирской платформой, а на востоке отделенный от кайнозойских сооружений Корякско-Камчатского складчатого пояса Охотско-Чукотским вулканогенным поясом [Зоненшайн и др., 1990а, б; Имаева и др., 2017]. Кроме того, в пределах исследуемого реги-

она проходят границы литосферных плит: Евразийской, Северо-Американской и Охотоморской [Bird, 2003].

Большая часть имеющейся на текущий момент времени информации о литосферных температурах на северо-востоке Евразии основывается на результатах поверхностно-волновой томографии [Cammarano and Guerri, 2017; Lebedev et al., 2017; Priestley et al., 2019], которые характеризуются горизонтальным разрешением в несколько сотен километров. При этом количество измерений поверхностного теплового потока, представляющего собой основные исходные

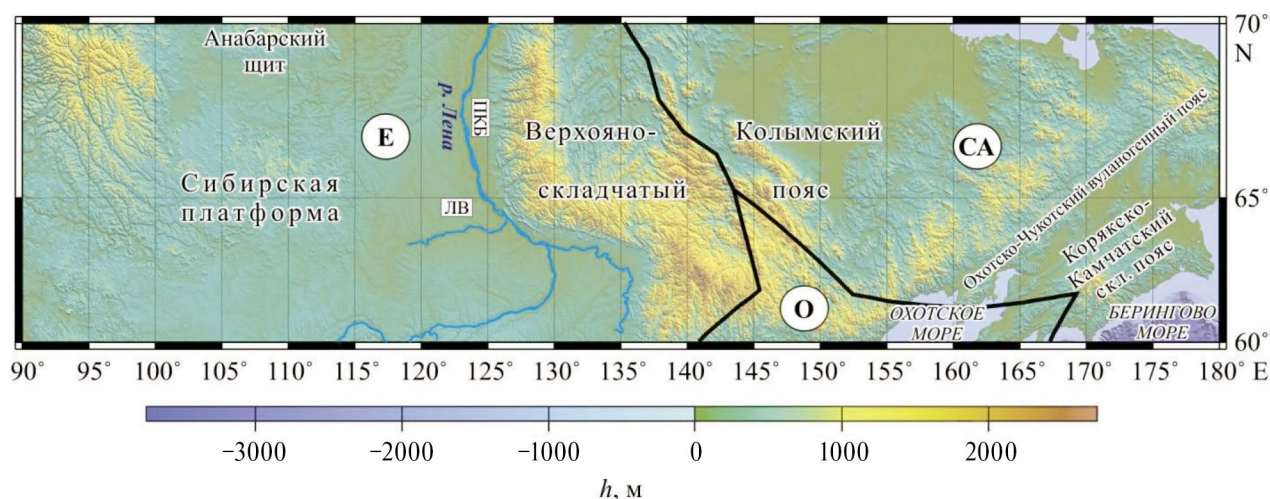


Рис. 1. Область исследования. Границы литосферных плит (черные кривые) приведены согласно [Bird, 2003]. Литосферные плиты (буквы в кружках): Е — Евразийская, О — Охотоморская, СА — Северо-Американская. Топография и батиметрия (h — высота над уровнем моря) показаны в соответствии с глобальной моделью ЕТОРО 2022 [NOAA..., 2022], ЛВ — Линденская впадина, ПКБ — Предверхоянский краевой прогиб.

данные для температурной модели TC1 [Artemieva, 2006], для рассматриваемой территории невелико, а распределение пунктов измерений весьма неравномерно (см. далее раздел 4.1) [Fuchs et al., 2021a, b]. Таким образом, для исследуемого региона большой интерес представляют независимые косвенные оценки глубинных температур. В частности, для этих целей широко используются подходы, основанные на анализе геомагнитных данных [Carillo-de la Cruz et al., 2021; Correa et al., 2022; Oliveira et al., 2021; Prasad et al., 2022; Sobh et al., 2021; и др.]. Причем накопленный к настоящему моменту объем разновысотных магнитных съемок, включая спутниковые наблюдения, позволяет проводить исследования даже в труднодоступных приполярных районах Земли [Середкина и Филиппов, 2021; Филиппова и Филиппов, 2022, 2023а, б; Gaudreau et al., 2019; Lu et al., 2022; Maule et al., 2005].

Полученные в последнее десятилетие распределения глубины нижней границы магнитоактивного слоя литосферы существенно противоречат друг другу, особенно для Сибирской платформы. Так, в глобальной модели [Gard and Hasterok, 2021] под ней наблюдается наиболее глубокое положение нижней границы — 35–55 км, причем больше распространено более глубокое залегание (более 45 км). В то же время в другой глобальной модели [Li et al., 2017] и распределении из работы [Lu et al., 2022], построенном для территории Арктики к северу от 65° N, эта глуби-

на под платформой не превышает 10–25 км. Разнятся оценки глубин и для складчатых поясов на востоке области исследования. Для Верхояно-Колымского складчатого пояса они составляют от 10–40 км согласно [Li et al., 2017; Lu et al., 2022] до 30–40 км [Gard and Hasterok, 2021]. Интересно, что в модели [Li et al., 2017] Корякско-Камчатский складчатый пояс характеризуется такими же глубинами, что и Верхояно-Колымский, в то время как у [Gard and Hasterok, 2021] под ним значения глубины составляют 20–25 км, т.е. прослеживается уменьшение глубины в восточном направлении.

В связи с невысоким горизонтальным разрешением температурных моделей литосферы и противоречивостью оценок глубины нижней границы магнитоактивного слоя литосферы в данной работе была поставлена задача — получить распределение глубины залегания нижней границы литосферных магнитных источников северо-востока Евразии (см. рис. 1), характеризующееся более высоким горизонтальным разрешением, чем имеющиеся модели. Для этого были использованы наиболее актуальная на текущий момент глобальная модель аномального геомагнитного поля EMAG2v3 [Meyer et al., 2017] и метод центроида [Tanaka et al., 1999]. Полученное нами распределение глубины сравнивалось с независимой геофизической информацией, и с его помощью была оценена степень прогрева литосферы. Выявленные вариации глубины

нижней границы литосферных магнитных источников также были сопоставлены с распределением эпицентров региональных землетрясений, зарегистрированных в инструментальный период наблюдений.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Оценки глубин залегания магнитоактивного слоя литосферы на северо-востоке Евразии были выполнены по данным глобальной модели аномального магнитного поля Земли EMAG2v3 [Meyer et al., 2017] (рис. 2а). В данной модели аномальное геомагнитное поле приведено к высоте 4 км над уровнем моря и имеет горизонтальное разрешение 2 угловые минуты.

