



ON THE CRUSTAL SOURCES OF MAGNETIC ANOMALIES IN THE MIDDLE URALS

P.S. Martyshko , N.V. Fedorova , A.L. Rublev 

Institute of Geophysical, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 100 Amundsen St, Ekaterinburg 620016, Russia

ABSTRACT. The 800×500 sq km area of the the Middle Urals, Russia, lying between 56 to 60° northern latitude and 54 to 66° eastern longitude, was studied in terms of the deep crustal structure. The study was based on three-dimensional modeling of the sources of magnetic anomalies in three layers of the Earth's crust. The studied area covers the folded region of the Urals and adjacent structures of the East European Platform and the West Siberian Plate. The sources modeled in the near-surface layer down to a depth of 5 km make it possible to clarify the position of magnetized massifs, mainly consisting of mafic-ultrabasic rocks, and to trace their connection with mafic-ultrabasic belts in the granite layer and root blocks in the lower basaltic layer of the Earth's crust. When the sources in the upper crustal layer are compared with those in the lower crustal layer, it is apparent that many belts on the platform have deep-seated roots and are located above the basalt layer protrusions, while most of the massifs in the Urals do not have deep-seated roots. The springs located under the western slope of the Urals allow reliably determining the depth to the basement of the ancient platform and the location of the eastern border of the East European Platform in the lower layer of the Earth's crust. There were found extended zones of subsidence of the roof of the lower magnetized layer, which probably mark the boundaries of various terrains forming the paleo-island arc sector of the Ural fold system. The most extensive subsidence of the roof of the lower layer occurs to the west of the Tyumen-Chudinovsky fault and is perhaps the eastern deep-seated dividing line between the Ural fold system and the West Siberian Plate.

KEYWORDS: magnetization of rocks; structural inverse magnetometric problem; Earth's crust

FUNDING: Research was carried out at the Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, with the support of the Russian Science Foundation, project 20-17-00058 "Methods for three-dimensional modeling of the Earth's crust based on a complex interpretation of geophysical fields using parallel algorithms (by the example of the Urals)".



EDN: JSSZJC

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Alexey L. Rublev, a.rublev@list.ru

Received: November 7, 2023

Revised: March 11, 2024

Accepted: March 14, 2024

FOR CITATION: Martyshko P.S., Fedorova N.V., Rublev A.L., 2024. On the Crustal Sources of Magnetic Anomalies in the Middle Urals. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (3), 0763. doi:10.5800/GT-2024-15-3-0763

ОБ ИСТОЧНИКАХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ СРЕДНЕГО УРАЛА

П.С. Мартышко, Н.В. Федорова, А.Л. Рублев

Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия

АННОТАЦИЯ. Для территории Среднего Урала 800×500 км в пределах географических координат от 56 до 60° с.ш. и от 54 до 66° в.д. выполнено исследование глубинного строения земной коры. Оно основано на трехмерном моделировании источников магнитных аномалий в трех слоях земной коры. Район исследования охватывает складчатую область Урала и прилегающие структуры Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской плиты. Построенные источники в приповерхностном слое до глубины 5 км позволяют уточнить положение намагниченных массивов, в основном состоящих из базит-ультрабазитовых пород, проследить их связь с базит-ультрабазитовыми поясами в гранитном слое и корневыми блоками в нижнем базальтовом слое земной коры. При сопоставлении источников в верхнем и нижнем слое коры отмечено, что на платформе многие пояса имеют глубинные корни и расположены над выступами базальтового слоя, а на Урале большинство массивов не имеет глубинных корней. Под западным склоном Урала выделены источники, которые позволяют надежно определить глубину до фундамента древней платформы и расположение восточной границы Восточно-Европейской платформы в нижнем слое земной коры. Выделены протяженные зоны погружения кровли нижнего намагниченного слоя, которые, вероятно, маркируют границы различных террейнов, образующих палеоостроводужный сектор Уральской складчатой системы. Наиболее широкое погружение кровли нижнего слоя происходит к западу от Тюменско-Чудиновского разлома и, возможно, является восточным глубинным разделом между Уральской складчатой системой и Западно-Сибирской плитой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: намагниченность горных пород; структурная обратная задача магнитометрии; земная кора

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования проведены в Институте геофизики УрО РАН при поддержке РФФ, проект 20-17-00058 «Методы построения трехмерных моделей земной коры на основе комплексной интерпретации геофизических полей с использованием параллельных алгоритмов (на примере Уральского региона)».

1. ВВЕДЕНИЕ

Уральская складчатая система протягивается более чем на 2500 км и расположена на северо-западном участке палеозойского Урало-Монгольского подвижного пояса. Географически Уральские горы разделяются на Южный, Средний, Северный, Приполярный и Полярный Урал. В описательных геологических целях уралиды разделены на шесть протяженных с севера на юг структурно-тектонических мегазон (рис. 1), которые в значительной степени основаны на возрасте и палеогеографии доминирующих внутри них пород. С запада на восток Уральская складчатая система делится на Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральскую, Центрально-Уральскую, Тагило-Магнитогорскую, Восточно-Уральскую и Зауральскую мегазоны.

Три западные мегазоны (Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральская и Центрально-Уральская), как отмечено в ряде современных работ [Puchkov, 2010; Ivanov, Puchkov, 2022], создают палеоконтинентальный сектор Урала, образованный на окраине континента Балтика / Лавруссия. Тагило-Магнитогорская, Восточно-Уральская и Зауральская мегазоны формируют палеоостроводужный сектор, представляющий собой коллаж офиолитов, островодужных и микроконтинентальных террейнов. Это разделение совпадает с традиционным обособлением мио- и эвгеосинкли-

нальных зон Урала, границей между которыми является шовная зона Главного Уральского глубинного разлома [Ivanov, Puchkov, 2022]. Границы западных мегазон Урала повторяют контуры Восточно-Европейской платформы и могут быть прослежены на поверхности на всем протяжении пояса. Восточные зоны наблюдаются преимущественно на Южном и Среднем Урале, постепенно исчезая к северу под мезокайнозойским чехлом молодой Западно-Сибирской плиты.

Для изучения глубинного строения Урала геофизические исследования проведены по сейсмическим профилям и геотраверсам. На Среднем Урале вблизи г. Верхняя Тура пробурена сверхглубокая скважина СГ-4. Этот район исследован более детально как методом отраженных волн, так и с помощью глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) по профилям: Верхнетуринский, Красноуральский, Нижняя Тура – Орск, Уральский, Рубин-1, Рубин-2, Гранит, Среднеуральский [Druzhinin et al., 1981, 1985; Sokolov, 1996; Kostuchenko et al., 1998; Kashubin, 2002; Rylkov et al., 2013]. При построении комплексных геолого-геофизических разрезов литосферы вдоль этих профилей использовались в основном двумерные методы интерпретации гравитационных и магнитных полей. Несмотря на большой объем проведенных исследований, многие вопросы глубинного строения остаются дискуссионными и нуждаются в дальнейших исследованиях.

