

ПРИМЕРЫ КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ МАГНИТОМЕТРИИ И ГРАВИМЕТРИИ ДЛЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ГРАНИЦ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Пьянков В.А., Рублев А.Л. – Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. По наблюдаемым данным проведена комплексная интерпретация магнитного и гравитационного полей участка земной коры Среднего и Южного Урала. Рассчитано распределение намагниченности и плотности. Для решения структурной обратной задачи магнитометрии предлагается модифицированный итеративный метод локальных поправок. В этой статье мы описываем новые результаты построения магнитной и плотностной моделей земной коры Предуралья, включая зону дилатансии.

Магнитное поле, гравитационное поле, обратная задача

EXAMPLES OF THE COMPLEX SOLUTION OF THE INVERSE MAGNETIC AND GRAVIMETRY PROBLEMS FOR THE EARTH'S CRUST RHEOLOGICAL BOUNDARIES

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

Abstract. According to the observed data, we had made a complex interpretation of the magnetic and gravitational fields of the Earth's crust region of the Middle and Southern Urals. The distribution of magnetization and density is calculated. To solve the structural magnetic inverse problem, a modified iterative local correction method is proposed. In this paper we describe new results of construction of the Earth crust magnetic and density models (Predurals, including the dilatant zone).

Magnetic field, gravitational field, inverse problem

Введение

При построении магнитной модели, как и любой другой модели земной коры, немаловажным фактором является то, какая геологическая концепция заложена в ее основу. В данной статье предпринята попытка выделения неоднородных по строению блоков земной коры с разными реологическими свойствами (пористостью, проницаемостью). Для решения поставленной задачи применяется комплексирование магнитных и гравитационных данных.

В результате многолетних исследований геомагнитного поля T на территории Среднего и Южного Урала выделены серии субмеридиональных протяженных аномалий векового хода (АВХ). В нашей работе рассматривается Башкирская АВХ, пространственно совпадающая со структурами Предуральского краевого прогиба (Пьянков, Шапиро, 1986). Отличительная особенность протяженной субмеридиональной зоны Башкирской АВХ – изменение знака приращений $\delta(\Delta T)$ в течение периода наблюдений. Наибольшей интенсивности аномальные изменения $\delta(\Delta T)$, 10-15 нТл/год, достигают на севере изучаемой территории (пос. Красный Зилим) Эти изменения происходят на фоне нормального поля

с амплитудами ± 2 нТл/год. Анализ статического аномального магнитного поля показал отсутствие в земной коре в зонах АВХ блоков горных пород с аномально высокими магнитными свойствами.

Это позволило исключить из рассмотрения пьезомагнитную гипотезу происхождения аномальных вариаций. Остается только гипотеза о связи аномальных вековых вариаций T с внутривоздушными токами электрокинетической природы. В работе (Пьянков, Шапиро, 1977) показано, что появление на земной поверхности АВХ электрокинетической природы возможно только при наличии в земной коре горизонтальных геоэлектрических неоднородностей и границ со скачком коэффициента потенциала течения (наличие блоков горных пород с аномально высокой пористостью). Ранее авторами установлено, что выделенная зона АВХ пространственно совпадает с участком повышенной электропроводности земной коры (Пьянков, Шапиро, 1986). Оставалась нерешенной задача о наличии (или отсутствии) в земной коре блоков аномально низкой плотности (высокой пористости и проницаемости горных пород), т.е. блоков с контрастными реологическими свойствами. На решение данной задачи и нацелена предлагаемая работа.

Методика выделения аномалий от источников в различных слоях земной коры

Аномальное магнитное поле имеет интегральный характер и содержит составляющие от всех источников, расположенных в верхней литосфере. Как правило, на открытых территориях наибольший вклад вносят аномалии от приповерхностных массивов. Интенсивность аномалий значительно снижается при удалении от локальных источников. С увеличением расстояния R от источника магнитное поле затухает по закону $-1/R^3$.

