

Комп'ютерна технологія інтерпретації векторних вимірювань магнітного поля

Т. А. Міхєєва, О. П. Лапіна, 2021

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
Надійшла 7 липня 2021 р.

Наведено комп'ютерну технологію для розв'язання оберненої задачі за векторними вимірюваннями магнітного поля з використанням програмно-алгоритмічного забезпечення автоматизованої системи інтерпретації потенціальних полів. Технологія включає побудову числової моделі магнітного поля досліджуваної ділянки, формування моделі початкового наближення, оцінювання глибини залягання джерел та їх намагніченості. Для опису джерел аномалій застосовано апроксимаційну конструкцію — сукупність однорідно намагнічених багатокутних призм. Для розв'язання задачі використано реальні векторні вимірювання магнітного поля за компонентами X_a , Y_a , Z_a , T_a на ділянках Грузька Південна і Грузька Північна. У геолого-структурному плані район досліджень належить до центральної частини Українського щита — Кіровоградського тектонічного мегаблоку. Площа робіт приурочена до Суботсько-Мошоринської широтної зони розломів. Можливість зіставлення результатів інтерпретації аномалій на кожному профілі за складовими аномального магнітного поля підвищує надійність геологічного тлумачення магніторозвідувальних даних порівняно з інтерпретацією модульних зйомок. Наявність векторних вимірювань істотно полегшує можливості визначення параметрів аномальних об'єктів, що дає змогу отримувати достовірніші розв'язки оберненої задачі. В разі використання векторної інформації можна успішніше локалізувати геологічні джерела і тим самим скоротити обсяги робіт.

Ключові слова: векторна магніторозвідка, компоненти магнітного поля, програмно-алгоритмічне забезпечення, обернена задача, апроксимаційна конструкція.

Вступ. У практиці геологорозвідувальних робіт, які спрямовані на вивчення рудних родовищ, провідні дослідження відводяться магнітометричним методам. Геологічна інтерпретація цих матеріалів разом з методикою і технікою польових робіт забезпечують ефективність геофізичних методів. Основним напрямом геофізичних досліджень залізорудних родовищ в останні десятиліття було моделювання рудних об'єктів за комплексом геологічних і геофізичних даних. Розв'язання задач магнітометрії потребує знання не тільки модуля індукції магнітного поля Землі, а також значень північної, східної та вертикальної складових повного вектора геомагнітного поля. Необхідність розрахунку компонент магнітного поля Землі для порівняння з ви-

міряними даними і для розповсюдження на території відсутності вимірів є актуальною. У статті [Максимчук та ін., 2013] наведено результати компонентних вимірювань геомагнітного поля на новій мережі пунктів вікового ходу України за період 2005—2010 рр., розраховано компоненти геомагнітного поля Одеської магнітної аномалії [Орлюк и др., 2014]. Математичне забезпечення та програмно-алгоритмічний комплекс, котрий дає змогу розраховувати вектор намагніченості джерел магнітних аномалій для довільного співвідношення вектора ΔB_a , розробили В. М. Коваленко-Завойський та І. М. Іващенко [Коваленко-Завойський, Іващенко, 2006]. У публікаціях [Старостенко и др., 2009, 2013] наведено загальну теорію розподілу об'ємних і по-

верхневих магнітних мас у тривимірних анізотропних тілах та розв'язано пряму задачу магніторозвідки. Алгоритм орієнтований на практичне застосування при побудові тривимірних магнітних моделей локальних і регіональних геологічних структур. Чим менші можливості магніторозвідки, тим більшою і різноманітнішою має бути геологічна і геохімічна інформація, яку використовують при побудові моделей. Втім геологічні матеріали, передусім буріння, пов'язані з великими витратами коштів й засобів. Подолання цих труднощів можливе в разі залучення векторної магнітної зйомки, що дає змогу отримати повнішу інформацію про геомагнітний образ родовища в цілому і кожного рудного тіла окремо та відновити пріоритет методів розв'язку обернених задач. Розвідувальну стадію, особливо стосовно рудних тіл складної форми з намагніченістю, в якій переважає інтенсивна залишкова компонента, часто із зворотною полярністю, обґрунтовують даними буріння, каротажу, польова магніторозвідка відіграє незначну роль. Розвідка залізорудних родовищ не є винятком. Це пов'язане з такими обставинами: 1) значна кількість рудних тіл та їх складна форма в межах конкретних родовищ не відповідають умовам єдиності розв'язку обернених задач магніторозвідки (оцінювання значень параметрів рудних тіл); 2) у завданнях розвідки залізорудних родовищ широко поширена модульна магнітна зйомка не є ефективною [Ладынин и др., 2002]. За результатами таких знімачь часто створюється помилкове уявлення про аномальне магнітне поле родовища, особливо в разі великої залишкової намагніченості, яка не збігається за напрямком із головним геомагнітним полем. Векторні вимірювання порівняно із модульними більш інформативні. Дані щодо векторного геомагнітного поля традиційно використовують при вирішенні широкого кола наукових і прикладних завдань: це дослідження фізичних процесів на Землі і в навколоземному просторі; побудова магнітної моделі літосфери; пошуки корисних копалин, зокрема, родовищ нафти і газу, магнітних

руд; морська і повітряна навігація. Отже, з огляду на підвищення точності магнітних зйомок і створення нових досконаліших методів кількісної геолого-геофізичної інтерпретації геомагнітного поля використання векторних вимірів є дуже важливим.

Обробка польових матеріалів. Співробітники Українського державного геологорозвідувального інституту (УкрДГРІ) виконали польові дослідно-методичні роботи з вивчення можливості векторної магніторозвідки для геофізичних досліджень: на ділянці проведено векторні вимірювання та модульна зйомка з протонним магнітометром МИНИМАГ за сіткою 50×10 м.

Методика вимірювання компонент магнітного поля передбачає точну орієнтацію ферозондового датчика у просторі в усіх пунктах спостережень [Методические..., 1981]. На досліджуваних ділянках при виборі видів зйомки, сітки спостережень та розмірів ділянок за основу брали результати магнітних вимірів з протонним магнітометром. При цьому напрямок магістралей та профілів відповідних ділянок зберігався. Для точного визначення положення магнітного меридіана та подальшого розрахунку геофізичних азимутів профілів на одному з пунктів у межах кожної ділянки були виконані спостереження з деклінометром-інклінометром LEMAD-203. При виконанні трикомпонентного знімання з векторним магнітометром паралельно реєстрували варіації магнітного поля магнітоваріаційною станцією (МВС) LEMAD-009. Первинну обробку матеріалів зйомки виконували паралельно з польовими роботами на персональному комп'ютері, який входив до комплексу вимірювального комплексу. Програма дає змогу обчислювати середні аномальні значення повного вектора та його складових для кожного окремого пункту зйомки, вводити поправки відносно контрольної точки, будувати графіки за профілями.