Развитие геофизических методов моделирования источников гравитационных и магнитных полей для больших массивов данных позволяет перейти от изучения глубинного строения литосферы вдоль профилей ГСЗ к объемным моделям. В данной работе на основе новых компьютерных технологий проведена интерпретация магнитного поля, построены объемные ис-

точники аномалий и получены новые результаты изучения глубинного строения земной коры Среднего Урала для площади 800×500 км в пределах географических координат от 56° до 60° с.ш. и от 54° до 66° в.д. (рис. 1). Район исследования охватывает складчатую область Урала и прилегающие структуры Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и Западно-Сибирской плиты (ЗСП). На первом этапе проведено изучение структурных особенностей аномального магнитного поля, выделены аномалии от различных слоев земной коры. Такая процедура позволяет определить, на какой глубине находятся источники аномалий, анализировать распределение источников, а следовательно, появляется возможность установить связь объектов в верхней коре с глубинными блоками. Затем, на втором этапе, по разделенным аномалиям решается обратная задача магнитометрии, в результате определяются поверхности магнитных источников в различных слоях земной коры.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Изучение структурных особенностей аномального магнитного поля проведено с использованием региональной базы данных, основанной на наземных и аэромагнитных съемках масштаба 1:200000 [Chursin et al., 2008]. При создании цифровой карты для более точного учета вековой вариации была проведена специальная аэромагнитная съемка по протяженным профилям и в качестве поля отсчитывания использована модель главного геомагнитного поля IGRF-2000. Матрица аэромагнитных данных оцифрована через 250 м. На Среднем Урале региональная база данных охватывает территорию на листах О-40 и О-41 в масштабе карт 1:1000000.

Базы данных аномального магнитного поля литосферы представлены в основном аномалиями модуля магнитной индукции ΔT_a , для которых, как известно, нельзя использовать гармонические функции, поскольку они не удовлетворяют уравнению Лапласа. В связи с этим для корректного применения методов решения обратных задач магнитометрии необходимо провести преобразование и определить вертикальную составляющую магнитных аномалий Z . Также для упрощения решения обратных задач магнитометрии требуется значения Z «привести к полюсу», т. е. вычислить данные при вертикальной намагниченности источников. Для этой цели был разработан метод аппроксимации аномалий модуля магнитной индукции полями сингулярных источников [Martyshko et al., 2016]. Аппроксимация аномалий модуля индукции решается методами нелинейного программирования и сводится к минимизации функционала между исходными данными и аномальными полями от набора модельных источников. Метод позволяет выполнять аппроксимацию магнитных аномалий для больших массивов данных, не делая никаких предположений о направлении намагниченности источников аномалий в отличие от метода, предложенного в работе

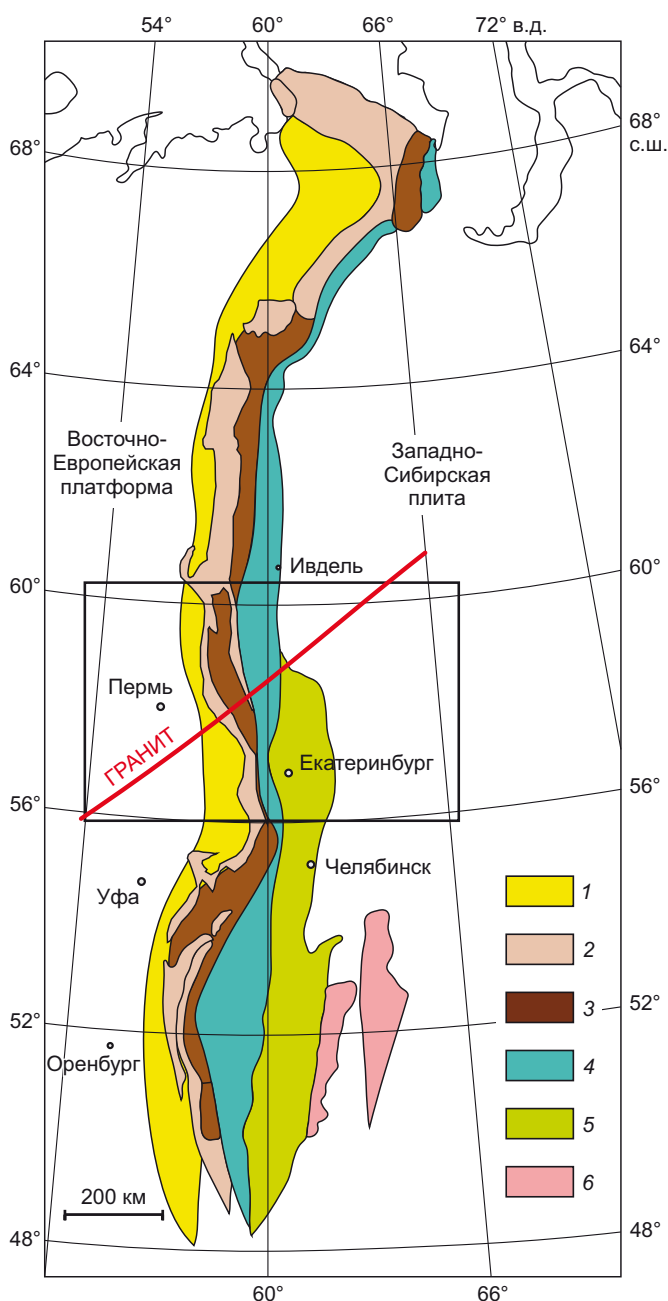


Рис. 1. Схема тектонического районирования Урала. 1 – Предуральский краевой прогиб; 2 – Западно-Уральская мегазона; 3 – Центрально-Уральская мегазона; 4 – Тагил-Магнитогорская мегазона; 5 – Восточно-Уральская мегазона; 6 – Зауральская мегазона.

Fig. 1. Scheme of the Urals tectonic zoning. 1 – Pre-Ural foredeep; 2 – Western Ural megazone; 3 – Central Ural megazone; 4 – Tagil-Magnitogorsk megazone; 5 – East Ural megazone; 6 – Trans-Ural megazone.

[Baranov, 1957] и реализованного в спектральной форме [Bhattacharyya, 1965].

В качестве модельных источников выбран набор однородно намагниченных стержней. Такой класс источников в аспекте параметризации задачи является оптимальным, по сравнению с классом точечных источников или диполей. Каждый модельный источник описывается только семью параметрами: координатами концов и линейной намагниченностью. Изменение длины стержня позволяет выполнять аппроксимации аномалии как от изометричных шарообразных, так и от протяженных объектов. Направления намагниченности стержней задавались либо вдоль источника [Muravyev et al., 2016], либо по современному геомагнитному полю [Martyshko et al., 2021a]. Для вычислений на сетках большой размерности использовано программное обеспечение, реализующее параллельные вычисления. Полученные в результате аппроксимации параметры сингулярных источников позволяют с помощью решения прямой задачи магнитометрии рассчитать прямоугольные компоненты магнитных аномалий (X , Y , Z), а также выполнить процедуру «приведения к полюсу».

