

ОРИГІНАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ПІДБОРУ МАГНІТНИХ АНОМАЛІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ СІТКОВИХ ПОКРИТТІВ ДЖЕРЕЛ

П.І. Гришук

*Міжнародний хаб природних ресурсів, вул. Дубровицька, 28, м. Київ, 04114, Україна,
e-mail: pgryshchuk@gmail.com*

Розглянуто оригінальний алгоритм підбору магнітних джерел. В основі підходу покладено принцип переміщення мас, що приводить до формування геологічних утворень. Для двовимірної сіткової моделі переміщення намагніченості у блоках виконано у чотирьох напрямках: вліво, вправо, угору і вниз. У виняткових випадках намагніченість може переміщуватися на значну відстань, наприклад унаслідок течії лави. Надлишкову намагніченість та напрямок руху блоків визначали довільно. Теоретичну модель складено з трьох прямокутних тіл. Розглянуто розрізи з кількістю шарів від 3 до 7. Модель підібрана за умови, що значення та напрямок намагніченості відомі. Кожен блок мав форму куба з розміром сторони 1 м. Вихідні та розраховані аномалії повного вектора магнітного поля порівнювали за допомогою середньої норми та похибки у відсотках. Геометрію тіл з однаковою намагніченістю (1 А/м) визначали точно для 3 і 4 шарів, а для 5—7 — з похибкою на більшій глибині. Модель з двома значеннями намагніченості (1,0 і 0,5 А/м) мала суттєві похибки при визначенні геометрії тіл. Відсутність стрибків на графіку цільової функції гарантувало визначення точної моделі. За новим алгоритмом, що ґрунтується на переміщенні маси між блоками, можна підібрати магнітну модель досить швидко. Основними факторами, що впливають на точність геометрії, є дані щодо намагніченості тіл і кількість шарів. Створений підхід дає змогу оцінювати розріз за сітковим розподілом надлишкової намагніченості. Розробку застосовано для двовимірної інтерпретації Курської магнітної аномалії. Глибина залягання, нахил і горизонтальна товщина залізистих кварцитів, визначені методом переміщення магнітних мас, узгоджуються з даними буріння.

Ключові слова: підбір моделі, кількість шарів моделі, намагніченість, алгоритм переміщення магнітної маси, відхилення у відсотках, точність підбору, Курська магнітна аномалія.

Вступ. Магніторозвідку використовують для багатьох завдань. У праці [10] наведено приклади застосування магнітометричних досліджень для оконтурення соляних куполів, виявлення тектонічних порушень пасток вуглеводнів, пошуку рудних покладів, розвідки алмазонасних структур, знаходження археологічних об'єктів, картування поверхні фундаменту. Тому важливим питанням є побудова достовірних геологічних моделей на підставі кількісного аналізу магнітних аномалій. Існують різні підходи до інтерпретації потенціальних полів [3]. Так, у статті [13] описано метод сітки для визначення надлишкової густини за геофізичними даними площі. Точність розв'язку цього підходу досліджували А.А. Юньков і Є.Г. Булах у двовимірному варіанті на прикладі гравіметрії [19]. Є.Г. Булах — автор численних алгоритмів оптимізації з багатьма параметрами.

У статтях [14, 17] викладено монтажний принцип розв'язку оберненої задачі гравіметрії, який ґрунтується на методі регульованої спрямованої кристалізації. В.І. Старостенко розробив стійкі методи розв'язку некоректних задач для гравіметрії [16]. Є.Г. Булах і І.М. Корчагін [1] описали метод послідовних приростів моделі для даних гравітацій-

ного поля, що ґрунтується на монтажному принципі, а також разом із співавторами [2] розглянули інші математичні алгоритми для розв'язку обернених задач потенціальних і геотермічних аномалій.

В.М. Завойський та Ю.С. Неїжсал [7] запропонували декомпозиційно-ітераційний метод розв'язання оберненої задачі магнітометрії. О.С. Долгаль [6] описав комп'ютерні технології обробки та інтерпретації даних гравіметричного та магнітного знімання. А.І. Кобрунов [8] розглянув еволюційно-динамічні принципи для реконструкції густинних моделей осадових басейнів з урахуванням того, що цей підхід не може бути використаний для моделювання тектонічних порушень. П.О. Міненко [11] запропонував сіткові апроксимації для розв'язку обернених задач гравімагніторозвідки та багатошарові моделі. О.П. Петровський і співавт. [15] описали швидкий алгоритм розв'язку прямої задачі гравіметрії, який дає змогу застосувати систему розв'язування обернених задач з використанням сіткових (багатомільйонних) покриттів розрізу.

Параметри моделі підбирають, зменшуючи різницю між розрахованим і спостереженим полями. Така задача має неоднозначний розв'язок. Для зменшення цього фактора задають певний клас мо-

делей. В цьому випадку модель обмежують простою формою. Наприклад, у методі характерних точок використовують кулю, горизонтальний та вертикальний циліндри [9], що мають відомі значення намагніченості. Як магнітні джерела застосовують нахилені призми [4, 24]. Наприклад, у статті [22] використано множину прямокутних призм для інтерпретації магнітних аномалій над шахтами з покладами цинку (північно-західна частина Канади). Для визначення топографії фундаменту за магнітними та гравітаційними даними для Центрального масиву Франції було застосовано перетворення Фур'є [23].

