

## Магнитные аномалии и модель распределения намагниченности в земной коре приполярного и полярного секторов Уральского региона

© Н. В. Федорова, А. Л. Рублев, Л. А. Муравьев,  
В. В. Колмогорова, 2017

Институт геофизики РАН, Уральское отделение, Екатеринбург, Россия

Поступила 7 декабря 2016 г.

Розглянуто результати вивчення структурних особливостей аномального магнітного поля в межах приполярного і полярного секторів Уральського регіону. Виділено аномалії від різних шарів земної кори і побудовано карти аномальних полів. У межах осадових басейнів карту локальних аномалій використано для картування базит-ультрабазитових масивів у верхніх частинах фундаменту. Проведено інтерпретацію регіональних магнітних аномалій. Модель будови земної кори та її параметри ґрунтуються на результатах досліджень уздовж профілів ГСЗ. Зіставлення розрізів глибинної будови, отриманих незалежними геофізичними методами за сейсмічними і магнітними даними, дало змогу розділити консолідовану земну кору на два шари з різними магнітними властивостями. Верхній шар кристалічної земної кори не робить помітного внеску в регіональне магнітне поле і характеризується низькою середньою намагніченістю (менш як 0,3 А/м). У межах цього шару виділено локальні намагнічені джерела. Нижній шар кори намагнічений значно сильніше. За результатами двовимірного моделювання намагніченість цього базитового шару кори сягає 3—4 А/м. Середня глибина до верхньої поверхні шару становить 18—20 км. Отримані параметри використано для тривимірного моделювання. Досліджено модель з однорідною намагніченістю, що спрямована за сучасним геомагнітним полем. Для всього регіону побудовано верхню поверхню намагніченого шару, що дало змогу уточнити рельєф базитового шару в просторі між профілями ГСЗ. Визначено, що на Північному і Полярному Уралі в земній корі відбувається значне занурення базитового шару до глибини 26—30 км.

**Ключові слова:** магнітна аномалія, намагніченість, земна кора, Уральський регіон.

**Введение.** В научном мире более полувека широко обсуждаются вопросы о том, какие слои литосферы могут создавать региональные магнитные аномалии, как изменяются магнитные свойства пород с глубиной, какие типы магнитных минералов наиболее распространены в нижней коре и верхней мантии. Одни исследователи придерживаются мнения, что источники магнитных аномалий расположены только в верхнем "гранитном" слое, другие допускают, что в нижнем "базальтовом" слое и даже в мантии до глубин более 100 км. Большой вклад в исследование природы магнитных аномалий был внесен украинскими магнитологами под руководством Зинаиды Александровны Крутиховской.

Комплексный подход к проблеме позволил З.А. Крутиховской получить убедительные до-

казательства того, что региональные магнитные аномалии созданы глубинными источниками, а не только суммарным полем от приповерхностных источников. Для довольно большой территории Восточно-Европейской платформы, Украинского и Балтийского кристаллических щитов проведено изучение магнитных свойств пород и для представительной коллекции образцов получена сравнительно небольшая величина средней намагниченности верхнего слоя — 0,3 А/м [Крутиховская, Пашкевич, 1976]. Следует отметить, что столь масштабные работы по определению магнитных характеристик фундамента больше не проводились. Для нижнего "базальтового" слоя получена оценка намагниченности от 2 до 4 А/м. Авторы исходили из предположения, что нижний слой земной коры плат-

форм содержит в основном базиты и ультрабазиты. Была выявлена статистическая связь между интенсивностью региональных аномалий и мощностью земной коры щитов и сделан вывод, что базальтовый слой обуславливает создание региональных аномалий [Крутиховская, 1976].

В 1976 и 1982 гг. в Киеве при непосредственном участии З. А. Крутиховской были организованы международные совещания, материалы которых опубликованы в монографиях [Магнитные ..., 1976; Аномалии ..., 1981]. З. А. Крутиховской и коллегами была издана монография [Крутиховская и др., 1982], посвященная вопросам построения магнитной модели Украинского щита. Большой вклад в дальнейшее исследование вопросов земного магнетизма и построения магнитной модели литосферы Европы внесли ученики и коллеги Зинаиды Александровны [Пашкевич и др., 1990; 1994; 2006; Орлюк, 2000]. Эти работы, а также другие многочисленные публикации З. А. Крутиховской до сих пор актуальны и содержат много полезной информации для геофизиков, занимающихся вопросами изучения глубинного строения литосферы.

Привлечение большого коллектива специалистов и широкое обсуждение проблем выделения региональных аномалий, построения магнитных моделей земной коры, петромагнитные исследования, организованные З. А. Крутиховской, инициировали проведение исследований литосферных магнитных аномалий в различных регионах, в том числе на Урале. Под руководством В. А. Шапиро и А. В. Чурсина была проведена высокоточная магнитная съемка по протяженным профилям, пересекающим Уральскую складчатую систему [Шапиро и др., 1982; Чурсин и др., 2008]. Под руководством А. В. Цирульского разработан новый метод интерпретации [Цирульский и др., 1980], который нашел широкое применение для построения магнитных моделей вдоль профилей, в том числе по профилю Гранит, проходящему через Украину и Россию, пересекающему Восточно-Европейскую платформу, Урал и Западно-Сибирскую плиту [Федорова, 2001; Геотраверс ..., 2002].

В настоящее время в геофизике при изучении глубинного строения происходит переход от построения двумерных разрезов вдоль профилей к созданию трехмерных моделей крупных регионов. Начальная модель основана на информации о разрезах по региональным сейсмическим профилям и геотраверсам. В работах по исследованию глубинного строения Уральской складчатой системы, Тимано-Печорской и Западно-Сибирской плит проведено изучение

связи аномального магнитного поля с сейсмическими границами, построенными методом двумерной сейсмической томографии [Федорова и др., 2010, 2013; Колмогорова, Федорова, 2015]. В результате сделаны выводы, что рельеф границ кристаллического фундамента и подошвы коры не проявляется в магнитном поле. По магнитным свойствам земную кору можно разделить на два слоя. В верхнем слое значительной намагниченностью обладают отдельные источники, которые могут быть выделены по локальным аномалиям. Однако в региональное магнитное поле верхний слой кристаллической земной коры не вносит заметный вклад, что свидетельствует о низкой средней намагниченности пород. Нижний слой коры намагничен значительно сильнее. По результатам двумерного моделирования получено значение намагниченности нижнего ("базитового") слоя коры, достигающее  $3 \text{ А/м}$ , а средняя глубина составляет  $20 \text{ км}$ . Рельеф границы, разделяющей слои, достаточно хорошо совпадает с положением скоростного уровня  $6,5 \text{ км/с}$  на соответствующих сейсмических разрезах [Федорова, Колмогорова, 2013].

