

## ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

Т.Л. Михеева, Е.П. Лапина, Н.В. Панченко

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладына, 32, г.Киев, 03680,  
Украина, e-mail: mtat@ukr.net*

Проведена интерпретация исходных гравиметрических и магнитометрических данных с целью определения геометрических параметров аномалиеобразующих тел с использованием автоматизированной системы интерпретации потенциальных полей. В процессе исследований построена числовая модель аномального гравиметрического и магнитометрического полей и проведена качественная и количественная интерпретация полученных результатов. На основе трех аппроксимирующих конструкций (стержневых тел, горизонтально расположенных, ограниченных по простиранию призм с вертикальным сечением в виде односвязного многоугольного контура, звездных тел) выполнено моделирование локальных аномалиеобразующих источников. Апробирована методика определения глубины залегания центров тяжести тел, верхней и нижней кромок подобранных источников. В алгоритмическом аспекте реализация метода автоматизированного подбора сводится к минимизации многопараметрических функционалов. Структура функционалов изменяется непосредственно в итерационном процессе минимизации. Помимо квадратичного приближения при формировании целевой функции применяются логарифмирование и нормирование сопоставляемых характеристик наблюдаемого и теоретического полей. Рассматриваемые возможности таких решений используются для конструирования сложной геологической модели, массы которой могут обусловить наблюдаемое поле. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение исследовано на модельных примерах и реальных площадных гравиметрических и магнитометрических данных.

**Ключевые слова:** качественная и количественная интерпретация, обратная задача, автоматизированная система, аналитическая аппроксимация, гравитационное поле, магнитное поле, аппроксимационная ячейка, геологический объект.

**Введение.** В практике интерпретации гравитационных аномалий над рудными объектами и интрузивными массивами часто возникает задача определения формы и глубинных границ возмущающего тела по полю силы тяжести или магнитному полю. В теории интерпретации гравитационных и магнитных данных это задача восстановления контура возмущающего объекта.

Помимо теоретической неоднозначности при решении обратных задач серьезные осложнения возникают вследствие сильной неустойчивости решений, обусловленной приближенной эквивалентностью [16, 17]. При интерпретации наблюдаемых аномалий можно получить множество практически эквивалентных распределений масс, отличающихся друг от друга особенностями конфигурации и положением контура возмущающего тела.

Технология поиска многовариантных решений обратной задачи была сформирована в процессе вычислительных экспериментов на ЭВМ. На модельных примерах имитировался процесс поиска решений обратной задачи; для этой цели были задействованы алгоритмы автоматизированного подбора [2].

Исходя из изложенного, в данной статье представлены результаты исследования алгоритмиче-

ского и программного обеспечения определения контуров геологических тел, созданного в отделе математической геофизики, с применением автоматизированной системы интерпретации потенциальных полей.

**Теоретические основы использованных алгоритмов интерпретации.** Метод подбора часто применяется в практике геологической интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных. Здесь наиболее полно можно учесть все априорные сведения о геологическом строении изучаемого района.

1. Задано поле  $U_{\text{исх}}(x, y, z)$  или  $U_{\text{исх}}(x, y)$ . Под функцией  $U_{\text{исх}}(x, y, z)$  будем понимать поле силы тяжести, его производные или специально построенные трансформанты. В заданном поле выбрано  $n$  наиболее характерных точек:

$$U_{\text{исх}}(x_i, y_i, z_i) = U_{\text{исх}}(i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

2. Анализ наблюдаемого поля и всех априорных сведений о строении района позволяет выбрать начальную геологическую модель. С этого момента интерпретационная задача решается в выбранном модельном классе. Каждый класс описывается только ему соответствующей совокупностью параметров:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$$

или

$$P = \{p_j\}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Если построена модель и заданы ее параметры, то можно решить прямую задачу. Во внешних относительно аномалиеобразующих масс точках вычисляется теоретическое поле. Оно может быть получено и в тех точках, которые были ранее выбраны в массиве (1). В этом случае получим:

$$U_i(x_i, y_i, z_i, P) = U_i(i, P), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Выражения (1) и (3) сопоставляются между собой. В процессе решения модель постоянно изменяется путем варьирования численных значений ее параметров (2). Необходимо подобрать такие значения  $\{p_j\}$ , которые минимизируют невязки между функциями (1) и (3). В качестве решения интерпретационной задачи принята последовательность  $P^* = \{p_j^*\}$  выражения (2), для которой невязка между исходным и теоретическим полями достигает минимума.

С одной стороны, известно только приближенное значение  $U_{\text{исх}}^{\delta}$ , с другой — геологическая модель почти никогда не отражает всей сложности строения геологических неоднородностей. Таким образом, невязка не может принять нулевого значения. Элемент  $P^*$  является квазирешением поставленной задачи.

Задано гравитационное или магнитное поле:

$$(\Delta g)_n(x_i, y_i, z_i) = (\Delta g)_n(i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

$$\mathbf{T}_n(x_i, y_i, z_i) = \mathbf{T}_n(i) = T_x(i)\mathbf{i} + T_y(i)\mathbf{j} + T_z(i)\mathbf{k}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

При решении задачи используются скалярные функции — вертикальная составляющая и модуль горизонтальной составляющей напряженности внешнего магнитного поля:

$$Zn(i) = Tn_z(i), \quad H(i) = \left(Tn_x(i)^2 + Tn_y(i)^2\right)^{1/2}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Для представления аномального тела использовалось несколько подходов к описанию геологических объектов.

1. Представленная аппроксимационная конструкция определяется набором трехмерных стержневых тел. Ориентация стержней согласована с координатными осями. Центр симметрии каждого тела может перемещаться. При решении задачи центры симметрии тел могут определять положения геометрических центров достаточно сложных фигур.

В этом модельном классе решены прямая и обратная задачи гравиметрии и магнитометрии для двумерного (2D-) и трехмерного (3D-) вариантов исследований [1, 3, 5].

Исходное поле (4) или (6) представлено полем некоторой совокупности элементарных тел (рис. 1). Каждое тело состоит из трех пересекающихся взаимно перпендикулярных материальных стержней.

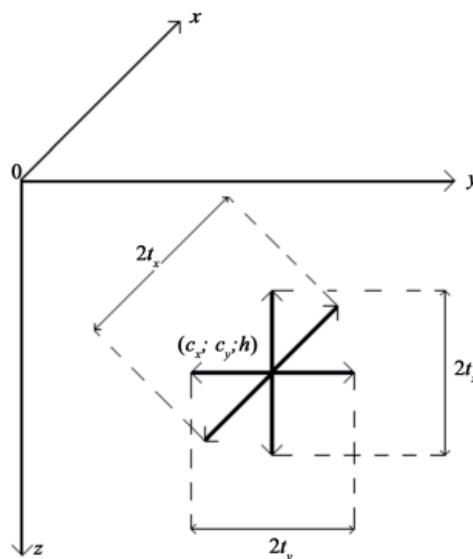


Рис. 1. Схема описания трехстержневой модели  
Fig. 1. Schematic description of the three-rod model

Точка пересечения — центр симметрии тела. Каждый стержень вытянут по направлению координатной оси. Общая геологическая модель для гравитационного поля определена такой последовательностью параметров:

$$P = \left\{ m(c_x, c_y, h)_j; (2t_x, 2t_y, 2t_z)_j; (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)_j \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

где  $m$  — количество элементарных тел;  $(c_x, c_y, h)$  — центры тяжести тел;  $(2t_x, 2t_y, 2t_z)$  — длины стержней;  $(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)$  — избыточные плотности тел.