З метою моделювання складних форм використовують сіткову модель, яка складається з блоків. В них визначають магнітні параметри, що дає змогу отримати геометрію тіл. Подібна задача є нелінійною. В цій ситуації важливо з'ясувати, за якої кількості шарів можна отримати точну форму джерела для теоретичних моделей.

Розглянемо основні підходи до інтерпретації аномалій повного вектора магнітного поля з прикладами застосування певної кількості шарів. У статті [20] описано модель із прямокутних блоків для тривимірної інверсії магнітних аномалій над вулканічними породами південної частини штату Айдахо. Модель складалася з двох шарів по 9 блоків у кожному. У публікації [26] використано багатоконтактну цільову функцію для розв'язання оберненої задачі магнітометрії у тривимірному варіанті. Модельний розріз складався з 10 шарів, у яких було 20 блоків. Результат цієї інверсії має наближений вигляд для теоретичних моделей із двох тіл. Верхні шари більше відповідали вхідним моделям, тому що були розташовані ближче до точок спостережень. Практичне застосування виконано для магнітних аномалій мідно-золотого порфірового родовища в межах гори Мілліган (центральна частина півночі Британської Колумбії, Канада), розріз якого досліджено на глибину 450 м і довжину 1200 м. А. Портнягин і М. Жданов [29] розробили компресійний алгоритм з фокусуванням зображення. На цій основі виконано магнітну інверсію на моделях з 10 шарів по 20 блоків у кожному, яка дала наближену форму вхідних моделей. Цю розробку було застосовано для виділення намагнічених зон у Північній Канаді, де гранітний фундамент перекритий осадовими відкладами потужністю 450 м. Метод деконволюції Ейлера було застосовано для моделювання тривимірних джерел над інтрузією лужних утворень у Бразилії [27], метод амплітудної магнітної інверсії — для району залізородних шахт Daye у Китаї [25].

Аналіз алгоритмів підбору моделей підказав два завдання для їх впровадження. По-перше, бажано створити алгоритм, який більш пов'язаний з утворенням геологічних об'єктів. По-друге, за наявності розробки важливим є з'ясування умов, за яких виконують точний підбір теоретичних моделей.

Опис алгоритму. Для автоматизованого створення різних форм найзручнішою є сіткова модель. Вона складається з прямокутних блоків, у яких намагніченість має власне значення (рис. 1). Цей принцип подібний до цифрового зображення, сформованого з прямокутників (пікселів), що мають свій колір.

Аномальний магнітний ефект $(\Delta T)_a$ для призматичного тіла в точці спостереження розраховують за формулами [21]

$$(\Delta T)_v = \sum_{t=1}^S B_t, \quad v=1 \dots P, \quad t=1 \dots S, \quad (1)$$

де v — номер точки спостереження; P — кількість пунктів спостережень; t — порядковий номер; S — кількість блоків; B_t — повний магнітний вектор блока:

$$B_t = \sum_i \sum_j \sum_k S \left[J_x (I_{xx} + m A_{xy} + n A_{xz}) + J_y (I_{yx} + m A_{yy} + n A_{yz}) + J_z (I_{zx} + m A_{zy} + n A_{zz}) \right].$$

Це інтегральні компоненти повного вектора магнітної індукції для призми, де

$$\alpha = x_i - x_0, \quad \beta = y_j - y_0, \quad \gamma = z_k - z_0,$$

$$S = (-1)^{i+j+k}, \quad i, j, k = 1, 2; \quad x_1 = x_0 - \Delta x/2,$$

$$x_2 = x_0 + \Delta x/2, \quad y_1 = y_0 - \Delta y/2, \quad y_2 = y_0 + \Delta y/2,$$

$$z_1 = z_0 - \Delta z/2, \quad z_2 = z_0 + \Delta z/2$$

— координати кутів призми; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — розміри призми вздовж відповідних осей x, y , та z ; $r = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}$ — відстань між точкою спостереження та кутовими точками призми;

$$S = \gamma \sin \psi + \alpha \cos \psi, \quad c = \alpha \cos \psi - \gamma \sin \psi, \quad l_1 = \ln(r - \beta),$$

$$l_2 = \ln(r - s), \quad l_3 = \ln(r - \alpha), \quad t_1 = \arctg \left(\frac{\beta s}{rc} \right),$$

$$t_2 = \arctg \left(\frac{\beta^2 \cos \psi + \gamma c}{-\beta r \sin \psi} \right), \quad t_3 = \arctg \left(\frac{\alpha \beta}{\gamma r} \right);$$

$$A_{xx} = -\sin \psi \cos \psi l_1 + \sin^2 t_1, \quad A_{xy} = A_{yx} = -\sin \psi l_2,$$

$$A_{xz} = A_{zx} = -\sin^2 \psi l_1 - \sin \psi \cos \psi t_1, \quad A_{yy} = -t_2,$$

$$A_{yz} = A_{zy} = \cos \psi l_2 - l_3.$$

Кут ψ — нахил призми, який має дорівнювати 90° з метою отримання вертикальних блоків.

Напрявні косинуси магнітного поля Землі в точці спостереження: $l = \cos I_e \cos(D_e - \theta)$, $m = \cos I_e \sin(D_e - \theta)$, $n = \sin I_e$, де I_e, D_e — нахилення та схилення геомагнітного поля; θ — азимут профілю.

