УДК.550.838

ПРОЯВЛЕНИЕ СТРУКТУР ПРЕДУРАЛЬСКОГО ПРОГИБА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПОЛЯРНОГО И ЮЖНОГО УРАЛА

Пьянков В.А., Рублев А.Л. **–** Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Исследована морфология региональной отрицательной магнитной аномалии (для Полярного и Южного Урала). Эта магнитная аномалия пространственно совпадает со структурами Предуральского прогиба. В этой статье мы применяем метод построения трехмерных моделей земной коры с использованием магнитных данных. Для решения структурной обратной задачи магнитометрии предлагается модифицированный итеративный метод локальных поправок. По магнитным данным построены трехмерные модели земной коры. Основные элементы глубинного строения, установленные на южных широтах, сохраняются и на северных.

Магнитное поле, поверхности раздела, обратная задача.

MANIFESTATION OF THE PREDURALS DEPRESSION STRUCTURES IN THE MAGNETIC FIELD OF THE POLAR AND THE SOUTHERN URALS

Pyankov V.A., Rublev A.L. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. We have investigated the morphology of the negative regional magnetic anomaly (from the Polar Urals to the Southern Urals). This magnetic anomaly spatially coincides with structures of Predurals depression. In this paper we apply the method of construction 3-D surfaces using magnetic data. We suggest modified iterative local correction method for solving structure magnetic inverse problem. The Polar region and the Southern region of Predurals depression 3D-models magnetization Earth crust have been constructed. The main elements of subsurface structure at whale latitudes are preserved.

Magnetic field, magnetized layers, inverse problem.

Введение

Строение земной коры как Полярного, так Южного сектора Уральской складчатой системы представляет огромный интерес в связи со сложным характером взаимоположения геологических структур первого порядка. Наибольший интерес, на наш взгляд, представляет изучение глубинного строения Предуральского прогиба. Эта структура является реперной по всей протяженности Уральской складчатой системы. В магнитном поле она проявляется в виде субмеридиональной региональной отрицательной магнитной аномалии достаточно сложной морфологии. Это, по-видимому, связано с тем, что существуют определенные различия в геологическом строении разных сегментов Уральской складчатой системы.

Южно-Уральский сегмент наиболее хорошо изучен, его особенностью является доступность для прямого изучения всех структурно-формационных мегазон, в том числе и Предуральского прогиба. Полярно-Уральский сегмент характеризуется сложным мозаичным геологическим строением, что находит свое отражение в магнитном поле. В глубинном строении южной и полярной частей Урала есть определенные черты сходства и различия. Сходство заключается, в первую очередь, в присутствии единой последовательности общеуральских структурных элементов. В то же время, сравнительно слабая, в целом, обнаженность региона настоятельно требует комплексного использования геологических и геофизических данных, без чего невозможно построение геолого-геофизических моделей земной коры. Наиболее важными источниками комплексной геолого-геофизической информации о глубинном строении Уральской складчатой системы являются как Полярно-Уральский трансект (Рыбалка и др., 2011) и профиль Уралсейс (Рыльков и др., 2013), так и магнитные данные секущих Северный Урал на различных высотах профилей аэромагнитной съемки (Шапиро и др., 1993). Необходимость прохождения нескольких опорных профилей была вызвана как стремлением создать объемную модель Уральской складчатой системы, так и существовани-

ем определенных различий геологического строения основных фрагментов Урала. Методика и результаты построения трехмерной магнитной модели для Полярного и Южного Урала приводятся ниже.

Восстановление поверхности слоя по магнитным данным

Как для Полярного, так и для Южного Урала наклонение вектора индукции геомагнитного поля превышает 70º (Магниторазведка … , 1980). Это позволяет в рамках допустимых погрешностей решать обратную задачу для вертикальной намагниченности слоев и использовать только вертикальную составляющую магнитного поля (Васин и др., 2008). Кроме того, значения намагниченности в слоях земной коры не превышают 6 А/м, поэтому эффект размагничивания внутри слоев будет небольшой и его можно не учитывать.