Общая геологическая модель для магнитного поля определена такой последовательностью параметров:

$$P = \left\{ m, (c_x, c_y, h)_j; (2t_x, 2t_y, 2t_z)_j; (I_x, I_y, I_z)_j \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

где  $m$  — количество элементарных тел;  $(c_x, c_y, h)$  — центры тяжести тел;  $(2t_x, 2t_y, 2t_z)$  — длины стержней;  $(I_x, I_y, I_z)$  — составляющие вектора интенсивности намагниченности.

2. Горизонтально расположенные, ограниченные по простирацию призмы с вертикальным сечением в виде односвязного многоугольного контура, составленного из отрезков прямых. Аппроксимационное построение представлено последовательностью параметров:

$$P1 = \left\{ I_x, I_y, I_z; y_1, y_2; x_1, z_1, x_2, z_2, \dots, x_N, z_N \right\}, \quad (9)$$

где  $I_x, I_y, I_z$  — составляющие вектора интенсивности

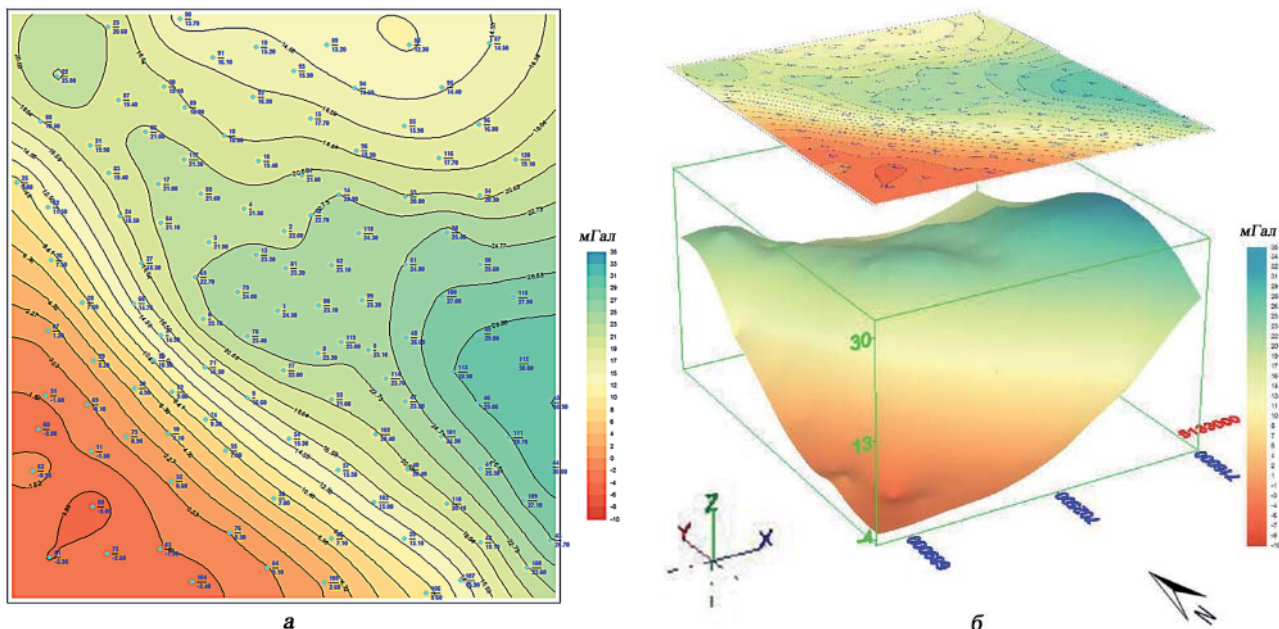


Рис. 2. Участок района исследований: а — карта аномалий силы тяжести в редукции Буге,  $\Delta g$ , мГал; б — 3D проецирование карты аномалий силы тяжести в редукции Буге,  $\Delta g$ , мГал

Fig. 2. Area of research: а — map of anomalies of the force of gravity in the reduction of Bouguer,  $\Delta g$ , mGal; б — 3D projection of the map of gravity anomalies in the reduction of Bouguer,  $\Delta g$ , mGal

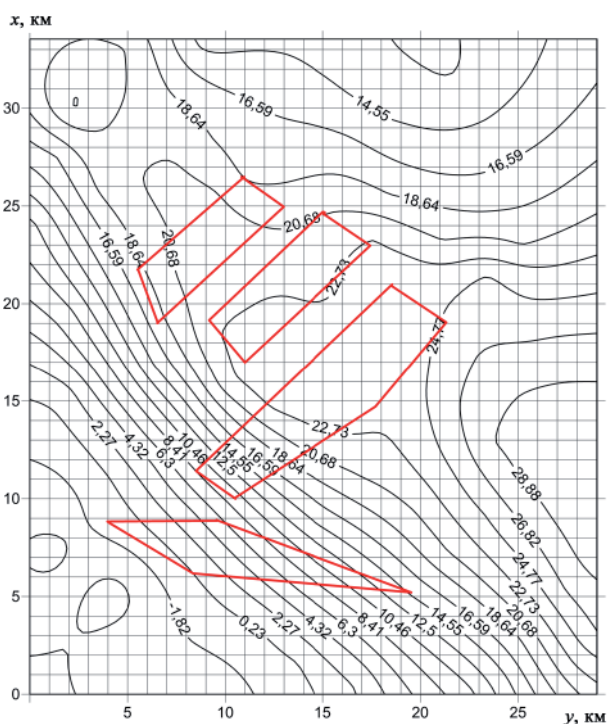


Рис. 3. Контуры нефтяных месторождений  
Fig. 3. Contours of oil fields

намагниченности;  $y_1, y_2$  — параметры простираения;  $x_i, z_i$  — параметры угловых точек аппроксимирующих контуров;  $N$  — количество угловых точек (сторон) в аппроксимирующем многограннике.

Размеры тела по простираению и его однородное намагниченность считались известными по априорным данным. Искомыми параметрами служили координаты угловых точек контура.

