

Локализация геологических объектов по магнитометрическим данным с использованием алгоритмов автоматизированного подбора

© *Е. П. Лапина, Т. А. Михеева, Н. В. Панченко, 2016*

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 14 июля 2016 г.

Представлено членом редколлегии И. Н. Корчагиным

Запропонований метод проведення якісної та кількісної інтерпретації вихідних магнітометричних даних на основі використання аналітичної апроксимації потенціальних полів та деякої сукупності похідних вищих степенів. У процесі досліджень було вирішено наступні задачі: виконано побудову числової моделі аномального поля, обчислені трансформанти магнітного поля та проведена якісна інтерпретація отриманих результатів, виконано моделювання локальних аномальних джерел. Розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення, опробоване на модельних прикладах та реальних магнітометричних даних, отриманих для району Алуштинсько-Батумської аномальної зони в акваторії Чорного моря.

Ключові слова: якісна та кількісна інтерпретація, обернена задача, аналітична апроксимація, магнітне поле, похідні вищих степенів, геологічний об'єкт.

Введение. Необходимость получения трехмерных распределений плотности и намагниченности пород диктуется практикой геофизических работ и усложнением геологических задач. Поэтому в последние годы интенсивно развиваются новые методы интерпретации потенциальных геофизических полей, цель которых — построение трехмерной модели геологической среды, адекватной наблюдаемому полю и имеющейся априорной информации.

Основным этапом применения любого геофизического метода при прогнозировании, поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, является геологическая интерпретация аномальных физических полей. Как известно [Старостенко, 1978; Страхов, 1995а,б; 2001; 2007; Кобрунов, 1995; Булах, 1999; 2010; Долгаль, 2002; Блох, 2012; Балк, Долгаль, 2013] и многих других исследователей, современное состояние теории интерпретации геофизических данных при достаточно высоком уровне ее развития характеризуется неполной адекватностью реальной геологической практике. Для обеспечения содержательной количественной интерпретации одним из основных моментов является выбор соответствующей параметризации изучаемого объема среды, формирование модельных физико-геологических представлений. Это требует определенных объе-

мов априорной информации о геологическом строении и петрофизических характеристиках исследуемого района. Уточнение имеющихся модельных представлений выполняется с применением эффективных и удобных современных компьютерных технологий, позволяющих проводить построение и визуализацию интерпретационных моделей. Обзор работ в этом направлении сделан в публикации [Булах, 1999]. В настоящее время широко применяется программный комплекс интерпретации данных потенциальных полей, предназначенный для автоматизированного введения изображений геолого-геофизических карт с дальнейшим преобразованием в цифровую информацию и последующим выполнением 3D интерпретационных построений [Старостенко и др., 2015].

Принципиально новую генерацию методов минимизации, используемых в прикладной геофизике при изучении формы, и пространственного положения источников поля представляют монтажные алгоритмы решения нелинейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки. Основы монтажного подхода были заложены в работах А. В. Овчаренко [Овчаренко, 1975] и В. Н. Страхова [Страхов, Лапина, 1976]. Над развитием этого направления также проводились исследования [Завойский, Неижсал, 1979; Булах, Корчагин,

1989]. Дальнейшие исследования и развитие монтажного метода, рассчитанного на применение при изучении трехмерных геологических тел и структур, представлено в работах [Балк и др., 1993, 2009]. Концепция монтажного подхода соответствует многим требованиям в современной теории решения обратных задач геофизики.

Актуальным вопросом остается усовершенствование способов комплексирования приемов качественной и количественной интерпретации геопотенциальных полей. При интерпретации гравитационных и магнитных аномалий иногда удобнее использовать не значения наблюдаемого поля, а их некоторые трансформированные аналоги, полученные вычислительным путем. Под трансформацией здесь понимается некоторое преобразование исходного аномального поля с целью выделения одних его особенностей и подавления других, менее существенных для решения поставленной геологической задачи. Как правило, на основе визуального анализа набора трансформант трассируются предполагаемые контуры аномалиеобразующих объектов в плане, прослеживаются разделяющие их тектонические нарушения, выделяются источники поля приповерхностного и глубинного происхождения.

Для описания численно заданных наблюдаемых полей можно использовать аналитические выражения, которые позволяют вычислять производные высших степеней и применять их при исследовании локальных аномалиеобразующих объектов, при изучении месторождений нефти и газа, рудных и нерудных полезных ископаемых [Старостенко, 1970; Маловичко, Тарунина, 1981; Костицын, 2002].

В статье представлены результаты применения разработанной в отделе математической геофизики компьютерной технологии для реализации качественной и количественной интерпретации практических данных аэромагнитной съемки Алуштинско-Батумской аномальной зоны в акватории Черного моря масштаба 1:1000 000.

Теоретические основы использованных алгоритмов интерпретации. Пусть в некоторых односвязных областях $D_j, j=1, 2, \dots, k$, сосредоточены однородно намагниченные массы, которые обуславливают зафиксированное в точках наблюдений аномальное магнитное поле. В этом поле выбрано n точек и сформирован массив данных:

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

Под функцией $U_{\text{исх}}(i)$ будем понимать аномальное гравитационное или магнитное поле, их производные или другие трансформанты.

В рассматриваемой задаче первоначально было задано аномальное магнитное поле, являющееся результатом полевых измерений современной магниторазведочной аппаратурой:

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

При дальнейшем решении задачи используются скалярные функции — вертикальная составляющая Z и модуль горизонтальной составляющей напряженности H внешнего относительно источников магнитного поля:

$$Z(i) = T_z(i); \quad H(i) = \left(T_x(i)^2 + T_y(i)^2 \right)^{1/2}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

В процессе решения трехмерной обратной задачи магнитометрии в классе стержневых тел [Булах, Лапина, 2002; 2008; Булах 2010] осуществляется истокообразная аппроксимация аномального магнитного поля и последующее вычисление его трансформант. Выбрана прямоугольная система координат: ее начало расположено на земной поверхности, ось Oz направлена вертикально вниз, тогда плоскость xOy совпадает с дневной поверхностью, если она является горизонтальной. Исходное поле приближается магнитным полем некоторой совокупности элементарных тел. Каждое элементарное тело состоит из трех взаимно перпендикулярных материальных стержней. Точка пересечения стержней является центром тяжести тела. Каждый стержень вытянут по направлению соответствующей координатной оси. Общая геологическая модель, состоящая из совокупности стержней, определена последовательностью параметров:

$$P = \left\{ m, (c_x, c_y, h)_j; (2t_x, 2t_y, 2t_z)_j; (I_x, I_y, I_z)_j \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

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 намагничивания стержневых масс. В результате решения обратной задачи получим численные значения параметров аппроксимационной модели, позволяющие описать исходное поле $\Delta T_n(i)$ аналитической

функцией и рассчитать некоторые интегральные характеристики возмущающих объектов.