Схема обробки, реалізована програмою, така:

1) обчислення аномальних значень компонент магнітного поля ΔX_a , ΔY_a , ΔZ_a за формулами

$$\Delta X_a = X_M - X_B, \Delta Y_a = Y_M - Y_B, \Delta Z_a = Z_M - Z_B,$$

де X_M, Y_M, Z_M — значення північної, східної та вертикальної складових повного вектора геомагнітного поля, виміряних магніто-варіаційною станцією на даний час, нТл;

X_B, Y_B, Z_B — значення північної, східної та вертикальної складових повного вектора геомагнітного поля, виміряних векторним магнітометром на той самий час, нТл;

2) обчислення аномальних значень модуля повного вектора магнітного поля за формулою:

$$\Delta T_a = \sqrt{X_M^2 + Y_M^2 + Z_M^2} - \sqrt{X_B^2 + Y_B^2 + Z_B^2},$$

а також аномальних значень проєкції модуля повного вектора на горизонтальну площину за формулою

$$\Delta H_a = \sqrt{\Delta X_a^2 + \Delta Y_a^2};$$

3) обчислення аномальних значень магнітного схилення за формулою

$$\Delta D_a = \arctg \frac{\Delta Y_a}{\Delta X_a};$$

повне значення кута ΔD_a , визначено за значеннями X_a та Y_a ;

4) обчислення проєкції модуля повного вектора на вертикальну площину профілю; для цього спочатку визначали його проєкцію на лінію профілю за формулою

$$\Delta H_a = \Delta H_a \cos(\Delta D_a - A_0),$$

де A_0 — азимут профілю.

Тоді

$$\Delta T_{np} = \sqrt{\Delta H_{np}^2 + \Delta Z_a^2};$$

кут нахилу проєкції повного вектора на вертикальну площину профілю обчислено за формулою $\varphi = \arctg \frac{\Delta Z_a}{\Delta H_{np}}$ (індекс «пр» — проєкції).

Обробка польових даних включала введення поправки за розбіжність КП та магнітоваріаційного пункту, векторні розрахунки. Побудовано карти ізодинам відповідних компонент магнітного поля (рис. 1, а—3, а). Всі розрахунки та побудови виконано відносно умовного рівня КП.

Інтерпретація даних векторної зйомки.

Зауважимо, що векторна зйомка виконана в Україні вперше. На час проведення робіт програмне забезпечення і алгоритми для автоматизованої інтерпретації даних, отриманих у результаті зйомки, практично були відсутні.

У процесі інтерпретації даних трикомпонентної зйомки найефективнішим можна вважати автоматизоване фізико-математичне моделювання за аномальним магнітним полем, яке представлено трьома складовими ($\Delta T_{ax}, \Delta T_{ay}, \Delta T_{az}$) повного вектора напруженості магнітного поля. Було використано програмне забезпечення, розроблене в Інституті геофізики НАН України на основі автоматизованої системи інтерпретації потенціальних полів. Це дало можливість інтерпретувати дані векторної зйомки з подальшою побудовою магнітних моделей геологічного середовища.

У програмному комплексі [Булах, Корчагин, 1990; Корчагин и др., 2004; Михеева, Панченко, 2013] реалізовано можливості підбору за вимірюваними компонентами $\Delta g, X_a, Y_a, Z_a, T_a$ гравітаційного і магнітного полів. Для моделювання векторних вимірів магнітного поля X_a, Y_a, Z_a окремо за кожною компонентою у статті наведено один з підходів, особливості якого розглянуто нижче. У рамках методу підбору кількісну інтерпретацію цих компонент виконано за допомогою програмно-алгоритмічного забезпечення. Автоматизований підбір параметрів аномальних джерел і коефіцієнтів лінійного фону модельованих компонент полів у алгоритмах ґрунтується на мінімізації суми квадратів розбіжностей між спостереженими та модельними компонентами:

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

де

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

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

Тут M — загальна кількість використаних при підборі вимірних компонент полів; α_m — ваговий множник внеску компоненти поля m у значення цільової функції; N_m — кількість використаних точок компонент поля m ; a_{im} — ваговий множник i -ї точки компоненти m ; $U_{c,m}^i, U_{T,m}^i$ — відповідно спостережені та модельні значення компонент полів у точці; $U_{j,m}^i$ — внесок j -ї апроксимувальної комірки в компоненту поля m ; K_m — кількість елементарних апроксимувальних комірок, використовуваних для опису аномальних мас m ; p_m — загальна кількість параметрів, що описують модельне поле m ; A^m, B^m, C^m, D^m — коефіцієнти лінійного фону компоненти m .

Для можливості підбору за векторними вимірами $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ для показника якості, що мінімізується (1), передбачено вибір $M=3$, а $U_1 \rightarrow \Delta X, U_2 \rightarrow \Delta Y, U_3 \rightarrow \Delta Z$. У цьому завданні усі геологічні утворення, що складають розріз, апроксимовано горизонтальними призмами з довільним контуром перерізу. З урахуванням співвідношень Пуассона між гравітаційним і магнітним потенціалами були використані вирази других похідних гравітаційного потенціалу, наведені у праці [Константинов, Константинова, 1974]. Алгоритм розрахунку модельних значень компонент $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta T$ від параметричної моделі магнітоактивних джерел реалізовано в програмі відповідно до співвідношень

$$\begin{aligned} A_X &= I_X A_{XX} + I_Y A_{XY} + I_Z A_{XZ}; \\ A_Y &= I_X A_{YX} + I_Y A_{YY} + I_Z A_{YZ}; \\ A_Z &= I_X A_{ZX} + I_Y A_{ZY} + I_Z A_{ZZ}; \\ A_T &= I_X (lA_{XX} + mA_{XY} + nA_{XZ}) + \\ &+ I_Y (lA_{YX} + mA_{YY} + nA_{YZ}) + \\ &+ I_Z (lA_{ZX} + mA_{ZY} + nA_{ZZ}), \end{aligned} \quad (2)$$

де I_X, I_Y, I_Z — складові вектора інтенсивності намагніченості джерела; l, m, n — напрямні косинуси земного магнітного поля (множники l, m, n визначаються виразами $l = \cos I \sin D$; $m = \cos I \cos D$; $n = \cos I$; I, D — схилення та відхилення вектора напруженості земного магнітного поля).