3. Класс звездных цилиндрических объектов [4]. Область, в которой сосредоточены намагниченные массы, имеет внешний контур, представленный непрерывной функцией в цилиндрической системе координат. Начало системы координат расположено в центре звездности. Каждый источник магнитного поля описан последовательностью параметров:

$$P2 = \{I_x, I_y, I_z; y_1, y_2; x_0, z_0, m_i, R_0, A_1, B_1, \dots, A_N, B_N\}. \quad (10)$$

Контур определяется величиной радиуса-вектора и зависит от угла отклонения этого радиуса от оси абсцисс. Имеем:

$$R = R(\varphi) = R_0 + \sum_{j=1}^{mf} A_j \cos j\varphi + B_j \sin j\varphi. \quad (11)$$

Предложенная технология описания вертикального сечения цилиндрических тел — аппроксимацией их контура тригонометрическим полиномом (по сравнению с кусочно-прямолинейной аппроксимацией), позволяет строить гладкие границы аномалиеобразующих тел при небольшом количестве параметров.

**Определение контуров геологических объектов при интерпретации гравимагнитных данных. Тургайская нефтегазоносная область Республики Казахстан.** В районе исследований ранее были открыты месторождения нефти, а также отмечены многочисленные нефте- и газопроявления в скважинах от коры выветривания, от фундамента до неокома включительно [6]. При решении задачи основной интерес представляют локальные гравитационные аномалии, полученные в результате выполнения гравиметрической съемки и введения необходимых поправок (рис. 2).

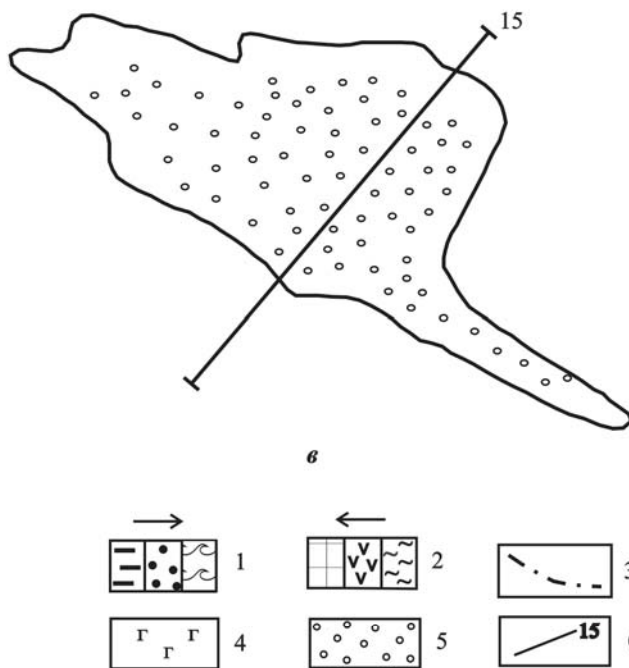
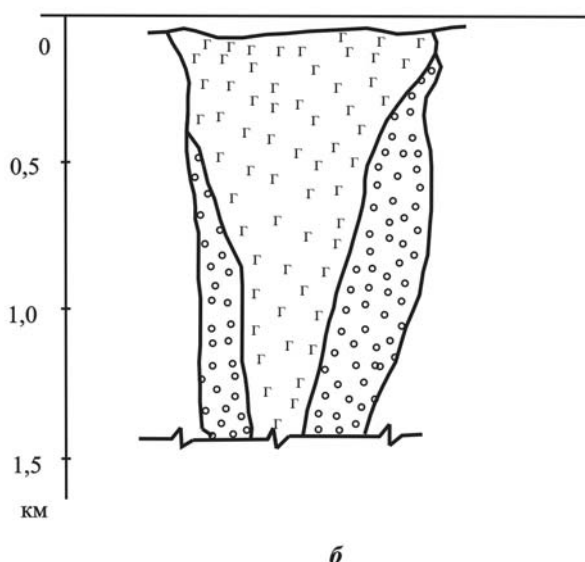
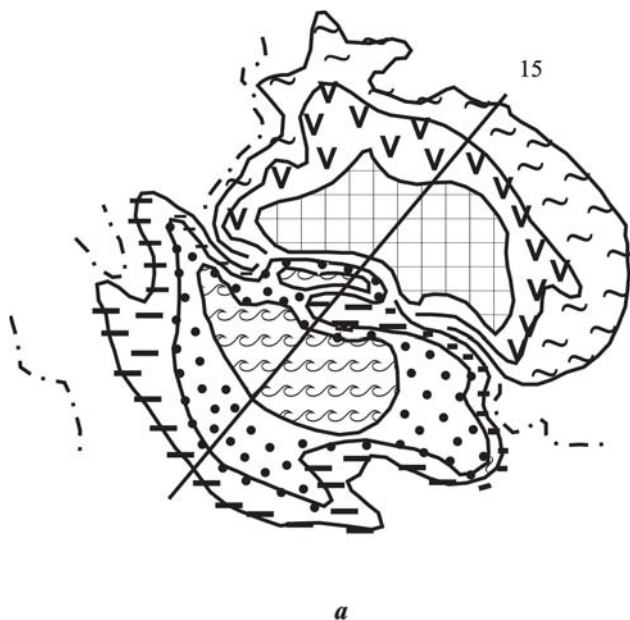


Рис. 4. Стремигородское тело рудных габброидов. Исходные данные для интерпретации: *a* — схема структуры магнитных аномалий; *контуры тела габброидов*: *б* — вертикальное сечение (вдоль профиля 15), *в* — план (на уровне эрозионного среза); *обширные максимумы поля  $\Delta Z$* : 1 — положительный, 2 — отрицательный (стрелками обозначено направление возрастания положительных и отрицательных значений напряженности поля); 3 — нулевая изодинама поля  $\Delta Z$ ; *тело габброидов*: 4 — меланократовая часть, 5 — лейкократовая оторочка; 6 — положение профиля интерпретации на схеме

Fig. 4. Stremygorodsky body of ore gabbroids. Input data for interpretation: *a* — a diagram of the structure of magnetic anomalies; *gabbroid body contours*: *б* — vertical section (along profile 15), *в* — plan (at the level of erosive cut); *extensive maxima of field  $\Delta Z$* : 1 — positive, 2 — negative (arrows indicate the direction of increase of positive and negative values of field strength); 3 — zero isometric of the field  $\Delta Z$ ; *gabbroid body*: 4 — melanocratic gabbroids, 5 — leucocratic fringe; 6 — position of the interpretation profile

В аномальном поле зафиксировано  $n = 120$  точек. В результате анализа имевшейся априорной информации построена модель начального приближения, состоящая из  $m = 120$  элементарных объектов. В качестве аппроксимирующих ячеек выбраны трехмерные стержневые тела. Первоначально источники задавались на глубине  $h = 1,2$  км. При выборе начальной модели задавалась избыточная плотность, равная  $-0,1$  г/см<sup>3</sup>. В результате решения получено значение среднего отклонения:  $\Delta_{\text{ср}} = 0,039$ . Построенная модель наиболее точно позволяет описать исходное аномальное поле аналитическим выражением. Глубины центров тяжести возмущающих источников варьируют от 1,1 до 1,94 км, значения избыточной плотности распределяются в интервале от  $-0,2$  до 3,69 г/см<sup>3</sup>.