Для проведения качественного анализа аномального магнитного поля также используются производные высших степеней [Маркова, Лапина, 2013, 2014]. На основании построенной аппроксимационной конструкции путем применения соответствующих операторов решения прямой задачи магниторазведки определяем производные высших степеней для вертикальной и горизонтальных составляющих магнитного поля:

$$\frac{\partial T_z}{\partial z}, \frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2}, \frac{\partial^3 T_z}{\partial z^3}, \frac{\partial^3 T_z}{\partial x \partial y \partial z}, \frac{\partial^2 T_z}{\partial z \partial x},$$

$$\frac{\partial^3 T_z}{\partial z \partial^2 x}, \frac{\partial^2 T_z}{\partial z \partial y}, \frac{\partial^3 T_z}{\partial z \partial^2 y} \text{ и т. д.},$$

которые позволяют локализовать положения центров тяжести аномалиеобразующих объектов, разделить близко расположенные друг к другу объекты, а также выделить небольшие и неглубоко расположенные тела относительно более крупных и более погруженных намагниченных объектов. Для уточнения конфигурации магнитоактивных источников целесообразно перейти к решению обратной задачи для другой параметризации источников, представленной 2,5D-многогранниками [Булах и др., 1986]. Каждый источник магнитного поля теперь будет описан последовательностью параметров:

$$P1 = \{I_x, I_y, I_z; y_1, y_2; x_1, z_1, x_2, z_2, \dots, x_N, z_N\}, \quad (5)$$

где I_x, I_y, I_z — составляющие вектора интенсивности намагничивания по осям Ox, Oy, Oz ; y_1, y_2 — координаты тела по простиранию; x_i, z_i — координаты угловых точек аппроксимирующих контуров в разрезе; N — количество угловых точек (сторон) многогранника.

Для решения задачи успешно применяется итерационный метод моделирования – метод автоматизированного подбора [Булах и др., 1976; Булах, 1999; 2006 и др.]. Используемый подход к решению обратных задач сводится к минимизации специально построенных функционалов. С этой целью используется градиентный метод скорейшего спуска.

Практический пример решения обратной задачи магнитометрии. В 60-х годах XX ст. Я. П. Маловицким, Б. Д. Угловым, Г. В. Осиповым в пределах остаточного рифтогенного поднятия Шатского и Восточно-Черноморского

рифтогенного прогиба была выделена крупная Алуштинско-Батумская магнитная аномалия. Рассматриваемая аномальная зона представляет собой полосу положительных и сопряженных с ними отрицательных магнитных аномалий. Общая протяженность зоны составляет более 600 км при ширине до 100 км [Осипов и др., 1977; Геология..., 1987]. Интенсивность отдельных экстремумов внутри этой зоны достигает $\pm(600—900)$ нТл. Источники аномалии имеют сложную природу [Туголесов и др., 1985; Орлюк и др., 2009]. По мнению авторов работы [Маловицкий и др., 1972] предполагается, что аномальная зона отражает крупный глубинный разлом, вдоль которого произошло внедрение магматических пород основного и ультраосновного составов, сформировавших магнитоактивные тела на глубинах от 11 до 20 км. В работе [Земная..., 1975] приведены результаты расчетов глубины залегания нижних кромок тел в пределах Черноморской впадины, они находятся в диапазоне от 24 до 48 км. Некоторыми исследователями установлено, что распределение глубинных температур в земной коре Черноморской впадины не предполагает возможности сохранения намагниченности на глубинах свыше 30 км. Расчеты показывают, что изотерма Кюри магнетита (580°C) здесь расположена на глубинах 25—30 км [Бурьянов и др., 1983]. Существует также предположение об области палеорифта, источники аномалий в котором формируют два структурных уровня, резко различающихся по глубине залегания [Осипов и др., 1977]. Нижний структурный уровень находится вблизи поверхности основания Черноморской впадины. Верхний уровень образуют тела, расположенные на глубинах 5—8 км, т. е. в толще осадочного чехла. Расчеты интенсивности намагничивания источников Алуштинско-Батумской аномальной зоны показали, что средняя ее величина составляет около 1,3 А/м, и изменяются от 0,5 до 3 А/м. Вектор намагничивания направлен по современному полю Земли. Количественная интерпретация магнитных аномалий Черного моря выполнялась различными авторами в предположении, что основные аномалии вызваны намагниченными изолированными телами пластообразной формы, залегающими в толщах практически немагнитных осадочных образований чехла.

Решение данной задачи проводилось в несколько этапов.

1 этап. Вычисление поля, обусловленного аппроксимационной моделью — совокупностью

стержней. Исходное аномальное поле участка исследований размерностью 11×14 км задано вертикальной составляющей вектора напряженности магнитного поля (рис. 1). В аномальном поле зафиксировано $n=228$ точек на уровне $Z=0$. При решении задачи применялись различные методические приемы: моделирование по частям сложных объектов; при различных вариантах закрепления параметров модели; при различных режимах работы программы; многократное решение одной и той же задачи с различными начальными приближениями, модель задавалась как с большим, так и с меньшим числом элементарных тел, которые располагались более глубоко и ближе к поверхности. Для выбора оптимального решения служат максимальное отклонение Δ_{\max} и среднее отклонение $\Delta_{\text{ср}}$ между исходным и теоретическим полями. В табл. 1 приведены значения уровней глубины залегания источников и значения максимального и среднего отклонений при различных вариантах решения задачи. Проанализировав полученные результаты, отметим, что в первых двух случаях при глубинах $h=25$ км и $h=20$ км приемлемых результатов решения задачи не получено.

На уровне глубины $h=15$ км вычислительный процесс осуществляется медленно как

Т а б л и ц а 1. Результаты решения задачи при многовариантном подбoре

Номер	h , км	Δ_{\max} , нТл	$\Delta_{\text{ср}}$, нТл
1	25	222,01	56,58
2	20	205,03	55,39
3	15	99,89	35,85
4	10	73,92	24,51
5	5	74,06	24,36
6	2	64,66	16,67

по скорости сходимости функционала, так и по подбору параметров модели. Полученное решение можно считать удовлетворительным.

При глубине расположения источников $h=10$ км подбирались как физические, так и геометрические параметры модели. Получено решение, где глубины центров тяжести аномальных источников распределились в интервале от 1,5 до 15 км.

Далее начальная глубина расположения объектов составляет $h=5$ км, вариации глубин расположения центров тяжести возмущающих источников расположены в интервале от 3,6 до 5,3 км, нижняя кромка расположена от

5,5 до 8 км. Полученные численные значения параметров модели с достаточной точностью соответствуют наблюдаемому полю.

