

УДК 550.114

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОРАЗВЕДКИ ПО ВЕКТОРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Т.Л. Михеева, Н.В. Панченко

Институт геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины, г. Киев

Рассмотрена возможность автоматизированного подбора аномальных источников по трехкомпонентным измерениям аномального магнитного поля. Показана возможность моделирования по трем компонентам путем автоматизированного подбора компонент ΔX , ΔY , ΔZ , ΔT .

Ключевые слова: магнитометрия, прямая и обратная задачи, намагниченное тело, автоматизированный подбор.

В практике геологоразведочных работ, которые направлены на изучение рудных месторождений, часто ведущая роль отводится магнитометрическим методам. Геологическая интерпретация этих материалов, наравне с методикой и техникой полевых работ, обеспечивает эффективность геофизических методов. Основным направлением геофизических исследований железорудных месторождений в последние десятилетия было моделирование рудных объектов по комплексу геологических и геофизических данных. Чем меньше возможности магниторазведки, тем больше и разнообразнее должна быть геологическая и геохимическая информация, используемые при построении моделей. Но геологические материалы, прежде всего данные бурения, сопряжены с большими затратами труда и средств. Преодоление этих трудностей возможно путем привлечения трехкомпонентной магнитной съемки, позволяющей получить более полную информацию о геомагнитном образе месторождения в целом и каждого рудного тела отдельно и восстановить приоритет методов решения обратных задач в оценке параметров рудных тел [5]. Разведочная стадия, особенно применительно к рудным телам сложной формы, имеющим намагниченность, в которой преобладает интенсивная остаточная компонента, часто с обратной полярностью, опирается на данные бурения, каротажа, а полевая магниторазведка играет малую роль. Разведка железорудных месторождений не является исключением. Это вызвано

следующими обстоятельствами: 1) большое число и сложная форма рудных тел в пределах конкретных месторождений не соответствует условиям единственности решения обратных задач магниторазведки (оценки значений параметров рудных тел); 2) в задачах разведки железорудных месторождений неэффективны широко распространенные модульные магнитные съемки [4]. По таким съемкам часто создается неадекватное представление об аномальном магнитном поле месторождения, особенно при большой остаточной намагниченности, несовпадающей по направлению с главным геомагнитным полем. Векторная магнитометрия дает возможность разделить намагниченные тела по направлению и интенсивности намагниченности. Совершенствование алгоритмов обработки данных и способов решения обратных задач модульной магнитометрии в этих условиях не всегда приводит к успеху.

Известно, что в условиях, когда аномальное поле имеет относительно небольшую интенсивность не представляет сложности интерпретация магнитных аномалий ΔT (разности модулей реального T и нормального T_0 полей), так как эта величина не очень сильно отличается от T_a (модуля разности векторов магнитной индукции реального и нормального полей). При поисках и разведке железорудных месторождений, которым соответствуют высокоинтенсивные и резко дифференцированные магнитные аномалии, возникают определенные трудности при интерпретации. Причины этого: а) значительная роль в намагниченности I железных руд ее остаточной компоненты I_r , направление которой часто не совпадает с направлением современного главного поля T_0 ; б) зависимость индуктивной намагниченности I_i не только от главного геомагнитного поля T_0 , но и от собственного аномального поля залежи $T_a(x, y, z)$, т. е. намагниченность зависит от положения и геометрии тел (рис. 1).

Направления векторов магнитной индукции реального и нормального полей в этих условиях могут сильно различаться, поэтому аномалии T_a

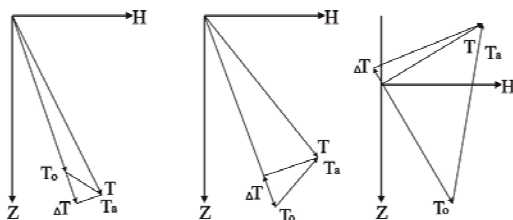


Рис. 1. Соотношение T_a и ΔT в при разных T_a и T_0 : слева направо – обычный случай слабых аномалий; случай сильных аномалий; большая обратная намагниченность

выявить по результатам модульной съемки представляет трудности. Поскольку T_a не равно ΔT , интерпретация ΔT в указанных условиях приводит к ошибочным результатам. Для оценки параметров железорудных тел целесообразно использовать данные векторных съемок. Постановке задачи развития метода векторной магнитометрии способствовало создание феррозондовых магнитометров, не уступающих по чувствительности феррозондовым датчикам зарубежных моделей. Получаемая от векторной съемки информация оказалась много обширней и полезней для оценки параметров рудных залежей, чем при благоприятных условиях от модульной съемки. Главное направление таких исследований – снижение трудоемкости и повышение производительности векторных магнитных измерений с приемлемым при поисках и разведке железорудных тел уровнем точности.