Полученные результаты распределения намагниченности в слоях земной коры и их оценка соответствуют выводам, сделанным для Украинского и Балтийского щитов З. А. Крутиховской. Петрофизические исследования, проведенные за последние десятилетия в глубоких и сверхглубоких скважинах (вплоть до глубины  $11 \text{ км}$ ), также подтверждают выводы о том, что верхний слой кристаллической коры состоит, в основном, из слабомагнитных пород. Сильномагнитные породы (намагниченность  $2\text{—}10 \text{ А/м}$ ) встречались в скважинах в виде тонких пластов  $20\text{—}300 \text{ м}$  [Иголкина, 2002].

В настоящей статье приведены результаты исследования аномального магнитного поля литосферы приполярного и полярного секторов Уральского региона. С помощью современных компьютерных технологий, разработанных в Институте геофизики УрО РАН, выделены аномалии от источников, расположенных в верхних слоях земной коры, и региональная составляющая геомагнитного поля, построена объемная магнитная модель "базитового" слоя.

**Методика выделения локальных аномалий и региональной составляющей.** Территория исследования расположена в пределах трапеции  $48\text{—}72^\circ \text{ в. д.}$  и  $60\text{—}68^\circ \text{ с. ш.}$  В тектоническом отношении этот регион охватывает северо-восточную часть Восточно-Европейской платформы, Тимано-Печорскую плиту, Поляр-

ный и Приполярный Урал и прилегающий с востока северный сегмент Западно-Сибирской плиты (рис. 1).

Большая часть исследуемой территории покрыта осадочным чехлом, мощность которого в пределах впадин достигает 8—12 км. Наблюдаемое магнитное поле имеет интегральный характер и содержит составляющие от всех источников, расположенных в верхней литосфере. Для выделения аномалии от слоев земной коры была использована методика, основанная на повысотных пересчетах [Мартышко, Пруткин, 2003]. Задача выделения эффекта от локальных источников, расположенных в горизонтальном слое от земной поверхности до некоторой глубины  $H$ , решалась в несколько этапов. На первом этапе наблюдаемое магнитное поле с помощью численного метода пересчитывалось вверх на высоту  $H$ .

При удалении от локальных источников интенсивность аномалий значительно снижается. С увеличением расстояния  $R$  от источника маг-

нитное поле затухает по закону  $-1/R^3$ . Если источник вблизи поверхности создает магнитную аномалию 500 нТл, то на высоте 5 км интенсивность магнитной аномалии будет меньше 4 нТл, т. е. интенсивность аномалий по величине становится сравнима с погрешностью наблюдений. Пересчет на высоту 5 км не избавляет полностью от эффекта локальных источников, горизонтальные размеры которых значительно больше 5 км. Это наглядно продемонстрировано в работах [Крутиховская и др., 1982; Орлюк та ін., 2013] по результатам разновысотных магнитных съемок в районах с интенсивными локальными аномалиями (Курск, Кривой Рог и др.).

Для того чтобы окончательно избавиться от влияния источников в верхнем слое, пересчитанное вверх поле аналитически продолжалось вниз на глубину  $H$ . Поскольку задача пересчета поля вниз относится к классу некорректно поставленных задач, то при вычислениях использовался метод с применением регуляризации. На следующем этапе поле пересчитыва-

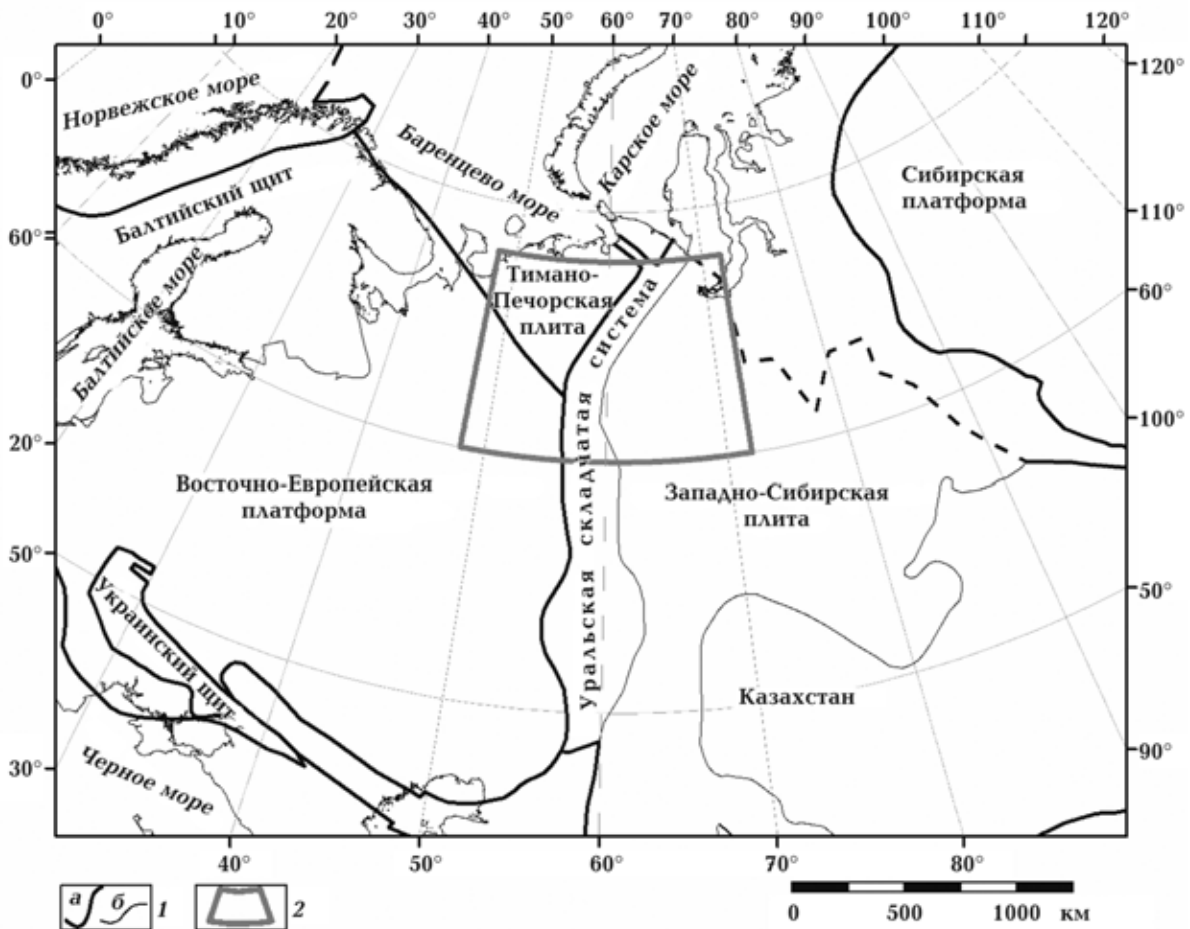


Рис. 1. Фрагмент тектонической карты Северной Евразии [Милановский, 2006]: 1 — границы древних платформ, метаплатформ, подвижных поясов (а) и тектонических структур в их пределах (б); 2 — контур территории исследований.