Для выделения аномалий от источников в различных слоях земной коры была использована методика, основанная на повысотных пересчетах (Мартышко и др., 2016). Приведение полученных результатов на начальный уровень дает возможность разделять длинноволновые и коротковолновые составляющие амплитудного спектра аномалий, созданных литосферой.

Для выделения аномального поля от слоев земной коры в работе (Мартышко, Пруткин, 2003) была предложена следующая методика трансформации полей. Введём декартову прямоугольную систему координат с осью Z , направленной вниз, плоскость XOY совпадает с дневной поверхностью. Пересчет измеренного на площади $D = \{(x, y) \in R^2 : a \leq x \leq b, c \leq y \leq d\}$ земной поверхности поля $U(x, y, z)|_{z=0}$ вверх на уровень $z=-H$ реализуется по формуле Пуассона

$$U(x, y, -H) = \frac{1}{2\pi} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + H^2]^{3/2}} U(x', y', 0) dx' dy' \quad (1)$$

При этом влияние локальных приповерхностных источников (до глубины H) если и не устраняется совсем, то значительно ослабевает. Для того чтобы окончательно избавиться от влияния локальных источников, находящихся в горизонтальном слое от дневной поверхности до глубины H , пересчитанное вверх поле затем продолжается вниз на глубину H . Для пересчета поля вниз на глубину $z=H$ и нахождения значений $\bar{U}(x, y, -H)$ решается уравнение Фредгольма первого рода

$$Ku \equiv \frac{1}{2\pi} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + H^2]^{3/2}} u(x', y', 0) dx' dy' = \bar{U}(x, y, H) \quad (2)$$

Уравнение 1-го рода (2) представляет собой некорректную задачу, поэтому необходимо при его решении использовать методы регуляризации.

После дискретизации на сетке уравнения (2) и аппроксимации интегрального оператора по квадратурным формулам задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с симметричной матрицей K . Для решения СЛАУ используются итерационные методы градиентного типа. На последнем шаге поле пересчитывается вновь вверх на уровень дневной поверхности. 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.

Алгоритм метода локальных поправок и примеры его применения

При решении обратной задачи магнитометрии нами используется модификация метода локальных поправок, предназначенного для приближенного решения нелинейных обратных задач, предложенного Пруткиным И.Л. (Пруткин, 1986). Этот метод не использует нелинейную минимизацию, что позволяет на порядок сократить время счета на ЭВМ. Рассмотрим модель двухслойной магнитной среды в трехмерном пространстве. Модель состоит из двух слоев постоянной намагниченности I_1 и I_2 , разделенных поверхностью S . Пусть в декартовой системе координат плоскость xOy совпадает с дневной поверхностью, ось z направлена вниз. Верхний слой ограничен сверху горизонтальной плоскостью $z=0$, а снизу – поверхностью S ; ниж-

ний слой сверху ограничен поверхностью S , снизу – плоскостью $z = h_+$. Искомая граница раздела сред постоянной намагниченности (контактная поверхность) S задается уравнением $z = z(x, y)$. Предполагается, что $z(x, y)$ однозначная, ограниченная функция, причем для некоторого H

$$\lim_{\substack{|x| \rightarrow \infty \\ |y| \rightarrow \infty}} |z(x, y) - H| = 0, \quad (3)$$

т.е. поверхность S имеет горизонтальную асимптотическую плоскость $z = H$. С точностью до постоянного слагаемого поле от двух-слойной модели есть поле магнитных масс, заключенных между поверхностью S и плоскостью $z = H$, с намагниченностью $\pm \Delta I$, где $\Delta I = I_2 - I_1$ – скачок намагниченности на границе раздела. Поле от такого объекта задается формулой

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

Дискретизация уравнения (4) приводит к следующей системе нелинейных уравнений:

$$c \sum_i \sum_j K_{i_0 j_0}(z_{ij}) = U_{i_0 j_0}, \quad (5)$$

где c – весовой коэффициент кубатурной формулы, $U_{i_0 j_0} = \Delta Z(x_{i_0}, y_{j_0}, 0)$ – левая часть уравнения (4), $z_{ij} = z(x_i, y_j)$, $K_{i_0 j_0}(z_{ij}) = K(x_{i_0}, y_{j_0}, x_i, y_j, z_{ij})$ – подынтегральное выражение в (4).