Полученные результаты использованы для определения контуров нефтяных месторождений

(рис. 3). Глубина расположения возмущающих объектов достигает 2,5 км.

**Стремигородский участок Коростенского плутона.** В пределах Коростенского и Корсунь-Новомиргородского плутонов и их обрамления выявлены коренные месторождения и проявления апатит-ильменитовых и ильменит-титаномагнитовых руд, которые пространственно и генетически связаны с телами габброидов [7, 11]. В связи с поисками новых коренных залежей и уточнением характера распределения рудной минерализации в уже выявленных особого внимания заслуживают вопросы количественной интерпретации и истолкования гравитационных и магнитных аномалий над телами рудных габброидов. Интерпретация магнитных аномалий над телами и массивами габброидов, особенно вмещающих рудную минерализацию, представляет собой достаточно сложную задачу.

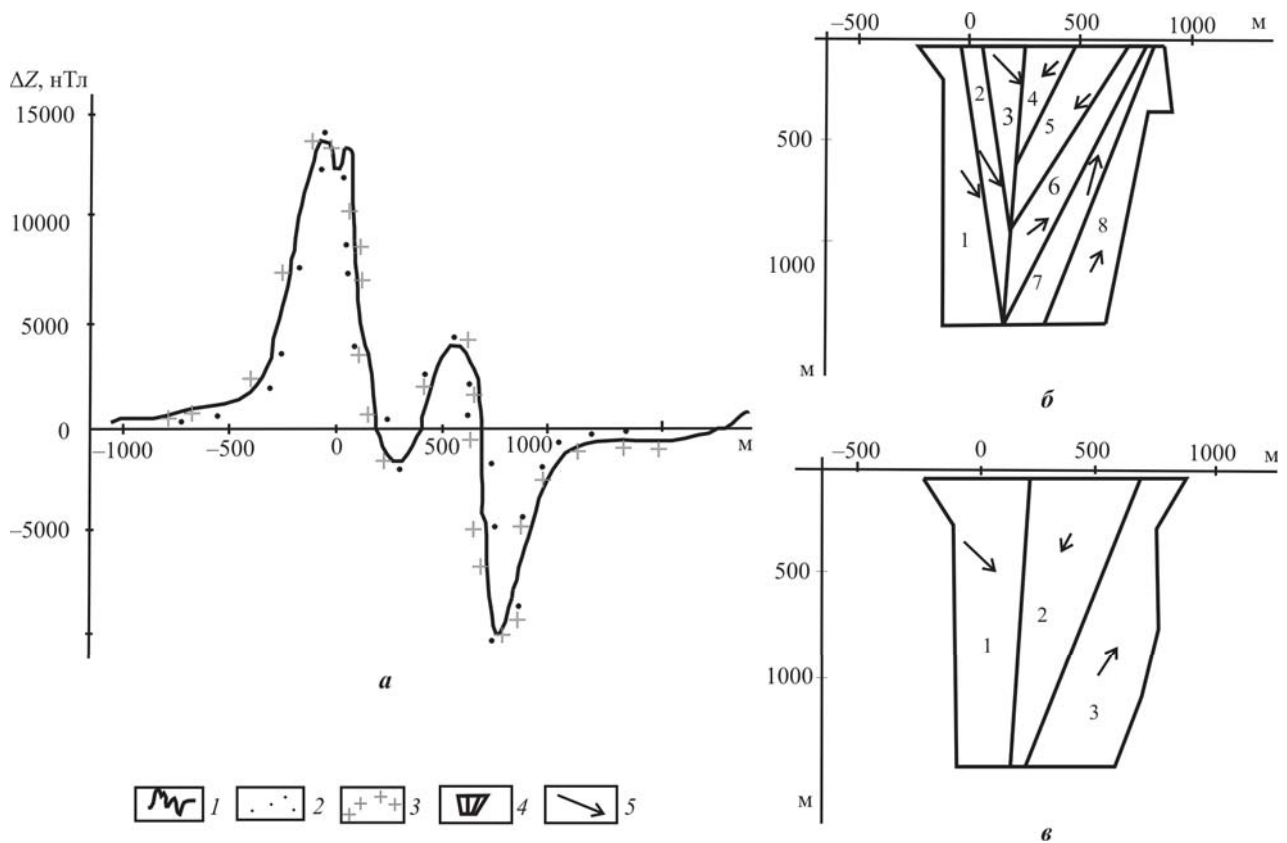


Рис. 5. Стремигородский участок, тело рудных габброидов: *a* — результаты интерпретации магнитных аномалий на профиле 15; модели распределения магнитоактивных источников: *б* — вариант 8, *в* — вариант 10; 1 — наблюдаемая аномалия  $\Delta Z$ ; рассчитанные аномалии: 2 — вариант 8, 3 — вариант 10; 4 — контуры сегментов модели; 5 — направление векторов эффективной намагниченности

Fig. 5. Stremygorodsky site the body of ore gabbroids: *a* — the results of the interpretation of magnetic anomalies on profile 15; models of distribution of magnetoactive sources: *б* — option 8, *в* — option 10; 1 — observed  $\Delta Z$  anomaly; anomalies calculated: 2 — option 8, 3 — option 10; 4 — contours of model segments; 5 — direction of the effective magnetization vectors

В качестве исходных данных для количественной интерпретации использовались: планы изодинам аномального магнитного и гравитационного полей масштаба 1:10 000; план-схемы и разрезы геологического строения тел рудных габброидов; данные измерений магнитных и плотностных свойств пород на образцах керна буровых скважин.

*Особенности процесса построения моделей.* Для построения моделей был выбран профиль 15 (рис. 4), который отображает наиболее существенные особенности поведения магнитных аномалий, обусловленные крупными сегментами тела габброидов, и, возможно, наименее искажен воздействием локальных неоднородностей.

Одна из примечательных особенностей магнитных аномалий этого профиля — интенсивные, сопряженные друг с другом положительный максимум и отрицательный минимум сдвинуты относительно эпицентра тела габброидов к его краевым зонам (рис. 5). Задача построения моделей решалась в режиме последовательных приближений на двух этапах: определение величины и направления векторов эффективной намагниченности сегментов модели; корректировка положения границ сегмен-

тов. На первом этапе удовлетворительное качество подбора наблюдаемого поля было достигнуто на базе аппроксимирующей конструкции, составленной из восьми сегментов (рис. 5). При анализе таких вариантов была упрощена геометрия модели — уменьшилось число сегментов: были заданы соответствующие начальные приближения, представленные конструкцией из трех сегментов, которые обеспечили качество подбора с точностью, ненамного уступающей вариантам из восьми сегментов.