Модель включает данные морских, аэромагнитных, наземных и спутниковых геомагнитных съемок. При этом использование спутниковых данных обеспечивает более надежное выделение нижней границы магнитных источников, что было экспериментально показано в [Wen et al., 2019]. Согласно используемой модели в пределах рассматриваемой территории отсутствуют области, не обеспеченные данными (рис. 2а).

Расчеты глубин залегания литосферных магнитных источников осуществлялись с помощью метода центра [Okubo et al., 1985; Tanaka et al., 1999], согласно которому принимается, что намагниченность в бесконечном в горизонталь-

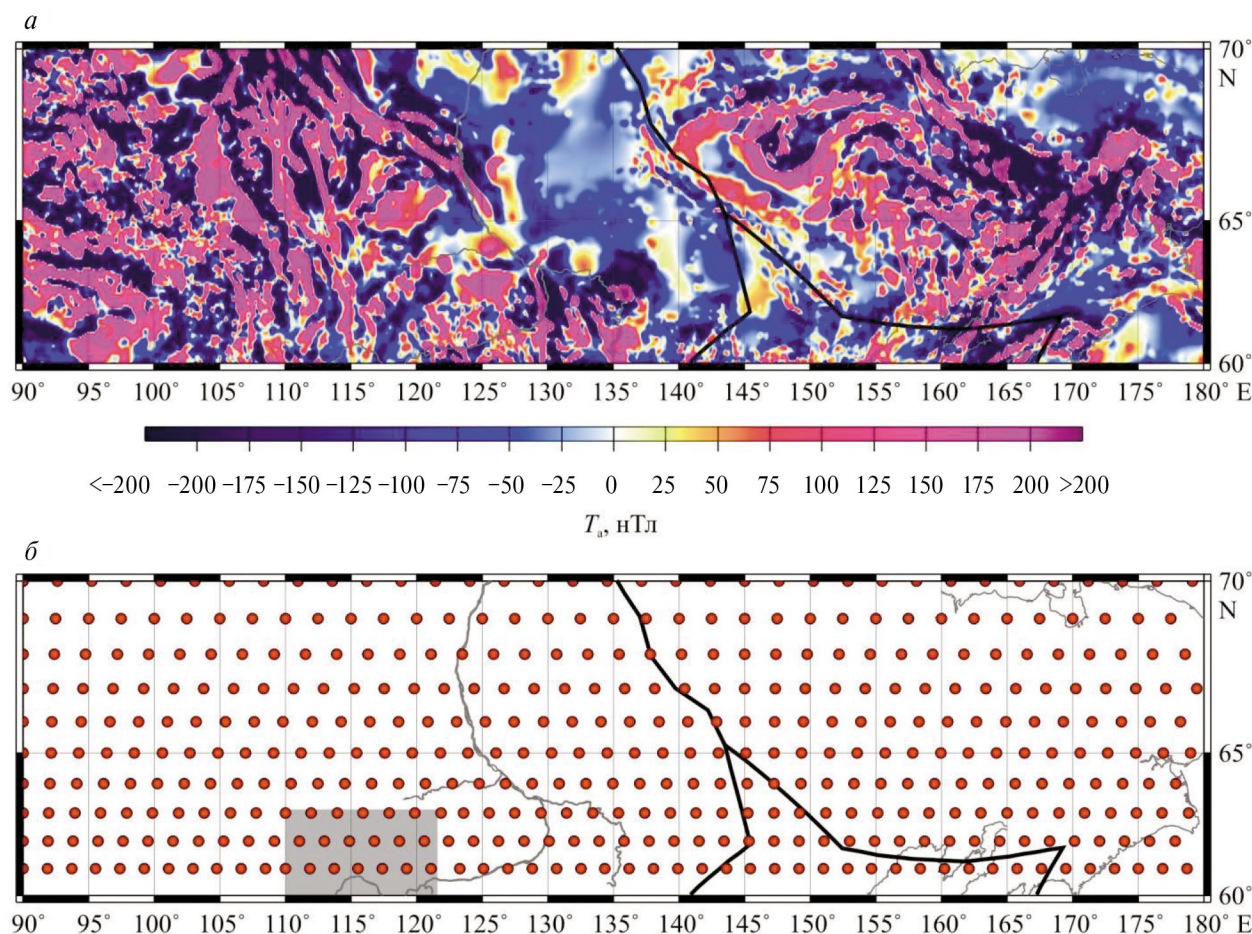


Рис. 2. Модуль полного вектора аномального геомагнитного поля (T_a , нТл) на высоте 4 км над уровнем моря согласно модели EMAG2v3 [Meyer et al., 2017] (а) и центральные точки блоков 200×200 км, в пределах которых выполнялись расчеты глубин залегания литосферных магнитных источников (б). Серым прямоугольником на рис. (б) выделена область, рассмотренная нами ранее в работе [Filipova et al., 2021]. Границы литосферных плит (черные кривые) приведены согласно [Bird, 2003].

ных направлениях слое является случайной функцией горизонтальных координат и не зависит от глубины. Процесс вычислений включал следующие этапы.

1. Выбор данных модели EMAG2v3 в квадратных блоках с размерами $200 \cdot 200$ км. Перекрывание между соседними блоками по широте составляло 1° , по долготе — 100 км. Всего, таким образом, было выделено 412 блоков, перекрывающих северо-восток Евразии, центральные точки которых показаны на рис. 2б. Для 19 блоков, расположенных на Сибирской платформе ($60\text{--}63^\circ \text{ N}$, $110\text{--}122^\circ \text{ E}$) и обозначенных серым прямоугольником на рис. 2б, для дальнейшего анализа были использованы результаты, полученные нами ранее для северо-восточного фланга Байкальского рифта и сопредельных территорий [Filipova et al., 2021].