Завдання кількісної інтерпретації за-

вжди вирішується у заздалегідь вибраному класі геологічних моделей. Кожна побудова таких моделей характеризується тільки йому належними параметрами. Для розв'язання задачі було використано дані векторних вимірів магнітного поля за компонентами X_a, Y_a, Z_a, T_a на ділянках Грузська Південна і Грузська Північна. За геолого-структурним планом район робіт належить до центральної частини Українського щита — Кіровоградського тектонічного мегаблоку. Площа робіт приурочена до потужної Суботсько-Мошоринської широтної зони розломів. За даними досліджень свердловин тут пройдені характерні горизонти «бокситоподібних» порід, що залягають у нижній частині райгородської товщі. За складом це вивітрені ксенотуфобрекчії, майже повністю перетворені на буро-червону глинисту масу, тобто класичні продукти вулканічних апаратів [Калашник и др., 2013; Лебедь и др., 2006]. У геофізичних полях структури кратерів відбиваються негативними контрастними аномаліями сили тяжіння амплітудою 0,7—0,9 мГал і незначними магнітними аномаліями (10—20 нТл). Рудні утворення локалізуються в ендо- і екзоконтактах тіл метаультрабазитів, де розташовуються найбільш сприятливі умови для розвитку золотої мінералізації залізисті кварцити. В магнітному полі залізисті кварцити чітко виділяються лінійними позитивними аномаліями субширотного простягання інтенсивністю близько 6000 нТл. На цих ділянках виконано модульну зйомку з протонним магнітометром і профільні векторні виміри. Результати обробки і варіанти автоматизованого підбору наведено на рис. 1—4.

Для розв'язання інтерпретаційної задачі на зазначених ділянках обрано клас геологічних моделей, що представлені сукупністю намагнічених призм, кожна з яких намагнічена однорідно і визначена координатами кутових точок й трьома складовими вектора намагніченості. Можливість введення у файл вихідних даних значної кількості елементарних тіл, а також зміни їх геометричних і магнітних параметрів дає

Рис. 1. Район досліджень — ділянки Грузька Південна та Грузька Північна Суразького родовища. Карти ізодинам горизонтальних складових напруженості магнітного поля, нТл: а — X_a , б — X_n , обумовленої апроксимаційною моделлю; в — об'ємне зображення горизонтальної складової напруженості магнітного поля X_n , обумовленої апроксимаційною моделлю.

Fig. 1. Research area — sections Gruzka Pivdenna and Gruzka Pivnichna of the Surozh deposit. Map of isodines of the horizontal component of the magnetic field, nT: a — X_a , б — X_n , due to the approximation model; в — is a three-dimensional image of the horizontal component of the magnetic field strength X_n due to the approximation model.