Представленные на рис. 5 варианты модели, несмотря на различное число слагающих их сегментов, отображают одни и те же особенности распределения магнитоактивных источников. Характер расположения сегментов и направления векторов намагниченности подчеркивают концентрически-зональное строение тела рудных габброидов. На моделях показаны векторы эффективной намагниченности, характеризующие каждый из сегментов. У левого (юго-западного) края тела располагаются сегменты с прямой полярностью намагниченности (согласуется с направлением современного геомагнитного поля Земли), у правого (северо-восточного) края — с обратной. В краевых (периферийных)

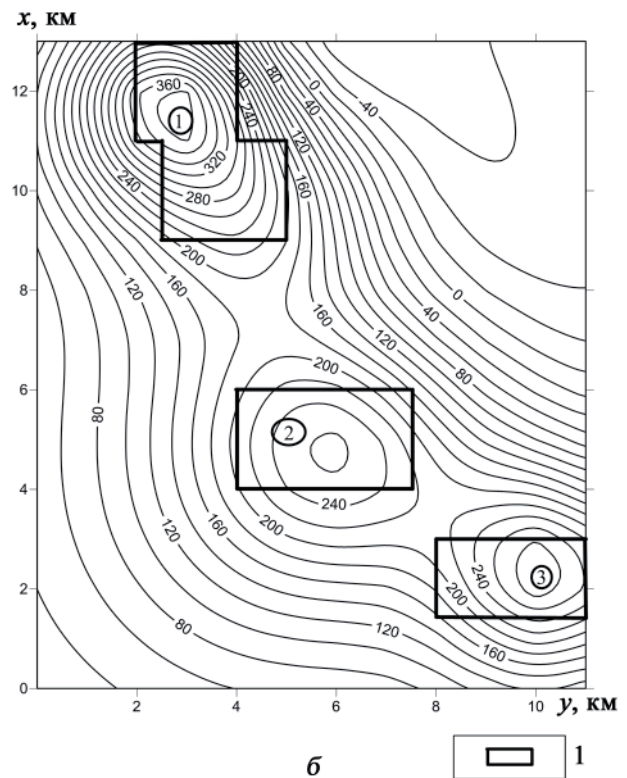
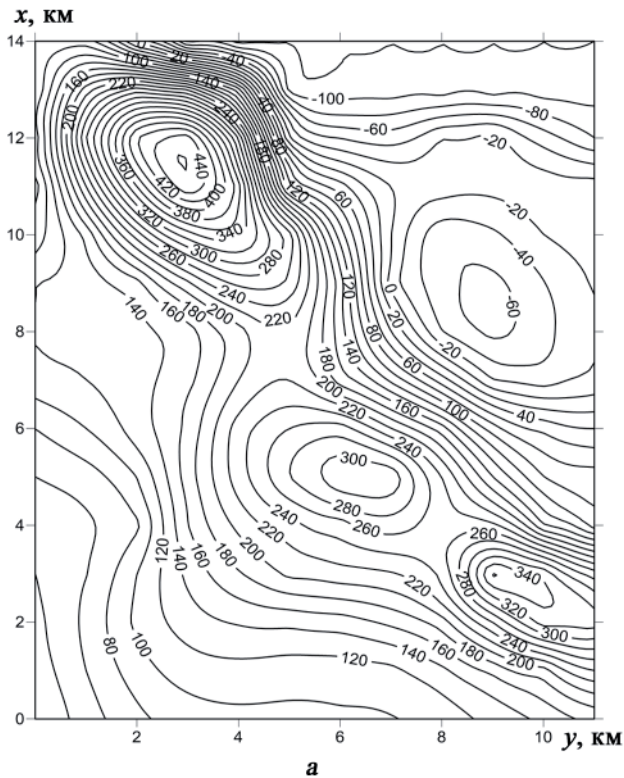


Рис. 6. Теоретическое поле, представленное вертикальной составляющей  $T_z^t$  (а), и полученное в результате решения обратной задачи, нТл (б): 1 — контуры возмущающих объектов

Fig. 6. The theoretical field represented by the vertical component  $T_z^t$  (a), obtained by solving the observed problem, nTl (b): 1—the contours of perturbing objects

сегментах векторы намагниченности имеют крутое падение, в центральной части модели — более пологое. Проведена интерпретация данных магнитных аномалий над телами рудных габброидов Коростенского плутона, Стремигородский участок. С учетом опыта интерпретации магнитных аномалий Стремигородской и Кропивенской штокообразных интрузий, а также данных литературных источников [8, 9, 18] были построены модели магнитоактивных источников, которые удовлетворяют наблюдаемым аномалиям (их зональной компоненте) и априорным геолого-геофизическим данным. Построенные модели носят неординарный характер. Магнитные аномалии, наблюдаемые над телами рудных габброидов, представляют собой результат суперпозиции нескольких компонент поля, различающихся геологической природой. Среди них доминирует составляющая (зональная компонента), которая отражает влияние тел габброидов в целом; ей свойственны наиболее интенсивные возмущения магнитного поля, что предопределяет характер построенных моделей. Имеются веские основания связывать происхождение зональной компоненты с тонкодисперсной вкрапленностью магнетита (гематита?) в пороодообразующих силикатах, замещенных в процессе постмагматических изменений вторичными ассоциациями минералов.

На фоне зональной компоненты проявляются аномалии локального характера, для некоторых из них можно предполагать связь с густовкрапленным оруденением (носители магнитных свойств — титаномагнетит, магнетит, сопутствующие ильмениту). По интенсивности локальные аномалии значительно уступают зональной компоненте.

Основное внимание при истолковании магнитных полей следует обращать на особенности морфологии аномалий средней интенсивности (от 200 до 2000 нТл) и их соотношение друг с другом. В связи с этим особую актуальность приобретают разработка методики распознавания «рудных» аномалий и их выделение из наблюдаемых полей.

**Алуштинско-Батумская магнитная аномалия Черного моря.** Рассматриваемая аномальная зона представляет собой полосу положительных и сопряженных с ними отрицательных аномалий. Общая протяженность зоны составляет более 600 км при ширине до 100 км [15]. Интенсивность отдельных максимумов этой зоны достигает  $\pm(600...900)$  нТл. Количественная интерпретация магнитных аномалий Черного моря выполнялась различными авторами [14, 19] в предположении, что основные аномалии вызваны намагниченными изолированными телами пластообразной формы, залегающими в толщах практически немагнитных осадочных образований чехла.