2. Спектральный анализ аномалий геомагнитного поля в каждом из выделенных блоков. Вычисления азимутально-усредненных Фурье-спектров мощности аномалий геомагнитного поля выполнялись с помощью программы Fourpot 1.3b [Pirttijärvi, 2015]. Чтобы избежать потери информации о глубинах залегания магнитоактивного слоя, процедуры предварительной фильтрации данных и их приведения к полюсу не проводились в соответствии с рекомендациями из работы [Núñez Demarco et al., 2021].

3. Определение искомым глубин — центра масс (Z_0), верхней (Z_t) и нижней границ (Z_b) литосферных магнитных источников — согласно методу центроида [Tanaka et al., 1999]:

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

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

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

где $\Phi_{\Delta T}$ — азимутально-усредненный Фурье-спектр мощности аномалий геомагнитного поля; k_x и k_y — проекции волнового числа по осям x и y в горизонтальной плоскости; $|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ — модуль волнового числа; A, B — const.

Глубины центра масс вычислялись по соотношению (1) в интервале волновых чисел от максимума спектра, т.е. примерно от 0 до 0.05 рад/км; для вычислений глубин верхней границы (соотношение (2) использовался интервал волновых

чисел примерно от 0.25 до 0.5 рад/км [Núñez Demarco et al., 2021]. Для большей части рассматриваемой территории глубина центра масс определялась во всем указанном диапазоне волновых чисел, и лишь в некоторых блоках, расположенных на Сибирской платформе, для которых в результате были получены максимальные мощности магнитоактивного слоя литосферы, линейность наклона спектра соблюдалась в более узком диапазоне волновых чисел — примерно до 0.04 рад/км.

4. Оценки погрешности определения глубин (ε) в соответствии с соотношением из работ [Okubo and Matsunaga, 1994; Salazar et al., 2017]:

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

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.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных расчетов глубин верхней и нижней границ литосферных магнитных источников представлены на рис. 3а и 4. Распределение глубины центра масс, значения которой в пределах рассматриваемой территории лежат в диапазоне 13—28 км, отдельно не приводится, так как оно схоже с распределением глубины Z_b , что является прямым следствием соотношения (3) и того факта, что $Z_t \ll Z_0$. Ранее это было продемонстрировано нами на примере Восточно-Сибирского моря [Филиппова и Филиппов, 2022]. Погрешности искомым параметров, оцененные по соотношению (4), распределены случайным образом и составили 0.1—3.5, 0.1—4.1 и 0.4—6.2 км для Z_t , Z_0 и Z_b соответственно. Их средние значения равны 0.6; 1.9 и 3.3 км. Следует отметить, что полученные значения погрешностей не учитывают ошибок исходных данных. При этом добавление случайного шума с амплитудой ± 167 нТл, соответствующего ошибкам модели EMAG2v3 для рассматриваемой территории [Meyer et al., 2017], практически не сказывается на значениях глубин центра масс и нижней границы магнитных источников, но может существенно (до 1—2 км) исказить значения глубины верхней границы [Середкина и Филиппов, 2021].

Для большей части северо-востока Евразии глубина Z_t не превышает 2 км, полный диапазон изменения Z_t составляет 0.1—5.5 км (рис. 3а).