Выберем модель, состоящую из $m=18$ элементарных тел на глубине $h=2$ км. В результате решения задачи получена модель, которая наиболее точно позволяет описать исходное аномальное поле аналитическим выражением, значения максимального и среднего расхождений приведены в табл. 1. Точность подбора составляет 3,6 % от максимальной амплитуды поля. Глубины центров тяжести возмущающих источников варьируют от 1,6 до 8 км. Тело с наименьшей глубиной расположено на периферийном участке района исследований. Полученные результаты использованы для построения карты изодинам теоретического поля (рис. 2) и расположения центров тяжести тел подобранной модели в плоскости xOy . На рис. 3, а, б приведены схемы изогипс глубины залегания центров тяжести и нижней кромки подобранных источников соответственно. Глубина расположения объектов достигает 10 км. Этот результат по экспертным оценкам является одним из лучших вариантов решения задачи.

II этап. Вычисление и анализ трансформант магнитного поля. Используя ранее подобранную модель эквивалентных источников магнитного поля, вычислим функции производных высших степеней и проанализируем полученные результаты. На рис. 4, а—г представлены карты изолиний производных высших степеней:

$$\frac{\partial T_z}{\partial z}, \frac{\partial^2 T_z}{\partial^2 z}, \frac{\partial^3 T_z}{\partial^3 z}, \frac{\partial^3 T_z}{\partial z \partial^2 x}$$

Аномалия $\partial T_z / \partial z$ по своей конфигурации согласуется с наблюдаемым полем Z_n . Для выделения локальных аномалий используются вторая производная аномального магнитного поля и его производные высших порядков, по графикам вертикальных производных отчетливо выделяются верхние кромки возмущающих объектов, а графики горизонтальных производных имеют экстремумы над угловыми точками аномалиеобразующих тел. На карте изолиний второй производной $\partial^2 T_z / \partial^2 z$ прослеживается четкое разделение аномалий, обусловленных близко расположенными объектами, на построенных картах производных $\partial^3 T_z / \partial^3 z$ и $\partial^3 T_z / \partial z \partial^2 x$ (см.

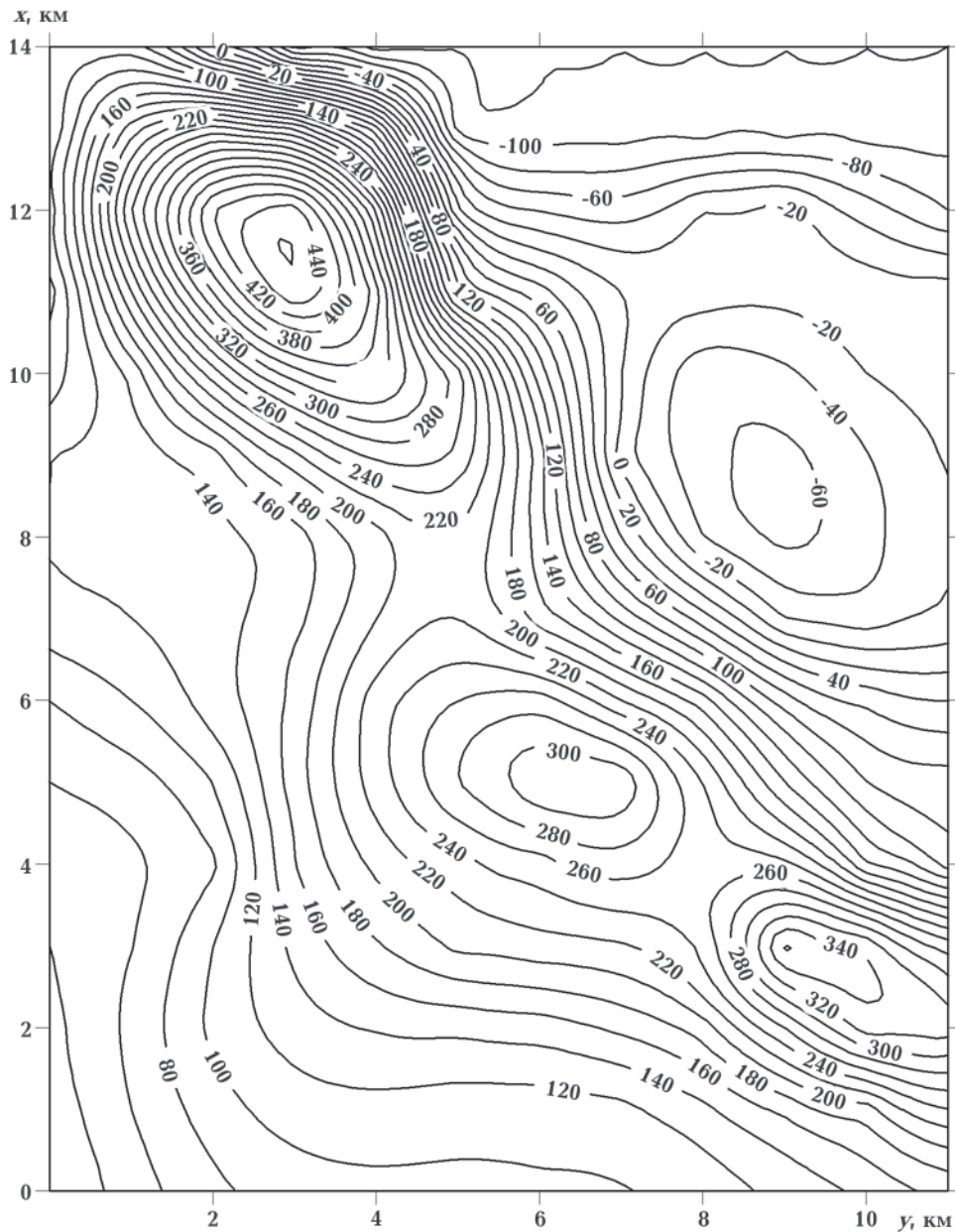


Рис. 1. Карта изодинам вертикальной составляющей напряженности магнитного поля Z_v , нТл.

рис. 4, в, г) хорошо отображены как неглубоко расположенные источники, так и глубинные. В данном случае на картах производных достаточно четко отмечаются границы отдельных объектов, несмотря на их глубинный характер. Это дает основание предположить о значительной мощности данных объектов. Анализируя построенные карты изогипс магнитного поля (см. рис. 3 а, б) и карты его трансформант (см. рис. 4, а—г), выделяем несколько блоков: первый — нижняя кромка в интервале глубин от 5

до 10 км; второй — на глубине до 10 км; третий — нижняя кромка возмущающих источников на глубине до 9 км.