Введем декартову прямоугольную систему координат с осью *Z*, направленной вниз, плоскость *XOY* совпадает с дневной поверхностью. Рассматривается двухслойная модель участка земной коры. Поверхность, разделяющая верхний и нижний слои, на достаточном удалении от центра участка выходит на асимптоту. Вертикальная компонента напряженности магнитной индукции *Z* в точке (*x,y*) на поверхности земли от контактной поверхности, разделяющей слои с вертикальными намагниченностями I_1 и I_2 вычисляется по формуле:

$$Z(x,y)=\Delta I\int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty}\left(\frac{z(x,y)}{\left[(x-x')^2+(y-y')^2+z^2(x,y)\right]^{3/2}}-\right.$$
$$\left.-\frac{H}{\left[(x-x')^2+(y-y')^2+H^2\right]^{3/2}}\right)dxdy, \qquad (1)$$

где $z(x,y)$ – уравнение поверхности, разделяющей верхний и нижний слои;
$\Delta I = I_2 - I_1$ – скачок намагниченности на границе слоев; H – горизонтальная асимптота.

Для решения этого уравнения и нахождения функции $z(x,y)$ были разработаны программы, основанные на модифицированном методе локальных поправок (Мартышко и др., 2010; 2014а). Метод локальных поправок был предложен для приближенного решения нелинейных обратных задач гравиметрии (Пруткин, 1986) и 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.

Разработан итерационный способ нахождения границы намагниченных слоев, определяемой уравнением $z = z(x,y)$ (Мартышко и др., 2010). На каждом шаге делается попытка уменьшить разность между заданными и приближенными значениями поля в данном узле лишь за счет изменения значения искомой функции в этом же узле. Дискретизация уравнения (1) приводит к следующей системе нелинейных уравнений:

$$c\sum_i\sum_j K_{i_0j_0}(z_{ij})=U_{i_0j_0}, \qquad (2)$$

где c – весовой коэффициент кубатурной формулы; $U_{i_0j_0}=\Delta Z(x_{i_0},y_{j_0},0)$ – левая часть уравнения (1); $K_{i_0j_0}=K(x_{i_0},y_{j_0},x_i,y_j,z_{ij})$ – подынтегральное выражение; $z_{ij}=z(x_i,y_j)$.

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

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

где α – параметр регуляризации; $\{z_{ij}^n\}$ – значения неизвестной функции *z(x,y)*; n – номер итерации.

Моделирование распределения намагниченности в земной коре Полярного и Южного сегментов Уральской складчатой системы

Разработанная методика локальных поправок была использована нами для построения 3D-магнитных моделей земной коры, включающих в себя структуры Предуральского прогиба на Полярном и Южном Урале.

Для построения поверхностей раздела необходимо знать как параметры асимптотической поверхности, так и предполагае-

мую намагниченность слоев. Считается, что первый слой практически немагнитный I_1 = 0,1 А/м (Шапиро и др., 1993; Федорова, Колмогорова, 2013; Федорова и др., 2013), а намагниченность следующего слоя получена в результате исследования материалов интерпретации данных профильных магнитных наблюдений. С этой целью на Урале в рамках трапеции 52–72ºE×52–68ºN была проведена специальная прецизионная разновысотная аэромагнитная съемка по 8 широтным геотраверсам и двум субмеридиональным профилям на высотах 150–4000 м (Шапиро и др., 1993). Основной целью этой региональной съемки было изучение строения магнитоактивного слоя литосферы Урала и сопредельных регионов. Завершающим этапом этих разновысотных исследований стала интерпретация аномального магнитного поля. Интерпретация магнитных аномалий была проведена по методике, разработанной в Институте геофизики УрО РАН (Цирульский, 1990; Федорова и др., 2010; Мартышко и др., 2011). В соответствии с этой методикой аномальное магнитное поле каждого из профилей аппроксимировано полями сингулярных источников, что позволило выделить источники, порождающие региональную компоненту магнитного поля. В результате исследований построены 2D-магнитные модели для всех профилей. Для западной окраины Урала отмечено интенсивное погружение под складчатый Урал мощного протяженного объекта с намагниченностью I_2 = 0,7–1 А/м. Ранее проведенные в магнетизме горных пород исследования особенностей распределения намагниченности пород с глубиной показывают, что намагниченности существенно большие 1–2 А/м для больших блоков маловероятны (Петрофизика … , 1992).