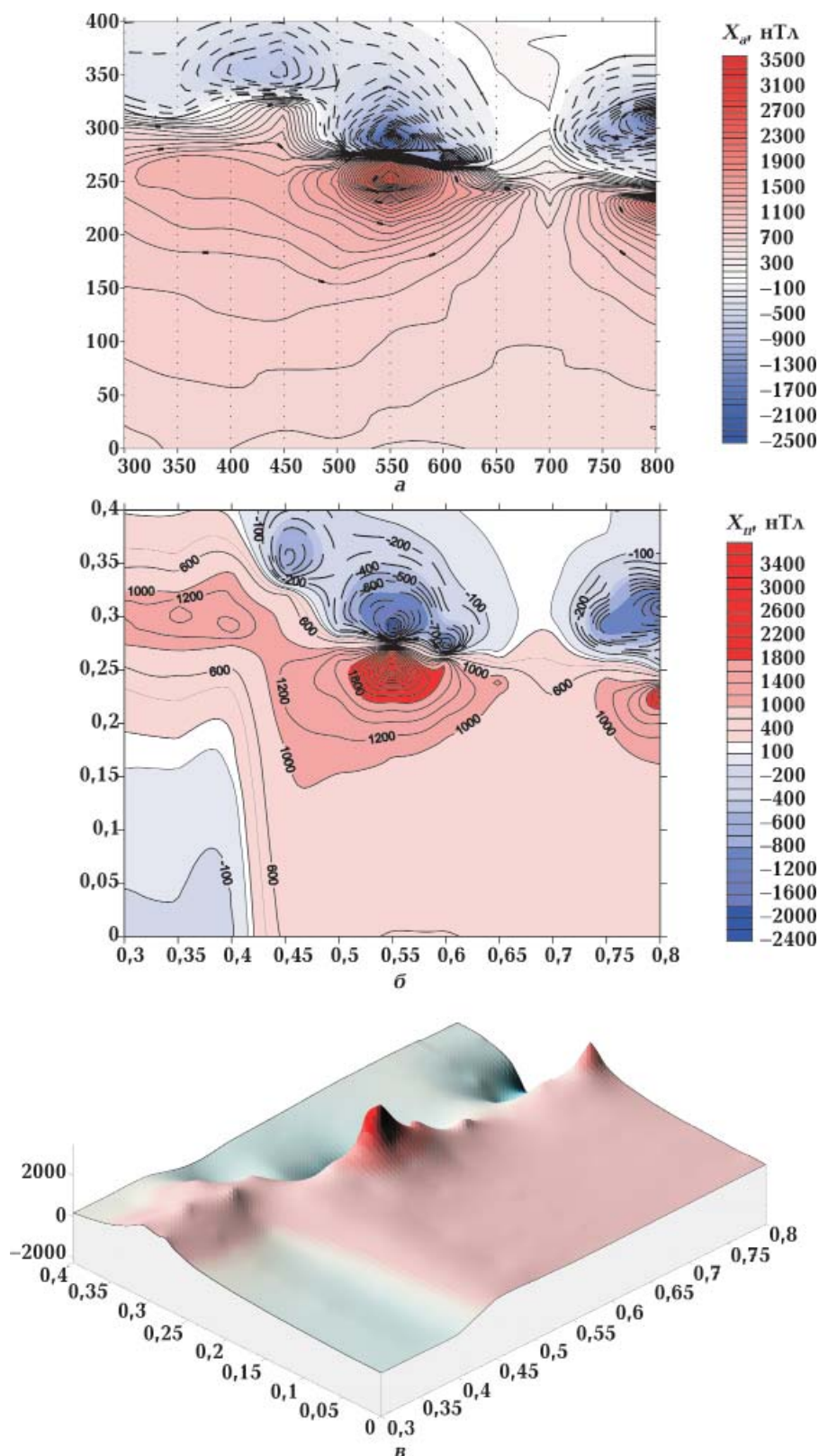


Рис. 2. Район досліджень — ділянки Грузька Південна та Грузька Північна Суразького родовища. Карти ізодинам горизонтальних складових напруженості магнітного поля, нТл: а — Y_a ; б — Y_n , обумовленої апроксимаційною моделлю; в — об'ємне зображення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Y_n , обумовленої апроксимаційною моделлю.

Fig. 2. Research area — sections Gruzka Pivdenna and Gruzka Pivnichna of the Surozh deposit. Map of isodines of the horizontal component of the magnetic field strength, nT: a — Y_a ; б — Y_n ; в — is a three-dimensional image of the horizontal component of the magnetic field strength Y_n , due to the approximation model.

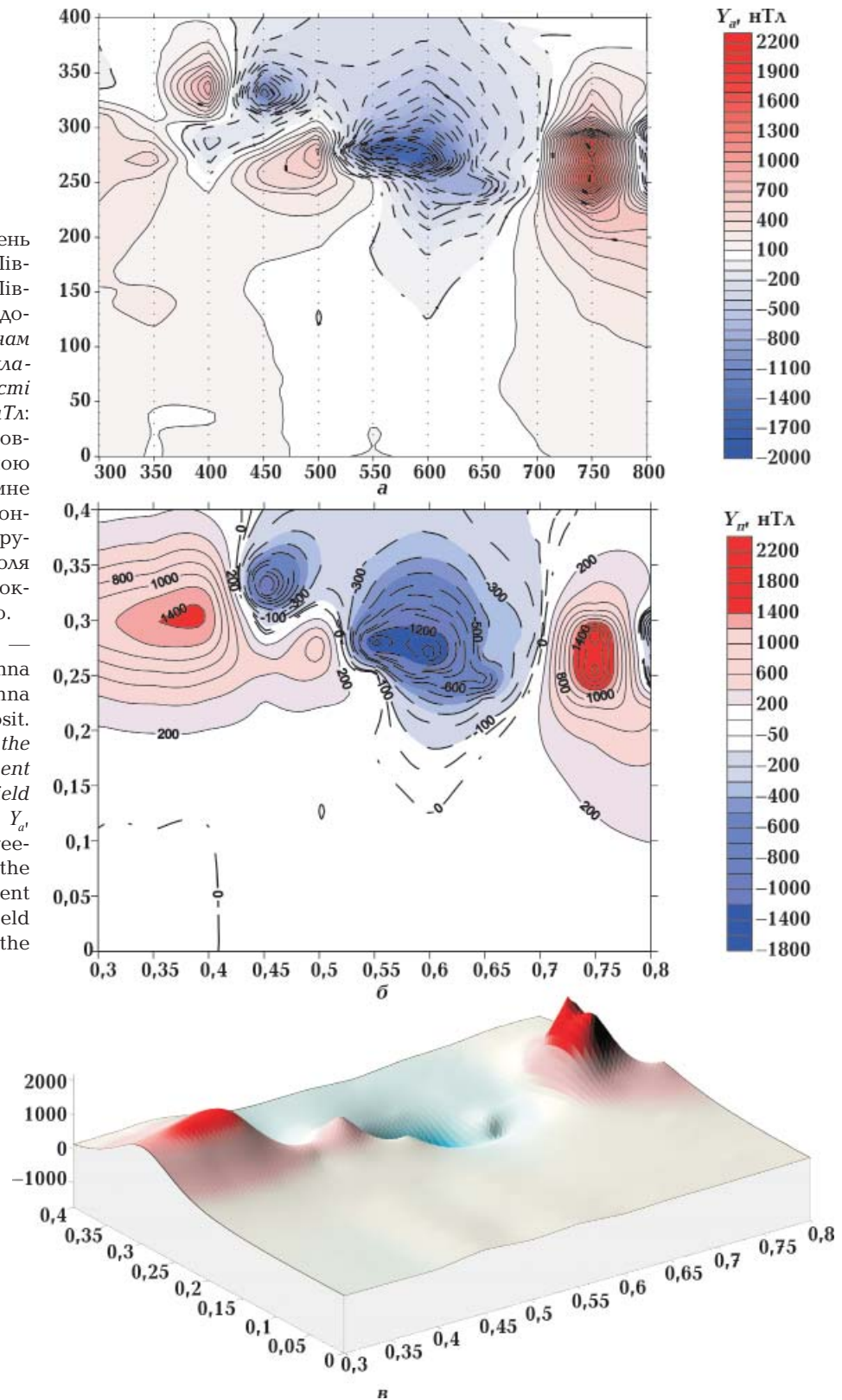


Рис. 3. Район досліджень — ділянки Грузька Південна та Грузька Північна Суразького родовища. Карти ізодинам вертикальної складової напруженості магнітного поля, нТл: а — Z_a , б — Z_n , обумовлена апроксимаційною моделлю; в — об'ємне зображення вертикальної складової напруженості магнітного поля Z_n , обумовленої апроксимаційною моделлю.

Fig. 3. Research area — sections Gruzka Pivdenna and Gruzka Pivnichna of the Surozh deposit. Map of isodines of the vertical component of the magnetic field strength, nTl: а — Z_a , б — Z_n , strength due to the approximation model; в — is a three-dimensional image of the vertical component of the magnetic field strength Z_n , due to the approximation model.