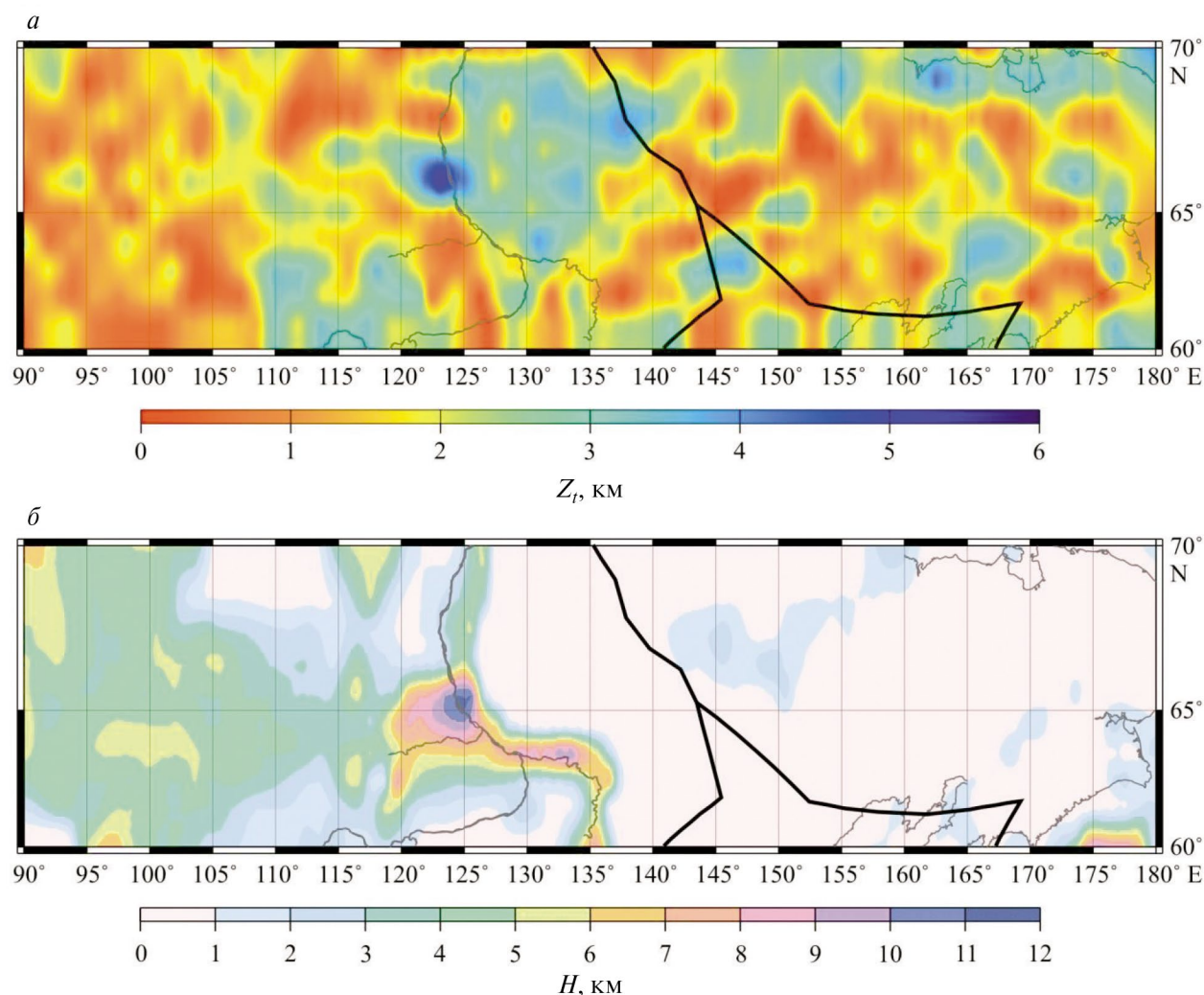


Рис. 3. Глубина верхней границы литосферных магнитных источников (Z_t , км), полученная в данной работе (а), и мощность осадочного слоя (H , км) согласно модели CRUST1.0 [Laske et al., 2013] (б). Границы литосферных плит (черные кривые) приведены согласно [Bird, 2003].

С учетом погрешностей увеличение Z_t уверенно прослеживается под Линденской впадиной и примыкающей к ней частью Предверхоанского краевого прогиба (см. рис. 1), которые входят в состав Лено-Вилюйской газонефтеносной провинции. Принимая, что намагниченность осадочных пород существенно меньше намагниченности пород кристаллического фундамента [Яновский, 1978], такое увеличение глубины Z_t на качественном уровне согласуется с глобальной моделью строения коры CRUST1.0, согласно которой мощность осадков в обсуждаемом районе достигает до 7–10 км (рис. 3б). Большая часть Сибирской платформы характеризуется

глубинами $Z_t < 1.5$ км (рис. 3а), в отличие от моделей CRUST1.0 (рис. 3б) и SibCrust [Cherepanova et al., 2013], а также результатов работы [Petrov et al., 2016], в которых мощность осадков достигает 6 км под отдельными локальными областями на платформе. Выявленное несоответствие может быть связано с широким распространением базальтовых траппов в осадочном чехле платформы [Drachev et al., 2010]. Полученное распределение глубины верхней границы магнитоактивного слоя литосферы указывает на большее распространение осадочного слоя под складчатыми поясами на северо-востоке Евразии, чем модель CRUST1.0, плохо обеспеченная

здесь исходными данными. Косвенно на это также указывают пониженные значения групповых скоростей волн Рэлея на периоде 20 с [Середкина, 2019; Levshin et al., 2001].

Максимальных значений (более 50 км) глубина нижней границы литосферных магнитных источников достигает практически повсеместно под Сибирской платформой к северу от 65°N , включая Анабарский щит (рис. 4). Отметим, что при использовании метода центра оценок глубин зависят от выбора размеров блоков, в пределах которых выполняется спектральный анализ [Ravat et al., 2007]. При этом выбранный нами размер блоков 200×200 км является достаточным для выделения областей с $Z_b > 50$ км, что ранее было продемонстрировано на примере Балтийского щита [Филиппова и Филиппов, 2023б]. К югу от 65°N под платформой значения Z_b существенно меньше и более выражены вариации этой глубины. Здесь она изменяется в диапазоне примерно от 35 до 50 км, причем отдельные минимумы и максимумы глубины коррелируют с геологическим строением. Например, как мы уже отмечали ранее, в работе [Филиппова et al., 2021] максимум глубины нижней границы магнитоактивного слоя литосферы в районе 63°N , 118°E приурочен к среднепалеозойской Вилюйской рифтовой системе [Зоненшайн и др., 1990а]. Под восточной окраиной Сибирской платформы залегание Z_b составляет около 40 км, что характерно и для соседних областей Верхояно-Колымского складчатого пояса.

Под Верхояно-Колымским складчатым поясом прослеживается чередование максимумов (до 44 км) и минимумов (до 30 км) глубины нижней границы литосферных магнитных источников (рис. 4). Под Корякско-Камчатским складчатым поясом глубина Z_b уменьшается в восточном направлении от ~ 34 до 26 км. Близкие значения Z_b характерны также для рассматриваемых частей Охотского и Берингова морей. Минимальные глубины нижней границы для всей области исследования прослеживаются под Охотско-Чукотским вулканогенным поясом и составляют около 24 км.

Полученное нами распределение глубины нижней границы литосферных магнитных источников (рис. 4) подтверждает основные крупномасштабные особенности глобальной модели [Gard and Hasterok, 2021], а именно: постепенное уменьшение глубины Z_b в восточном направлении, и свидетельствует о занижении глубин в моделях [Li et al., 2017; Lu et al., 2022], особенно существенном для Сибирской платформы. Как мы уже обсуждали это ранее для смежных регионов [Филиппова и Филиппов, 2023а], причинами таких несоответствий частично могут являться различия в исходных данных и горизонтальном разрешении результатов, однако основной вклад, скорее всего, вносят особенности используемых методов. Отметим также, что для складчатых поясов на востоке исследуемой территории полученные результаты закономерно согласуются с нашими средними