До напрямних косинусів магнітної призми належать: $L = \cos I_r \cos(D_r - \theta)$, $M = \cos I_r \sin(D_r - \theta)$, $N = \sin I_r$, де I_r, D_r — нахилення та схилення вектора намагнічування призми.

Повну інтенсивність намагнічування визначають через векторні компоненти [28]: $J_x = \chi T_0 l + J_r L$; $J_y = \chi T_0 m + J_r M$; $J_z = \chi T_0 n + J_r n$, де T_0 — нормальне маг-

нітне поле; χ — магнітна сприйнятливість призми; J_r — інтенсивність залишкової магнітної намагніченості для призми. Загальну магнітну поляризацію визначають за формулою

$$J = J_x l + J_y m + J_z n. \quad (2)$$

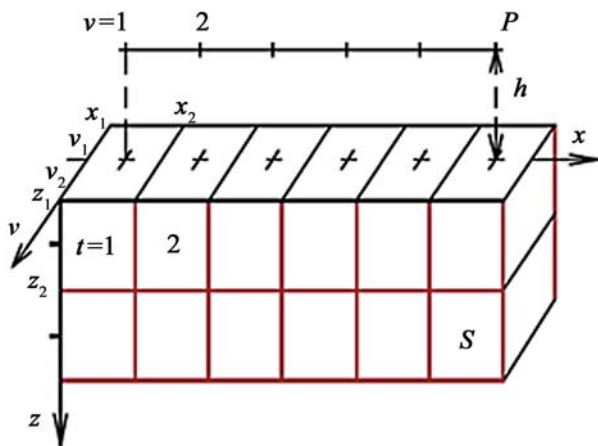


Рис. 1. Сіткова двовимірний модель з точками спостережень (v) і номерами блоків (t)

Fig. 1. Two-dimensional grid model with points of observation (v) and block numbers (t)

Для моделювання геометрії аномальних джерел у магнітометрії потрібен алгоритм, що пов'язаний з природним утворенням геологічних тіл. Ці об'єкти з'являлися внаслідок рухів і нагромадження відкладів упродовж різного періоду часу. За загального підходу до формування магнітної маси, мають існувати породи з певними властивостями намагніченості та магнітної сприйнятливості. Такий об'єкт може утворитися внаслідок збільшення, зменшення та переміщення магнітної маси. На підставі цього підходу створено оригінальний алгоритм формування геологічних об'єктів. Розріз складається з блоків, в яких визначають намагніченість. Речовина в природі може переміщуватися, тому блок наділяють здатністю рухатися у чотирьох перпендикулярних напрямках для двовимірного варіанта (рис. 2). Сумарна намагніченість може бути перенесена з одного блока (a) до іншого (a'). Рух зміни намагніченості показано тонкими стрілками з номерами від 1 до 6. Підбирання намагніченості починають пошарово справа ліворуч, тобто з нижнього шару (1), проміжного (2) та верхнього (3) — стрілки під номерами. Це перший етап руху речовини по горизонталі, але з поступовим підніманням угору. На другому етапі відбувається горизонтальний рух зліва праворуч з верхнього шару (4), проміжного (5) та нижнього (6) — стрілки проведено над номерами. Загальну послідовність перебирання намагніченості в блоках виконують у шарах з нумерацією від 1 до 6 для тришарової моделі середовища.

Розглянемо алгоритм підбирання магнітних мас (рис. 3). Вхідними є дані аномалій магнітного поля.

Алгоритм переміщення маси належить до стохастичного, тому що спочатку довільно здійснюємо одну із дій як вибір надлишкової намагніченості із заданого діапазону або її переміщення в інший блок (див. рис. 2). Наступний крок — розрахунок магнітного поля від поточної моделі (ΔT_v^{poz}) за формулами (1), (2) для профілю даних. Далі порівнюємо вхідне (ΔT_v^{bx}) і розраховане (ΔT_v^{poz}) аномальні поля (формула (3)) за допомогою середньої норми ($E_{сер}$). На останньому етапі перевіряємо рівень наближення розрахованого поля до вхідного (формула (4)). Цей параметр задаємо для зручності у відсотках ($E_{\%}$). Формули (3), (4) для порівняння полів наведено нижче.

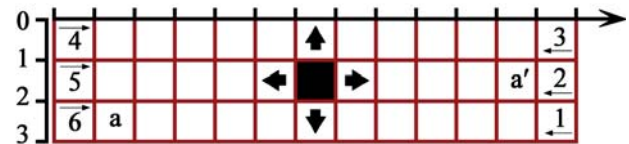


Рис. 2. Послідовність перебирання блоків (тонкі стрілки) та рух магнітної маси (товсті стрілки та aa')

Fig. 2. The sequence of block picking (thin arrows) and the movement of the magnetic mass (thick arrows and aa')



Рис. 3. Підбір магнітної моделі алгоритмом переміщення мас
Fig. 3. Fitting of magnetic model by the mass displacement algorithm

Як цільові функції розглянуто середню, середньоквадратичну та логарифмічну норми, але найбільшій результат було отримано для середньої цільової функції. Тому порівняння вхідного і розрахованого полів виконано за допомогою середнього відхилення магнітних аномалій вздовж профілю спостережень за формулою

$$E_{сер} = \frac{1}{P} \sum_{v=1}^P \left| \left(\Delta T_v^{bx} - \Delta T_v^{poz} \right) \right|. \quad (3)$$

Різницю між вхідним і розрахованим магнітними аномаліями визначали у відсотках за формулою

$$E_{\%} = \frac{1}{P} \sum_{v=1}^P \left| \frac{\Delta T_v^{\text{вх}} - \Delta T_v^{\text{роз}}}{\Delta T_v^{\text{вх}}} \right| 100\%, \quad (4)$$

де $v=1, \dots, P$ — кількість вхідних ($\Delta T_i^{\text{вх}}$) і розрахованих ($\Delta T_i^{\text{роз}}$) аномальних значень магнітного поля.