Проведенные расчеты для Уральского региона и сопоставление карт аномалий модуля магнитной индукции ΔT_a и вычисленной вертикальной компоненты Z показывают, что аномалии Z смещены к северо-северо-востоку относительно аномалий модуля ΔT_a , и расстояние между эпицентрами достигает 15–20 км [Muravyev et al., 2016; Martyshko et al., 2021a].

3. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАССИВОВ И СЛОЕВ ЛИТОСФЕРЫ

Петрофизические исследования пород уральских массивов показали, что граниты, гранодиориты имеют низкие магнитные свойства, а магнитная восприимчивость образцов основного и ультраосновного состава (диориты, базальты, амфиболиты, габбро, серпентиниты, пироксениты) высокая и может достигать $25000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, однако средние значения не превышают $6000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ [Petrophysical Methods..., 1988]. Анализ результатов измерения магнитных свойств в сверхглубокой скважине СГ-4 показал, что наиболее магнитными являются диориты, диабазы, диоритовые порфириды, плагиоклазовые базальты, магнитная восприимчивость которых составляет $1000 \cdot 10^{-5}$ – $5500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ [Igolkina, 2002]. Для образцов с высокой магнитной восприимчивостью значение фактора Кенигсбергера (отношение остаточной и индукционной составляющих намагниченности), как правило, меньше 1, поэтому можно полагать, что интегральная намагниченность не превышает 2–3 А/м.

На Урале базит-ультрабазитовые массивы преимущественно сосредоточены в линейно вытянутых поясах и приурочены к глубинным разломам, протягивающимся на сотни и даже тысячи километров. Для определения границ массивов и углов падения разломов широко использовались различные методы интерпре-

тации магнитных аномалий, в основном в двумерном варианте. Тела, связанные с глубинными разломами, как правило, имеют крутые углы падения, некоторые из таких тел по геофизическим данным прослеживаются на большие глубины. Ряд гипербазитовых массивов имеет небольшие углы падения и плоскую форму, что, по-видимому, является следствием их надвиговой природы и оторванности этих массивов от корневых блоков. Результаты моделирования источников магнитных аномалий вдоль профилей двумерными методами дали возможность оценить интегральную намагниченность базит-ультрабазитовых массивов в 2–3 А/м [Fedorova, Rublev, 2019].

При построении магнитной модели литосферы необходимо иметь не только оценки намагниченности горных пород, но также значения средней намагниченности слоев коры и расположение нижней границы магнитоактивного слоя. Главные носители намагниченности в земной коре – минералы титаномагнетитового ряда, и прежде всего магнетит, который теряет ферромагнитную намагниченность при температуре Кюри 580 °С. Породы осадочного слоя содержат незначительное количество магнитных минералов и не создают заметных магнитных аномалий. В верхнем кристаллическом слое земной коры выделяются блоки, имеющие значительную намагниченность, однако средняя намагниченность гранитного слоя низкая, ее значение, оцененное по петрофизическим исследованиям на щитах, не превышает 0.3 А/м [Krutikhovskaya et al., 1982]. На Урале по результатам магнитного каротажа, проведенного в верхних 5 км в Уральской СГ-4, среднее значение магнитной восприимчивости составляет $60 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ [Main Results..., 2000].

Для пород базальтового слоя характерны высокие значения намагниченности – 2–6 А/м, и по результатам моделирования северного сегмента Уральского региона величина средней намагниченности этого слоя составляет 3 А/м [Fedorova et al., 2017b], но источники региональных магнитных аномалий Среднего Урала имеют более высокую намагниченность – 5–7 А/м [Fedorova, 2005; Martyshko et al., 2021b]. Магнитовариационные исследования на ряде региональных магнитных аномалий, в том числе на Манчажской аномалии, которая находится в пределах изучаемого региона в южной части ВЕП, показали, что в нижней коре преобладает индукционная намагниченность [Fedorova, 2005; Orlyuk et al., 2014]. Изучение структуры аномального магнитного поля Уральской складчатой системы и взаимосвязи между длинноволновыми магнитными аномалиями и сейсмическими границами, а также мощностью консолидированной коры выявили прямую связь только с кровлей базальтового слоя [Fedorova et al., 2017a]. Аномалии, которые могли бы соответствовать резкому изменению рельефа границы Мохо, выделить не удалось. Скорее всего, это связано с тем, что нижняя часть базальтового слоя и переходная зона между корой и мантией имеют низкую намагниченность – возможное следствие коллизионной

переработки в процессе орогенеза либо разогрева выше температуры Кюри магнитных минералов. По результатам моделирования вдоль геотраверса Гранит намагниченность пород земной коры в прогибе границы Мохо под Уралом не превышает 0.5 А/м [Fedorova, 2001].

Исследования ксенолитов мантийных пород показали, что верхняя мантия имеет низкие магнитные свойства (магнитная восприимчивость образцов порядка 10^{-4} – 10^{-3} ед. Си) [Pechersky, 1994; Pechersky et al., 2006], поэтому нижним ограничением магнитоактивного слоя литосферы может быть граница Мохо или глубина в нижней коре, где температура превышает 580 °С. Геотермические исследования в глубоких и сверхглубоких скважинах установили принципиально новый результат изменения с глубиной температурного градиента как основного показателя термодинамического режима недр. Температура растет значительно быстрее, чем считалось ранее по результатам измерений в неглубоких скважинах. В относительно холодной коре древней Восточно-Европейской платформы на глубине 12 км температура достигла 220 °С вместо ожидаемых 120–130 °С [Orlov, Laverov, 1998]. В Уральской скважине СГ-4 на глубине 5 км зафиксирована температура 90 °С. По результатам измерений на молодых плитах температурные градиенты значительно выше, чем на ВЕП, и на глубине 7 км в Тимано-Печорской СГ-5, Тюменской СГ-6 и Ен-Яхинской СГ-7 температура достигает 160, 200 и 210 °С соответственно [Main Results..., 2000; Mazur, 1996]. В связи с этим можно предположить, что земные недра разогреты до температуры 580 °С на глубине 30–40 км, и, следовательно, подошва магнитоактивного слоя расположена значительно выше границы Мохо.

4. МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ОТ ИСТОЧНИКОВ В РАЗЛИЧНЫХ СЛОЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Аномальное магнитное поле имеет интегральный характер и содержит составляющие от всех источников, расположенных в литосфере. Для выделения аномалий от источников в различных слоях земной коры была использована методика, основанная на повысотных пересчетах [Martyshko et al., 2014, 2021a]. Как правило, на открытых территориях наибольший вклад в аномальное магнитное поле вносят аномалии от приповерхностных массивов, поскольку интенсивность аномалий значительно снижается при удалении от локальных источников. Как известно, с увеличением расстояния R от намагниченного тела напряженность магнитного поля затухает по закону $\sim 1/R^3$, поэтому если источники вблизи поверхности создают магнитные аномалии 200–1000 нТл, то на высоте 5 км интенсивность аномалий будет меньше 1–8 нТл, т.е. по величине становится сравнима с погрешностью наблюдений.

Задача выделения эффекта от локальных источников, расположенных в горизонтальном слое от зем-

ной поверхности до некоторой глубины H , решалась в несколько этапов. На первом этапе наблюдаемое магнитное поле с помощью численного метода пересчитывалось вверх на высоту H . Для того чтобы окончательно избавиться от влияния источников в верхнем слое, пересчитанное вверх поле аналитически продолжалось вниз на глубину H . Поскольку пересчет поля вниз относится к классу некорректно поставленных задач, при вычислениях использовался метод с применением регуляризации. На следующем этапе поле вновь пересчитывалось вверх на уровень дневной поверхности $h=0$. Полученное трансформированное поле можно рассматривать как поле от источников, расположенных ниже границы H . После вычисления разности наблюдаемого и трансформированного полей получаем аномалии от локальных источников, расположенных в верхнем слое. Таким образом, с помощью вычислений для разных значений высоты H можно получить аномалии от источников, расположенных в различных горизонтальных слоях.

При изучении крупных территорий приходится задавать большие массивы данных, что приводит к значительным затратам времени при вычислениях на однопроцессорных компьютерах. Использование параллельных алгоритмов для многопроцессорных вычислительных систем значительно сокращает время расчетов. Создана новая компьютерная технология, основанная на параллельных вычислениях. Описание математического аппарата и алгоритмов параллельных вычислений на суперкомпьютере Уран приведено в статьях [Martyshko et al., 2014, 2016]. Алгоритм реализован также на графических процессорах NVidia и AMD [Martyshko et al., 2021a].

Для решения обратной задачи магнитометрии и вычисления поверхности источников магнитных аномалий применен модифицированный метод локальных поправок [Martyshko et al., 2021b]. Этот метод позволяет определить геометрию поверхности раздела между двумя слоями при заданных значениях однородной вертикальной намагниченности в слоях и средней глубине до второго слоя. Разработан итерационный способ нахождения границы, базирующийся на предположении о том, что наибольшее влияние на изменение значения поля в некоторой точке оказывает изменение ближайшей к данной точке части поверхности. На каждом шаге итерации уменьшается разность между заданными и приближенными значениями поля в данном узле (лишь за счет изменения значения искомой функции в этом же узле). Предложенный метод не использует нелинейную минимизацию, что позволяет значительно сократить время вычислений и оперативно решать объемные задачи [Fedorova, Rublev, 2019; Martyshko et al., 2021b].

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

В пределах Уральской складчатой системы кристаллические породы выведены на земную поверхность,

магнитное поле имеет сильно изрезанный характер и над базит-ультрабазитовыми массивами интенсивность магнитных аномалий достигает 4000–6000 нТл (рис. 2, а). Аномалии на восточном склоне Урала и Западной Сибири простираются преимущественно в меридиональном направлении север – юг. Над прилегающей областью Восточно-Европейской платформы и Предуральским краевым прогибом фундамент покрыт мощным осадочным чехлом 4–6 км, и в магнитном поле отчетливо выделяются протяженные региональные аномалии, интенсивность которых не превышает 1500 нТл. Отметим, что региональные аномалии на ВЕП простираются в различных направлениях, а ряд из них имеют широтное направление, и восточные фланги этих аномалий прослеживаются не только под Уральским краевым прогибом, но и под западным склоном Уральского орогена.

При моделировании распределения намагниченности в земной коре авторы выделили три слоя: приповерхностный (до глубины 5 км), верхний, или гранитный, и нижний, или базальтовый. Понятие «гранитный слой» и «базальтовый слой» имеют условный характер и ранее были введены при геофизических исследованиях для разделения земной коры на верхний и нижний слои кристаллической коры, различаю-

щиеся по физическим свойствам. Средняя глубина до базальтового слоя по сейсмическим данным составляет 20 км [Druzhinin et al., 1985, 2003]. Выполнены расчеты трансформированных полей (пересчитанных вверх и вниз) для уровней 5, 20, 50 км, и построены карты разделенных магнитных аномалий от источников в трех слоях земной коры (рис. 2).

Для выделенных от каждого слоя аномалий выполнено решение обратной задачи магнитометрии и определена геометрия кровли намагниченных источников в каждом слое (рис. 3). В приповерхностном слое от 0 до 5 км на платформах модель намагниченных источников позволила под слоем осадочного чехла локализовать массивы, как правило, состоящие из базитов и ультрабазитов, намагниченность которых составляет 2–4 А/м, а положение верхних кромок источников дает возможность уточнить глубину до кристаллического фундамента (рис. 3, а). В пределах Уральской складчатой системы наблюдается резкий контраст в распределении магнитных массивов между палеоконтинентальным и палеоостроводужным сектором. В Западной и Центральной Уральских зонах присутствуют лишь немногочисленные источники, а к востоку от главного Уральского разлома в Тагильско-Магнитогорской и Восточно-Уральской зонах наблюдается