Для определения параметров асимптотической поверхности использованы сейсмические данные Полярно-Уральского и Южно-Уральского (УРСЕЙС-95) трансектов. Полярно-Уральский трансект имеет протяженность 300 км и сечет главные структуры Уральской складчатой системы. Западная граница трансекта располагается в Предуральском прогибе, далее на восток он пересекает пакеты пластин Лемвинского аллохтона (рис. 1) (Рыбалка и др., 2011). Эта часть территории и является объектом изучения строения магнитной модели земной коры. Моделирование распределения намагниченности в земной коре было проведено для прямоугольного участка площади 62–64ºE×65–67ºN, включающего в себя структуры Предуральского прогиба, основано на базе данных (Овчаренко, 1996). По сейсмическим данным Предуральский прогиб представлен слоистой пачкой отражателей, соответствующих палеозойскому складчатому чехлу. До глубин около 2 км отражения очень слабые, далее интенсивные отражения прослеживаются до глубин 10 км, а в восточной части прогиба до 15 км. Западная часть Лемвинского аллохтона характеризуется хаотическим распределением отражателей. Таким образом, опираясь на особенности геологического строения земной коры изучаемой зоны, предполагаем, что глубина до асимптотической поверхности при решении обратной задачи магнитометрии методом локальных поправок составляет 10 км. По данным предыдущих работ (Шапиро и др., 1993) установлена величина намагниченности I_2 = 0,7–1 А/м.

С целью исключения влияния припо-

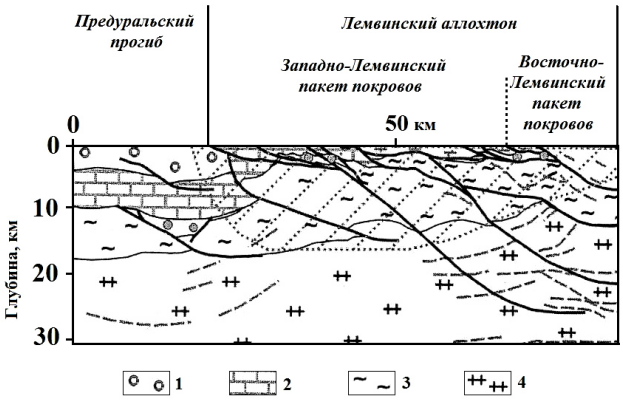


Рис. 1. Схематическая геолого-геофизическая модель западного сегмента Полярно-Уральского транссекта (Рыбалка и др., 2011):
1 – пермские и раннемезозойские отложения Предуральского прогиба; 2 – мелководные терригенно-карбонатные образования; 3 – позднепротерозойские вулканогенные и осадочные образования; 4 – гнейсы и амфиболиты выступов дорифейского фундамента

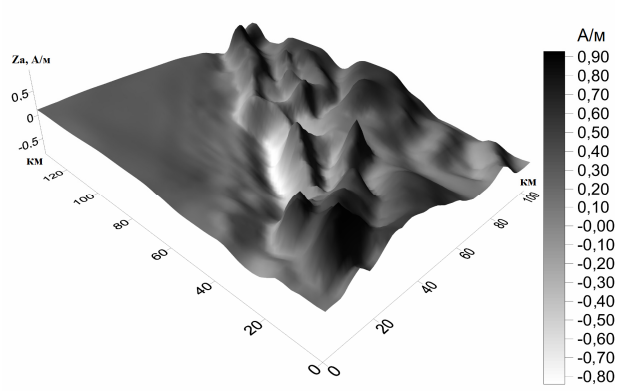


Рис. 2. Исходное магнитное поле сегмента Полярного Урала

верхностных источников используется пересчет наблюденного магнитного поля на высоту. На суперкомпьютере «Уран» выполнены вычисления для набора высот H = 5, 10, 15, 20 км. Для каждой трансформации проводился пересчет поля вверх на высоту H, затем пересчет поля вниз на глубину $2H$ и опять пересчет вверх на высоту H. Таким образом, трансформированное поле приводится к уровню поверхности Земли (Мартышко и др. 2012; 2014б). Для выбора параметра регуляризации α были использованы результаты интерпретации магнитных аномалий, выполненные двумерным методом (Цирульский и др., 1980). Аномальное магнитное поле северо-западного сектора Предуралья и части складчатого Урала приведено на рис. 2. Далее на рис. 3 приведена карта Z-составляющей магнитного поля, полученного с помощью пересчетов поля вверх на 10 км и затем вниз на нулевой уровень. Для пересчитанного поля Z методом локальных по-