лось вновь 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. 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 приведено в работах [Мартышко и др., 2012, 2014]. Результаты применения разработанной технологии и карты аномалий от различных слоев земной коры для исследуемой территории опубликованы в статьях [Федорова и др., 2015; Fedorova et al., 2015]. Эти данные использованы при построении прогнозной карты базит-ультрабазитовых массивов, распо-

ложенных под осадочными породами в верхней части фундамента до глубины 5 км [Федорова, 2016]. С применением разработанной методики были также выделены аномалии от намагниченных массивов в более глубоких слоях фундамента до глубины  $H = 20$  км. На рис. 2 приведена карта аномального магнитного поля и аномалии, созданные локальными источниками в верхнем слое до глубины 5 км, в слое от 5 до 20 км, а также региональная составляющая.

**Региональные магнитные аномалии.** Карта региональной составляющей приведена на рис. 2, *г* и 4, *а*. Интенсивность аномалий изменяется от  $-250$  до  $+250$  нТл. В западной части карты наиболее заметной особенностью является крупная отрицательная аномалия, занимающая почти половину территории Тимано-Печорской плиты. Ее поперечный размер достигает 350 км и интенсивность  $-250$  нТл. В южной части площади эта аномалия сливается с цепочкой отрицательных аномалий, простирающихся в пределах Уральской складчатой системы. Несмотря на то, что в пределах Уральских гор близко к поверхности Земли находятся кристаллические породы (габбро, серпентиниты, диориты), которые создают интенсивные локальные положительные аномалии, длинноволновая часть магнитного поля состоит из отрицательных аномалий. Уральские горы про-

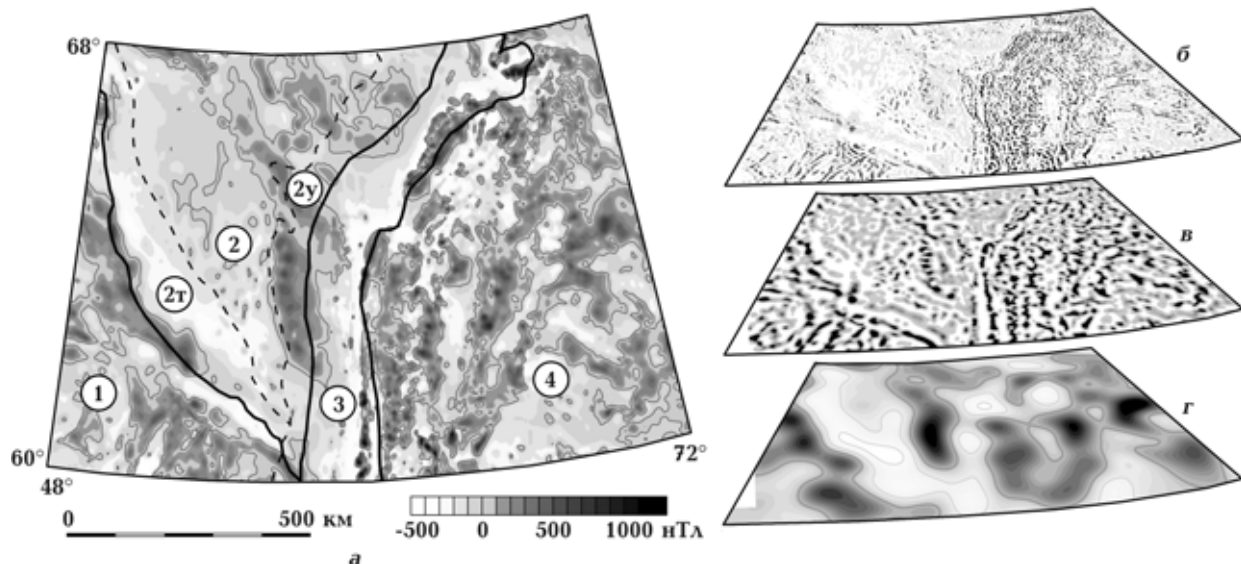


Рис. 2. Карта аномального магнитного поля (*а*). Результаты разделения аномалий от источников в различных слоях земной коры: локальные аномалии от верхнего слоя до глубина 5 км (*б*); аномалии от источников, расположенных в слое на глубине от 5 до 20 км (*в*); региональные аномалии (*г*). Карты приведены в перспективной проекции. Границы тектонических структур показаны черными линиями: 1 — Восточно-Европейская платформа, 2 — Тимано-Печорская плита, 2т — Тиманский кряж, 2у — Предуральский краевой прогиб, 3 — Уральская складчатая система, 4 — Западно-Сибирская плита.

тягиваются более чем на 2300 км и разделены на Южный, Средний, Северный, Полярный и Приполярный сектора. Ранее отрицательные региональные аномалии были выделены над Южным, Средним и Северным хребтами Уральских гор [Федорова и др., 1989; Мартышко и др., 2012]. Как видно на карте (см. рис. 2, г), наличие отрицательных региональных аномалий магнитного поля характерно и для Приполярного и Полярного секторов Урала, что, безусловно, свидетельствует о сходстве особенностей глубинного строения всех секторов Уральского орогена.

Положительные аномалии наблюдаются над восточной частью Тимано-Печорской плиты, причем наиболее интенсивная Ильчевская аномалия простирается с севера на юг и частично охватывает Предуральский прогиб и западный край Приполярного Урала. Цепочки положительных аномалий наблюдаются вдоль края Восточно-Европейской платформы и над Западно-Сибирской плитой.

**Моделирование источников длинноволновых магнитных аномалий.** При интерпретации магнитных аномалий, как правило, используют модели, состоящие из ограниченных в пространстве намагниченных блоков или модели с дискретным слоисто-блоковым распределением магнитных образований в земной коре [Нагайцева, Запорожцева, 1984; Пашкевич и др., 1990, 2006, 2014; Орлюк, 2000; Орлюк, Пашкевич, 2012 и др.]. При интерпретации в моделях часто не учитывают влияние фоновой намагниченности слоев земной коры, поэтому возникают сложности с объяснением источников отрицательных магнитных аномалий.