Таким образом, данные результаты подтверждают полученные ранее и предположения о глубинном характере источников магнитных аномалий, приведенные в работах [Осипов и др., 1977; Геология..., 1987]. Приняв во внимание эти сведения, можно упростить первоначальную геологическую модель, уточнить ее параметры и перейти к количественной

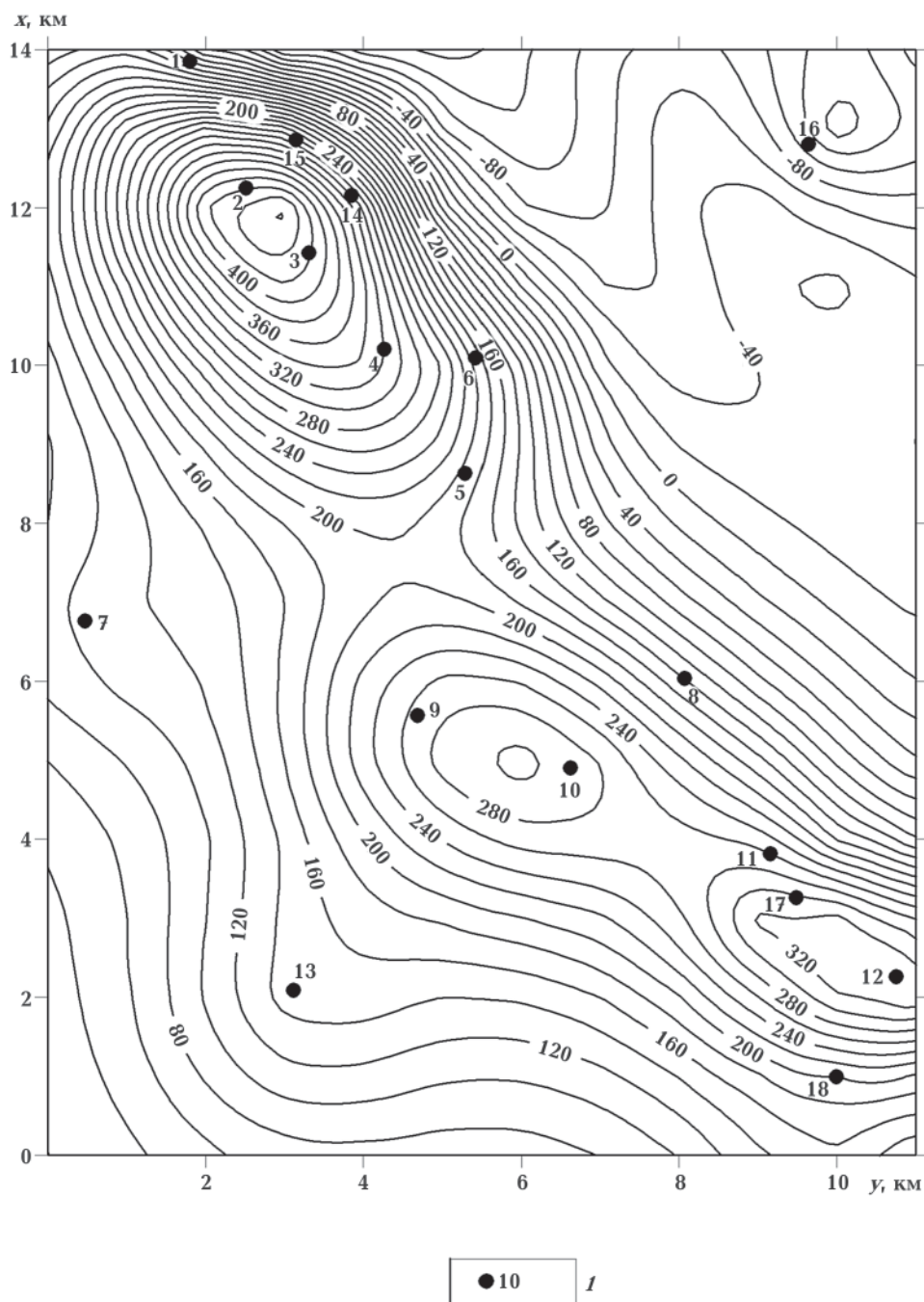


Рис. 2. Карта изодинам вертикальной составляющей напряженности магнитного поля Z_n , обусловленной аппроксимационной моделью (совокупностью стержней), нТл: 1 — местоположение центров тяжести элементов аппроксимационной конструкции.

интерпретации аномального магнитного поля.

III этап. Выделение и оконтуривание магнитоактивных источников. Построение 2.5D-моделей магнитоактивных источников осуществлялось аппроксимацией многоугольными контурами. Такой подход рассматривался ранее для района прогиба Сорокина [Зейгель-

ман, Панченко, 2011; Зейгельман и др., 2011]. 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 $\Delta_{\text{ср}}=2,66$ нТл, что составляет 0,7%.