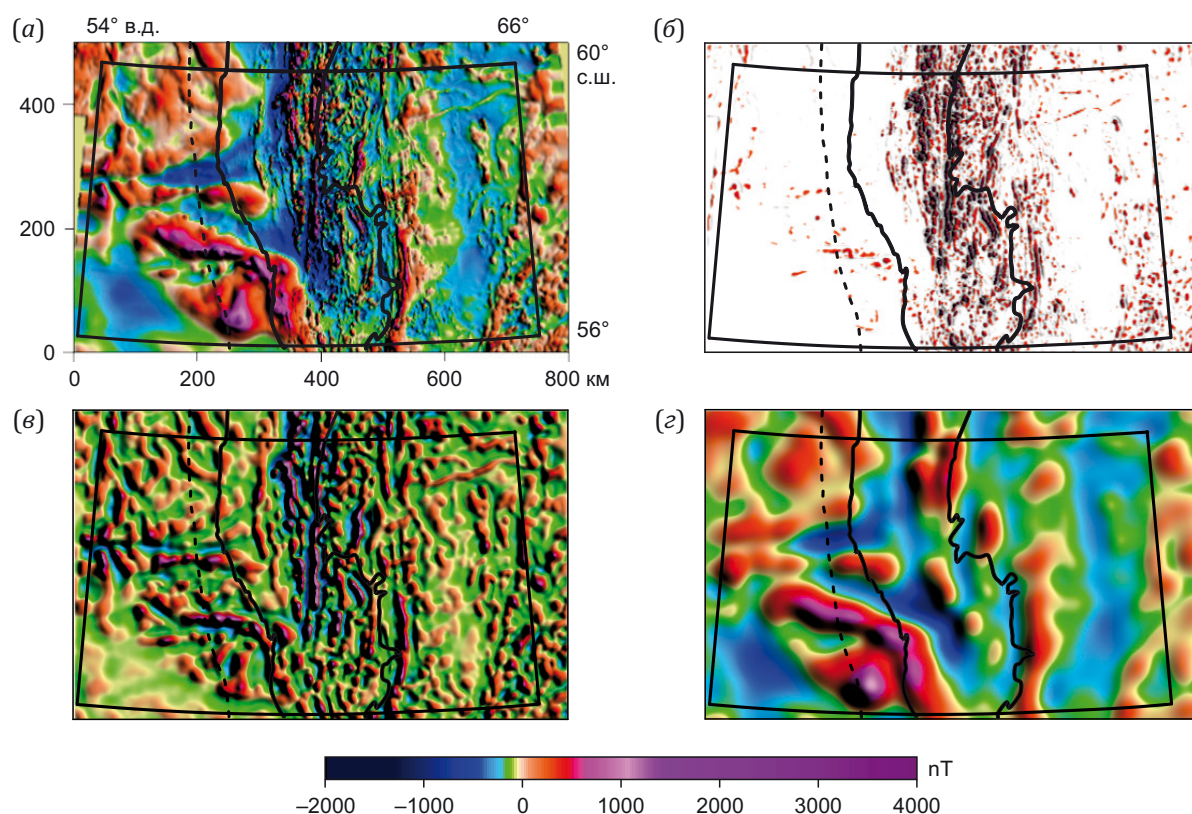


Рис. 2. Карты аномального магнитного поля Среднеуральского региона (а) и выделенных магнитных аномалий от приповерхностного (б), гранитного (в) и базальтового (г) слоев земной коры. Границы Урала показаны сплошной черной линией, а Предуральского краевого прогиба – пунктиром.

Fig. 2. Maps of the anomalous magnetic field of the Middle Urals region (a) and magnetic anomalies from the sources in the near-surface (b), granite (c) and basalt (d) layers of the Earth's crust. The boundaries of the Urals are shown with a solid black line, and those of the Pre-Ural foredeep – with a dotted line.

огромное количество намагниченных массивов, часть из которых маркируют многочисленные глубинные разломы. В данной работе положение глубинных разломов и их названия приведены в соответствии с данными геологических карт О-40 и О-41 третьего поколения [State Geological Map..., 2011, 2015]. Намагничен-

ные источники присутствуют не только в пределах Уральских гор, но и под осадками Западно-Сибирского бассейна. Плотность намагниченных источников значительно снижается в районах крупных гранитных массивов на восточном склоне Урала, на рис. 3, а, эти области выделяются светлыми пятнами.

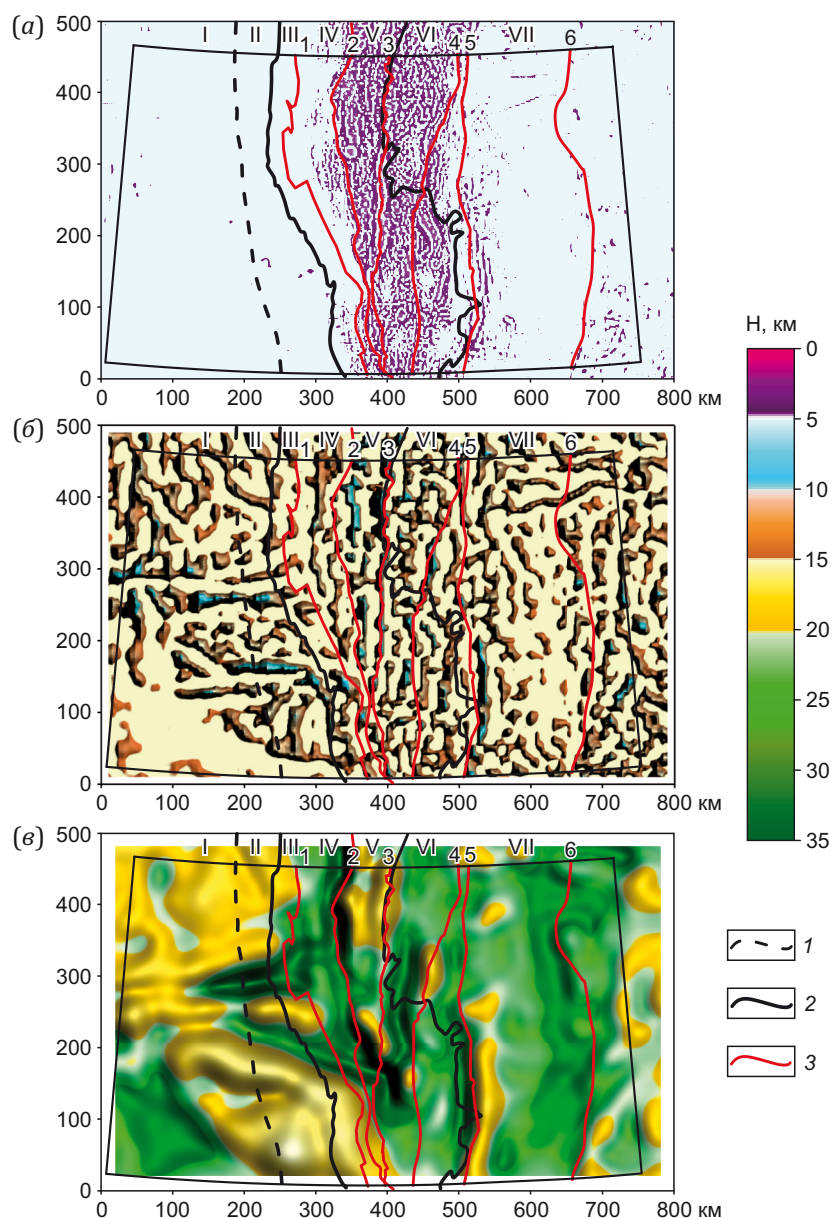


Рис. 3. Результаты моделирования источников магнитных аномалий.

(а) – источники в приповерхностном слое; (б) – кровля поверхности гранитного слоя; (в) – кровля базальтового слоя земной коры. 1 – Предуральский краевой прогиб; 2 – границы Уральского орогена; 3 – границы мегазон и глубинные разломы: 1 – Западно-Уральский, 2 – Главный Уральский, 3 – Серовско-Маукский, 4 – Мурзинский, 5 – Бичурско-Копейский, 6 – Тюменско-Чудиновский (по данным геологических карт О-40 и О-41). I – Восточно-Европейская платформа; II – Предуральский краевой прогиб; III – Западно-Уральская мегазона; IV – Центрально-Уральская мегазона; V – Тагил-Магнитогорская мегазона; VI – Восточно-Уральская мегазона; VII – Западно-Сибирская плита.