Как показали исследования, верхний слой кристаллической земной коры характеризуется низкой средней намагниченностью и не вносит заметного вклада в региональное магнитное поле. Поэтому в пределах этого слоя можно пренебречь фоновой намагниченностью. Нижний "базальтовый" слой коры намагничен значительно сильнее. По результатам двумерного моделирования мы оценили, что в среднем намагниченность этого слоя достигает 3—4 А/м, а средняя глубина составляет 20 км. Верхняя граница слоя достаточно хорошо совпадает с положениями скоростного уровня 6,5 км/с на соответствующих сейсмических разрезах профилей ГСЗ: Красноленинский, Агат-2, Глобус, Кварц, Рубин [Федорова, Колмогорова, 2013]. Эти результаты авторы настоящей статьи использовали для трехмерной интерпретации региональной составляющей магнитного поля и восстановления рельефа верхней границы "базитово-

го" слоя методом локальных поправок [Мартышко и др., 2010]. Рассмотрена модель с однородной намагниченностью, направленной по современному геомагнитному полю.

Введем декартову прямоугольную систему координат с осью  $OZ$ , направленной вниз, где плоскость  $XOY$  совпадает с земной поверхностью. Для двухслойной модели вертикальная составляющая напряженности магнитного поля в точке  $(x, y, 0)$  на поверхности Земли вычисляется по формуле

$$Z(x, y, 0) = \frac{\Delta I}{4\pi} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{z(x, y)}{\left( (x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2(x, y) \right)^{3/2}} - \frac{H}{\left( (x-x')^2 + (y-y')^2 + H^2(x, y) \right)^{3/2}} \right] \times dx dy, \quad (1)$$

где  $z(x, y)$  — уравнение поверхности  $S$ , разделяющей верхний и нижний слой;  $H$  — горизонтальная асимптота;  $\Delta I = I_2 - I_1$  — скачок намагниченности на границе слоев. Предполагается, что оба слоя имеют вертикальную намагниченность.

Для решения этого уравнения и нахождения поверхности  $z(x, y)$  была разработана программа, основанная на модифицированном методе локальных поправок [Мартышко и др., 2010]. Метод основан на предположении о том, что на изменение значения поля в некоторой точке наибольшее влияние оказывает изменение ближайшей к данной точке части поверхности  $S$ , которая представляет собой границу между двумя слоями с различными физическими свойствами. Первоначально такой метод был предложен для приближенного решения нелинейной обратной структурной задачи гравиметрии [Пруткин, 1986].

Разработан итерационный способ нахождения границы  $S$ . На каждом шаге делается попытка уменьшить разность между заданными и приближенными значениями поля в данном узле  $(x, y)$  лишь за счет изменения значения искомой функции  $z(x, y)$  в этом же узле. Дискретизация уравнения (1) приводит к следующей

системе нелинейных уравнений:

$$c \sum_i \sum_j K_{i_0 j_0} (z_{ij}) = U_{i_0 j_0}, \quad (2)$$

где  $c$  — весовой коэффициент кубатурной формулы,  $U_{i_0 j_0} = \Delta Z(x_{i_0}, y_{j_0}, 0)$  — левая часть уравнения (1),  $z_{ij} = z(x_i, y_j)$ ,  $K_{i_0 j_0}(z_{ij}) = K(x_{i_0}, y_{j_0}, x_i, y_j, z_{ij})$  — подинтегральное выражение в (1).

В результате получена итерационная формула для нахождения  $z_{ij}^{n+1}$ :

$$\left(z_{ij}^{n+1}\right)^2 = \frac{\left(z_{ij}^n\right)^2}{1 + \alpha \left(z_{ij}^n\right)^2 \left(U_{ij} - U_{ij}^n\right)}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — параметр регуляризации,  $(z_{ij}^n)$  — значения неизвестной функции  $z(x, y)$ ,  $n$  — номер итерации.

Предложенный итерационный метод не использует нелинейную минимизацию, что позволяет быстро решать объемные задачи. Так, исходное поле, заданное на сетке  $100 \times 100$  точек, восстанавливается с относительной низкой погрешностью (равной сотым долям процента) за 300 итераций и процесс вычислений занимает несколько минут.

Результаты предварительной интерпретации региональных аномалий Тимано-Печорского региона приведены в работе [Федорова и др., 2013]. Глубина до намагниченного нижнего слоя коры варьирует от 14 до 30 км. Полученный результат хорошо совпадает с результатами двумерного моделирования для профилей ГСЗ. В районе Тимано-Печорской региональной отрицательной магнитной аномалии граница намагниченного слоя в нижней коре погружается до 24—30 км, а на северо-восточной окраине ВЕП поднимается до 15—16 км. Максимальный подъем до 14 км происходит в пределах Предуральского прогиба в зоне Ильчевской положительной аномалии.

При выполнении магнитных съемок в основном используется аппаратура, измеряющая абсолютные значения модуля геомагнитной индукции  $T$ , поэтому аномальное магнитное поле литосферы представлено модульными значениями  $\Delta T_a$ . Поскольку  $\Delta T_a$  не гармоническая функция, для корректного применения метода решения трехмерной обратной задачи магнитометрии (1) требуется провести преобразование и определить составляющую магнитного поля

$Z_v$  вертикально намагниченных источников.

Разработан алгоритм вычисления вертикальной составляющей аномального магнитного поля по распределению его абсолютного значения. Преобразование основано на аппроксимации аномалий модуля магнитной индукции  $\Delta T_a$  набором сингулярных источников и последующем вычислении вертикальной компоненты магнитного поля  $Z$  от подобранного распределения источников. В качестве модельных источников использован набор стержней, однородно намагниченных вдоль своей оси. Направление нормального поля для такого преобразования задавалось в зависимости от географических координат по модели главного геомагнитного поля IGRF 1965 г. Проведено исследование применимости различных методов нелинейной оптимизации для решения данной задачи. Алгоритм реализован с помощью технологии параллельных вычислений на графическом процессоре NVidia [Бызов, Муравьев, 2015].

Для исследуемой территории, включающей Приполярный и Полярный Урал, выполнена аппроксимация магнитного поля и определена вертикальная составляющая  $Z$ . Затем выполнены вычисления компоненты  $Z_v$  при вертикальной намагниченности всех источников (рис. 3). В геофизической литературе такое преобразование часто называют приведением к полюсу [Магниторазведка, 1990]. Несмотря на то, что исследование проводится для приполярного региона, направление геомагнитного поля близко к вертикальному (наклонение  $74$ — $80^\circ$ ), однако расхождения между аномалиями  $\Delta T_a$  и  $Z_v$  значительные. Эпицентры аномалий  $Z_v$  смещены к северо-северо-востоку относительно эпицентров аномалий  $\Delta T_a$ , причем расстояние достигает порой  $20$ — $40$  км.