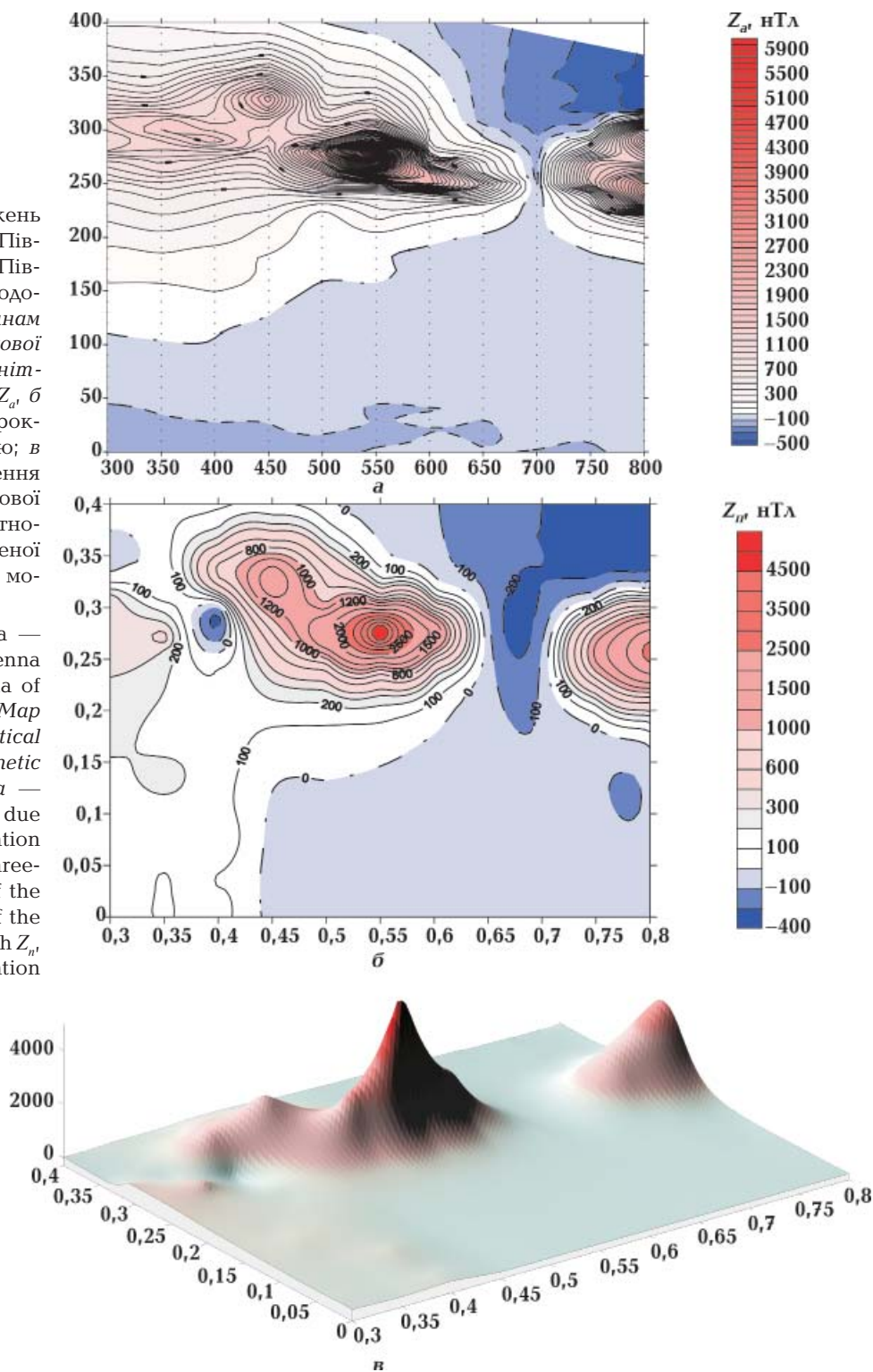
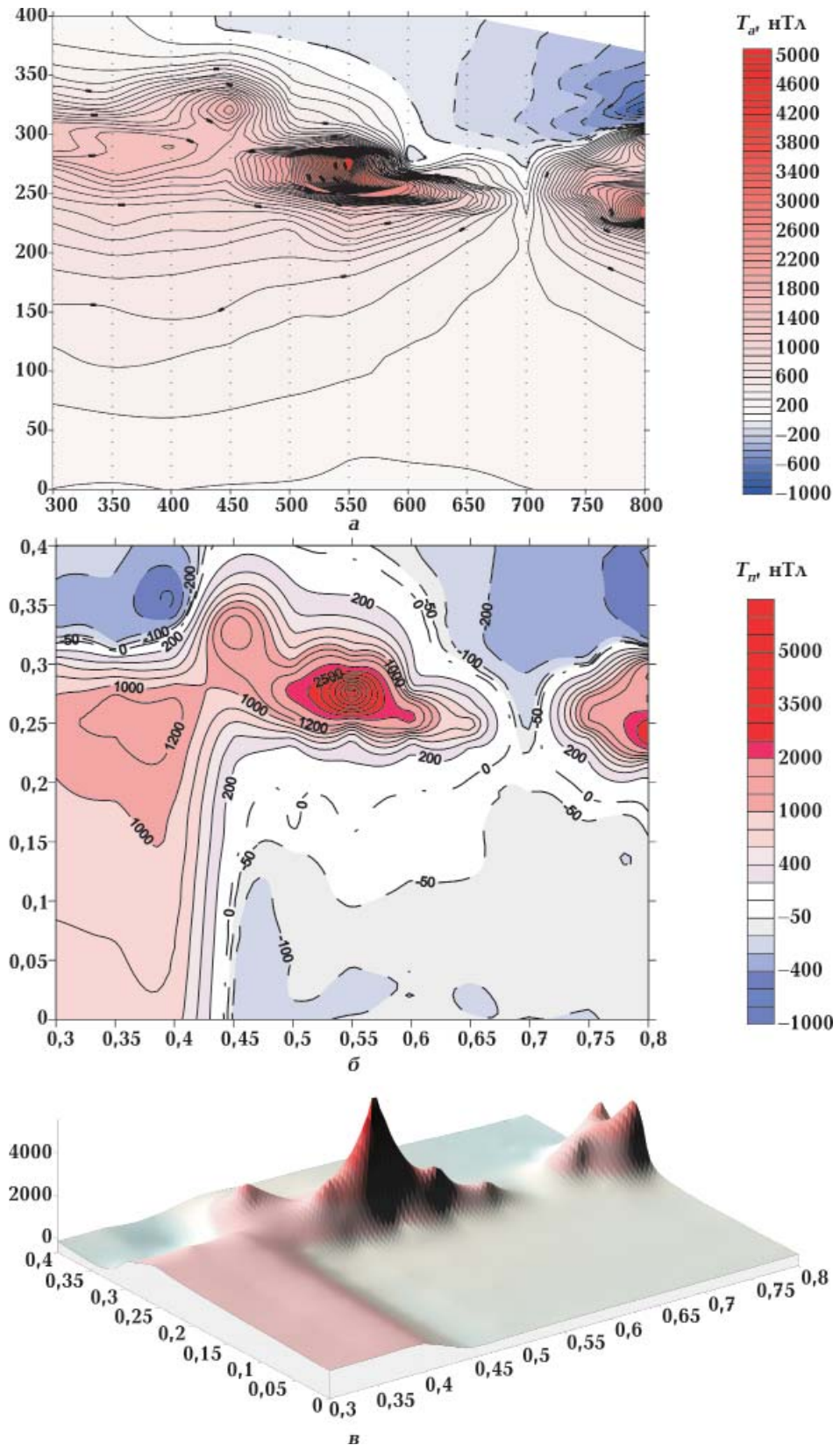