Нами разработан итерационный метод для решения системы уравнений (5). Предположим, что $\{z_{i,j}^n\}$ – значения неизвестной функции $z(x, y)$, n – номер итерации. В результате имеем:

$$U_{i_0 j_0}^n = c \sum_i \sum_j K_{i_0 j_0}(z_{ij}^n) \quad (6)$$

Метод локальных поправок 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 различной намагниченностью. В соответствии с этим 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. Тогда мы имеем следующий итерационный процесс:

$$K_{ij}(z_{ij}^{n+1}) - K_{ij}(z_{ij}^n) = \alpha (U_{ij} - U_{ij}^n), \quad (7)$$

где α – параметр регуляризации, а ядро интегрального оператора имеет вид:

$$K_{ij}(z_{ij}^n) = \frac{1}{(z_{ij}^n)^2} - \frac{1}{H^2}. \quad (8)$$

В результате мы имеем итерационную формулу для нахождения z_{ij}^{n+1} :

$$(z_{ij}^{n+1})^2 = \frac{(z_{ij}^n)^2}{1 + \alpha (z_{ij}^n)^2 \cdot (U_{ij} - U_{ij}^n)}. \quad (9)$$

С целью проверки работоспособности алгоритма проведен ряд модельных вычислений. Алгоритм показал очень высокую скорость счета (одна итерация порядка 1 секунды при сетке 50x50 точек) и неплохую точность восстановления модельных границ при относи-

тельной погрешности восстановления поля равной сотым долям процента.

Результаты численных экспериментов на натурном материале

Для Западной и Центральной части Южного Урала обработан массив данных магнитометрии, измеренных на площади, имеющей размеры 450x350 км (рис. 1). Исходные данные – карты масштаба 1:200000.

Центральная часть этой площади пространственно совпадает с Башкирской аномалией векового хода (от 140 до 240 км по широте и от 100 до 350 км по долготе), ограничивающей складчатый Урал с запада. На этой же территории обнаружена субмеридиональная аномалия электропроводности земной коры. Для изучения природы аномалии по реальным наблюдаемым данным (после исключения влияния приповерхностных неоднородностей) методом локальных поправок решена задача об определении рельефа поверхности S , разделяющей слои со скачком намагниченности 1 А/м, для положения асимптотической поверхности $H=20$ км. На рис. 2 изображена часть рельефа поверхности S .