Для территории приполярного и полярного секторов Уральского региона результат моделирования региональных аномалий проведен для прямоугольного участка с размерами  $800 \times 800$  км, его контуры показаны рис. 4, а. Модель поверхности "базитового" слоя, вычисленная для намагниченности  $3$  А/м, приведена на рис. 4, б.

Рельеф поверхности изменяется от 14 до 30 км. На восточной окраине Тимано-Печорской плиты в пределах Предуральского краевого прогиба происходит подъем до 14 км. Под Уральскими горами наблюдается резкое погружение границы, имеющее форму протяженного оврага, и достигает глубины 26 км на Приполярном Урале и 30 км на Полярном Урале. В литосфере Западной Сибири наблюдаются бо-

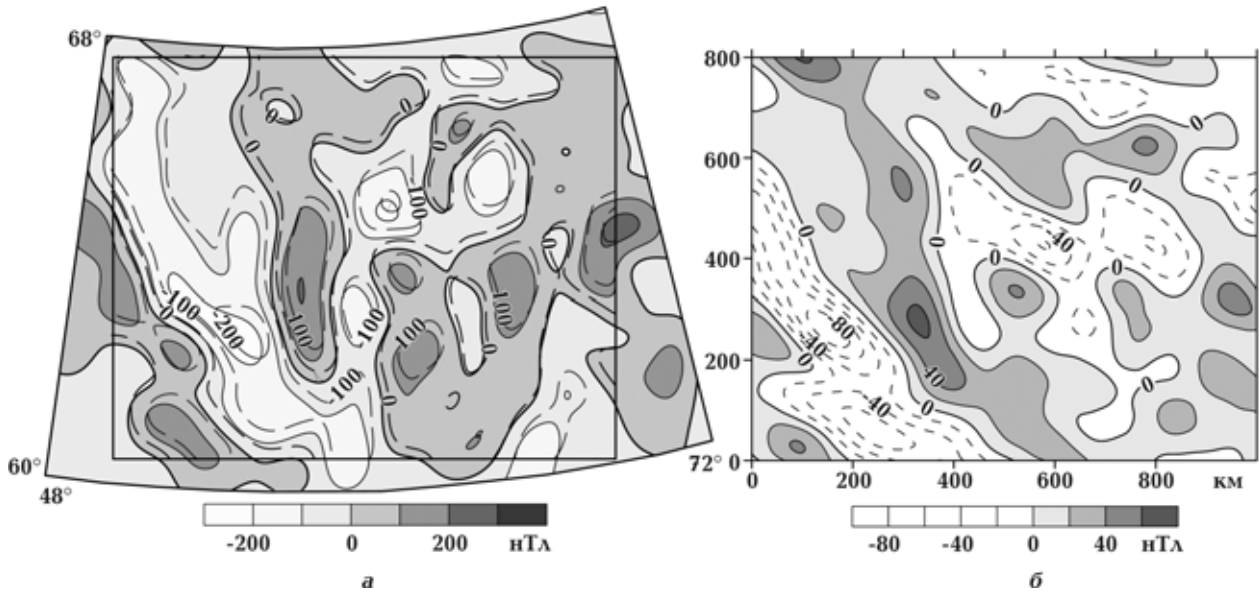


Рис. 3. Результат определения вертикальной компоненты  $Z_v$  региональных магнитных аномалий, изолинии приведены через 100 нТл,  $\Delta T_a$  — сплошными линиями,  $Z_v$  — пунктирными линиями (а); разность  $\Delta T_a - Z_v$ , изолинии приведены через 20 нТл (б).

лее плавные изменения рельефа, чем на Урале, и глубина варьирует от 14 до 27 км.

Главные носители намагниченности глубинных пород — минералы титаномагнетитового ряда и, прежде всего, магнетит. Поэтому нижняя граница магнитоактивного слоя литосферы может быть ограничена по изотерме Кюри 580 °С или по границе Мохо в тех районах, где температура у подошвы земной коры ниже тем-

пературы Кюри магнетита [Пашкевич и др., 1994; Печерский и др., 2006]. Однако оценить мощность магнитоактивного слоя по геотермическим данным трудно из-за достаточно редкой и неравномерной сети измерений теплового потока и отсутствия данных в северной части территории. Вследствие неоднозначности решения обратной задачи геотермии получены существенно различающиеся оценки температурных

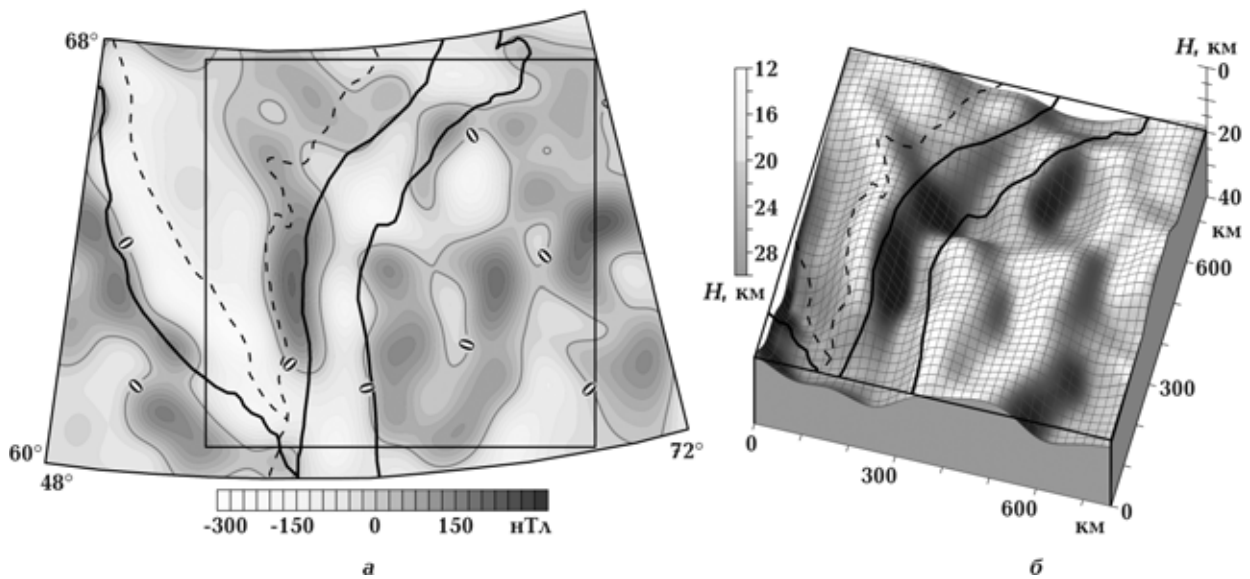


Рис. 4. Карта региональных магнитных аномалий (а) и результат моделирования поверхности кровли нижнего намагниченного слоя земной коры; границы тектонических структур показаны на горизонтальной поверхности на глубине 20 км (б).