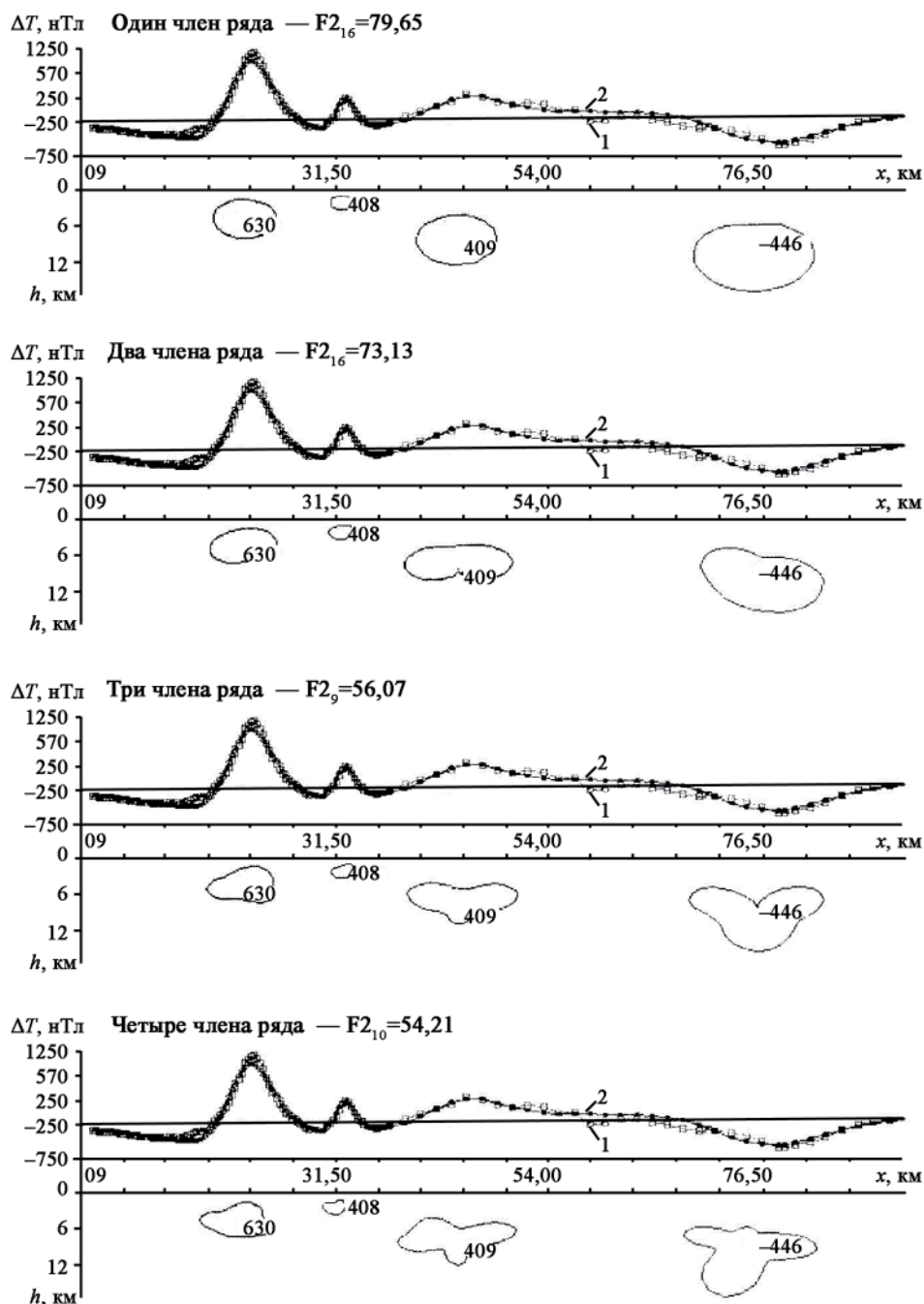


Рис. 7. Результаты определения конфигурации источников вдоль фрагмента галса 0704 в зависимости от количества членов ряда, аппроксимирующих радиусы-векторы тел

Fig. 7. The results of determining the configuration of sources along the fragment of gals 0704, depending on the number of members of the series, approximating the radius vector of bodies

Исходное аномальное поле участка исследований, размерностью  $11 \times 14$  км задано вертикальной составляющей вектора напряженности магнитного поля [12]. В аномальном поле зафиксировано  $n=228$  точек на уровне  $Z=0$ .

Построение моделей магнитоактивных источников осуществлялось аппроксимацией многоугольными контурами. Такой подход рассматривался ранее для района прогиба Сорокина в работах [9, 10]. Для решения задачи выбрана модель начального

приближения, состоящая из четырех элементарных тел. При решении обратной задачи точность подбора характеризуется максимальным отклонением  $\Delta_{\max}=76,77$  нТл и средним отклонением  $\Delta_{\text{cp}}=2,66$  нТл, что составляет  $0,7\%$ . На рис. 6 показано теоретическое поле  $T_{\text{т}}$  и аномалиеобразующие источники в плоскости  $xOy$ . Для первого блока возмущающие объекты расположены в интервале глубин от 2 до 4,5 км, для второго — от 3,5 до 9, для третьего блока — от 3 до 7 км. Таким образом, была получена

адекватная модель, которая вполне удовлетворяет наблюдаемому полю и согласуется с ранее полученными результатами других исследователей.

**Против Брансфилд.** Аппроксимационная ячейка представлена звёздным телом [13]. Координаты центров тяжести аномальных тел и начальные приближения радиусов-векторов задавались с учетом результатов аппроксимации многоугольными контурами. Задача решалась многократно с различным количеством членов усечённого тригонометрического ряда, аппроксимирующего радиусы-векторы отдельных объектов. Некоторые варианты решения данной задачи показаны на рис. 7. Анализ результатов позволяет сделать вывод: с увеличением числа членов ряда, аппроксимирующих радиусы-векторы объектов, увеличивается точность восстановления аномальной кривой и усложняются подобранные конфигурации объектов; сильно вытянутый объект с отрицательным намагничиванием в конце профиля приобретает очертания, близкие к изометрическим, и располагается на существенно большей глубине, чем на предыдущем этапе подбора; точность восстановления аномальной кривой, полученная при аппроксимации объектов многоугольными контурами, не достигается. Выше отмечалось, что на первом этапе моделирования одновременно с геометрическими параметрами подбиралась интенсивность намагничивания объектов. Полученные значения интенсивности намагничивания достаточно высокие, что противоречит выполненным измерениям намагниченности на образцах пород из данного региона. Поэтому на следующем этапе моделирования исследовалась возможность приближения аномального поля вдоль галса возмущающими объектами с меньшими значениями намагниченности. Для этой цели многократно решалась задача восстановления конфигурации объекта при различных фиксированных значениях намагниченности — 400; 300; 200; 150 ( $10^{-5}$  ед. СГСМ).