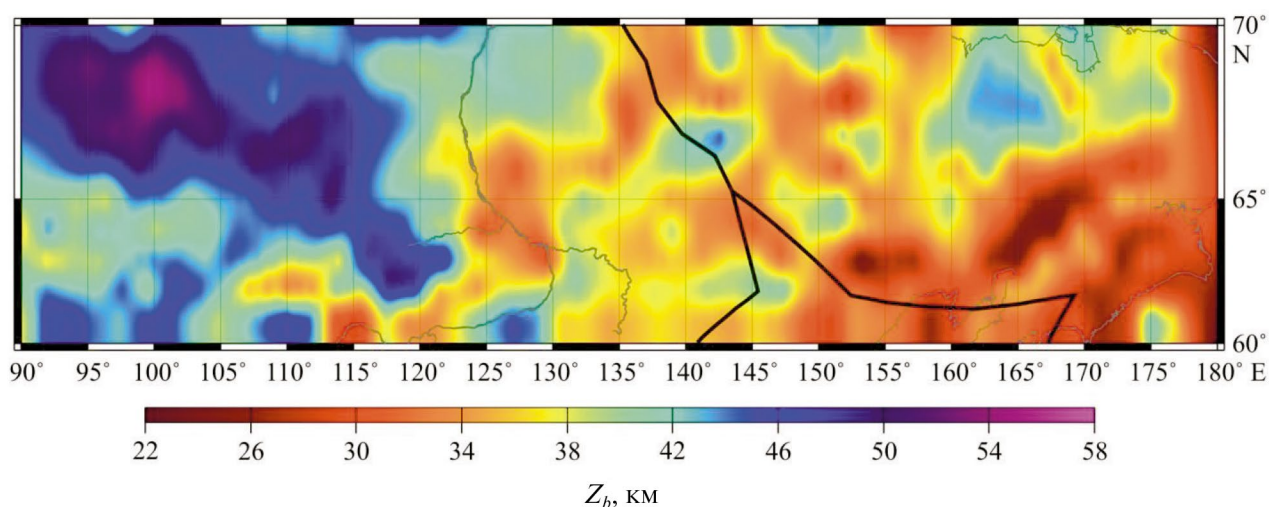


Рис. 4. Глубина нижней границы литосферных магнитных источников (Z_b , км). Границы литосферных плит (черные кривые) приведены согласно [Bird, 2003].

оценками из работы [Середкина и Филиппов, 2021]. При этом значение Z_b около 32 км, полученное для блока с размерами 300×300 км и центральной точкой с координатами 65° N и 105° E (Сибирская платформа) [Середкина и Филиппов, 2021], вероятно, является заниженным вследствие выбора более широкого диапазона волновых чисел для расчета глубины центра масс магнитных источников, чем диапазон, рекомендованный в [Núñez Demarco et al., 2021] и используемый в данной работе.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Тепловой режим литосферы

Принимая, что основным магнитным минералом в литосфере является магнетит, распределение глубины нижней границы литосферных магнитных источников может быть отождествлено с глубиной изотермы 578°C , что соответствует температуре точки Кюри магнетита [Langel and Hinze, 1998]. Исходя из этого полученное нами распределение глубины нижней границы литосферных магнитных источников (см. рис. 4) свидетельствует, что наиболее холодной и, следовательно, мощной литосферой обладает Сибирская платформа, особенно к северу от 65° N. Напротив, наиболее прогретая и утоненная литосфера наблюдается под Корякско-Камчатским складчатым поясом и Охотско-Чукотским вулканогенным поясом. Промежуточная между этими структурами степень прогрева литосферы в среднем характерна для Верхояно-Колымского складчатого пояса, при этом его различные районы прогреты по-разному.

Полученные нами результаты могут быть сопоставлены с независимыми геофизическими данными, в первую очередь со значениями поверхностного теплового потока (рис. 5а) [Fuchs et al., 2021a, b]. Сразу отметим, что количество измерений теплового потока для рассматриваемой территории невелико (63 значения) и пункты измерений распределены весьма неравномерно, что позволяет нам проанализировать только общие тенденции в тепловом режиме литосферы. Также необходимо иметь в виду, что имеющиеся значения потока могут быть несколько заниженными из-за влияния многолетней мерзлоты, мощность которой достигает десятков метров к северу от 60° N, что уже упоминалось нами ранее при расчете средней геотермы для 12 значений потока на Сибирской платформе (в районе 62.5° N, 114.0° E) [Filippova et al., 2021]. Тем не менее все измерения поверхностного теплового потока со значениями менее

40 мВт/м^2 расположены на Сибирской платформе (рис. 5а). На ее восточной окраине тепловой поток увеличивается до $42\text{--}59 \text{ мВт/м}^2$, а для Верхояно-Колымского складчатого пояса составляет $60\text{--}99 \text{ мВт/м}^2$. Корякско-Камчатский складчатый пояс и Охотско-Чукотский вулканогенный пояс, к сожалению, практически не обеспечены пунктами измерений потока. Таким образом, имеющиеся данные о поверхностном тепловом потоке подтверждают увеличение степени прогрева литосферы в восточном направлении — от Сибирской платформы к Верхояно-Колымскому складчатому поясу.

Об увеличении литосферных температур с запада на восток в пределах рассматриваемой территории свидетельствуют температурные модели, основанные на распределениях скоростей S-волн, полученных методами поверхностно-волновой томографии [Cammarano and Guerri, 2017; Lebedev et al., 2017; Priestley et al., 2019]. Однако, учитывая невысокое горизонтальное разрешение томографических реконструкций, они не позволяют проследить более мелкомасштабные вариации температуры, например выявленные нами для Верхояно-Колымского складчатого пояса (см. рис. 4). Частично такие вариации подтверждаются глобальной моделью континентальной литосферы TC1 [Artemieva, 2006], в которой область, ограниченная примерно $65\text{--}70^\circ$ N и $140\text{--}165^\circ$ E, характеризуется пониженными температурами. Так, согласно результатам данной работы (см. рис. 4) большинство наиболее выраженных максимумов глубины нижней границы литосферных магнитных источников ($Z_b > 42$ км) под этим складчатым поясом приурочено именно к этой области.