условий в земной коре Уральского региона, причем разница в оценках достигает 20—30 км [Федорова, Колмогорова, 2013]. Мощность земной коры изменяется в больших пределах от 35 до 57 км, в среднее значение около 40 км. По результатам аппроксимации магнитного поля не выделены аномалии, которые могли бы соответствовать рельефу границы Мохо. Причем над значительным увеличением мощности земной коры в пределах Уральской складчатой системы выделены отрицательные региональные аномалии. Скорее всего, породы вблизи подошвы земной коры имеют слабые магнитные свойства. Поэтому в этой модели намагниченный слой ограничен снизу горизонтальной плоскостью, расположенной на глубине 40 км.

**Выводы.** Региональные магнитные аномалии содержат важную информацию о глубинном строении земной коры. Наиболее контрастными границами слоев в литосфере по упругим физическим свойствам, скорости сейсмических волн и плотности являются граница между осадочным слоем и кристаллическим фундаментом, а также граница Мохо, отделяющая земную кору и верхнюю мантию. Внутри коры изменения этих параметров при переходе от

слоев, содержащих преимущественно кислые породы, к слоям, состоящим из основных и ультраосновных пород, могут быть незначительными. При этом контраст магнитных свойств может достигать больших значений. Поэтому интерпретация аномалий регионального магнитного поля позволяет получить рельеф границы намагниченного слоя внутри коры. Поскольку для профилей ГСЗ на разрезах земной коры граница намагниченного слоя достаточно хорошо совпадает с положением скоростного уровня 6,5 км/с, то можно сделать вывод, что полученные результаты дают пространственное представление о рельефе границы нижнего высокоскоростного и более плотного "базитового" слоя земной коры.

Вдоль всего Центрального Уральского антиклинория выделены отрицательные региональные магнитные аномалии. Согласно результатам их интерпретации на Приполярном и Полярном Урале в земной коре происходит значительное погружение "базитового" слоя до глубины 26—30 км.

При построении моделей использовались компьютерные технологии, разработанные в Институте геофизики УрО РАН.

### Список литературы

- Аномалии геомагнитного поля и глубинное строение земной коры.* Под ред. З.А. Крутиховской. Киев: Наук. думка, 1982. 172 с.
- Бызов Д.Д., Муравьев Л.А.* Вычисление вертикальной компоненты геомагнитного поля с помощью аппроксимации его модуля системой намагниченных отрезков. *Урал. геофиз. вестник.* 2015. № 2(26). С. 24—28.
- Геотраверс "Гранит": Восточно-Европейская платформа—Урал—Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований.* Под ред. С.Н. Кашубина. Екатеринбург: Изд. ИРА УТК, 2002. 312 с.
- Иголкина Г.В.* Скважинная магнитометрия при исследовании сверхглубоких и глубоких скважин. Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 2002. 215 с.
- Колмогорова В.В., Федорова Н.В.* Результаты моделирования глубинного строения земной коры уральской части геотраверса Кварц. *Геофизика.* 2015. № 6. С. 67—82.
- Крутиховская З.А.* Проблема создания земной коры древних щитов. *Геофиз. сб.* 1976. № 73. С. 3—29.
- Крутиховская З.А., Пашкевич И.К.* Намагниченность земной коры древних щитов и региональные магнитные аномалии. В кн.: *Магнитные аномалии земных глубин.* Киев: Наук. думка, 1976. С. 108—125.
- Крутиховская З.А., Пашкевич И.К., Силина И.М.* Магнитная модель и структура земной коры Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1982. 216 с.
- Магнитные аномалии земных глубин.* Отв. ред. С.И. Субботин. Киев: Наук. думка, 1976. 232 с.
- Магниторазведка.* Справочник геофизика. Под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. Москва: Недра, 1990. 470 с.
- Мартышко П.С., Пруткин И.А.* Технология разделения источников гравитационного поля по глубине. *Геофиз. журн.* 2003. Т. 25. № 3. С. 30—34.
- Мартышко П.С., Рублев А.Л., Пьянков В.А.* Применение метода локальных поправок для струк-