**Заключение.** Выполненные исследования позволяют утверждать: целевые функции, на минимизации которых построены алгоритмы минимизации, многоэкстремальны. Конечные результаты подбора в значительной степени зависят от выбора начального приближения. В данной работе тщательно изучалась априорная информация при интерпретации практических материалов. При недостатке априорной информации выбиралось несколько альтернативных вариантов построения начальной модели. При решении всех практических задач использовалась методика последовательного усложнения модели. В результате автоматизированного подбора от различных начальных приближений были получены варианты решений с близкими значениями функции цели, но с разными особенностями выбранной конфигурации тела и характером приближения исходного и модельного полей. Для формирования каждого допустимого решения поэтапно улучшались

варианты — повторение процедуры минимизации с последовательной корректировкой начальных приближений в диалоговом режиме. Несмотря на различные конфигурации частных решений, им присущи и общие свойства: хорошая сопоставимость положения центра тяжести тела и площади подобранных контуров сечений, а следовательно, и суммарной массы тела. Это соответствует известным положениям о высокой устойчивости восстановления интегральных характеристик объекта. Структура функционалов изменяется непосредственно в итерационном процессе минимизации. Помимо квадратичного приближения при формировании целевой функции применяются логарифмирование и нормирование сопоставляемых характеристик наблюдаемого и теоретического полей. Рассматриваемые возможности таких решений используются для построения аналитической модели исходного внешнего поля, для оценки местоположения намагниченных рудных тел, для конструирования сложной геологической модели, массы которой могут обусловить наблюдаемое поле.

Технология аппроксимации звездных тел сложной конфигурации значительно расширяет функциональные возможности программного комплекса, что позволяет реализовывать многошаговые стратегии подбора при моделировании практических аномальных объектов.

При интерпретации высокоточной гравиметрической съемки можно вычислить производные высших порядков и исключить влияние ближних к земной поверхности плотностных неоднородностей. Последовательное исключение плотностных неоднородностей даст возможность получить аномальный эффект от области, включающей нефтяную залежь, более точно. Если в аномальном поле этот эффект составляет небольшую часть, то в остаточном может преобладать. Дальнейшие исследования этого участка будут направлены на определение локальных эффектов и выделение границ области для проведения прямых поисков и постановки исследований другими геофизическими методами.

#### Список библиографических ссылок

1. Булах Е.Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Київ: Наукова думка, 2010. 462 с.
2. Булах Е.Г., Зейгельман М.С., Корчагин И.Н. Автоматизированный подбор гравитационных и магнитных аномалий: программно-алгоритмическое обеспечение и методические рекомендации. 1986. 236 с. Деп. в ВИНТИ, 08.12.86, № 8363 — в Деп.
3. Булах Е.Г., Лапина Е.П. К вопросу о построении аналитической модели внешнего магнитного поля. *Геофизический журнал*. 2008. Т. 30, № 2. С. 42—50.
4. Булах Е.Г., Михеева Т.Л. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии в классе горизонтальных цилиндрических тел. *Геофизический журнал*. 2004. № 5. С. 23—38.



5. Булах Е.Г., Шиншин И.В. Об аналитической аппроксимации исходного поля аномалии силы тяжести и его качественной интерпретации. *Физика Земли*. 2002. № 4. С. 67–74.
6. Воцалевский Э.С., Куадыков Б.М., Булекбаев З.Е. и др. Месторождения нефти и газа Казахстана: справочник. Москва: Недра, 1993.
7. Галецкий Л., Ремезова О. Титанові руди України. *Геолог України*. 2007. № 3. С. 51–61.
8. Егорова Т.П., Курганова Л.И., Старостенко В.И. Объемное плотностное моделирование Кропивненского рудного тела: опыт применения методики с быстрым преобразованием Фурье. *Геофизический журнал*. 1992. Т. 14, № 1. С. 48–52.
9. Зейгельман М.С., Михеева Т.Л., Панченко Н.В. К истолкованию магнитных аномалий над телами рудных габброидов Коростенского плутона (Украинский щит). *Геофизический журнал*. 2011. Т. 33, № 1. С. 114–127.
10. Зейгельман М.С., Панченко Н.В. Обратная задача магниторазведки: особенности технологии поиска многовариантных решений. Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: зб. наук. праць. Київ, 2011. С. 158–169.
11. Кривдик С.Г., Дубина О.В., Гуравський Т.В. Деякі мінералогічні та петрологічні особливості рудоносних (фосфор, титан) габроїдів анортозит-рапаківігранітних плутонів Українського щита. *Мінералогічний журнал*. 2008. Т. 30, № 4. С. 41–57.
12. Лапина Е.П., Михеева Т.Л., Панченко Н.В. Локализация геологических объектов по магнитометрическим данным с использованием алгоритмов автоматизированного подбора. *Геофизический журнал*. 2016. Т. 38, № 6. С. 160–173.
13. Михеева Т.Л., Лапина Е.П., Панченко Н.В. Моделирование магнитометрических данных с использованием алгоритмов автоматизированного подбора. *Геоінформатика*. 2018. Т. 65, № 1. С. 48–54.
14. Орлюк М.И., Пашкевич И.К., Лебедь Т.В. 3D магнитная модель земной коры Азово-Черноморского региона. *Геофизический журнал*. 2009. Т. 31, № 5. С. 102–114.
15. Осипов Г.В., Свистунов Ю.И., Терехов А.А. О возможной природе Алуштинско-Батумской магнитной аномалии на Черном море. *Геотектоника*. 1977. № 1. С. 74–79.
16. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. Киев: Наукова думка, 1978. 228 с.
17. Страхов В.Н. К вопросу о единственности решения плоской обратной задачи теории потенциала. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1972, № 2. С. 38–48.
18. Тарасенко В.С. Критерии локального прогнозирования фосфатно-титановых руд в габбро-анортозитовых массивах Украинского щита. *Геологический журнал*. 1988. № 6. С. 33–43.
19. Туголесов Д.А., Горшков А.С., Мейснер Л.Б. и др. Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впадины. Москва: Недра, 1985. 210 с.

Поступила в редакцию 08.11.2018 г.

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНТУРІВ ГЕОЛОГІЧНИХ ТІЛ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ПОТЕНЦІЙНИХ ПОЛІВ

*Т.Л. Михеева, Е.П. Лапіна, Н.В. Панченко*

*Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна*

Проведено інтерпретацію початкових гравіметричних і магнітометричних даних з метою визначення геометричних параметрів аномалієзбурювальних тіл з використанням автоматизованої системи інтерпретації потенційних полів. Побудовано числову модель аномального гравіметричного та магнітометричного полів та проведено якісну й кількісну інтерпретацію отриманих результатів. На основі трьох апроксимувальних конструкцій (стрижневих тіл, горизонтально розташованих; обмежених за простяганням призм з вертикальним перерізом у вигляді однозв'язного багатокутного контуру, зоряних тіл), змодельовано локальні аномалієзбурювальні джерела. Апробовано методику визначення глибини залягання центрів тяжіння тіл, верхньої та нижньої кромок підібраних джерел. У алгоритмічному сенсі реалізація методу автоматизованого підбору зводиться до мінімізації багатопараметричних функціоналів. Структура функціоналів змінюється безпосередньо в ітераційному процесі мінімізації. Крім квадратичного наближення при формуванні цільової функції застосовано логарифмування і нормування характеристик спостереженого і теоретичного полів, які зіставляються. Можливості таких рішень використано для конструювання складної геологічної моделі, маси якої можуть зумовити спостережене поле. Розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення випробувано на модельних прикладах і за реальними гравіметричними і магнітометричними даними.