4.2. Сейсмичность

За исключением практически асейсмичной Сибирской платформы рассматриваемая нами территория северо-востока Евразии характеризуется высоким уровнем сейсмической активности [Имаева и др., 2017; Fujita et al., 2009]. Так, по данным сводного каталога из работы [Gvishiani et al., 2022], с 1962 по 2020 г. здесь произошло 703 землетрясения с $M \geq 4.0$, включая сильнейшие на северо-востоке России за инструментальный период наблюдений Артыкское землетрясение 18 мая 1971 г. с $MS = 7.0$ [Козьмин, 1984] и Олюторское землетрясение 20 апреля 2006 г. с $M_w = 7.6$ [Чебров, 2007] (рис. 5б). Эпицентры большинства землетрясений трассируют границы литосферных плит (рис. 5б). Помимо современных проявлений сейсмической активности в регионе так-

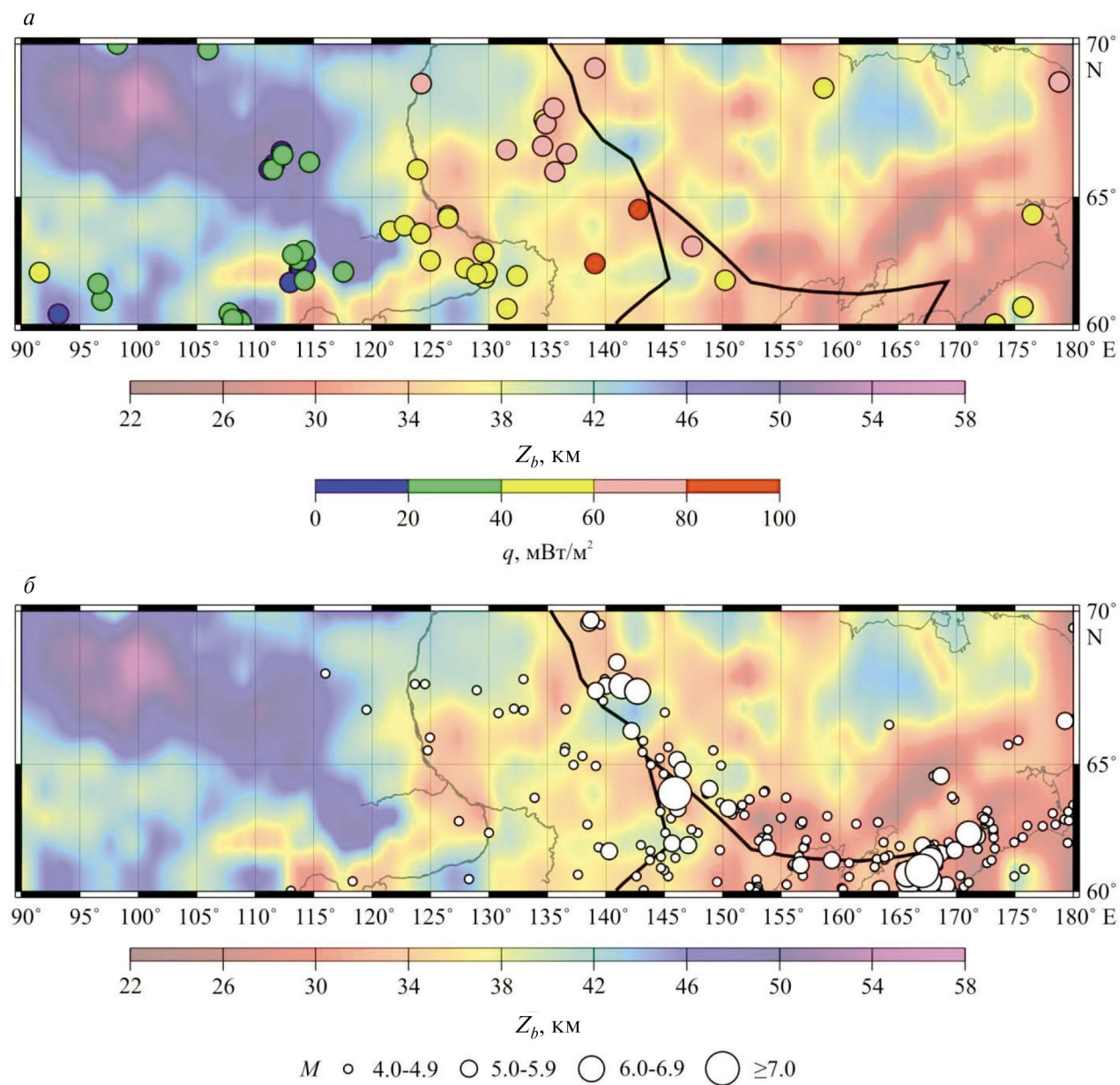


Рис. 5. Поверхностный тепловой поток (q , мВт/м²) по [Fuchs et al., 2021a] (а) и эпицентры региональных землетрясений с $M \geq 4.0$, зарегистрированных в 1962–2020 гг., по [Gvishiani et al., 2022] (б) в сопоставлении с полученным распределением глубины нижней границы литосферных магнитных источников (Z_b , км). Границы литосферных плит (черные кривые) приведены согласно [Bird, 2003].

же известны многочисленные разновозрастные палеосейсмодислокации, возникшие в результате сейсмических событий с $M > 7.0$ [Важенин, 2000; Имаев и др., 2000].

Поскольку количество сейсмических станций в пределах исследуемой области невелико, а

их распределение весьма неравномерно (например, см. [Алёшина и др., 2022; Чебров и др., 2022; Шибаяев и др., 2022]), глубины очагов для подавляющего числа региональных землетрясений либо не определены вовсе, либо характеризуются высокими погрешностями. Следовательно,

вычисление глубины нижней границы сейсмоактивного слоя, позволяющей косвенно оценить температурный режим литосферы [Sibson, 1984], как это было сделано в работах [Filippova et al., 2021; Idarraga-Garcia and Vargas, 2018; Tanaka and Ishikawa, 2005], является для северо-востока Евразии практически невозможным. Однако определенный интерес представляет сопоставление полученных нами результатов с распределением эпицентров умеренных и сильных сейсмических событий ($M \geq 4.0$, 1962—2020 гг.).