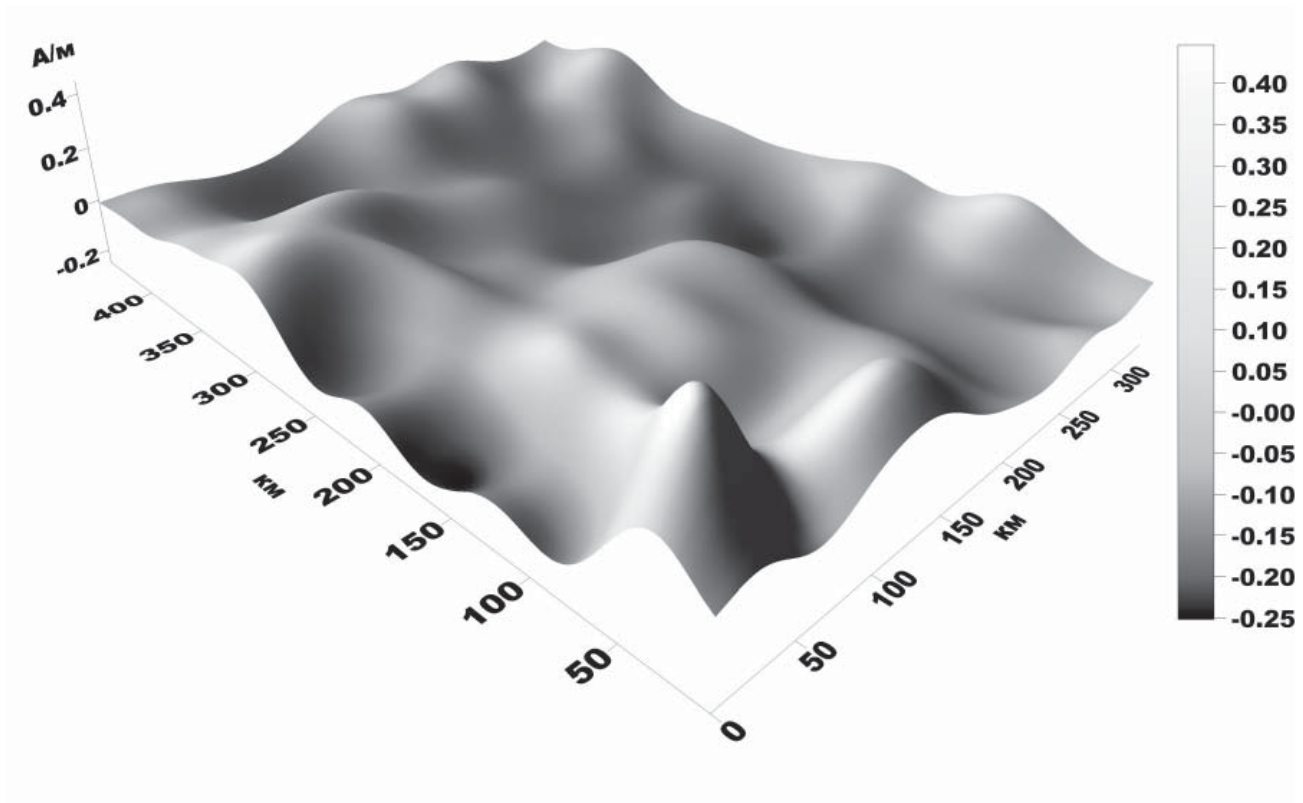


Рис. 1. Магнитное поле на территории Предуралья и Центрального Урала (пересчет на 20 км)