- турных задач магнитометрии. *Геофизика*. 2010. № 4. С. 3—8.
- Мартышко П. С., Федорова Н. В., Акимова Е. Н., Гемайдинов Д. В. Изучение структурных особенностей гравитационного и магнитного полей литосферы с использованием параллельных алгоритмов. *Физика Земли*. 2014. № 4. С. 50—55. doi: 10.7868/S0002333714040097.
- Мартышко П. С., Федорова Н. В., Гемайдинов Д. В. Применение параллельных алгоритмов вычислений при изучении структуры аномально-гравитационного поля Урала. *Докл. АН*. 2012. Т. 446. № 2. С. 201—203.
- Милановский Е. Е. Тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий. М-б 1 : 4000 000. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2006.
- Нагайцева Л. С., Запорожцева И. В. Геомагнитная модель земной коры европейского северо-востока СССР. *Труды Института геологии Коми филиала Академии наук СССР*. 1984. Вып. 47. С. 46—49.
- Орлюк М. И. Пространственные и пространственно-временные магнитные модели разноранговых структур литосферы континентального типа. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 6. С. 148—165.
- Орлюк М. И., Марченко А. В., Бакаржієва М. І. Курська магнітна аномалія: аналіз аномального магнітного поля за даними наземних, стратосферних та супутникових зйомок. Зб. наук праць: *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. Київ, 2013. С. 107—116.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Глубинные источники региональных магнитных аномалий: тектонотипы и связь с трансформными разломами. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 224—234.
- Пашкевич И. К., Марковский В. С., Орлюк М. И., Елисеєва С. В., Мозговая О. П., Таращан С. А. Магнитная модель литосферы Европы. Киев: Наук. думка, 1990. 168 с.
- Пашкевич И. К., Орлюк М. И., Елисеєва С. В., Бакаржієва М. И., Лебедь Т. В., Роменец А. А. 3D магнитная модель земной коры Украинского щита и его петролого-тектоническая интерпретация. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 5. С. 7—18.
- Пашкевич И. К., Печерский Д. М., Городницкий А. М., Валяшко Г. М., Верба В. В., Витте Л. В., Волк В. Э., Геншафт Ю. С., Гордун В. М., Елисеєва С. В., Лукьянов С. В., Лыков А. В., Марковский В. С., Орлюк М. И., Попов К. В., Щербаков В. П. Петромагнитная модель литосферы. Киев: Эссе, 1994. 175 с.
- Пашкевич И. К., Шаров Н. В., Савченко А. С., Старостенко В. И. Трехмерная геолого-геофизическая модель литосферы центральной части Карельского кратона. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 6. С. 58—78.
- Печерский Д. М., Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Магнетизм низов земной коры континентов: развитие результатов исследования и идей З. А. Крутиховской. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 5. С. 40—52.
- Пруткин И. Л. О решении трехмерной обратной задачи гравиметрии в классе контактных поверхностей методом локальных поправок. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1986. № 1. С. 67—77.
- Федорова Н. В. Картирование базит-ультрабазитовых массивов в верхних горизонтах фундамента приполярного сектора Евразии. *Урал. геофиз. вестник*. 2016. № 1(27). С. 48—52.
- Федорова Н. В. Модели намагниченности земной коры по геотраверсу Гранит. *Урал. геофиз. вестник*. 2001. № 2. С. 88—93.
- Федорова Н. В., Колмогорова В. В. Модели распределения намагниченности и скорости продольных волн в земной коре Тимано-Печорского и Северо-Уральского регионов. *Литосфера*. 2013. № 5. С. 160—169.
- Федорова Н. В., Колмогорова В. В., Лаговский И. В. Геофизические модели строения земной коры по Красноленинскому профилю. *Урал. геофиз. вестник*. 2010. № 1. С. 59—68.
- Федорова Н. В., Коломогорова В. В., Рублев А. Л., Цугаев А. Г. Магнитная модель северо-восточной части Европы. *Геофиз. исследования*. 2013. Т. 14. № 2. С. 25—37.
- Федорова Н. В., Шапиро В. А., Тюрмина Л. О. Поля относимости при региональных аэромагнитных съемках и выделение длинноволновых геомагнитных аномалий на Урале. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1989. № 4. С. 104—112.
- Цирульский А. В., Никонова Ф. И., Федорова Н. В. Метод интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с построением эквивалентных семейств решений. Свердловск: Изд. УНЦ АН СССР, 1980. 135 с.
- 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.
- Шапиро В. А., Цирульский А. В., Никонова Ф. И.,

Федорова Н. В., Беляева О. Я., Тюрмина Л. О., Чурсин А. В. Проблема построения магнитной модели земной коры на примере широтного пересечения Урала. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1982. № 9. С. 39—50.

Fedorova N. V., Martyshko P. S., Gemaydinov D. V., Rublev A. L., 2015. The computer technology for highlighting the magnetic anomalies of the Earth's crust layers, and results of its usage for the sec-

tor of northern Eurasia. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik* (2), 58—66 (in Russian).

Fedorova N. V., Martyshko P. S., Gemaidinov D. V., Rublev A. L., 2015. Computer technology for highlighting the magnetic anomalies from the deep layers of the Earth's crust. *EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects, Geoinformatics, 1—14 May 2015, Kiev, Ukraine*. 4 p. doi: 10.3997/2214-4609.201412426.

## Magnetic anomalies and model of the magnetization in the Earth's crust of circumpolar and polar the sectors of Ural region

© N. V. Fedorova, A. L. Rublev, L. A. Muraviev, V. V. Kolmogorova, 2017

The study of the structural features of the anomalous magnetic field for the territory of the circumpolar and polar sector of the Urals region was carried out. The anomalies of the Earth's crust layers were identified and the maps of such anomalies were created. Map of local anomalies was used for mapping basic-ultrabasic massifs in the upper parts of the foundation within the sedimentary basins. An interpretation of regional magnetic anomalies was carried out, a model structure of the Earth's crust and their parameters are based on the results of the studies along the DSS profiles. Comparison of the deep structure of the cuts produced by independent geophysical methods based on seismic and magnetic data has enabled us to share the consolidated crust into two layers with different magnetic properties. Top layer of the Earth's crust does not make a significant contribution into regional magnetic field and is characterized by a low magnetization (less than 0,3 A/m). Within this layer magnetized local sources were identified. The lower layer has greater crustal magnetization. As a result of the two-dimensional modeling of the value of the magnetization of the basalt layer of the crust is 3—4 A/m. The average depth to the top surface of the layer is 18—20 km. The resulting parameters were used for three-dimensional modeling. Model with uniform magnetization directed along the modern geomagnetic field has been considered. For the entire region it was built the upper surface of the magnetized layer, which allowed to clarify mafic layer in the space between the DSS profiles. It was found that at the Northern, Circumpolar and Polar Urals basalt layer plunged to a considerable depth of 26—30 km.

**Key words:** magnetic anomaly, magnetization, modeling, Earth's crust, Urals region.

### References

Anomalies of the geomagnetic field and deep crustal structure, 1982. Ed. Z. A. Krutikhovskaya. Kiev: Naukova Dumka, 172 p. (in Russian).

Byzov D. D., Muraviev L. A., 2015. Geomagnetic field vertical component calculation by magnetized rods system approximation of its absolute value. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik* (2), 24—28 (in Russian).

Geotraverse "Granite": East-European platform—Urals—Western Siberia (the structure of the Earth's crust as a result of complex geological and geo-

physical studies), 2002. (Ed. S. N. Kashubin). Ekaterinburg: IRA UTK, 312 p (in Russian).

Igolkina G. V., 2012. Borehole magnetometry survey at ultra-deep and deep wells. Ekaterinburg: UB RAS, 215 p. (in Russian).

Kolmogorova V. V., Fedorova N. V., 2015. Results of the deep structure crust modeling for Ural part of the Quartz Geotravers. *Geofizika* (6), 67—82 (in Russian).