На рис. 5б видно, что эпицентры большинства землетрясений инструментального периода наблюдений с $M \geq 6.0$ приурочены к зонам, в которых происходит резкое изменение глубины нижней границы литосферных магнитных источников. Так, область Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г. ($M_w = 7.6$) и его афтершоков [Чебров, 2007] ($\sim 61^\circ \text{ N}$, 167° E) характеризуется изменением глубины Z_b с 34 до 26 км в восточном направлении. Еще более резкий скачок в изменении глубины — с 34 до 46 км — наблюдается в районе очагов Андрей-Тасского землетрясения 22 июня 2008 г. ($M_w = 6.1$) [Имаева и др., 2017; Filippova and Melnikova, 2023] и Илинь-Тасского землетрясения 14 февраля 2013 г. ($M_w = 6.7$) [Имаева et al., 2015; Filippova and Melnikova, 2023] ($\sim 67^\circ \text{ N}$, 142° E). Исключение составляет Артыкское землетрясение 18 мая 1971 г. ($M_S = 7.0$) [Козьмин, 1984], эпицентр которого расположен примерно в середине области со значениями Z_b около 32 км ($\sim 64^\circ \text{ N}$, 146° E). Такое отклонение от выявленной тенденции может быть обусловлено, с одной стороны, погрешностями определения эпицентра рассматриваемого сейсмического события, а с другой стороны, недостаточным горизонтальным разрешением результатов данной работы, ограниченным размерами блоков, в которых выполнялся спектральный анализ аномального геомагнитного поля ($200 \cdot 200 \text{ км}$).

5. ВЫВОДЫ

В данной работе для территории северо-востока Евразии ($60\text{--}70^\circ \text{ N}$, $90\text{--}180^\circ \text{ E}$) выполнен спектральный анализ аномального геомагнитного поля, заданного глобальной моделью EMAG2v3. Оценки глубины нижней границы магнитоактивного слоя литосферы были выполнены с помощью метода центроида. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Максимальных значений (более 50 км) глубина нижней границы литосферных магнитных источников (Z_b) достигает практически повсе-

местно под Сибирской платформой к северу от 65° N . Под Верхояно-Колымским складчатым поясом прослеживается чередование максимумов (до 44 км) и минимумов (до 30 км) глубины Z_b . Минимальные значения Z_b ($< 30 \text{ км}$) характерны для Корякско-Камчатского складчатого пояса и Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.

2. Полученное распределение глубины Z_b с учетом того, что основным магнитным минералом в континентальной литосфере является магнетит, свидетельствует об увеличении степени прогрева литосферы в восточном направлении — от Сибирской платформы к Корякско-Камчатскому складчатому поясу, что подтверждается независимыми геофизическими данными.

3. Сопоставление полученных нами результатов с распределением эпицентров региональных землетрясений ($M \geq 4.0$, 1962—2020 гг.) показывает, что очаги большинства сильных землетрясений инструментального периода регистрации ($M \geq 6.0$) приурочены к зонам, в которых происходит резкое изменение глубины нижней границы литосферных магнитных источников. Для рассматриваемой территории данный результат получен впервые.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 21-77-10070.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Полученное распределение глубины нижней границы литосферных магнитных источников доступно по запросу: <http://aleirk@mail.ru>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алёшина Е.И., Курткин С.В., Карпенко Л.И. Сейсмичность Северо-Востока России в 2016—2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 25 (2016—2017 гг.). С. 176—186. 2022. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.15>
- Важенкин Б.П. Принципы, методы и результаты палеосейсмогеологических исследований на Северо-Востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 205 с.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра. Кн. 1.

- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, Кн. 2. 334 с. 1990б.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. М.: ГЕОС. 2000.
- Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Мельникова В.И., Середкина А.И., Маккей К.Д., Ашурков С.В., Смекалин О.П., Овсяченко А.Н., Чипизубов А.В., Сясько А.А. Сейсмотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2017.
- Козьмин Б.М. Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений. М.: Наука. 1984.
- Середкина А.И. Поверхностно-волновая томография Арктики по данным дисперсии групповых скоростей волн Рэлея и Лява // Физика Земли. № 3. С. 58—70. 2019.
<https://doi.org/10.31857/S0002-33372019358-70>
- 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>
- 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. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S0002333722040032>
- Филиппова А.И., Филиппов С.В. Тепловой режим литосферы под полуостровом Таймыр по геомагнитным данным // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 3. С. 391—402. 2023а.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022600600>
- Филиппова А.И., Филиппов С.В. Глубины залегания литосферных магнитных источников под Балтийским щитом // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 63. № 5. С. 667—679. 2023б.
<https://doi.org/10.31857/S0016794023600059>
- Чебров В.Н. (отв. редактор) Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2007.
- Чебров Д.В., Салтыков В.А., Дроздина С.Я., Ромашева Е.И., Митюшкина С.В., Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Раевская А.А., Матвеев Е.А. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 2016—2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 25 (2016—2017 гг.). С. 164—175. 2022.
<https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.14>
- Шибанов С.В., Geissler W., Козьмин Б.М., Туктаров Р.М., Макаров А.А. Сейсмичность Якутии в 2016—2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 25 (2016—2017 гг.). С. 187—195. 2022.
<https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.16>
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Ленинградский университет. 1978.
- Artemieva I.M. Global $1^\circ \times 1^\circ$ thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution // Tectonophysics. V. 416. P. 245—277. 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.11.022>
- Bird P. An updated digital model of plate boundaries // Geochem. Geophys. Geosyst. V. 4. № 3. 1027. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- 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>
- Carillo-de la Cruz J.L., Prol-Ledesma R.M., Gabriel G. Geostatistical mapping of the depth to the bottom of magnetic sources and heat flow estimations in Mexico // Geothermics. V. 97. 102225. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102225>
- Cherepanova Y., Artemieva I.M., Thybo H., Chemia Z. Crustal structure of the Siberian Craton and the West Siberian Basin: an appraisal of existing data // Tectonophysics. V. 609. P. 154—183. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.004>
- Correa R.T., Vidotti R.M., Guedes V.J.C.B., Scandolara J.E. Mapping the Thermal Structure of the Amazon Craton to Constrain the Tectonic Domains // J. Geophys. Res.: Solid Earth. V. 127. № 1. e2021JB023025. 2022.
<https://doi.org/10.1029/2021JB023025>
- Drachev S.S., Malyshev N.A., Nikishin A.M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview / Petroleum geology: from mature basins to new frontiers — Proc. 7th Petroleum Geology Conference. Geological Society, London, 2010.
<https://doi.org/10.1144/0070591>
- Filippova A.I., Golubev V.A., Filippov S.V. Curie point depth and thermal state of the lithosphere beneath the north-eastern 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>
- Filippova A.I., Melnikova V.I. Crustal stresses in the East Arctic region from new data on earthquake focal mechanisms // Tectonics. V. 42. e2022TC007338. 2023.
<https://doi.org/10.1029/2022TC007338>
- 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/fidgeo.2021.014>
- Fuchs S., Beardsmore G., Chiozzi P., et al. A new database structure for the IHFC Global Heat Flow Database // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. V. 4. № 1 P. 1—14. 2021b.
<https://doi.org/10.31214/ijthfa.v4i1.62>
- Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., Имаев В.С., McLean M.S. Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia // Geology, Geophysics and Tectonics of Northeastern Russia: a Tribute to Leonid Parfenov. Stephan Mueller Spec. Publ. V. 4. P. 117—145. 2009.
<https://doi.org/10.5194/smsps-4-117-2009>