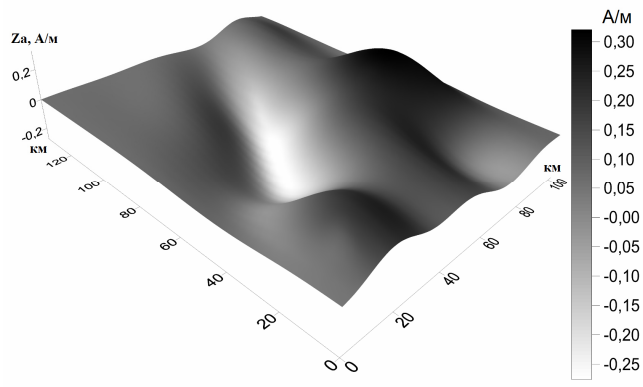


Рис. 3. Магнитное поле, пересчитанное на 10 км

правок решена 3D-обратная задача магнитометрии для контактной поверхности с асимптотой H = 10 км и скачком намагниченности равным 1 А/м. Глубина до асимптоты выбрана на основе анализа геолого-геофизического разреза для Полярного трансекта. Анализируя морфологию контактной поверхности (рис. 4), приходим к заключению, что в направлении на юго-восток глубина до поверхности увеличивается на несколько километров, т. е. наблюдается погружение контактной поверхности под Урал. По-видимому, таким образом в магнитном поле проявляется зона субдукции.

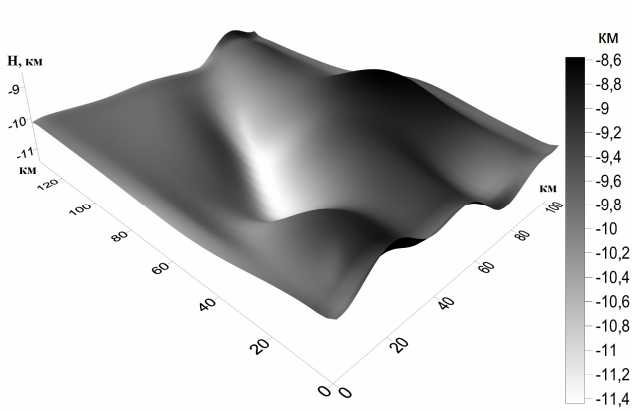


Рис. 4. Контактная поверхность, рассчитанная методом локальных поправок

Аналогичным образом решалась задача для Южного Урала. УРАЛСЕЙС-95 является наиболее крупным комплексным геолого-геофизическим профилем через Урал, он был пройден в самом широком и представительном сечении региона, в северной части Южного Урала, по линии Стерлитамак-Николаевка, поэтому он и выбран нами в качестве опорного при построении объемной магнитной модели земной коры Южного Урала. Помимо классического комплекса сейсмических исследований, здесь были проведены высокоточные наземные синхронные наблюдения модуля полного вектора T геомагнитного поля и магнитовариационные наблюдения на станции Нугуш (Шапиро, Пьянков, 1976). В результате этих наблюдений на региональном субширотном профиле выделена отрицательная магнитная аномалия ΔT с амплитудой в экстремуме до 300 нТл.