Приклади підбору теоретичних моделей. Визначення роботи алгоритму розглянемо на теоретичних прикладах. Тришарова модель розрізу складалася з трьох тіл (рис. 4, а), що розташовані на різних глибинах. Перше тіло не торкається верхнього та нижньо-

го шарів вертикального розрізу, тобто знаходиться у проміжному положенні. Друге тіло починається з поверхні спостережень, але не доходить до підшови нижнього шару. Третій об'єкт розміщений внизу і не виходить на верхню лінію розрізу. Різномірне розташування тіл дає змогу виявити особливості роботи алгоритму інверсії для усіх шарів. Відомо, що зі збільшенням глибини залягання об'єктів точність їх знаходження зменшується. Тому було створено розрізи з кількістю шарів більш як три, а також збільшено на один шар конфігурацію попередньої моделі за збільшення товщини тіл і утворено чотири-

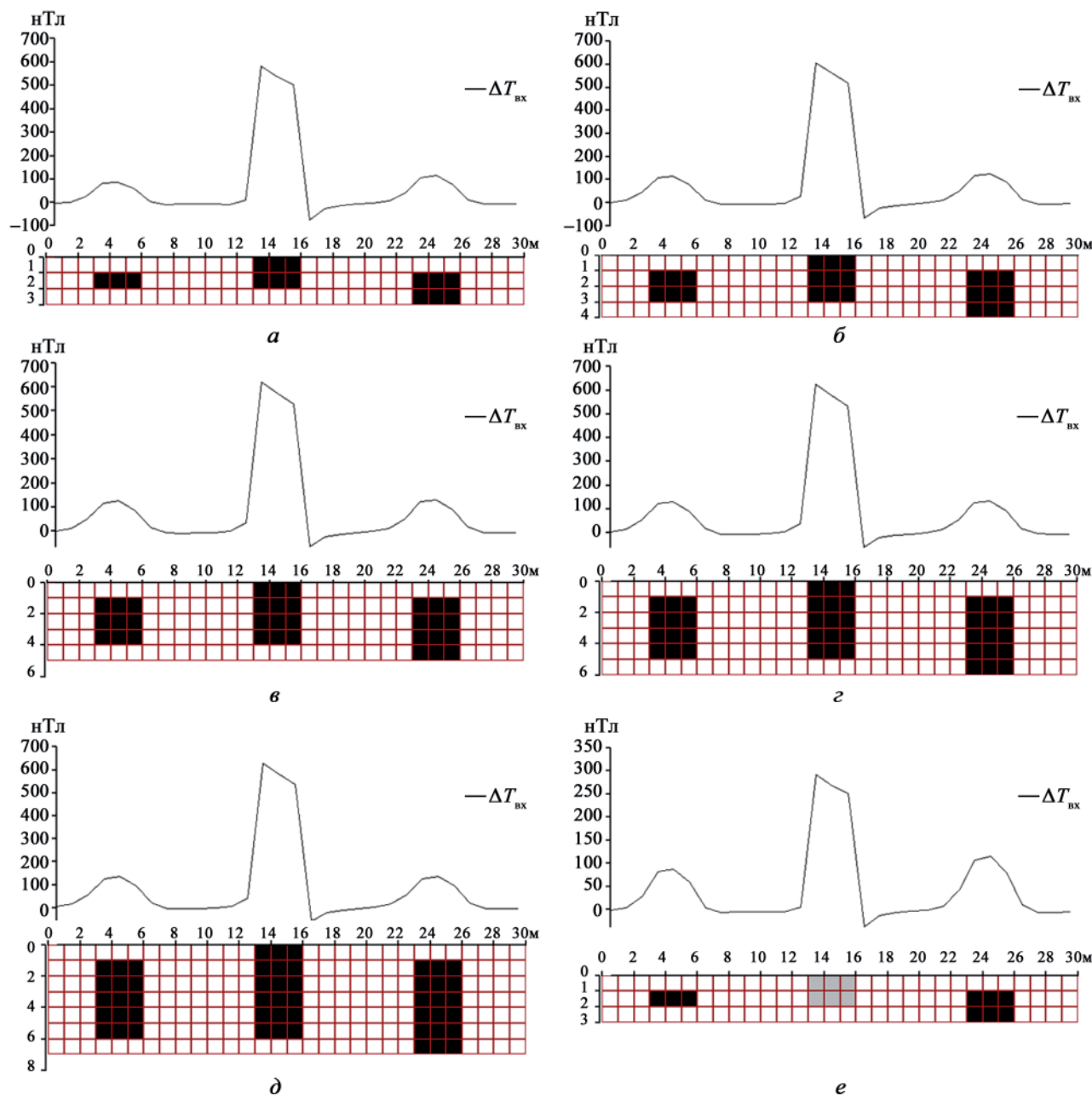


Рис. 4. Аномалії повного вектора магнітного поля ($I=70^\circ$, $D=0^\circ$) над вхідними моделями, що складаються з трьох тіл ($\Delta J=1$ А/м) для трьох (а), чотирьох (б), п'яти (в), шести (г), семи (д) шарів і двох надлишкових намагніченостей ($\Delta J=1$ і $0,5$ А/м) (е)