Fig. 3. Results of modeling of magnetic anomaly sources.

(а) – sources in the near-surface layer; (б) – the roof of the granite layer; (в) – the roof of the basalt layer of the Earth's crust. 1 – Pre-Ural foredeep; 2 – boundaries of the Ural orogeny; 3 – boundaries of megazones and deep-seated faults: 1 – Western Ural, 2 – Main Ural, 3 – Serovsko-Mauksky, 4 – Murzinsky, 5 – Bichursko-Kopeysky, 6 – Tyumensko-Chudinovsky (according to geological maps О-40 and О-41). I – East European Platform; II – Pre-Ural foredeep; III – Western Ural megazone; IV – Central Ural megazone; V – Tagil-Magnitogorsk megazone; VI – East Ural megazone; VII – West Siberian Plate.

На рис. 3, 6, приведены намагниченные источники в верхнем или гранитном слое от 5 до 15 км. Здесь источники в основном образуют линейные пояса. Отметим практически равномерное распределение этих источников по всей территории за исключением юго-западного участка. В пределах Восточно-Европейской платформы протяженность поясов небольшая: от 20 до 100 км, а направления их простирания варьируются от широтного до меридионального. По-видимому, они образовались в результате тектономагматической активности в докембрии и являются аналогами архейских зеленокаменных поясов.

На Урале и в Западной Сибири пояса имеют протяженность от 50 до 300 км. На западном склоне Урала пояса уральского направления (север – юг) появляются к востоку от центральной части Центрально-Уральской зоны на глубине 10–12 км. Западнее резко меняется направление простирания поясов на субширотное, что свидетельствует о принадлежности этих источников фундаменту Восточно-Европейской платформы. В пределах Предуральского краевого прогиба глубина до верхних кромок источников составляет 5–8 км, а в Западно-Уральской и восточной части Центрально-Уральской зоны происходит погружение до 12–14 км. Расположение этих источников позволяет надежно определить глубину до фундамента древней платформы под уралидами. На восточном склоне Урала и в Тагильской зоне верхние кромки поясов расположены значительно выше – на глубине 5 км.

В пределах Восточно-Европейской платформы и западного склона Урала региональным аномалиям соответствуют подъемы кровли нижнего намагниченного слоя коры до 15 км (рис. 3, в). Нижнюю границу этого слоя авторы статьи ограничили горизонтальной плоскостью на глубине 40 км. Такая глубина близка к среднему значению мощности коры в прилегающих

частях Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской плиты, а также соответствует оценке максимальной глубины изотермической поверхности Кюри магнетита для территории России, приведенной в публикации [Moiseenko, Smyslov, 1986]. Резкое погружение поверхности до 30–35 км происходит в зоне Главного Уральского разлома, и это позволяет уверенно определить восточную границу докембрийской платформы в нижней коре. Восточнее наблюдается еще несколько узких зон погружения, протягивающихся в меридиональном направлении. Возможно, они маркируют глубинные границы различных террейнов, образующих палеоостроводужный сектор. Наиболее широкое погружение кровли нижнего слоя происходит к западу от Тюменско-Чудиновского разлома и, вероятно, является глубинным разделом между Уральской складчатой системой и Западно-Сибирской плитой. Кроме того, на восточном фланге ВЕП выделены две депрессии субширотного простирания, по-видимому разграничивающие разные блоки, из которых была образована древняя платформа.

6. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ С СЕЙСМИЧЕСКИМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ

Результаты моделирования авторы статьи сопоставили с сейсмическим разрезом по геотраверсу Гранит [Kashubin, 2002]. Поскольку метод ГСЗ позволяет выделять только крупные неоднородности, на сейсмическую модель скоростей продольных волн добавлена лишь модель кровли намагниченного нижнего слоя (рис. 4). Можно констатировать, что наблюдается неплохое соответствие между скоростной границей 6.6 км/с и положением выступов и прогибов поверхности намагниченного слоя. Совпадение в нижнем слое коры зон пониженных скоростей и магнитных свойств

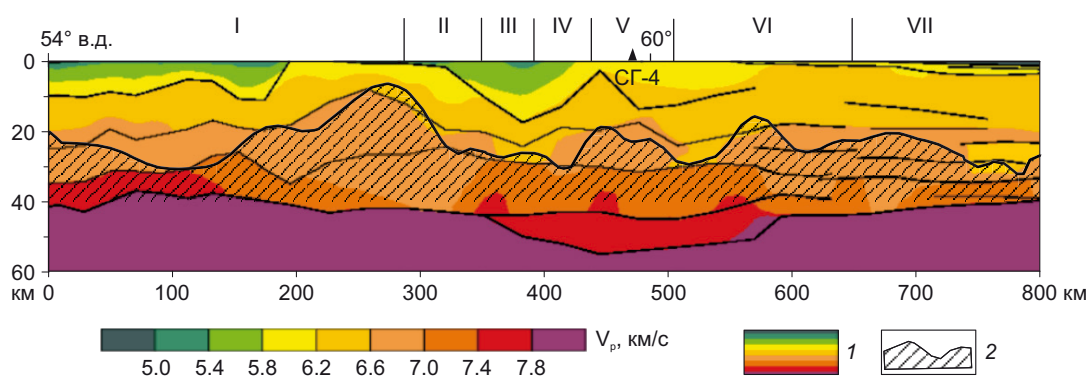


Рис. 4. Уральская часть геотраверса Гранит.

1 – сейсмическая модель распределения скорости продольных волн [Kashubin, 2002]; 2 – магнитная модель нижнего слоя земной коры. I – Восточно-Европейская платформа; II – Предуральский краевой прогиб; III – Западно-Уральская мегазона; IV – Центрально-Уральская мегазона; V – Тагило-Магнитогорская мегазона; VI – Восточно-Уральская мегазона; VII – Западно-Сибирская плита.

Fig. 4. Ural part of the Granit geotraverse.

1 – seismic model of the distribution of longitudinal wave velocities [Kashubin, 2002]; 2 – magnetic model of the lower layer of the Earth's crust. I – East European Platform; II – Pre-Ural foredeep; III – Western Ural megazone; IV – Central Ural megazone; V – Tagil-Magnitogorsk megazone; VI – East Ural megazone; VII – West Siberian plate.

соответствует зонам разуплотнения вследствие интенсивной трещиноватости или даже тектонических разрывов. Построенная магнитная модель позволяет проследить эти глубинные зоны в пределах всего Среднеуральского региона.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное моделирование источников магнитных аномалий в трех слоях земной коры позволяет уточнить положение намагниченных массивов, в основном состоящих из базит-ультрабазитовых пород, некоторые из которых имеют крутые углы падения и приурочены к глубинным разломам; проследить их связь с базит-ультрабазитовыми поясами в гранитном слое и корневыми блоками в нижнем базальтовом слое земной коры. При сопоставлении источников в верхнем и нижнем слое коры можно заметить, что на платформе многие пояса имеют глубинные корни и расположены над выступами базальтового слоя. На Урале большинство массивов не имеет глубинных корней.