Рис. 4. Район досліджень — ділянки Грузька Південна та Грузька Північна Суразького родовища. Карти ізодинам повного вектора напруженості магнітного поля, нТл: а — T_a , б — T_n , обумовленого апроксимаційною моделлю; в — об'ємне зображення повного вектора напруженості магнітного поля T_n , обумовленого апроксимаційною моделлю.

Fig. 4. Research area — sections Gruzka Pivdna and Gruzka Pivnichna of the Surozh deposit. Map of isodines of the full vector of magnetic field strength, nT: а — T_a , б — T_n , strength due to the approximation model; в — is a three-dimensional image of the total vector of the magnetic field strength T_n , due to the approximation model.



зможу моделювати геологічні об'єкти будь-якої складності. За наявності апріорних даних задають початкові параметри моделі: кількість тіл, координати кутових точок кожної призми, складові вектора намагніченості. У процесі моделювання виконано пошук такої сукупності призматичних намагнічених тіл, аномальне поле яких у межах точності вимірів збігається з вихідним. При цьому модель наділена геологічним змістом, тому можливо прогнозувати місце розміщення, розміри і намагніченість ре-

альних об'єктів. Передбачено такі варіанти розв'язання оберненої задачі.

1. У геологічній моделі зафіксовані геометричні параметри кожного тіла. Задачу розв'язано щодо складових вектора намагніченості.

2. У геологічній моделі закріплені значення вектора намагніченості. Задачу розв'язано щодо геометричних параметрів.

Підбір параметрів можна здійснювати як окремо за кожною складовою вектора напруженості магнітного поля, так і одно-

Параметри початкової і підібраної моделей

Номер моделі	Координати кутових точок апроксимувальних комірок				Параметри інтенсивності намагнічення		
	x_i	z_i	y_1	y_2	I_x	I_y	I_z
Параметри початкової моделі							
1	0,50 0,50 0,60 0,60 0,50	0,03 0,5 0,5 0,03 0,03	0,265	0,295	0	0	2500
2	0,72 0,72 0,90 0,90 0,72	0,02 0,7 0,7 0,02 0,02	0,245	0,285	0	0	1000
3	0,43 0,43 0,47 0,47 0,43	0,05 0,7 0,7 0,05 0,05	0,325	0,335	0	0	2500
4	0,30 0,30 0,42 0,42 0,30	0,05 0,7 0,7 0,05 0,05	0,285	0,315	0	0	2500
Параметри підібраної моделі							
1	0,50 0,50 0,59 0,59 0,50	0,016 0,468 0,468 0,016 0,016	0,267	0,287	77	377	2528
2	0,74 0,74 0,80 0,80 0,74	0,027 0,127 0,127 0,027 0,027	0,236	0,289	-177	253	1147
3	0,42 0,42 0,49 0,49 0,43	0,031 0,501 0,501 0,031 0,031	0,326	0,334	2	279	3462
4	0,3 0,3 0,44 0,44 0,3	0,059 0,301 0,301 0,059 0,059	0,288	0,311	300	97	2393

часно за двома чи трьома складовими цього вектора.

Якісний аналіз магнітного поля дає змогу припустити, що геологічна модель складається з чотирьох ізольованих тіл. Для початкової моделі прийнято припущення, що всі тіла намагнічені однорідно. Задачу розв'язували з використанням обмежень на геометричні та фізичні параметри. За допомогою функціонала (1) зіставляли аномальні поля з теоретичним. При розв'язанні прямої задачі значення функціонала $F_0=577056$ нТл. Для мінімізації виконано 150 ітерацій. Середня розбіжність полів дорівнює 26 нТл, максимальна розбіжність — 121 нТл. Задачу автоматизованого підбору обчислено по 11 профілях. Значення параметрів початкової і підібраної моделей наведено в таблиці. Найточніший розв'язок отримано по четвертому профілю, де максимальна розбіжність полів становила 65 нТл. У результаті кількісної інтерпретації магнітних аномалій по 11 профілях отримано оцінки параметрів намагнічених тіл за вказаними трьома компонентами аномального поля. У статті [Михеева, Панченко, 2013] для інтерпретації векторних даних розв'язано задачу, де в якості апароксимуючих осередків було взято обмежені за простяганням вертикальні паралелепіпеди. Можливість зіставлення результатів інтерпретації аномалій на кожному профілі за складовими аномального поля сама по собі підвищує надійність геологічного тлумачення магніторозвідувальних даних порівняно з інтерпретацією даних модульних зйомок. Розглянута модифікація автоматизованого підбору за трикомпонентними вимірами магнітного поля випробувана на великій кількості тестових прикладів.

Широкий спектр передбачуваних значень магнітних характеристик трапів і кімберлітів робить схематичним прогноз створюваних ними полів. У разі відсутності апріорних даних за невідомі беруть геометричні параметри об'єктів, що створюють аномалії, їхні взаємовідношення із вмісним середовищем і дані стосовно вектора намагніченості цих об'єктів.