В программном комплексе [1, 2, 6] реализованы возможности подбора по измеряемым компонентам Δg , ΔZ , ΔT гравитационного и магнитного полей. Рассматривается один из подходов для моделирования трехкомпонентных измерений магнитного поля, разработанный на базе программного комплекса автоматизированного подбора [1, 2, 6].

В программном комплексе предусмотрена возможность подбора по данным ΔX , ΔY , ΔZ одновременно, некоторые особенности которой рассмотрим ниже. В рамках метода подбора количественная интерпретация этих компонент может быть выполнена с помощью программно-алгоритмического обеспечения [1]. В алгоритмах [1] автоматизированный подбор параметров аномальных источников и коэффициентов линейного фона моделируемых компонент полей базируется на минимизации суммы квадратов расхождений между наблюдаемыми и модельными компонентами:

$$F = \sum_{m=1}^M \alpha_m \sum_{i=1}^{N_m} a_{im} \left[\frac{U_{n,m}^i}{U_{n,m}^{cp}} \cdot \frac{U_{T,m}^i}{U_{T,m}^{cp}} \mathbf{x}^m \right]^2, \quad (1)$$

где

$$U_m^{cp} = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} |U_m^i|; \quad \mathbf{x}^m = (x_1^m, x_2^m, x_{pm}^m);$$

$$U_{T,m}^i = \sum_{j=1}^{K_m} U_{j,m}^i + A^m x_i + B^m y_i + C^m z_i + D^m.$$

Здесь M – общее количество используемых при подборе измеренных компонент полей; α_m – весовой множитель вклада компоненты поля m в значения целевой функции; N_m – количество используемых точек задания компоненты поля m ; a_{im} – весовой множитель i -й точки компоненты m ; $U_{n,m}^i$, $U_{T,m}^i$ – наблюдаемые и модельные значения компонент полей в точке; $U_{j,m}^i$ – вклад j -й аппроксимирующей ячейки в компоненту поля m ; K_m – количество элементарных аппроксимирующих ячеек, используемых для описания аномальных масс компоненты m ; p_m – общее количество параметров, описывающих модельное поле m ; A^m , B^m , C^m , D^m – коэффициенты линейного фона компоненты m .

Программный комплекс позволяет также осуществлять подбор как по трехкомпонентным измерениям ΔX , ΔY , ΔZ , так и по любой из компонент отдельно. В этом случае для минимизируемого показателя качества (1) $M = 3$, а $U_1 \rightarrow \Delta X$, $U_2 \rightarrow \Delta Y$, $U_3 \rightarrow \Delta Z$. Для параметризации априори построенной схемы геологического строения в программном комплексе используется более 10 аппроксимирующих ячеек. В рассматриваемой задаче в качестве аппроксимирующих ячеек были выбраны ограниченные по простиранию вертикальные параллелепипеды. С учетом соотношений Пуассона между гравитационным и магнитным потенциалами были использованы выражения вторых производных гравитационного потенциала, приведенные в работе [3]:

$$\left. \begin{aligned} V_{xx}(x, y, z) &\approx \sum_{i=1}^n \operatorname{arctg} \frac{(y-\eta)(z-\zeta)}{(x-\xi)\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}} \left| \begin{matrix} x_i & y_i & z_i \\ x_i & y_i & z_i \end{matrix} \right| ; \\ V_{xy}(x, y, z) &\approx -\sum_{i=1}^n \ln \left[\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2} + (z-\zeta) \right] \left| \begin{matrix} x_i & y_i & z_i \\ x_i & y_i & z_i \end{matrix} \right| ; \\ V_{xz}(x, y, z) &\approx -\sum_{i=1}^n \ln \left[\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2} + (y-\eta) \right] \left| \begin{matrix} x_i & y_i & z_i \\ x_i & y_i & z_i \end{matrix} \right| ; \\ V_{yy}(x, y, z) &\approx \sum_{i=1}^n \operatorname{arctg} \frac{(x-\xi)(z-\zeta)}{(y-\eta)\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}} \left| \begin{matrix} x_i & y_i & z_i \\ x_i & y_i & z_i \end{matrix} \right| ; \\ V_{yz}(x, y, z) &\approx -\sum_{i=1}^n \ln \left[\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2} + (x-\xi) \right] \left| \begin{matrix} x_i & y_i & z_i \\ x_i & y_i & z_i \end{matrix} \right| ; \\ V_{zz}(x, y, z) &\approx \sum_{i=1}^n \operatorname{arctg} \frac{(x-\xi)(y-\eta)}{(z-\zeta)\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}} \left| \begin{matrix} x_i & y_i & z_i \\ x_i & y_i & z_i \end{matrix} \right| . \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Алгоритм расчета модельных значений компонент ΔX , ΔY , ΔZ , ΔT от параметрической модели магнитоактивных источников реализуется в программе в соответствии с соотношениями