Fig. 4. Anomalies of the total magnetic field ($I=70^\circ$, $D=0^\circ$) over the input models, which consist of three bodies ($\Delta J=1$ А/м) for three (а), four (б), five (в), six (г), seven (д) layers of two apparent magnetizations ($\Delta J=1$ and $0,5$ А/м) (е)

шаровий розріз (рис. 4, б). За аналогією, сформовано модель з п'яти, шести та семи шарів (рис. 4, в—д). У зазначених моделях тіла мали однакову надлишкову намагніченість (ΔJ) — 1 А/м. Для визначення впливу тіл з різною намагніченістю на результат підбору ви-

користали тришарову модель, у якій центральне тіло мало надлишкову намагніченість 0,5 А/м, а крайні об'єкти — по 1 А/м (рис. 4, е).

Застосування запропонованого алгоритму підбору відомої намагніченості дало точний результат для

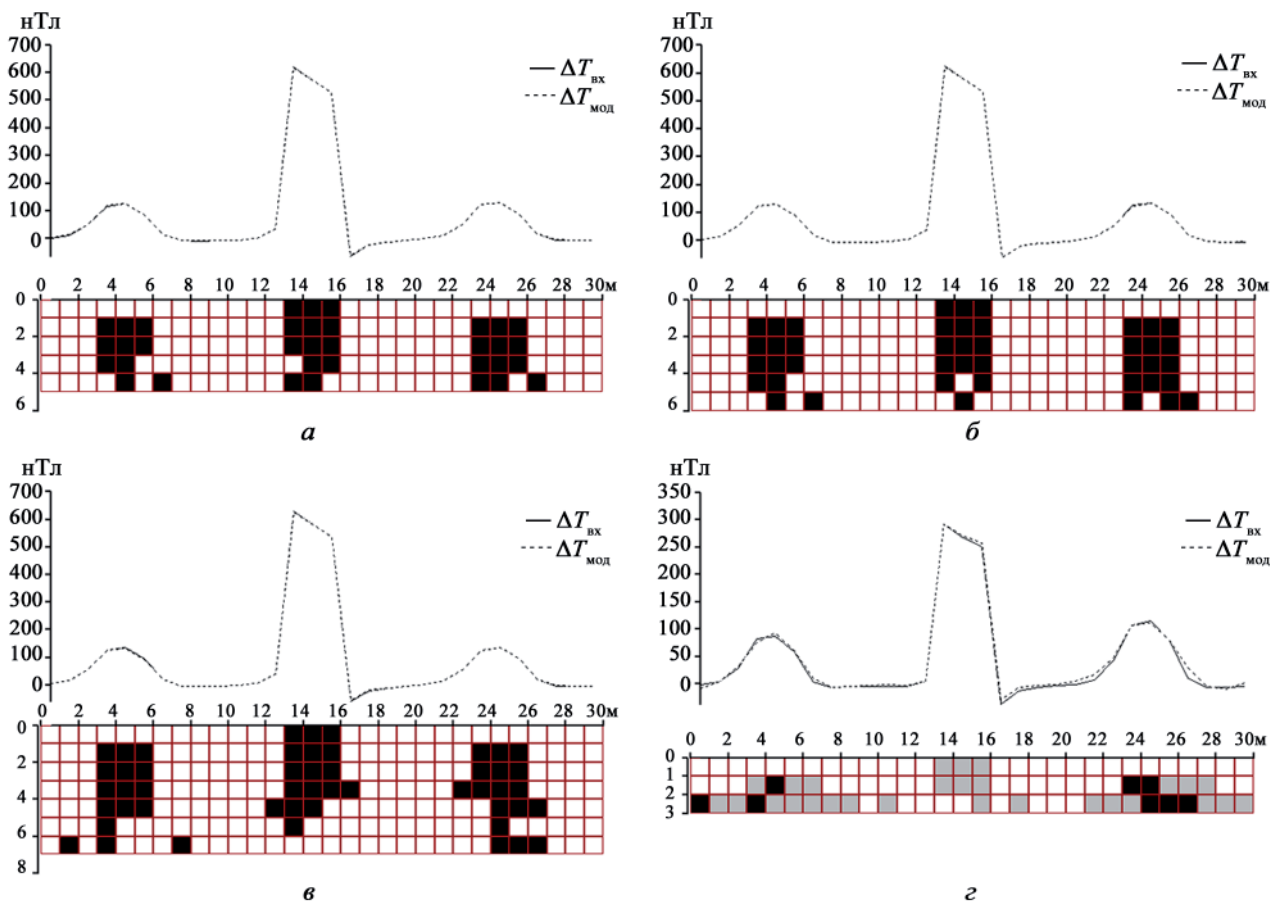


Рис. 5. Підбір магнітних джерел для п'яти (а), шести (б), семи шарів (в) і двох надлишкових значень намагніченості (0,5 та 1 А/м) (г)

Fig. 5. Fitting of magnetic sources for five (a), six (б), seven layers (в) and two apparent values of magnetization (0,5 i 1 A/m) (г)