В верхнем слое земной коры в пределах ВЕП и Предуральского краевого прогиба ряд источников простираются в широтном направлении и погружаются на востоке до 12–14 км под уральские структуры. Их расположение под уралами в Западно-Уральской и Центрально-Уральской зонах позволяет надежно определить глубину до фундамента древней платформы. Построенные поверхности источников региональных аномалий в пределах ВЕП и западного склона Урала делают возможным уверенное определение расположения восточной границы докембрийской платформы в нижнем слое земной коры.

Выделенные протяженные зоны погружения кровли нижнего намагниченного слоя, вероятно, маркируют границы различных террейнов, образующих палеостроводужный сектор Уральской складчатой системы. Совпадение в нижнем слое земной коры этих зон и блоков пониженных скоростей вдоль геотраверса Гранит соответствует зонам разуплотнения, интенсивной трещиноватости или даже тектонических разрывов. Наиболее широкое погружение кровли нижнего слоя происходит к западу от Тюменско-Чудиновского разлома и, возможно, является восточным глубинным разделом между Уральской складчатой системой и Западно-Сибирской плитой.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

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

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

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

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

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

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Baranov V.A., 1957. New Method for Interpretation of Aeromagnetic Maps: Pseudo-Gravimetric Anomalies. *Geophysics* 22 (2), 225–441. <https://doi.org/10.1190/1.1438369>.

Bhattacharyya B.K., 1965. Two-Dimensional Harmonic Analysis as a Tool for Magnetic Interpretation. *Geophysics* 30 (5), 705–932. <https://doi.org/10.1190/1.1439658>.

Chursin A.V., Prutyay A.M., Fedorova N.V., 2008. Digital Map of the Anomalous Magnetic Field of the Northern, Middle and Southern Urals and Adjacent Territories of the East European and West Siberian Platforms. *Lithosphere* 6, 63–72 (in Russian) [Чурсин А.В., Прутьян А.М., Федорова Н.В. Цифровая карта аномального магнитного поля Северного, Среднего и Южного Урала и прилегающих территорий Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ // Литосфера. 2008. № 6. С. 63–72].

Druzhinin V.S., Karetin Yu.S., Dyakonova A.G., Kashubin S.N., Kashubina T.V., Kolmogorova V.V., Kukhmazov S.U., Parygin G.I., Osipov V.Yu., 2003. Integrated Geophysical Studies of the Middle Urals Lithosphere along the Artinsky Transect. *National Geology* 1, 65–73 (in Russian) [Дружинин В.С., Каретин Ю.С., Дьяконова А.Г., Кашубин С.Н., Кашубина Т.В., Колмогорова В.В., Кухмазов С.У., Парыгин Г.И., Осипов В.Ю. Комплексные геофизические исследования литосферы Среднего Урала по Артинскому профилю // Отечественная геология. 2003. № 1. С. 65–73].

Druzhinin V.S., Karetin Yu.S., Rybalka V.M., Khalevin N.I., 1981. New Data on the Deep Structure of the Urals (Based on the Results of Research on the Krasnouralsk DSS Profile). *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 258 (1), 173–176 (in Russian) [Дружинин В.С., Каретин Ю.С., Рыбалка В.М., Халевин Н.И. Новые данные о глубинном строении Урала (по результатам исследований на Красноуральском профиле ГСЗ) // Доклады АН СССР. 1981. Т. 258. № 1. С. 173–176].

Druzhinin V.S., Kashubin S.N., Valchak V.I., Kashubina T.V., Rybalka A.V., 1985. The Deep Structure of the Urals along the Meridional DSS Profile Nizhnyaya Tura – Orsk. *Soviet Geology* 1, 74–86 (in Russian) [Дружинин В.С., Кашубин С.Н., Вальчак В.И., Кашубина Т.В., Рыбалка А.В. Глубинное строение Урала по меридиональному профилю ГСЗ Нижняя Тура – Орск // Советская геология. 1985. № 1. С. 74–86].

Fedorova N.V., 2001. Models of the Earth's Crust Magnetization along the Geotraverse Granite. *Ural Geophysical Bulletin* 2, 88–93 (in Russian) [Федорова Н.В. Модели намагниченности земной коры по геотраверсу Гранит // Уральский геофизический вестник. 2001. № 2. С. 88–93].

Fedorova N.V., 2005. Modeling of the Magnetic Field Variation in Relation to the Origin of the Manchazh Secular Trend Anomaly. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 41 (5), 355–362.

Fedorova N.V., Muravyev L.A., Kolmogorova V.V., 2017a. Statistical Estimations of the Relationship of Regional Magnetic Anomalies with Seismic Borders of the Urals Region Nether-Polar Sector. *Ural Geophysical Bulletin* 1 (29), 47–51 (in Russian) [Федорова Н.В., Муравьев Л.А., Колмогорова В.В. Статистические оценки связи региональных магнитных аномалий с сейсмическими границами приполярного сектора Уральского региона // Уральский геофизический вестник. 2017. № 1 (29). С. 47–51]. <https://doi.org/10.25698/UGV.2017.1.12027>.

Fedorova N.V., Rublev A.L., 2019. Numerical Modeling of the Sources of Magnetic Anomalies in the South Urals Earth's Crust. *Russian Geology and Geophysics* 60 (11), 1310–1318. <https://doi.org/10.15372/RGG2019106>.

Fedorova N.V., Rublev A.L., Muravyev L.A., Kolmogorova V.V., 2017b. Magnetic Anomalies and Model of the Magnetization in the Earth's Crust of Circumpolar and Polar the Sectors of Ural Region. *Geophysical Journal* 39 (1), 111–122. DOI:10.24028/gzh.0203-3100.v39i1.2017.94014.

Igolkina G.V., 2002. Borehole Magnetometry in Investigation of Deep and Superdeep Boreholes. Publishing House of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, 221 p. (in Russian) [Иголкина Г.В. Скважинная магнитометрия при исследовании сверхглубоких и глубоких скважин. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 221 с.].

Ivanov K.S., Puchkov V.N., 2022. Structural-Formational Zoning of the Ural Fold Belt: An Overview and New Approach. *Geotectonics* 56, 747–780. <https://doi.org/10.1134/s0016852122060036>.

Kashubin S.N. (Ed.), 2002. Geotraverse GRANITE. East European Platform – Ural – West Siberia (Crustal Structure Based on Results of Complex Geological and Geophysical Studies). Ekaterinburg, 312 p. (in Russian) [Геотраверс «ГРАНИТ»: Восточно-Европейская платформа – Урал – Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / Ред. С.Н. Кашубин. Екатеринбург, 2002. 312 с.].