Геологічні ділянки, що складають розріз, апроксимували горизонтальними призмами з довільним контуром перерізу. Детальність побудови горизонтальних призм визначали за обсягом наявного фактичного матеріалу. Процес інтерпретації методом підбору полягав у багатоваріантній побудові геолого-геофізичних профілів і коригуванні фізичних й геометричних параметрів збурювальних тіл з метою найліпшого збігу модельних та спостережених полів.

На сучасному етапі найефективнішим можна вважати автоматизоване тривимірне (3D) фізико-математичне моделювання за аномальним магнітним полем, що представлено трьома складовими (ΔT_{ax} , ΔT_{ay} , ΔT_{az}) повного вектора напруженості магнітного поля.

Висновки. Інформативність векторних зйомок вища за модульні, і це очевидно, оскільки векторні зйомки дають змогу за нахилом та схиленням знайти напрямок на центр магнітних мас у розрізі, а за схиленням — оцінити напрямок із точки спостереження на об'єкт у плані [Ладынин и др., 2002]. Наявність векторної інформації істотно збагачує інтерпретатора можливостями визначення параметрів збурювальних об'єктів і тим самим сприяє достовірності розв'язку оберненої задачі магніторозвідки. Використання векторної інформації дає змогу успішніше локалізувати джерела і тим самим скоротити обсяг польових робіт.

За допомогою запропонованої технології моделювання магнітоактивних джерел за даними векторних вимірювань магнітного поля можна ефективно і просто будувати моделі та застосовувати для вирішення практичного завдання різноманітні стратегії автоматизованого підбору.

1. Для конкретної практичної задачі реалізуються варіанти автоматизованого підбору параметрів магнітоактивних джерел за кожною з компонент ΔX , ΔY , ΔZ . Необхідну компоненту для кожного варіанта розв'язання задачі обирають при заданні значень D і I нормального магнітного поля Землі.

2. У разі присвоєння параметрам D і I значень, що відповідають точним значенням нормального магнітного поля для ділянки вимірювань, за раніше підготовленим файлом вхідної інформації можуть бути вирішені також завдання підбору за компонентами магнітного поля ΔH і ΔT .

Працездатність програми підбору за компонентами магнітного поля ΔX , ΔY , ΔZ апробована при вирішенні модельних і практичних завдань, її також можна успішно застосовувати при інтерпретації аеромагнітних даних. Розвиток технологій кількісної інтерпретації векторних вимірювань магнітного поля за даними ΔX , ΔY ,

ΔZ водночас є перспективним. Інтерес до цієї проблеми підвищився останнім часом у зв'язку з появою і практичним застосуванням векторних магнітометрів. Установлено, що в деяких випадках у верхній частині розрізу над покладами вуглеводнів відбувається перерозподіл форм заліза (III) і заліза (II), що може зумовити різні перепади (зменшення і збільшення) магнітної сприйнятливості порід. Кількісна інтерпретація даних векторного магнітного знімання у таких фізико-геологічних умовах може надати істотну допомогу при виявленні і локалізації покладів вуглеводнів.

Список літератури

- Буллах Е. Г., Корчагин И. Н. Автоматизированный подбор трехкомпонентных измерений аномального магнитного поля. Докл. АН УССР. Сер. Б. 1990. № 7. С. 3—5.
- Калашник Л. А., Кирьянов Н. Н., Палкина Е. Ю. Алмазоперспективные структуры Ингульского мегаблока Украинского щита. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2013. № 13. С. 39—64.
- Коваленко-Завойский В. М., Иващенко И. М. Математичне забезпечення інтерпретації поля ΔV_a регіональних магнітних аномалій. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 5. С. 18—30.
- Константинов Г. Н., Константинова Л. С. Моделирование в рудной магниторазведке. Новосибирск: Изд. СНИИГГИМС, 1974. 76 с.
- Корчагин И. Н., Левашов С. П., Михеева Т. Л., Орлова М. И., Прилуков В. В., Якимчук Н. А., Якимчук Ю. Н., Шумик С. В. Элементы многошаговых стратегий в технологиях автоматизированного подбора гравитационных и магнитных аномалий. В сб.: Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. Т. 1. Київ, 2004. С. 143—158.
- Ладынин А. В., Василевский А. И., Павлов А. В., Попова А. А. Методика векторной магнитной съемки для разведки железорудных месторождений. *Геология и геофизика*. 2002. Т. 43. № 1. С. 78—89.
- Лебедь Т. В., Пашкевич И. К., Елисеєва С. В. Трехмерная магнитная модель Сурожского золоторудного месторождения. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 26. № 6. С. 49—58.
- Магниторазведка. Справочник геофизика. Под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. Москва: Недра, 1980, 367 с.
- Максимчук В. Ю., Орлюк М. И., Трегубенко В. И., Марченко Д. О., Накалов Є. Ф., Чоботок І. О. Результати компонентних вимірювань магнітного поля Землі на мережі пунктів вікового ходу України у 2005—2010 рр. *Геодинаміка*. 2013. № 2(15). С. 219—222.
- Методические рекомендации по применению векторной магниторазведки при поисках кимберлитов на трапповых площадях. Иркутск: Изд. ВостСибНИИГГИМС, 1981. 100 с.
- Михеева Т. Л., Панченко Н. В. Решение обратной задачи магниторазведки по векторным измерениям аномального магнитного поля. В сб.: Теоретичні та практичні аспекти геоінформатики. Київ, 2013. С. 135—142.
- Орлюк М. И., Марченко А. В., Иващенко И. Н. Расчет компонент геомагнитного поля на примере Одесской магнитной аномалии. *Геодинаміка*. 2014. № 1(16). С. 96—100.
- Старостенко В. И., Шуман В. Н., Иващенко И. Н., Легостаева О. В., Савченко А. С., Скриник О. Я. Магнитные поля трехмерных анизотропных тел.: теория и практика вычислений. *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 20—35.

Старостенко В. И., Шуман В. Н., Пашкевич И. К., Легостаева О. В., Савченко А. С. Методы восстановления гармонических функций по магнитному полю ΔT и функ-

ции В. Н. Страхова ΔS : обзор. *Физика Земли*. 2013. № 1. С. 151—160. <https://doi.org/10.7868/S0002333713010158>.