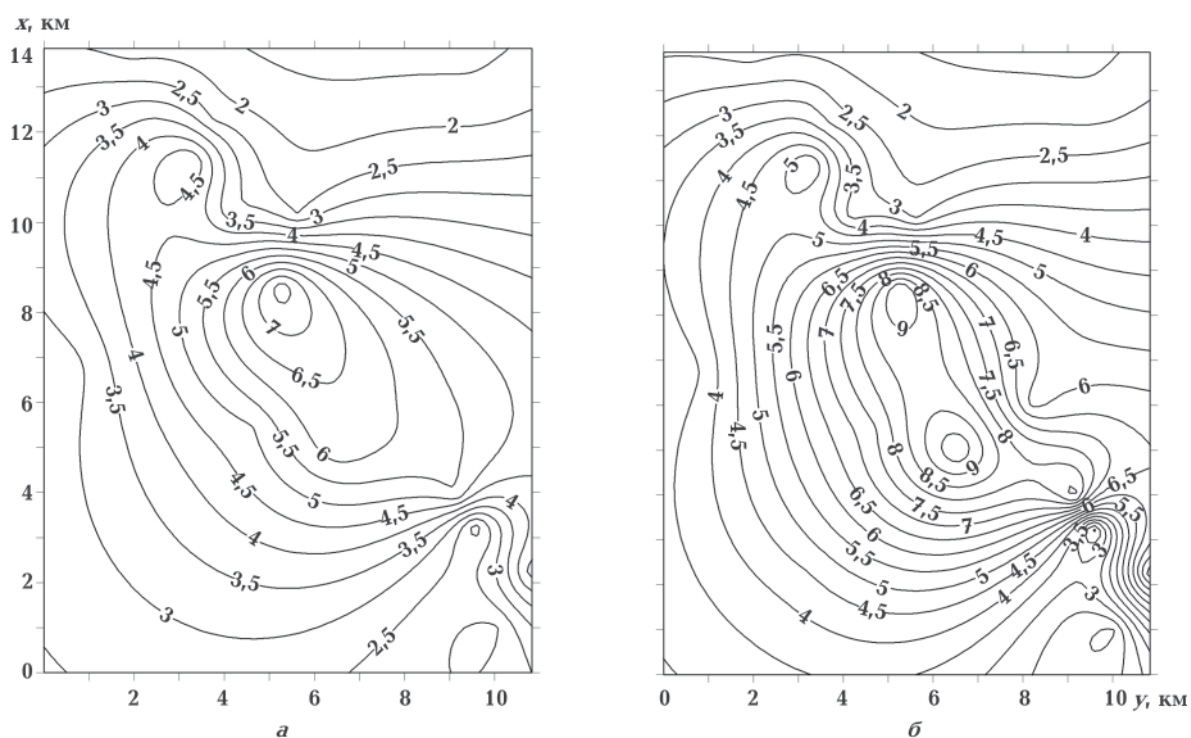


Рис. 3. Карты изогипс глубин расположения: центров тяжести элементов аппроксимационной модели, км (а) и нижней кромки элементов аппроксимационной модели, км (б).

Т а б л и ц а 2. Параметры модели, полученные в результате решения обратной задачи

Номер	Глубина верхней кромки h_1 , км	Глубина нижний кромки h_2 , км	Интенсивность намагничения I , А/м
1	2	4	0,9
2	3	4,5	1,2
3	3,5	9	0,9
4	3	7	1,3

На рис. 5 представлено поле Z'_n полученное в результате решения обратной задачи и аномалиеобразующие источники в плоскости xOy . Результаты решения задачи приведены в табл. 2. Таким образом, получена адекватная модель, которая вполне удовлетворяет наблюдаемому полю и согласуется с ранее полученными результатами других исследователей.

Заключение. В статье представлены результаты интерпретации магнитометрических данных на основе разработанного программно-алгоритмического комплекса с использованием априорной геологической информации. В процессе исследований решены следующие важные задачи:

- исходное магнитное поле представлено аналитическим выражением;

- вычислены различные трансформанты аномального поля и проведена качественная интерпретация полученных карт;
- осуществлена оценка глубинной приуроченности аномалиеобразующих объектов;
- выделены и оконтурены интенсивно намагниченные тела, отождествляемые с интрузиями основного и ультраосновного составов, внедренными по глубинному разлому. Выделенные и оконтуренные по результатам интерпретации данных магниторазведки крупные скопления интрузивных пород предположительно могли обеспечить локальный прогрев вышеле-

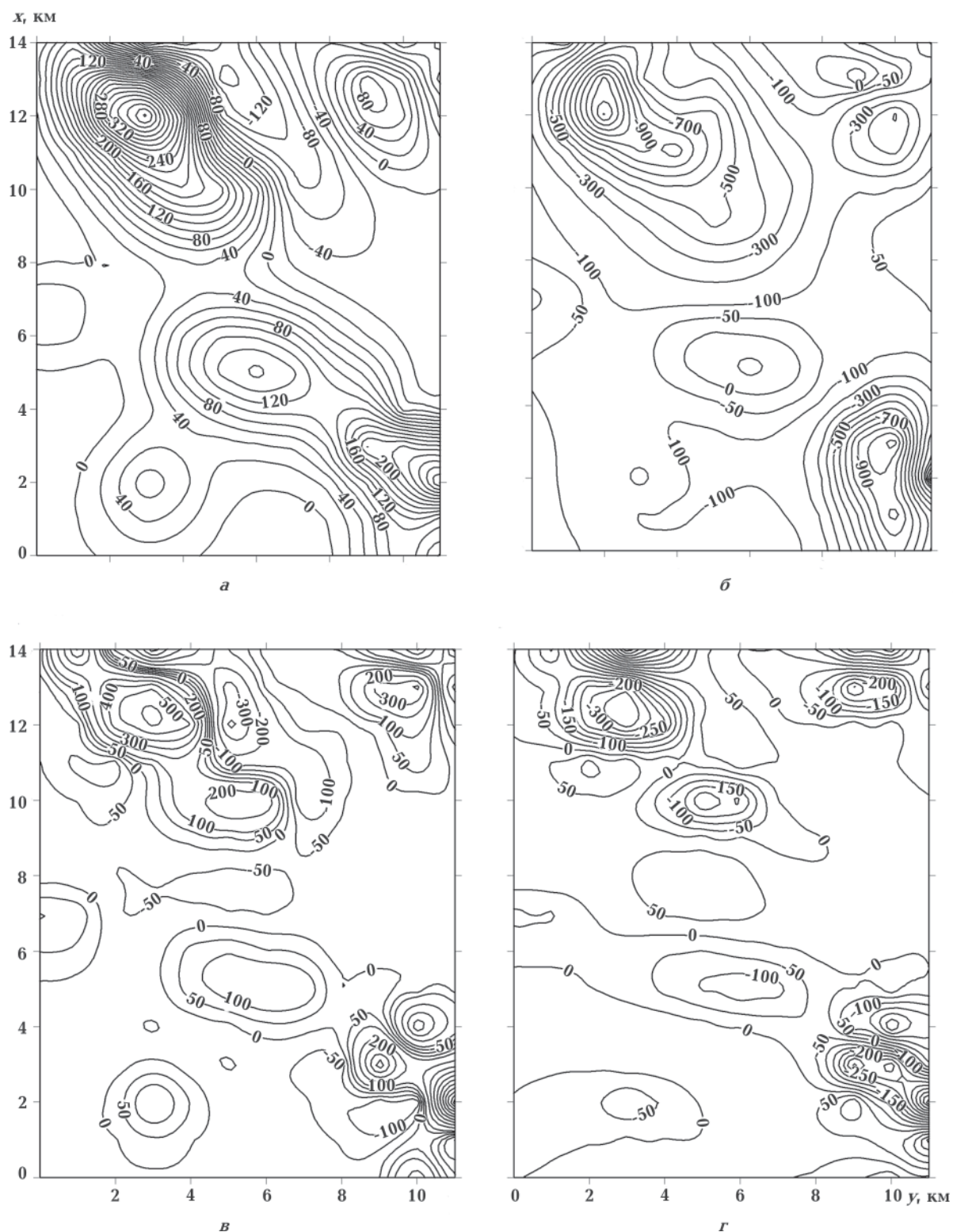


Рис. 4. Карты изолиний высших производных аномального магнитного поля T_z , нТл: а — производная $\partial T_z / \partial z$; б — производная $\partial^2 T_z / \partial z^2$; в — производная $\partial^3 T_z / \partial z^3$; г — производная $\partial^4 T_z / \partial z \partial x^2$, нТл.