- 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>
- Gaudreau É., Audet P., Schneider D.A. Mapping Curie depth across western Canada from a wavelet analysis of magnetic anomaly data // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. V. 124. P. 4365–4385. 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JB016726>
- Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A. Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic // *Applied Sciences*. V. 12. № 10. 5010. 2022. <https://doi.org/10.3390/app12105010>
- Idarraga-Garcia J., Vargas C.A. Depth to the bottom of magnetic layer in South America and its relationship to Curie isotherm, Moho depth and seismicity behavior // *Geodesy and Geodynamics*. V. 9. P. 93–107. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.09.006>
- Imaeva L.P., Koz'min B.M., Imaev V.S., Mackey K.G. Structural dynamic analysis of the epicentral zone of the Ilin-Tas earthquake (Feb 14, 2013, $M_s = 6.9$) // *J. Seismol.* V. 19. P. 341–353. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10950-014-9469-5>
- Langel R.A., Hinze W.J. The magnetic field of the Earth's lithosphere. Cambridge University, Cambridge, UK, 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., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Villasenor A., Padgett C.A. New constraints on the arctic crust and uppermost mantle: surface wave group velocities, Pn, and Sn // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 123. P. 185–204. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(00\)00209-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(00)00209-0)
- 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>
- Maule C.F., Purucker M.E., Olsen N., Mosegaard K. Heat flux anomalies in Antarctica revealed by satellite magnetic data // *Science*. V. 309. P. 464–467. 2005. <https://doi.org/10.1126/science.1106888>
- 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>
- NOAA National Centers for Environmental Information. 2022: ETOPO 2022 15 Arc-Second Global Relief Model. DOI:10.25921/fd45-gt74. Available from <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>. Last accessed 25 July 2023.
- 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>
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., Kashubin S., Artemieva I.M., Sobolev N., Petrov E., Ernst R.E., Sergeev S., Smelror M. Crustal structure and tectonic model of the Arctic Region // *Earth Sci. Rev.* V. 154. P. 29–71. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013>
- Pirttijärvi M. 2D Fourier domain operations, FOURPOT program. 2015. <https://wiki.oulu.fi/x/0oU7AQ/>
- Prasad K.N.D., Bansal A.R., Prakash Om, Singh A.P. Magneto-thermometric modeling of Central India: Implications for the thermal lithosphere // *Journal of Applied Geophysics*. V. 196. 104508. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104508>
- 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>

- *Sibson R.H.* Roughness at the base of the seismogenic zone: contributing factors // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. V. 89. № B7. P. 5791–5799. 1984.
<https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05791>
- *Sobh M., Gerhards C., Fadel I., Götze H.-J.* Mapping the thermal structure of Southern Africa from Curie depth estimates based on wavelet analysis of magnetic data with uncertainties // *Geochem. Geophys. Geosyst.* V. 22. № 1. e2021GC010041. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2021GC010041>
- *Tanaka A., Ishikawa Y.* Crustal thermal regime inferred from magnetic anomaly data and its relationship to seismogenic layer thickness: The Japanese islands case study // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 152. P. 257–266. 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2005.04.011>
- *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>

Depth to the bottom of lithospheric magnetic sources beneath north-eastern Eurasia: lithospheric thermal regime and relation to seismicity

A. I. Filippova^{1,*}, S. V. Filippov^{1,**}

¹ *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of RAS (IZMIRAN), Moscow, Troitsk*

* *e-mail: aleirk@mail.ru*

** *e-mail: sfilip@izmiran.ru*

For north-eastern Eurasia (60–70° N, 90–180° E), the bottom depth of the lithospheric magnetoactive layer is estimated using the centroid method based on two-dimensional spectral analysis of the lithospheric magnetic field. The lithospheric magnetic field within the study region is described by the EMAG2v3 global model. The obtained results show that maximum values (> 50 km) of the depth to the bottom of lithospheric magnetic sources are observed almost everywhere under the Siberian platform north of 65° N. Minimum depth values (< 30 km) are traced under the Koryak-Kamchatka fold belt and the Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt. Under the Verkhoyansk-Kolyma fold belt, different maximums (up to 40 km) and minimums (up to 30 km) of the bottom depth are seen. Assuming that magnetite is a main magnetic mineral in the continental lithosphere, our distribution of the bottom depth evidences for the eastward lithospheric heating — from the Siberian platform to the Koryak-Kamchatka fold belt. The revealed tendency is confirmed by independent geophysical data. Comparison of the obtained results with a distribution of epicenters of regional earthquakes ($M \geq 4.0$, 1962–2020) shows that most sources of strong earthquakes ($M \geq 6.0$), registered during the instrumental period of observation, are confined to zones in which a sharp change in the depth to the bottom of lithospheric magnetic sources occurs.

Keywords: lithospheric geomagnetic field, centroid method, thermal regime of the lithosphere, seismicity, north-eastern Eurasia.