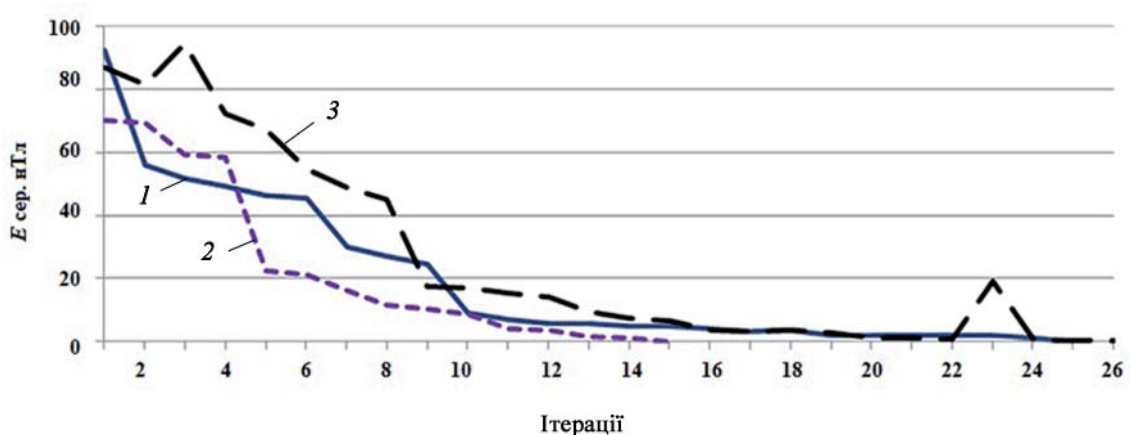


Рис. 6. Залежність середньої норми аномального магнітного поля від кількості ітерацій для розрізу з трьох (1), чотирьох (2) та п'яти (3) шарів

Fig. 6. Connection of the average norm of anomalous magnetic field from the number of iterations for a section from three (1), four (2) and five (3) layers

моделей з трьох і чотирьох шарів, тобто їх геометрія відповідає вхідній (рис. 4, а, б). Розріз з п'ятьма шарами було визначено не зовсім точно для четвертого

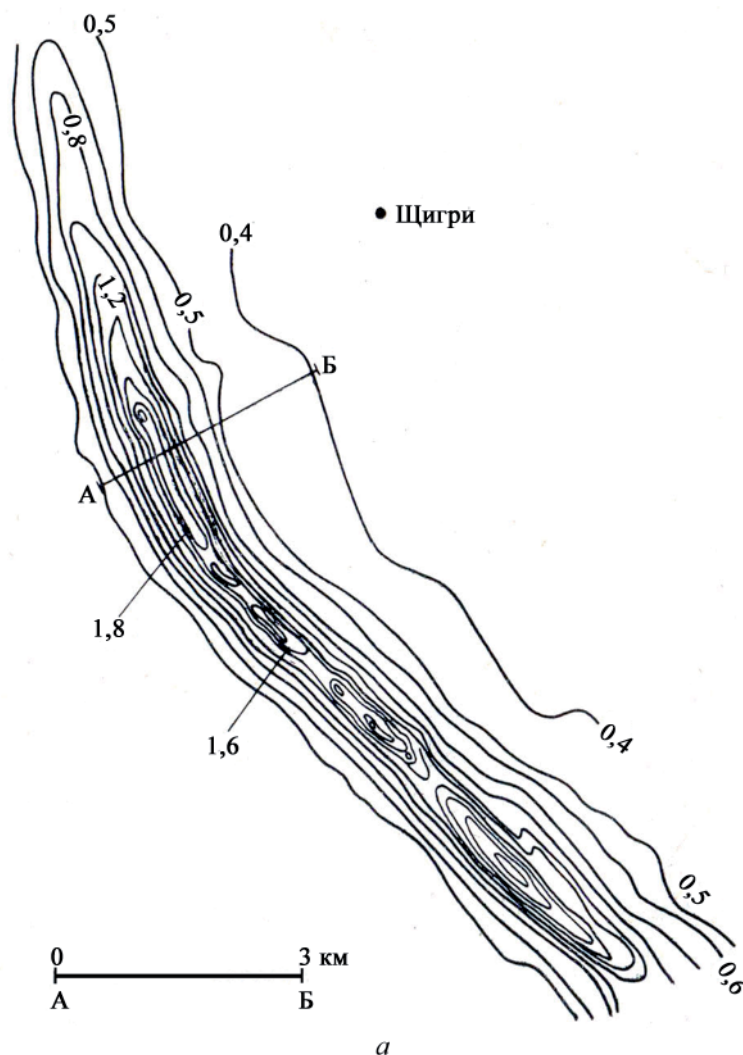
і п'ятого шарів (рис. 5, а). Модель з шести шарів (рис. 5, б) мала відмінності від вхідної для п'ятого і шостого шарів. Згідно з дослідженнями, за однієї

Таблиця 1. Результат підбору магнітних даних алгоритмом переміщення маси
Table 1. Result of the fitting of magnetic data by the mass displacement algorithm

Кількість шарів	Кількість ітерацій	Час, с	Похибка цільової функції ($E_{\text{сер}}$), нТл	Різниця вхідних і розрахованих полів ($E_{\%}$), %
3	25	21,621	0	0,000081345
4	15	22,104	0	0,0000783176
5	26	57,925	0,266667	3,92082

Таблиця 2. Дані інтерпретації Курської магнітної аномалії над залізистими кварцитами
Table 2. Data of the interpretation for the Kursk magnetic anomaly over iron quartzites

Метод визначення	Глибина, м	Горизонтальна ширина, м	Кут падіння, градуси	J , А/м
Графічні способи (середнє)	187	335	80	521
Метод порівняння	256	409	90	1086
Алгоритм підбору	200	300	80	400—2400
Дані буріння	167	266	57	



фіксованої надлишкової намагніченості можна виконувати точну магнітну інверсію для трьох тіл три- і чотиришарового розрізу.