жащих осадочных отложений. Таким образом, надинтрузивные участки могут оказаться благоприятными для

формирования месторождений нефти и газа.

На модельных примерах и реальных маг-

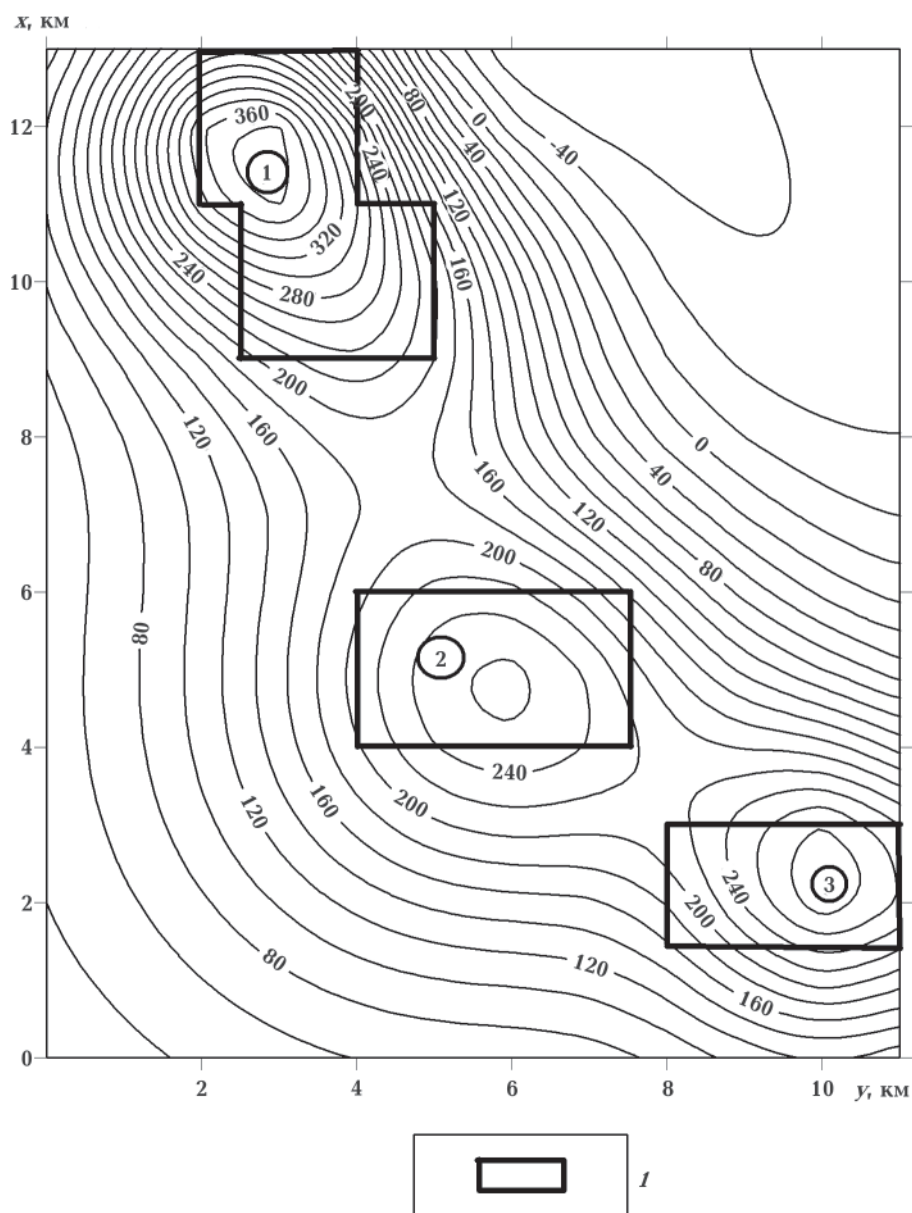


Рис. 5. Результаты решения обратной задачи магниторазведки: 1 — контуры возмущающих объектов и карта изодинам модельного поля Z'_n , нТл.

нитометрических данных, полученных для района Алуштинско-Батумской аномальной зоны в акватории Черного моря, авторами было успешно опробовано разработанное программно-алгоритмическое обеспечение и определены этапы проведения исследований. Таким образом, показано, что разработанное программно-алгоритмическое обеспечение можно использовать при интерпретации аномальных полей, обусловленных геологическими объектами, расположенными как на малых, так и на больших глубинах. В процессе интерпретации осуществлена декомпозиция

исходных данных, т. е. выполнено разделение поля от разноглубинных объектов, получены аномалии от изолированных тел и тем самым сложная задача сведена к совокупности более простых. Необходимо отметить, что в общем виде задача не имеет решения, однако в конкретной постановке при данном объеме априорной информации она может быть успешно решена. В результате получена апостериорная интерпретационная модель геомагнитных неоднородностей, удовлетворяющая как наблюдаемому полю, так и априорной геологической информации.