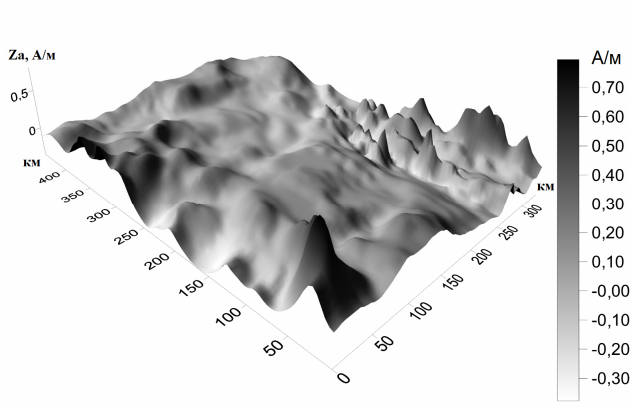


Рис. 5. Исходное магнитное поле Южного Урала

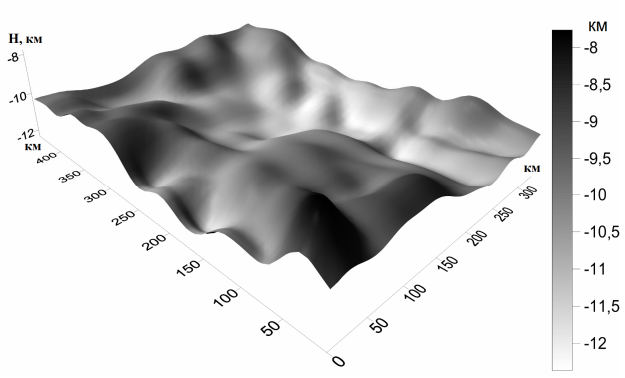


Рис. 6. Контактная поверхность, рассчитанная методом локальных поправок для магнитного поля, пересчитанного на 10 км

На основе этих данных была построена 2D-модель распределения намагниченности в земной коре по профилю Стерлитамак-Николаевка (Васин и др., 2008). В результате этих исследований установлено, что в земной коре, включающей в себя часть Восточно-Европейской плиты, Предуралье и часть миогеосинклинальной области Урала, существует протяженный блок восточного падения с намагниченностью 0,7–2 А/м. Глубина до верхней кромки блока в рамках двумерной модели 10–20 км (для I_2 = 1 А/м). Таким образом, был получен опорный профиль для построения 3D-магнитной модели земной коры Южного Урала. Площадь магнитных исследований (рис. 5) представляет собой трапецию 54–59ºE×52–56ºN и охватывает практически всю территорию Башкирии, использованы данные (Овчаренко, 1996). Исследуемое магнитное поле обладает очень сложной морфологией, отражающей как относительно приповерхностные, так и глубинные магнитные эффекты.

Как и в первой задаче, с целью устранения влияния приповерхностных намагниченных объектов был проведен пересчет магнитного поля на высоту (Мартышко и др. 2012; 2014б). После анализа магнитных и сейсмических данных для решения обратной задачи магнитометрии методом локальных поправок установлены как глубина до асимптотической поверхности – 10 км, так и намагниченность I_2 = 0,7 А/м. В результате решения обратной задачи магнитометрии методом локальных поправок получена контактная поверхность, разделяющая относительно немагнитные и магнитные породы (рис. 6). У магнитной 3D-границы очень сложная морфология, что связано, в том числе, и тем, что в земной коре изучаемой области находится зона аномальной электропроводности, присутствие которой несколько искажает достаточно плавный рельеф контактной поверхности. Для визуализации преобладающей картины рельефа изучаемой поверхности построены разрезы (рис. 7) по двум

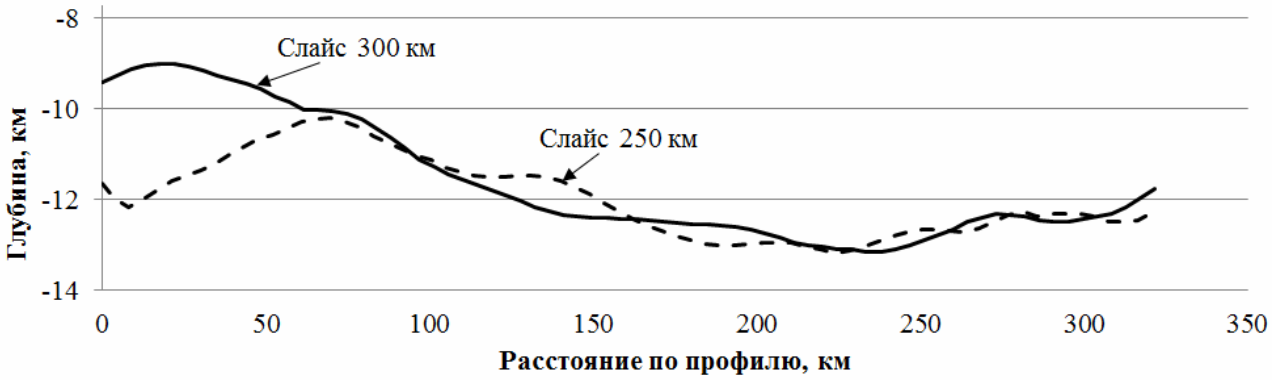


Рис. 7. Слайсы контактной поверхности для широтных пересечений 250 и 300 км

субширотным профилям, секущим контактную поверхность примерно по середине изучаемой площади. В результате исследований установлено, что морфология отрицательной региональной магнитной аномалии на Южном Урале в большей степени отражает погружение контактной границы на восток под Урал. Амплитуда погружения на данном участке от 8 до 14 км. Показано, что дальнейшее трассирование отрицательной региональной магнитной аномалии, вероятно, позволит продлить структуры Предуралья в зону Арктического шельфа. Для её уверенной идентификации необходимо знать особенности морфологии контактной магнитной поверхности.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