Розріз із 7 шарів мав наближений вигляд (рис. 5, в). Відмінність від вхідних розташувань блоків стосується 4–7-го шарів. Зазначимо, що надлишкова намагніченість тіл для підбору була задана,

як 1 А/м. Якщо тіла мали дві різні вхідні надлишкові намагніченості, а саме 0,5 та 1 А/м, то результат інверсії вже був менш достовірний (рис. 5, г). У цьому випадку центральне тіло з меншою намагніченістю було визначено досить точно. Більше за об'ємом тіло, яке розташовано унизу праворуч, мало геометрію, далеку від реальної. Найменший

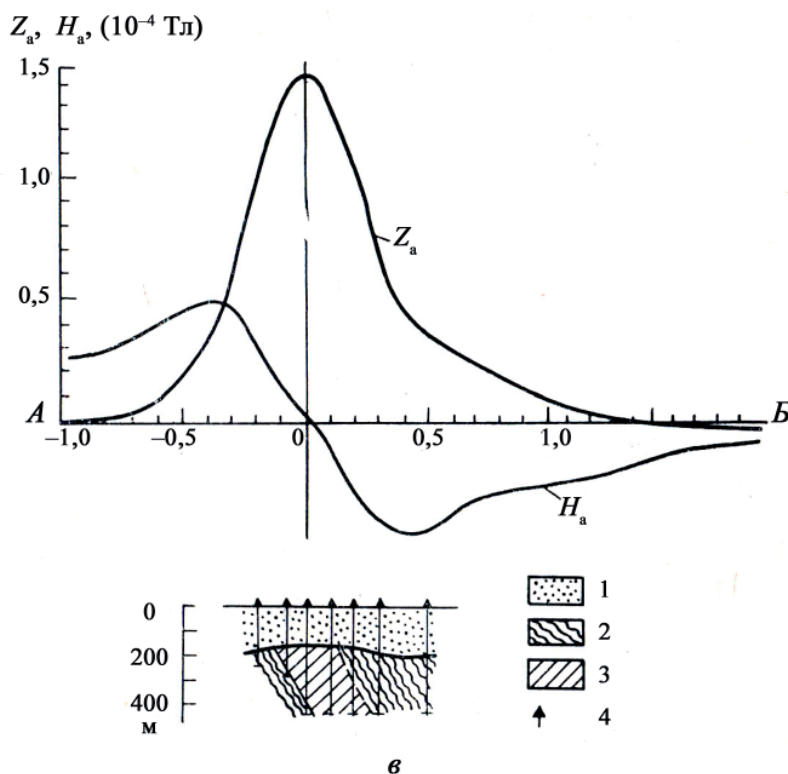
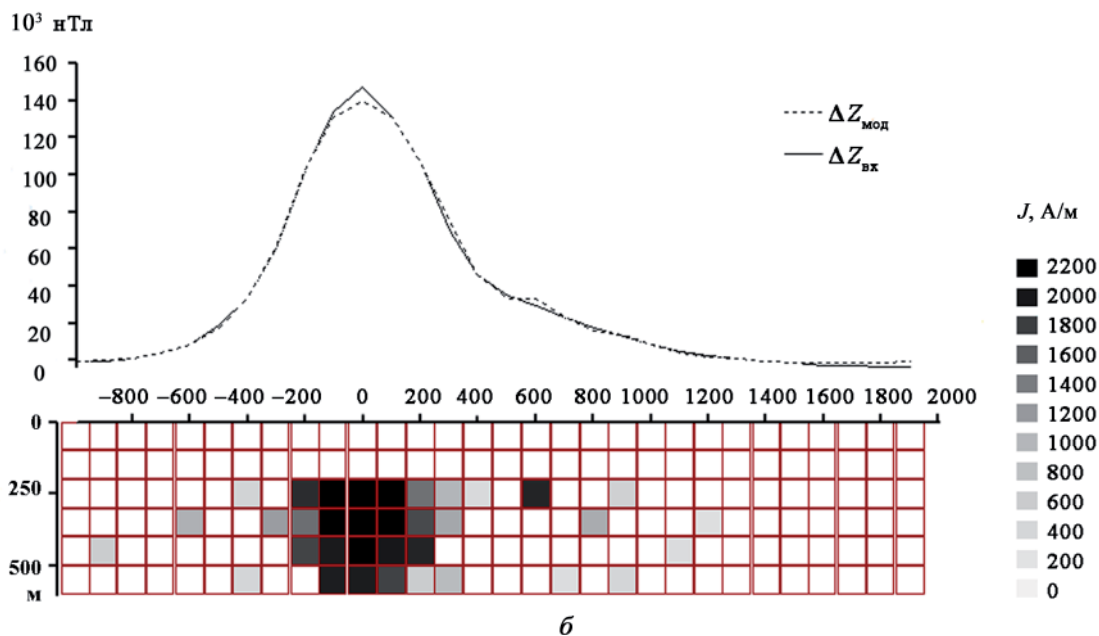