Kostiuchenko S.L., Egorkin A.V., Solodilov L.N., 1998. The Lithospheric Structure beneath the Urals: Evidence from Multiwave Deep Seismic Sounding. *Geotectonics* 32 (4), 3–18 (in Russian) [Костюченко С.Л., Егоркин А.В., Солодилов Л.Н. Особенности строения литосферы Урала по результатам многоволнового глубинного сейсмического зондирования // Геотектоника. 1998. № 4. С. 3–18].

Krutikhovskaya Z.A., Pashkevich I.K., Silina I.M., 1982. Magnetic Model and Structure of the Earth's Crust of the Ukrainian Shield. *Naukova Dumka*, Kiev, 216 p. (in Russian) [Крутиховская З.А., Пашкевич И.К., Силина И.М. Магнитная модель и структура земной коры Украинского щита. Киев: Наукова думка, 1982. 216 с.].

Main Results of Deep and Ultra-Deep Drilling in Russia, 2000. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 111 p. (in Russian) [Основные результаты глубокого и сверхглубокого бурения в России. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. 111 с.].

Martyshko P.S., Fedorova N.V., Akimova E.N., Gemaidinov D.V., 2014. Studying the Structural Features of the Lithospheric Magnetic and Gravity Fields with the Use of Parallel

Algorithms. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50, 508–513. <https://doi.org/10.1134/S1069351314040090>.

Martyshko P.S., Fedorova N.V., Byzov D.D., 2021a. Computer Technology for Separating Lithospheric Magnetic Anomalies. In: *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Proceedings of 20th International Conference* (May 11–14, 2021). EAGE, p. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521087>.

Martyshko P.S., Fedorova N.V., Rublev A.L., 2021b. Numerical Algorithms for Structural Magnetometry Inverse Problem Solving. *Russian Journal of Earth Sciences* 21, ES3002. <https://doi.org/10.2205/2021ES000766>.

Martyshko P.S., Ladovsky I.V., Fedorova N.V., Byzov D.D., Tsidav A.G., 2016. Theory and Methods of Complex Interpretation of Geophysical Data. Publishing House of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, 94 p. (in Russian) [Мартышко П.С., Ладовский И.В., Федорова Н.В., Бызов Д.Д., Цидав А.Г. Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2016. 94 с.].

Mazur V.B. (Ed.), 1996. Tyumen Superdeep Borehole (Interval 0–7502 m): Drilling and Research Results. Collection of Scientific Papers of the Meeting (February 21–23, 1995). KamNIIKIGS, Perm, 376 p. (in Russian) [Тюменская сверхглубокая скважина (интервал 0–7502 м): Результаты бурения и исследования: Сборник научных докладов совещания (21–23 февраля 1995 г.) / Ред. В.Б. Мазур. Пермь: КамНИИКИГС, 1996. 374 с.].

Moiseenko U.I., Smyslov A.A., 1986. Temperature of the Earth's Subsurface. Nedra, Leningrad, 180 p. (in Russian) [Мойсеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. Л.: Недра, 1986. 180 с.].

Muravyev L., Byzov D., Fedorova N., 2016. Approximation of Anomalous Magnetic Field Using Array of Singular Sources (Magnetized Rods). In: *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Proceedings of 15th International Conference* (May 10–13, 2016, Kiev, Ukraine). EAGE, p. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600520>.

Orlov V.P., Laverov N.P. (Eds), 1998. Kola Superdeep. Scientific Results and Research Experiences. Tekhnoneftegaz, Moscow, 260 p. (in Russian) [Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыты исследования / Ред. В.П. Орлов, Н.П. Лаверов. М.: Технонефтегаз, 1998. 260 с.].

Orlyuk M.A., Romenets A.A., Bakarzhieva M.I., Marchenko A.V., Lebed T.V., 2014. Study of Dynamics of Geomagnetic Field at the Area of Chernigov Regional Anomaly. *Bulletin of the Perm University* 3 (24), 48–59 (in Russian) [Орлюк М.А., Роменец А.А., Бакаржиева М.И., Марченко А.В., Лебедь Т.В. Исследование динамики геомагнитного поля в районе Черниговской региональной аномалии // Вестник Пермского университета. 2014. Т. 3. № 24. С. 48–59]. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.24.48>.

Pechersky D.M. (Ed.), 1994. A Petromagnetic Model of the Lithosphere. *Naukova Dumka*, Kiev, 175 p. (in Russian) [Петромагнитная модель литосферы / Ред. Д.М. Печерский. Киев: Наукова Думка, 1994. 175 с.].

Pechersky D.M., Orlyuk M.I., Pashkevich I.K., 2006. Magnetism of the Lower Continental Crust: Development of

Research Results and Ideas of Z.A. Krutikhovskaya. *Geophysical Journal* 28 (5), 40–51 (in Russian) [Печерский Д.М., Орлюк М.И., Пашкевич И.К. Магнетизм низов земной коры континентов: развитие результатов исследования и идей З.А. Крутиховской // Геофизический журнал. 2006. Т. 28. № 5. С. 40–51].

Petrophysical Methods of Searching and Studying Iron Ore Deposits in the Urals, 1988. Guidelines. Sverdlovsk, 228 p. (in Russian) [Петрофизические методы поисков и изучения железорудных месторождений на Урале: Методические рекомендации. Свердловск, 1988. 228 с.].

Puchkov V.N., 2010. *Geology of the Urals and Cisurals (Topical Issues of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny)*. DizaynPoligrafServis, Ufa, 280 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.].

Rylkov S.A., Rybalka A.V., Ivanov K.S., 2013. Deep Structure and Metallogeny of the Urals: The Comparison of Deep Structure of Southern, Middle and Polar Urals. *Lithosphere* 1, 3–16 (in Russian) [Рыльков С.А., Рыбалка А.В., Иванов К.С.

Глубинное строение и металлогения Урала: сопоставление глубинной структуры Южного, Среднего и Полярного Урала // Литосфера. 2013. № 1. С. 3–16].

Sokolov V.B., 1996. Results and Problems of Studying the Earth's Crust of the Urals Using the Method of Reflected Waves. In: *Deep Structure and Development of the Urals*. Nauka, Ekaterinburg, p. 111–123 (in Russian) [Соколов В.Б. Результаты и проблемы изучения земной коры Урала методом отраженных волн // Глубинное строение и развитие Урала. Екатеринбург: Наука, 1996. С. 111–123].

State Geological Map of the Russian Federation, 2011. Urals Series. Scale of 1:1000000. Sheet O-41 (Ekaterinburg). VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Уральская серия. Масштаб 1:1000000. Лист О-41 (Екатеринбург). СПб.: ВСЕГЕИ, 2011].

State Geological Map of the Russian Federation, 2015. Urals Series. Scale of 1:1000000. Sheet O-40 (Perm). VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Уральская серия. Масштаб 1:1000000. Лист О-40 (Пермь). СПб.: ВСЕГЕИ, 2015].