Krutikhovskaya Z. A., 1976. The problem of creati-

- on of the ancient shield crust. *Geofizicheskiy sbornik* (73), 3—29 (in Russian).
- Krutikhovskaya Z.A., Pashkevich I.K., 1976. The magnetization of the crust of ancient shields and regional magnetic anomalies. In: *Magnetic anomalies in the earth's depths*. Kiev: Naukova Dumka, 108—125 (in Russian).
- Krutikhovskaya Z.A., Pashkevich I.K., Silina I.M., 1982. The magnetic model and the structure of the crust of the Ukrainian Shield. Kiev: Naukova Dumka, 216 p. (in Russian).
- Magnetic anomalies in the earth's depths, 1976. Ed. S.I. Subbotin. Kiev: Naukova Dumka, 232 p. (in Russian).
- Magnetic Prospecting: Handbook for Geophysicist, 1990. Eds V.E. Nikitskiy, Yu.S. Glebovskiy. Moscow: Nedra, 470 p. (in Russian).
- Martyshko P.S., Prutkin I.L., 2003. Technology for separating the gravity sources by the depth. *Geofizicheskiy zhurnal* 25(3), 159—168 (in Russian).
- Martyshko P.S., Rublev A.L., Pyankov V.A., 2010. Using local corrections technique to solve structural magnetometry problems. *Geofizika* (4), 3—8 (in Russian).
- Martyshko P.S., Fedorova N.V., Akimova E.N., Gemaydinov 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(4), 508—513 (in English). doi: 10.1134/S1069351314040090.
- Martyshko P.S., Fedorova N.V., Gemaydinov D.V., 2012. Study of the anomalous magnetic field structure in the Urals region using parallel algorithms. *Doklady Earth Sciences*, 446(1), 1102—1104 (in English). doi: 10.1134/S1028334X12090127.
- Milanovsky E.E., 2006. Tectonic map of Russia, adjacent territories and water areas. 1: 4000000. Moscow: Publ. MSU (in Russian).
- Nagaytseva L.S., Zaporozhtseva I.V., 1984. Geomagnetic model of the crust of the European North-East of the USSR. *Proceedings of the Institute of Geology, Komi Branch of the USSR Academy of Sciences*, Is. 47, 46—49 (in Russian).
- Orlyuk M.I., 2000. Spatial and spatio-temporal magnetic models of the varying in ranks structures lithosphere of the continental type. *Geofizicheskiy zhurnal* 22(6), 148—165 (in Russian).
- Orlyuk M.I., Marchenko A.V., Bakarzhieva M.I., 2013. Kursk magnetic anomaly: an analysis of the anomalous magnetic field according to the ground, stratospheric and satellite surveys. Collection of scientific works: *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*. Kiev, 107—116 (in Ukrainian).
- Orlyuk M.I., Pashkevich I.K., 2012. Deep sources of regional magnetic anomalies: tectonotypes and relation transcrustal faults. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(4), 224—234 (in Russian).
- Pashkevich I.K., Markovskiy V.S., Orlyuk M.I., Eliseeva S.V., Mozgovaya O.P., Tarashchan S.A., 1990. The magnetic model of the lithosphere of Europe. Kiev: Naukova Dumka, 168 p. (in Russian).
- Pashkevich I.K., Orlyuk M.I., Eliseeva S.V., Bakarzhieva M.I., Lebed T.V., Romanets A.A., 2006. 3D magnetic model of the Earth's crust of the Ukrainian Shield and its petrologic-tectonic interpretation. *Geofizicheskiy zhurnal* 28(5), 7—18 (in Russian).
- Pashkevich I.K., Pecherskiy D.M., Gorodnitskiy A.M., Valyashko G.M., Verba V.V., Witte L.V., Wolk V.E., Genshaft Yu.S., Gordin V.M., Eliseeva S.V., Lukyanov S.V., Lykov A.V., Markovskiy V.S., Orlyuk M.I., Popov K.V., Shcherbakov V.P., 1994. Petromagnetic model of the lithosphere. Kiev: Esse, 175 p. (in Russian).
- Pashkevich I.K., Sharov N.V., Savchenko A.S., Starostenko V.I., 2014. Three-dimensional geological-geophysical model of the lithosphere of the central part of the Karelian Craton. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(6), 58—78 (in Russian).
- Pecherskiy D.M., Orlyuk M.I., Pashkevich I.K., 2006. Magnetism bottom of the crust over the world: the development of research results and ideas Z.A. Krutikhovskaya. *Geofizicheskiy zhurnal* 28(5), 40—52 (in Russian).
- Prutkin I.L., 1986. The solution of the three-dimensional inverse problem of gravimetry in a class of contact surfaces by local corrections. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (1), 67—77 (in Russian).
- Fedorova N.V., 2016. Mapping mafic-ultramafic massifs in the upper horizons of the basement polar sector of Eurasia. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik* (1), 48—52 (in Russian).
- Fedorova N.V., 2001. Earth's crust magnetization model of Geotraverse Granite. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik* (1), 88—93 (in Russian).
- Fedorova N.V., Kolmogorova V.V., 2013. Models of distribution of the magnetization and the longitudinal wave velocity of the Earth's crust in Timan-Pechora and Northern Ural regions. *Litosfera* (5), 160—169 (in Russian).
- Fedorova N.V., Kolmogorov V.V., Ladovskiy I.V., 2010. Geophysical model of crustal structure on Krasnoleninsk profile. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik* (1), 59—68 (in Russian).

- Fedorova N. V., Kolmogorova V. V., Rublev A. L., Tsidaev A. G.*, 2013. The magnetic model of the North-Eastern region of Europe. *Geofizicheskie issledovaniya* 14(2), 25—37 (in Russian).
- Fedorova N. V., Martyshko P. S., Gemaydinov D. V., Rublev A. L.*, 2015. The computer technology for highlighting the magnetic anomalies of the Earth's crust layers, and results of its usage for the sector of northern Eurasia. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik* (2), 58—66 (in Russian).
- Fedorova N. V., Shapiro V. A., Tyurmina L. O.*, 1989. Reference fields in regional aeromagnetic survey and detection of long-wave geomagnetic anomalies in the Ural area. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (4), 104—112.
- Tsirulskiy A. V., Nikonova F. I., Fedorova N. V.*, 1980. The method of interpretation of gravity and magnetic anomalies with the construction of families of equivalent solutions. Sverdlovsk: USC AS of USSR, 135 p. (in Russian).
- 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 areas of the East European and West Siberian platforms. *Litosfera* (6), 63—72 (in Russian).
- Shapiro V. A., Tsirulskiy A. V., Nikonova F. I., Fedorova N. V., Belyaeva O. Ya., Tyurmina L. O., Chursin A. V.*, 1982. The problem of constructing a magnetic model of the Earth's crust on the example of East-West crossing of the Urals. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (9), 39—50 (in Russian).
- Fedorova N. V., Martyshko P. S., Gemaydinov D. V., Rublev A. L.*, 2015. Computer technology for highlighting the magnetic anomalies from the deep layers of the Earth's crust. *EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects, Geoinformatics, 1—14 May 2015, Kiev, Ukraine*. 4 p. doi: 10.3997/2214-4609.201412426.