Список литературы

- Балк П. И., Долгаль А. С. Конечноэлементные технологии моделирования в гравиразведке. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publ., 2013. 76 с. <http://www.lap-publishing.com>.
- Балк П. И., Долгаль А. С., Балк Т. В. Сеточные методы решения обратных задач и опыт их применения при прослеживании дифференцированных интрузий по данным гравиразведки. *Геология и геофизика*. 1993. № 5. С. 127—134.
- Балк П. И., Долгаль А. С., Христенко Л. А. Теория и опыт применения монтажного подхода к решению трехмерных обратных задач гравиметрии. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 5. С. 128—141.
- Блох Ю. И. Теоретические основы комплексной магниторазведки. Москва, 2012. 160 с. <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-complex/pdf>.
- Булах Е. Г. К вопросу о методе подбора при решении обратных задач гравиметрии и магнитометрии. *Обзор. Физика Земли*. 2006. № 2. С. 72—77.
- Булах Е. Г. Обзор работ по методам минимизации в обратных задачах гравиметрии и магнитометрии. *Геофиз. журн.* 1999. Т. 21. № 4. С. 5—18.
- Булах Е. Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Киев: Наук. думка, 2010. 462 с.
- Булах Е. Г., Зейгельман М. С., Корчагин И. Н. Автоматизированный подбор гравитационных и магнитных аномалий: программно-алгоритмическое обеспечение и методические рекомендации. Деп. в ВИНТИ № 8363-В86. Киев, 1986. 235 с.
- Булах Е. Г., Корчагин И. Н. Исследование метода последовательных приращений в программах автоматизированного подбора гравитационных и магнитных аномалий. *Развед. геофизика*. 1989. № 109. С. 107—114.
- Булах Е. Г., Лапина Е. П. К вопросу о построении аналитической модели внешнего магнитного поля. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 2. С. 42—50.
- Булах Е. Г., Лапина Е. П. Обратные задачи магнитометрии в классе стержневых тел в связи с построением аналитической модели исходного поля. *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 4. С. 60—70.
- Булах Е. Г., Ржаницын В. А., Маркова М. Н. Применение метода минимизации для решения задач структурной геологии по данным гравиразведки. Киев: Наук. думка, 1976. 219 с.
- Бурьянов В. Б., Гордиенко В. В., Кулик С. Н., Логвинов И. М. Комплексное геофизическое изучение тектоносферы континентов. Киев: Наук. думка, 1983. 174 с.
- Геология шельфа УССР. Тектоника. Отв. ред. В. Б. Соллогуб. Киев: Наук. думка, 1987. 150 с.
- Долгаль А. С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитных съемок в горной местности. Абакан: ООО «Фирма Март», 2002. 188 с.
- Завойский В. Н., Неижсал Ю. Е. Декомпозиционно-итерационный метод решения обратной задачи магниторазведки. *Геофиз. журн.* 1979. Т. 1. № 2. С. 46—52.
- Зейгельман М. С., Михеева Т. Л., Панченко Н. В. К истолкованию магнитных аномалий над телами рудных габброидов Коростенского Плутона (Украинский щит). *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 1. С. 114—127.
- Зейгельман М. С., Панченко Н. В. Обратная задача магниторазведки: особенности технологии поиска многовариантных решений. В зб.: *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. Київ, 2011. С. 158—169.
- Земная кора и история развития Черноморской впадины. Под ред. Ю. Д. Буланже, М. В. Муратова, С. И. Субботина, Б. К. Балавадзе. Москва: Наука, 1975. 358 с.
- Кобрунов А. И. Теоретические основы решения обратных задач геофизики. Ухта: Изд. Ухтинский индустриальный институт, 1995. 228 с.
- Костицин В. И. Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки: Избранные труды. Пермь: Изд. Пермского гос. ун-та, 2002. 224 с.
- Маловичко А. К., Тарунина О. Л. Использование высших производных при обработке и интерпретации результатов геофизических наблюдений. Москва: Недра, 1981. 186 с.
- Маловицкий Я. П., Углов Б. Д., Осипов Г. В. Некоторые черты глубинного строения Черноморской впадины по данным гидромагнитной съемки. *Морская геология и геофизика*. 1972. № 3. С. 12—21.
- Маркова М. Н., Лапина Е. П. Высшие производные магнитного поля, их исследование и возможности практического использования для решения задач магнитометрии. В зб.: *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. Вип. 10. Київ, 2013. С. 81—98.
- Маркова М. Н., Лапина Е. П. Исследования и возможности практического применения высших производных магнитного потенциала для решения задач магнитометрии. В зб.: *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. Вип. 11. Київ, 2014. С. 102—120.

- Овчаренко А. В. Подбор сечения двумерного тела по гравитационному полю. В кн.: *Вопросы нефтяной и рудной геофизики*. Вып. 2. Алма-Ата: Изд-во Казахского политехн. ин-та, 1975. С. 71—75.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К., Лебедь Т. В. 3D магнитная модель земной коры Азово-Черноморского региона. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 5. С. 102—114.
- 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.
- Старостенко В. И. Определение вертикальных производных потенциала притяжения по результатам наблюдений с горизонтальным гравитационным градиентометром. Киев: Наук. думка, 1970. 100 с.
- Старостенко В. И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. Киев: Наук. думка, 1978. 228 с.
- Старостенко В. И., Легостаева О. В., Макаренко И. Б., Савченко А. С. Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей (GMT-Auto). *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 1. С. 42—52.
- Страхов В. Н. Интерпретационные процессы в гравиметрии и магнитометрии — это реализации единого аппроксимационного подхода. Основные идеи и конструктивные принципы. *Физика Земли*. 2001. № 10. С. 3—18.
- Страхов В. Н. Об эффективных по быстродействию и точности методах построения линейных аналитических аппроксимаций в геофизике, геоинформатике и гравиметрии. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 1. С. 56—84.
- Страхов В. Н. Основные направления развития теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. Ч. 1. *Геофизика*. 1995а. № 3. С. 9—18.
- Страхов В. Н. Основные направления развития теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. Ч. 2. *Геофизика*. 1995б. № 4. С. 10—20.
- Страхов В. Н., Лапина М. И. Монтажный метод решения обратной задачи гравиметрии. *Докл. АН УССР*. 1976. Вып. 227. № 2. С. 344—347.
- Туголесов Д. А., Горшков А. С., Мейснер Л. Б., Соловьев В. В., Хахалев Е. М. Тектоника мезокайнозойских обложений Черноморской впадины. Москва: Недра, 1985. 210 с.

Localization of geological objects according to magnetometric data with application of algorithms of automated selection

© E. P. Lapina, T. L. Miheeva, N. V. Panchenko, 2016

The method of carrying out quality and quantitative interpretation of basic magnetometric data on the basis of use of analytical approximation of potential fields and some set of derivative highest degrees is offered. In the course of the researches the following tasks are solved: creation of numerical model of the anomalous field is executed, transformant of magnetic field are calculated and quality interpretation of the received results is carried out, modeling local the anomalous of sources is executed. The developed software is tested on the model examples and magnetometric data obtained for the region of the Alushta and Batumi anomalous area in the water area of the Black Sea.

Key words: qualitative and quantitative interpretation, inverse problem, analytical approximation, the magnetic field, derivatives of the highest degree, geological object.

References

- Balk P. I., Dolgal A. S., 2013. Finite element modeling technology in gravity. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publ., 76 с. <http://www.lap-publishing.com> (in Russian).
- Balk P. I., Dolgal A. S., Balk T. V., 1993. Grid methods for solving inverse problems and experience of their use in pursuit of differentiated intrusions according to gravity. *Geologiya i geofizika* (5), 127—134 (in Russian).
- Balk P. I., Dolgal A. S., Khristenko L. A., 2009. Theory and experience of mounting approach to solving the three-dimensional inverse problems of gravimetry.