**Ключові слова:** якісна і кількісна інтерпретація, обернена задача, автоматизована система, аналітична апроксимация, гравітаційне поле, магнітне поле, апроксимаційна комірка, геологічний об'єкт.

## TECHNOLOGY FOR DETERMINING THE CONTOURS OF GEOLOGICAL BODIES USING AN AUTOMATED SYSTEM FOR INTERPRETING POTENTIAL FIELDS

*T.L. Mikheeva, E.P. Lapina, N.V. Panchenko*

*S.I. Subbotin Institute of Geophysics NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine*

**Purpose.** The initial gravimetric and magnetometric data were interpreted to determine the geometrical parameters of anomalous forming bodies using an automated system for interpreting potential fields.

**Design/methodology/approach.** In the process of research, a numerical model of the anomalous gravimetric and magnetometric fields was constructed and the results were qualitatively and quantitatively interpreted. On the basis of three approximating structures: rod bodies, horizontally located prisms limited in strike, with a vertical section in the form of a simply connected polygonal contour, and star bodies, local anomalies-forming sources were simulated.

**Findings.** The method of determining the depth of the centers of gravity of the bodies, the upper and lower edges of selected sources was tested.

**Practical significance/implications.** In algorithmic terms, the implementation of the automated selection method is reduced to minimizing multiparameter functionals. The structure of the functionals is changed directly in the iterative minimization process. In addition to the quadratic approximation, the logarithm and normalization of the compared characteristics of the observed and theoretical fields are used in the formation of the objective function. The considered capabilities of such solutions are used to construct a complex geological model, the masses of which may determine the observed field. The developed software and algorithmic software was tested on model examples and real areal gravimetric and magnetometric data.

**Keywords:** qualitative and quantitative interpretation, inverse problem, automated system, analytical approximation, gravitational field, magnetic field, approximation cell, geological object.

## References

1. Bulakh E.G. Priamyie i obratnye zadachi gravimetrii i magnitometrii. Kiev: Naukova dumka, 2010. 462 p.
2. Bulakh E.G., Zeigelman M.S., Korchagin I.N. Avtomatizirovanniy podbor gravitacionnykh i magnitnykh anomalii: programmno-algoritmicheskoe obespechenie i metodicheskie rekomendatsii. 1986. 236 p. Dep. v VINITI, 08.12.86. N 8363 – v Dep.
3. Bulakh E.G., Lapina E.P. K voprosu o postroenii analiticheskoi modeli vneshnego magnitnogo polia. *Geofizicheskii zhurnal*. 2008. Vol. 30, N 2. P. 42–50.
4. Bulakh E.G., Mikheeva T.L. Priamyie i obratnye zadachi gravimetrii i magnitometrii v klasse gorizontalnykh teilyndricheskikh tel. *Geofizicheskii zhurnal*. 2004. N 5. P. 23–38.
5. Bulakh E.G., Shinshin I.V. Ob analiticheskoi approksimatsii iskhodnogo polia anomalii sily tiazhesti i ego kachestvennoi interpretatsii. *Fizika Zemli*. 2002. N 4. P. 67–74.
6. Votcalevskii E.S., Kuadykov B.M., Bulekbaev Z.E. i dr. Mestorozhdeniia nefi i gaza Kazakhstana: spravochnik. Moscow: Nedra, 1993.
7. Galetkii L., Remezova O. Titanovi rudi Ukraïni. *Geolog Ukraïny*. 2007. N 3. P. 51–61.
8. Egorova T.P., Kurganova L.I., Starostenko V.I. Obemnoe plotnostnoe modelirovanie Kropivnenskogo rudnogo tela: opyt primeneniia metodiki s bystrym preobrazovaniem Fur'e. *Geofizicheskii zhurnal*. 1992. Vol. 14, N 1. P. 48–52.
9. Zeigelman M.S., Miheeva T.L., Panchenko N.V. K istolkovaniiu magnitnykh anomalii nad telami rudnykh gabbroidov Korostenskogo Plutona (Ukrainski scit). *Geofizicheskii zhurnal*. 2011. Vol. 33, N 1. P. 114–127.
10. Zeigelman M.S., Panchenko N.V. Obratnaia zadacha magnitorazvedki: osobennosti tehnologii poiska mnogovariantnykh resheni. Teoretichni ta prikladni aspekti geoinformatiki. Kyiv, 2011. P. 158–169.
11. Krivdik S.G., Dubina O.V., Guravski T.V. Deiaki mineralogichni ta petrologichni osoblivosti rudonosnih (fosfor, titan) gabbroidiv anortozit-rapakivgranitnih plutoniv Ukraïnskogo scita. *Mineralogichniy jurnal*. 2008. Vol. 30, N 4. P. 41–57.
12. Lapina E.P., Lapina E.P., Miheeva T.L., Panchenko N.V. Lokalizaciia geologicheskikh obektov po magnitometriceskim dannym s ispolzovaniem algoritmov avtomatizirovannogo podbora. *Geofizicheskii jurnal*. 2016. Vol. 38, N 6. P. 160–173.
13. Miheeva T.L., Lapina E.P., Panchenko N.V. Modelirovanie magnitometriceskikh dannyh s ispolzovaniem algoritmov avtomatizirovannogo podbora. *Geoinformatika*. 2018. N 1(65). P. 48–54.
14. Orliuk M.I., Pashkevich I.K., Lebed T.V. 3D magnitnaia model zemno kory Azovo-Chernomorskogo regiona. *Geofizicheskii zhurnal*. 2009. Vol. 31, N 5. P. 102–114.
15. Osipov G.V., Svistunov Iu.I., Terehov A.A. O vozmojno prirode Alushtinsko-Batumsko magnitno anomalii na Chernom more. *Geotektonika*. 1977. N 1. P. 74–79.
16. Starostenko V.I. Ustoichivye chislennyye metody v zadachakh gravimetrii. Kiev: Naukova dumka, 1978. 228 p.
17. Strakhov V.N. K voprosu o edinstvennosti resheniia ploskoi obratnoi zadachi teorii potenciala. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. 1972. N 2. P. 38–48.
18. Tarasenko V.S. Kriterii lokalnogo prognozirovaniia fosfatno-titanovykh rud v gabbro-anortozitovykh massivah Ukraïnskogo scita. *Geologicheskii zhurnal*. 1988. N 6. P. 33–43.
19. Tugolesov D.A., Gorshkov A.S., Mesner L.B. i dr. Tektonika mezokanozokskih oblojeni Chernomorsko vpadiny. Moscow: Nedra, 1985. 210 p.

Received 08/11/2018