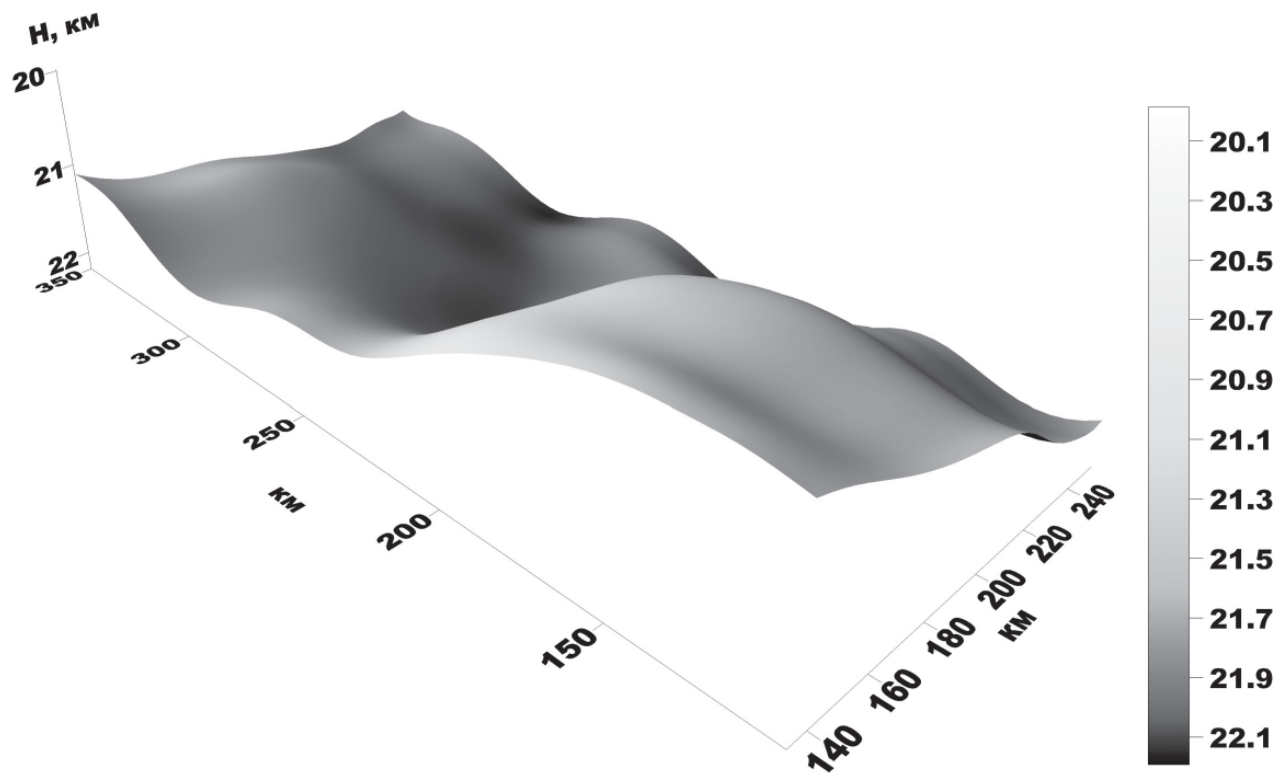


Рис. 2. Рельеф поверхности S по магнитным данным в зоне АВХ

На рис. 3 для той же площади представлен рельеф плотностной поверхности S_1 , разделяющей слои со скачком плотности $\Delta\sigma=0,1$ г/см³. Расчеты проведены Акимовой Е.Н. по данным Δg с карты масштаба 1:200000. Из

анализа особенностей морфологии изолиний поверхностей S и S_1 следует заключение об их практическом подобии. Это субмеридиональные погружения рельефа поверхностей S и S_1 с амплитудой примерно 3 км. Рельеф