1. Изученная морфология региональной отрицательной магнитной аномалии (для Полярного и Южного Урала) характеризует, в основном, единую структуру Предуральского прогиба.

2. В результате решения обратной задачи магнитометрии методом локальных поправок была получена 3D-модель распределения намагниченности земной коры как для Полярного, так и для Южного Урала. Как следствие, показано, что контактная поверхность, разделяющая немагнитные и магнитные породы, наклонена на восток под Урал. Таким образом, зафиксировано погружение Восточно-Европейской платформы на восток (зона субдукции).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта №14-27-00059 Российского научного фонда.

Литература

Васин В.В., Акимова Е.Н., Пересторонина Г.Я., Мартышко П.С., Пьянков В.А. Методы решения обратной задачи магнитометрии // Сибирские электронные математические известия. 2008. Т. 5. С. 620–631.

Петрофизика: Справочник. М.: Недра. Т. 1. Горные породы и полезные ископаемые / Отв. редактор Н.Б. Дортман. 1992. 391 с.

Мартышко П.С. Пруткин И.Л. Технология разделения источников гравитационного поля по глубине // Геофизический журнал. 2003.Т. 25. № 3. С. 30–34.

Мартышко П.С., Дружинин В.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю., Фёдорова Н.В., Ладовский И.В., Колмогорова В.В., Цидаев А.Г. Методика и результаты создания объемной геолого-геофизической модели верхней части литосферы северного и среднего сегментов Уральского региона // Динамика физических полей Земли. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 9–30.

Мартышко П.С., Рублев А.Л., Пьянков В.А. Применение метода локальных поправок для структурных задач магнитометрии // Геофизика. 2010. № 4. С. 3–8.

Мартышко П.С., Рублев А.Л., Федорова Н.В. Метод нахождения поверхностей намагниченных слоев земной коры // Уральский геофизический вестник. 2014а. № 1. С. 61–66.

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. 2014б. № 4. С. 50–55.

Мартышко П.С., Федорова Н.В., Гемайдинов Д.В. Применение параллельных алгоритмов вычислений при изучении структуры аномального магнитного поля Урала // ДАН. 2012. Т. 446. № 2. С. 201–203.

Магниторазведка: Справочник геофизика / Под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. М.: Недра, 1980. 368 с.

Овчаренко А.В. Компьютерная база геополей Урала – информационная основа нового этапа исследований региона // Глубинное строение и развитие Урала. Екатеринбург: Наука, 1996. С. 136–146.

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.

Рыбалка А.В., Петров Г.А., Куликов В.В., Душин В.А. Глубинное строение Урала по данным Полярно-Уральского трансекта //

Региональная геология и металлогения. 2011. № 48. С. 25–36.

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.

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., Ладовский И.В. Геофизические модели строения земной коры по Красноленинскому профилю // Уральский геофизический вестник. 2010. № 1. С. 59–68.

Федорова Н.В., Колмогорова В.В., Рублев А.Л., Цидаев А.Г. Магнитная модель северо-восточной части Европы // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. № 2. С. 25–37.

Цирульский А.В. Функции комплексного переменного в теории и методах потенциальных геофизических полей. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 131 с.

Цирульский А.В., Никонова Ф.И., Федорова Н.В. Метод интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с построением эквивалентных семейств решений // Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. 135 с.

Шапиро В.А., Никонова Ф.И., Федорова Н.В., Чурсин А.В., Бахтерев Д.В. Строение магнитоактивного слоя Северного Урала по геомагнитным данным // ДАН. 1993. Т. 330. № 6. С. 774–777.

Шапиро В.А., Пьянков В.А. Токовая аномалия векового хода магнитного поля Т в Башкирии // Геомагнетизм и аэрономия. 1976. № 5. С. 943–946.