Computer technology for interpreting vector measurements of the magnetic field

T. L. Mikheeva, O. P. Lapina, 2021

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Computer technology is presented to solve the inverse problem of magnetic field vector measurements using software and algorithmic support for an automated system to interpret potential fields. The technology includes constructing a numerical model of the magnetic field of the studied area, forming an initial approximation model, assessing the depth of the sources and their magnetization. An approximation structure is used to describe the sources of anomalies (a set of uniformly magnetized polygonal prisms). To solve the problem, we used real vector measurements of the magnetic field by the components X_a, Y_a, Z_a, T_a in the sections of Gruzsko South and Gruzsko Severnaya. Geologically, the area belongs to the central part of the Ukrainian Shield — the Kirovograd tectonic megablock. The area of work is confined to the Subotsko-Moshorin latitudinal fault zone. The possibility of comparing the results of the interpretation of anomalies on each profile by the components of the anomalous magnetic field increases the reliability of the geological interpretation of magnetic prospecting data compared to the interpretation of modular surveys. The presence of vector measurements greatly facilitates the ability to determine the parameters of anomalous objects, which makes it possible to obtain more reliable solutions to the inverse problem. The use of vector information makes it possible to localize geological sources more successfully, thereby reducing the amount of work.

Key words: vector magnetic prospecting, magnetic field components, software and algorithmic support, inverse problem, approximation construction.

References

- Bulakh, E. G., & Korchagin, I. N. (1990). Automated selection of three-component measurements of anomalous magnetic field. *Doklady AN USSR. Ser. B*, (7), 3—5 (in Russian).
- Kalashnik, L. A., Kiryanov, N. N., & Palkina, E. Yu. (2013). Promising diamond structures of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield. *Naukovi pratsi UkrNDMI NAS of Ukraine*, (13), 39—64 (in Russian).
- Kovalenko-Zavoysky V. M., & Ivashchenko, I. M. (2006). Mathematical support for the interpretation of the ΔB_a field of regional magnetic anomalies. *Geofizicheskij Zhurnal*, 28(5), 18—30 (in Ukrainian).
- Konstantinov, G. N., & Konstantinova, L. S. (1974). *Modeling in ore magnetic prospecting*. Novosibirsk: Publishing SNIIGGIMS, 76 p. (in Russian).
- Korchagin, I. N., Levashov, S. P., Mikheeva, T. L., Orlova, M. I., Prilukov, V. V., Yakimchuk, N. A., Yakimchuk, Yu. N., & Shumik, S. V. (2004). Elements of multistep strategies in technologies of automated selection of gravitational and magnetic anomalies. In *Theoretical and applied aspects of geoinformatics* (Vol. 1, pp. 143—158). Kyiv (in Russian).
- Ladynin, A. V., Vasilevskiy, A. I., Pavlov, A. V., & Popova, A. A. (2002). Vector magnetic survey technique for exploration of iron ore deposits. *Geologiya i geofizika*, 43(1), 78—89 (in Russian).
- Lebed, T. V., Pashkevich, I. K., & Eliseeva, S. V.

- (2006). Three-dimensional magnetic model of the Surozh gold ore deposit. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 26(6), 49—58 (in Russian).
- Nikitskiy, V. E., & Glebovskiy, Yu. S. (Eds.). (1980). *Magnetic prospecting. Geophysics Handbook*. Moscow: Nedra, 367 p. (in Russian).
- Maksymchuk, V. Yu., Orlyuk, M. I., Tregubenko, V. I., Marchenko, D. O., Nakalov, E. F., & Chobotok, I. O. (2013). Results of component measurements of the Earth's magnetic field at repeat stations of the Ukrainian network during 2005—2010. *Geodynamika*, (2), 219—222 (in Ukrainian).
- Methodological recommendations on the use of vector magnetic prospecting in the search for kimberlites in trap areas.* (1981). Irkutsk: Publishing VostSibNIIGiMS, 100 p. (in Russian).
- Mikheeva, T. L., & Panchenko, N. V. (2013). Solution of the inverse problem of magnetic prospecting based on vector measurements of the anomalous magnetic field. In *Theoretical and applied aspects of geoinformatics* (pp. 135—142). Kyiv (in Russian).
- Orlyuk, M. I., Marchenko, A. V., & Ivaschenko, I. N. (2014). Calculating of the geomagnetic field induction vector components on the Odessa magnetic anomaly region. *Geodynamika*, (1), 96—100 (in Russian).
- Starostenko, V. I., Shuman, V. N., Ivaschenko, I. N., Legostaeva, O. V., Savchenko, A. S., & Skrinik, O. Ya. (2009). Magnetic fields of 3-D anisotropic bodies: theory and practice of calculations. *Fizika Zemli*, (8), 20—35 (in Russian).
- Starostenko, V. I., Shuman, V. N., Pashkevich, I. K., Legostaeva, O. V., & Savchenko, A. S. (2013). Methods for reconstructing harmonic functions from the magnetic field ΔT and V. N. Strakhov's function ΔS : a review. *Fizika Zemli*, (1), 151—160. <https://doi.org/10.7868/S0002333713010158> (in Russian).

Компьютерная технология интерпретации векторных измерений магнитного поля

Т. Л. Михеева, Е. П. Лапина, 2021

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

Приведена компьютерная технология для решения обратной задачи по векторным измерениям магнитного поля с использованием программно-алгоритмического обеспечения автоматизированной системы интерпретации потенциальных полей. Технология включает в себя построение числовой модели магнитного поля изучаемого участка, формирование модели начального приближения, оценку глубины залегания источников и их намагниченности. Для описания источников аномалий используется аппроксимационная конструкция — совокупность однородно намагниченных многоугольных призм. Для решения задачи использованы реальные векторные измерения магнитного поля по компонентам X_a , Y_a , Z_a , T_a на участках Грузской Южный и Грузской Северной. В геолого-структурном плане район работ относится к центральной части Украинского щита — Кировоградскому тектоническому мегаблоку. Площадь работ приурочена к Субботско-Мошоринской широтной зоне разломов. Возможность сопоставления результатов интерпретации аномалий на каждом профиле по составляющим аномального магнитного поля повышает надежность геологического истолкования магниторазведочных данных по сравнению с интерпретацией модульных съемок. Наличие векторных измерений существенно облегчает определение параметров аномальных объектов, что дает возможность получать более достоверные решения обратной задачи. Использование векторной информации позволяет успешнее локализовывать геологические источники и тем самым сокращать объемы работ.

Ключевые слова: векторная магниторазведка, компоненты магнитного поля, программно-алгоритмическое обеспечение, обратная задача, аппроксимационная конструкция.