$$\begin{aligned} A_x &= I_x A_{xx} + I_y A_{xy} + I_z A_{xz}; & A_y &= I_x A_{yx} + I_y A_{yy} + I_z A_{yz}; \\ A_z &= I_x A_{zx} + I_y A_{zy} + I_z A_{zz}; \\ A_T &= I_x (lA_{xx} + mA_{xy} + nA_{xz}) + I_y (lA_{yx} + mA_{yy} + nA_{yz}) + \\ &+ I_z (lA_{zx} + mA_{zy} + nA_{zz}) \end{aligned} \quad (3)$$

соответственно, где I_x, I_y, I_z – составляющие вектора интенсивности намагниченности источника; l, m, n – направляющие косинусы земного магнитного поля. Множители l, m, n определяются выражениями

$$l = \cos I \sin D; \quad m = \cos I \cos D; \quad n = \sin I,$$

где I, D – соответственно наклонение и склонение вектора напряженности земного магнитного поля.

Для решения задачи использовались данные измерений магнитного поля по компонентам ΔX , ΔY , ΔZ (рис. 2, а, б, в). Компонента магнитного поля ΔT (рис. 2, г) приближенно представляется проекций составляющих аномального поля по координатным осям на направление вектора нормального магнитного поля Земли. Качественный анализ магнитного поля позволил предположить, что геологическая модель состоит из четырех изолированных тел. Для начальной модели выбрано предположение, что все тела намагничены однородно. Задача решалась с использованием ограничений на геометрические и физические параметры. С помощью функционала (1) сопоставлялись исходные поля с теоретическим. При решении прямой задачи значение функционала $F^0 = 568\,086$ нТл². Для минимизации выполнено 150 итераций. Среднее расхождение полей равно 28, максимальное –121 нТл. Задача автоматизированного подбора выполнялась по 11 профилям (см. таблицу). Наиболее точное решение было получено по четвертому профилю (рис. 3), где максимальное расхождение полей равно 65 нТл. В результате количественной интерпретации магнитных аномалий по 11 профилям получены оценки параметров намагниченных тел по указанным трем компонентам аномального поля. Возможность сопоставления результатов интерпретации аномалий на каждом профиле по составляющим аномального поля сама по себе повышает надежность геологического истолкования магнитораз-

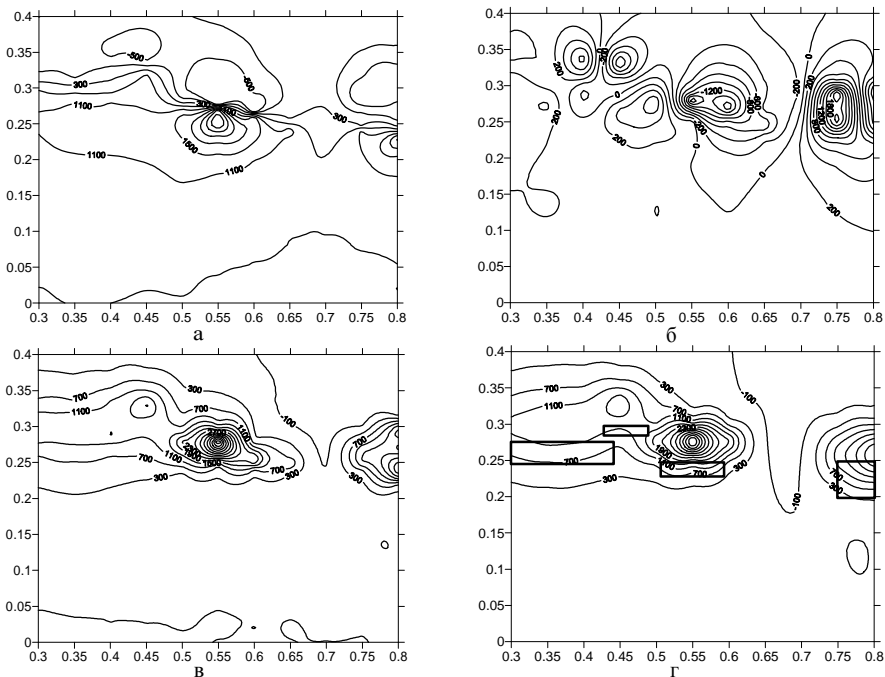
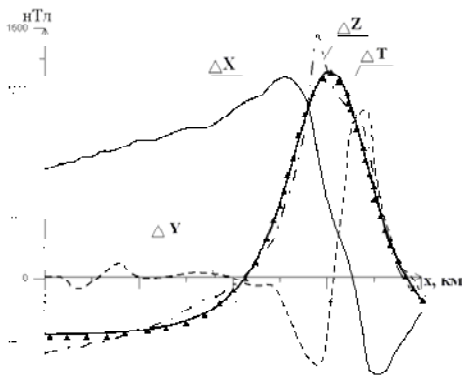