- Geofizicheskiy zhurnal* 31(5), 128—141 (in Russian).
- Bloch Yu. I., 2012. Theoretical bases of a complex magnetic survey. Moscow, 160 p. <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-complex/pdf> (in Russian).
- Bulakh E. G., 2006. On the use of the fitting method in solving inverse problems of gravimetry and magnetometry. *Fizika Zemli* (2), 72—77 (in Russian).
- Bulakh E. G., 1999. A review of studies on methods of minimizing in inverse problems of gravimetry and magnetometry. *Geofizicheskiy zhurnal* 21(4), 5—18 (in Russian).
- Bulakh E. G., 2010. Direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry. Kiev: Naukova Dumka, 462 p. (in Russian).
- Bulakh E. G., Zeygelman M. S., Korchagin I. N., 1986. Automated selection of gravity and magnetic anomalies: software and algorithmic support and methodical recommendations. Dep. VINITI number 8363-V86. Kiev, 235 p.
- Bulakh E. G., Korchagin I. N., 1989. The study of the method of successive increments in the programs of the automated selection of gravity and magnetic anomalies. *Razvedochnaya geofizika* (109), 107—114 (in Russian).
- Bulakh E. G., Lapina E. P., 2008. On the construction of an analytical model of an external magnetic field. *Geofizicheskiy zhurnal* 30(2), 42—50 (in Russian).
- Bulakh E. G., Lapina E. P., 2002. Inverse magnetometric problems in a class of rod-shaped bodies associated with setting up an analytical model of the initial field. *Geofizicheskiy zhurnal* 24(4), 60—70 (in Russian).
- Bulakh E. G., Rzhantsyn V. A., Markova M. N., 1976. Application of the method minimizing at the solutions problems the structural geology on the data gravimetric prospecting. Kiev: Naukova Dumka, 219 p. (in Russian).
- Buryanov V. B., Gordienko V. V., Kulik S. N., Logvinov I. M., 1983. Complex geophysical study tectonosphere of continents. Kiev: Naukova Dumka, 174 p. (in Russian).
- Geology shelf of USSR. Tectonics.* 1987. Ed. V. B. Sollogub. Kiev: Naukova Dumka, 150 p. (in Russian).
- Dolgal A. S., 2002. Computer technology data processing and interpretation of gravity and magnetic surveys in the highlands. Abakan: Firma Mart, 188 p. (in Russian).
- Zavoyskiy V. N., Neizhsal Yu. E., 1979. Decomposition and iterative method for solving the inverse problem of magnetic prospecting *Geofizicheskiy zhurnal* 1(2), 46—52 (in Russian).
- Zeygelman M. S., Mikheeva T. L., Panchenko N. V., 2011. On the nature of magnetic anomalies above the bodies of ore gabbroides of the Korosten pluton (the Ukrainian Shield). *Geofizicheskiy zhurnal* 33(1), 114—127 (in Russian).
- Zeygelman M. S., Panchenko N. V., 2011. The inverse problem of magnetic prospecting: features search technology of multiple solutions. In: *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*. Kyiv, P. 158—169 (in Russian).
- The earth's crust and the history of the Black Sea basin*, 1975. Eds. Yu. D. Bulanzhe, M. V. Muratov, S. I. Subbotin, B. K. Balavazde. Moscow: Nauka, 358 p. (in Russian).
- Kobrunov A. I., 1995. Theoretical basis of the solution of inverse problems of geophysics. Ukhta: Publ. UII, 228 p. (in Russian).
- Kostitsin V. I., 2002. Methods of improving the accuracy and geological efficiency of detailed gravimetric prospecting: Selected Works. Perm: Perm Stat. Univ. Press, 224 p. (in Russian).
- Malovichko A. K., Tarunina O. L., 1981. Use of higher derivatives at processing and interpretation results of geophysical observation. Moscow: Nedra, 186 p. (in Russian).
- Malovitskiy Ya. P., Uglov B. D., Osipov G. V., 1972. Some features of the deep structure of the Black Sea basin according hydromagnetic survey. *Morskaya geologiya i geofizika* (3), 12—21 (in Russian).
- Markova M. N., Lapina E. P., 2013. Higher derivatives of the magnetic field of the study and the possibility of practical use for the solution of problems magnetometry. In: *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*. Is. 10. Kyiv, P. 81—98 (in Russian).
- Markova M. N., Lapina E. P., 2014. Research and possible practical applications of higher derivatives of the magnetic potential for solving problems magnetometry. In: *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*. Is. 11. Kyiv, P. 102—120 (in Russian).
- Ovcharenko A. V., 1975. Selection of section of two-dimensional body on the gravitational field. In: *Questions of oil and ore geophysics*. Vol. 2. Alma-Ata: Publ. House of the KPI, P. 71—75 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Pashkevich I. K., Lebed T. V., 2009. 3D magnetic model of the Earth's crust of the Azov-Black Sea region. *Geofizicheskiy zhurnal* 31(5), 102—114 (in Russian).
- Osipov G. V., Svistunov Yu. I., Terekhov A. A., 1977. Possible nature of Alushta-Batumi magnetic anomaly on the Black Sea. *Geotektonika* (1), 74—79 (in Russian).

- Starostenko V. I.*, 1970. Definition vertical derivative of the potential of gravity on the results of observations with horizontal gravity gradiometer. Kiev: Naukova Dumka, 100 p. (in Russian).
- Starostenko V. I.*, 1978. Stable numerical methods in problems of gravimetry. Kiev: Naukova Dumka, 228 p. (in Russian).
- Starostenko V. I., Legostaeva O. V., Makarenko I. B., Savchenko A. S.*, 2015. Software system for automated data interpretation of potential fields (GMT-Auto). *Geofizicheskiy zhurnal* 37(1), 42—52 (in Russian).
- Strakhov V. N.*, 2001. Interpretive process in gravity and magnetic - is the implementation of a unified approximation approach. The basic ideas and constructive principles. *Fizika Zemli* (10), 3—18 (in Russian).
- Strakhov V. N.*, 2007. On effective on speed and accuracy of the methods of constructing the linear analytical approximations in geophysics, geoinformatics and gravimetry. *Geofizicheskiy zhurnal* 29(1), 56—84 (in Russian).
- Strakhov V. N.*, 1995a. Main directions of development of the theory and methodology of interpretation of geophysical data at the turn of the XXI century. Pt. 1. *Geofizika* (3), 9—18 (in Russian).
- Strakhov V. N.*, 1995b. Main directions of development of the theory and methodology of interpretation of geophysical data at the turn of the XXI century. Pt. 2. *Geofizika* (4), 10—20 (in Russian).
- Strakhov V. N., Lapina M. I.*, 1976. Mounting method for solving the inverse problem of gravimetry. *Doklady AN USSR* (2), 344—347 (in Russian).
- Tugolesov D. A., Gorshkov A. S., Meysner L. B., Solovyev V. V., Khakhalev E. M.*, 1985. Meso-Cenozoic Tectonics levies Black Sea basin. Moscow: Nedra, 210 p. (in Russian).