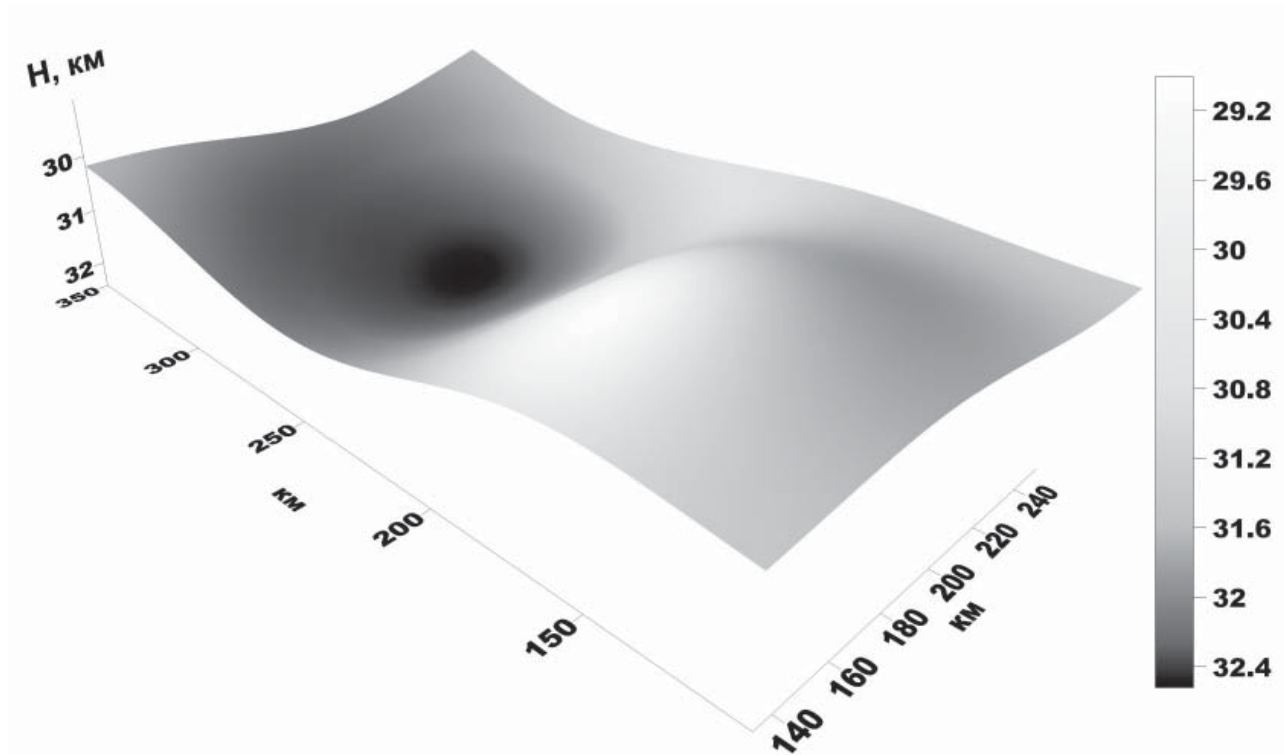


Рис.3. Рельеф поверхности S_1 по гравитационным данным в зоне АВХ (по расчетам Акимовой Е.Н.)

каждой из поверхностей обладает своей специфической особенностью. Так, например, для плотностной модели характерно наличие в ее северной оконечности контрастного погружения полусферической формы (район поселка Красный Зилим). Для магнитной модели подобное погружение наблюдается также в северной оконечности аномальной зоны. Если наше предварительное предположение о наличии в земной коре аномальной дилатирующей зоны справедливо, то полусферическое погружение для плотностной модели – это активное дилатирующее включение, гидродинамические процессы в котором могут генерировать электрокинетические токи, являющиеся источником аномальных магнитных вариаций в эпицентре Башкирской АВХ. Дилатирующее включение представляет собой изометричный блок горных пород высокой проницаемости, помещенный в среду существенно меньшей проницаемости. Следовательно, изучаемая поверхность является реологической границей пород с разной плотностью и проницаемостью. Эти породы находятся в той части земной коры, для которой характерны определённые гидростатические условия, т.е. возможно перетекание поровой жидкости.

Заключение

Таким образом, с созданием оригинальных алгоритмов решения обратной задачи магнитометрии и гравиметрии и современной методики их реализации на ЭВМ появилась возможность корректной интерпретации наблюдаемого поля. В результате комплексной интерпретации магнитного и гравитационного полей в земной коре в зоне предполагаемого протекания электрокинетических токов выделен участок погружения намагниченной поверхности на глубине 20 – 25 км (скачок намагниченности 1 А/м). Амплитуды погружения поверхности намагниченных пород практически совпадают с изоглубинами депрессии реологической поверхности со скачком плотности 0,1 г/см³. Эта зона пониженной плотности (интенсивное погружение полусферической формы) находится на широте п. Красный Зилим, где зарегистрированы аномально высокие вариации векового хода геомагнитного поля. Предполагается, что это участок тектонически активного дилатирующего включения, динамика и реологические свойства которого и определяют пространственно-временные характеристики вариаций магнитного поля электрокинетической природы.

Литература

- Пьянков В.А., Шапиро В.А. Связь пространственно-временных характеристик аномального магнитного поля со структурно-динамическими особенностями строения и развития земной коры Урала // Прогноз землетрясений. Предвестники землетрясений магнитной, электромагнитной и электрической природы. Душанбе-Москва: Дониш. 1986. №7. С. 234-248.
- Пьянков В.А., Шапиро В.А. Некоторые аспекты природы Буткинской аномалии векового хода геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. 1977. Т. 17. №3. С. 548-550.
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Федорова Н.В., Цидаев А.Г., Бызов Д.Д. Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. Екатеринбург, Изд-во ИГФ УрО РАН, 2016, 94 с.
- Мартышко П.С., Пруткин И.Л. Технология разделения источников гравитационного поля по глубине // Геофизический журнал, 2003. Т. 25, №3, С. 30-34.
- Пруткин И.Л. О решении трехмерной обратной задачи гравиметрии в классе контактных поверхностей методом локальных поправок // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. №1. С.67-75.