Рис. 2. Схематическое изображение составляющих аномального магнитного поля: а – поле ΔX , б – поле ΔY , в – поле ΔZ , г – поле ΔT , – расположение подобранных тел



ПР 4

Рис. 3. Результаты подбора геометрических параметров, ограниченных по простирацию источников по трехкомпонентным данным. Профиль 4

Значения параметров начальной и подобранной моделей

N	Координаты угловых точек аппроксимирующих ячеек				Параметры интенсивности намагничения		
	x_i	z_i	y_1	y_2	I_x	I_y	I_z
Начальная модель							
1	0,505 0,505 0,605 0,605 0,505	0,03 0,5 0,5 0,03 0,03	0,265	0,295	0	0	2500
2	0,725 0,725 0,905 0,905 0,725	0,02 0,7 0,7 0,02 0,02	0,245	0,285	0	0	1000
3	0,435 0,435 0,475 0,475 0,435	0,05 0,7 0,7 0,05 0,05	0,325	0,335	0	0	2500
4	0,305 0,305 0,425 0,425 0,305	0,05 0,7 0,7 0,05 0,05	0,285	0,315	0	0	2500
Подобранная модель							
1	0,506 0,506 0,596 0,596 0,506	0,016 0,468 0,468 0,016 0,016	0,267	0,287	77	377	2528
2	0,747 0,747 0,8 0,8 0,747	0,027 0,127 0,127 0,027 0,027	0,236	0,289	177	253	1147
3	0,428 0,428 0,489 0,489 0,428	0,031 0,501 0,501 0,031 0,031	0,326	0,334	2	279	3462
4	0,3 0,3 0,441 0,441 0,3	0,059 0,301 0,301 0,059 0,059	0,288	0,311	300	97	2393

ведочных данных по сравнению с интерпретацией данных модульных съемок. Рассмотренная модификация автоматизированного подбора по измерениям компонент ΔX , ΔY , ΔZ аномального магнитного поля опробована на большом количестве тестовых примеров.

1. Булах Е.Г. Автоматизированный подбор трехкомпонентных измерений аномального магнитного поля / Е.Г. Булах., И.Н. Корчагин // Докл. АН УССР. Сер. Б. – 1990. – № 7. – С. 3–5.
2. Компьютеризированная технология гидромагнитных исследований в морских акваториях / С.С. Гросс, В.П. Кобелев., И.Н. Корчагин [и др.] // Сборник научных трудов УкрДГРИ. – 2003. – № 2. – С. 21–31.
3. Константинов Г.Н. Моделирование в рудной магниторазведке / Константинов Г.Н., Константинова Л.С. – Новосибирск: – СНИИГГИМС, 1974. – 76 с.
4. Методика векторной магнитной съемки для разведки железорудных месторождений / А.В. Ладынин, А.И. Василевский, А.В. Павлов, А.А. Попова // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 1. – С. 78–89.
5. Страхов В.Н. Математическое моделирование в теории интерпретации гравимагнитных полей / В.Н. Страхов // Математическое и физическое моделирование железорудных месторождений и рудных полей. – Новосибирск: СНИИГГИМС, 1983. – С. 7–17.
6. Элементы многошаговых стратегий в технологиях автоматизированного подбора гравитационных и магнитных аномалий / Корчагин И.Н., Левашов С.П., Михеева Т.Л. [и др.] // В сб.: Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. Т. 1. – К.: 2004. – С. 143–158.

Розв’язок оберненої задачі магніторозвідки за векторними вимірюваннями аномального магнітного поля Т.Л. Михеева, Н.В. Панченко

Розглянуто можливість автоматизованого підбору аномальних джерел за трикомпонентним вимірюванням аномального магнітного поля. Показано можливість моделювання за трьома компонентами з використанням автоматизованого підбору за допомогою компонент ΔX , ΔY , ΔZ , ΔT .

Ключові слова: магнітометрія, пряма та обернена задачі, намагнічене тіло, автоматизований підбір.

Solution of the inverse problem on magnetic prospecting anomalous magnetic field vector measurements T.L. Mikheeva, N.V. Panchenko

An algorithm and program of the automated selection of sources parameters by the three-component measurements of the magnetic field are directed. It is shown that for modeling of three-component data it is possibility to use the program of selection by the ΔX , ΔY , ΔZ , ΔT components

Keywords: magnetometry, direct and inverse problems, magnetized body, automatic fitting.