Рис. 7. Карта ($Z_a \cdot 10^{-4}$ Тл) Курської магнітної аномалії в районі м. Щигри (а), дані підбору (б) та геологічний розріз (в): 1 — пухкі піщано-вапнякові породи; 2 — метаморфізовані вапняки, сланці та гнейси; 3 — залізисті кварцити; 4 — свердловини

Fig. 7. Map ($Z_a \cdot 10^{-4}$ T) Kursk magnetic anomaly in the Shchygry region (a), data of fitting (b) and geological section (v): 1 — soft sand-limestone rocks; 2 — metamorphosed limestone, shale and gneiss; 3 — ferruginous quartzite; 4 — wells

об'єкт, який був розміщений на проміжній глибині й створював найменшу аномалію, менш точно визначено за формою та надлишковою намагніченістю. Таким чином, збільшення кількості значень намагніченості для окремих трьох тіл ускладнює отримання правильного результату підбору запропонованим алгоритмом.

Поведінка цільової функції ($E_{\text{сер}}$) при підбиранні аномальних даних повного вектора магнітного поля була плавною для моделей з трьох і чотирьох шарів, для яких отримано точну форму джерел (рис. 6). При ітераціях поведінка цільової функції для моделі з п'яти шарів має два різкі стрибки і наближену геометрію моделі відносно реальної.

Магнітні джерела запропонованим алгоритмом підбирали швидко і з малою кількістю ітерацій (табл. 1). Кожен шар складався із 30 квадратних блоків зі стороною 1 м. Визначення надлишкової намагніченості для 90, 120 та 150 блоків займало менше хвилини. Середній час підбору для розрізу з трьох, чотирьох і п'яти шарів становить 34 с. За точної інверсії, яка отримана для моделі з трьох і чотирьох шарів, похибка цільової функції дорівнювала нулю. Для п'ятишарового розрізу моделі було отримано наближений підбір з похибкою середньої норми 0,27 нТл.

Приклад ітерації Курської магнітної аномалії. Запропонований алгоритм було застосовано для інтерпретації профілю (А—Б) магнітної карти (Z_a) Курської аномалії (рис. 7, а) [18]. Це витягнута у північно-східному напрямку аномалія вертикальної складової повного вектора магнітної індукції, яку виявлено у Курській області (Росія) у XVIII ст. і детально вивчено у 1920-х роках. Під мезокайнозойською товщею пісковиків і вапняків, які залягають майже горизонтально, бурінням виявлено докембрійський кристалічний фундамент на глибині 100—300 м. Він представлений кристалічними вапняками, вапняково-слюдистими і біотитовими сланцями, а також гнейсами. Рудоносну товщу, що залягає серед цих порід, складають залізисті кварцити з прошарками інших порід. Падіння порід стрімке, майже вертикальне, простягання — північно-західне [18]. Великі значення намагніченості залізистих кварцитів створюють сильні магнітні аномалії до 150 000 нТл.

Аномальне поле майже не має від'ємних значень і може бути зумовлене плаstopодібним витягнутим тілом, яке стрімко поширюється на глибину. Геологічний розріз складається з пухких порід осадового чохла, які перекривають кристалічний фундамент. Залізисті кварцити пов'язані з докембрійським фундаментом. За складом вони належать до магнетитових і гематитових руд. Проста форма магнітної аномалії дала змогу виконати інтерпретацію методом порівняння для нахилених призматичних джерел [5], за яким глибина до підшови становить 2300 м.

Для методу переміщення мас розріз сформовано з шести шарів, розмір блоків в яких — 100×100 м, простягання — 10 км (рис. 7, б). За даними графічних способів інтерпретації середня надлишкова намагніченість дорівнює 521 А/м. На підставі цього було задано діапазон надлишкових намагніченостей від 400 до 800 А/м, який не дав достатнього збігу розрахованого поля із вхідним, особливо для максимальних значень аномалії. Кращу відповідність магнітних полів та його кореляцію з геологічними даними (рис. 7, в) отримано за широкого діапазону значень надлишкової намагніченості (400—2400 А/м), що відповідає різниці намагніченості залізистих кварцитів і метаморфізованих вапняків, сланців і гнейсів. Так, Т. Нагата [12] наводить значення 2530 А/м для намагніченості залізорудного поклада в районі шт. Арканзас (США). Загалом геометрія магнітного джерела, що отримана підбором переміщення мас, узгоджується з даними буріння.

За даними різних способів кількісного аналізу та буріння отримано вертикальний переріз і надлишкову намагніченість залізистих кварцитів Курської магнітної аномалії (табл. 2).

Висновки. Описано теорію алгоритму підбору магнітних джерел для двовимірного сіткового покриття розрізу. Підхід ґрунтується на перенесенні магнітних мас порід, який відбувався в природі за різний інтервал часу. Цей алгоритм дав змогу визначити геометрію трьох тіл на різних рівнях із фіксованою намагніченістю. Точні результати підбору отримано на теоретичних моделях для трьох і чотирьох шарів на підставі мінімізації аномалій магнітного поля за середньою нормою. Збільшення кількості шарів від п'яти до семи виявило відмінності між вхідними моделями з четвертого шару і донизу. Запропонований алгоритм застосовано для інтерпретації Курської магнітної аномалії над залізистими кварцитами. Підібрана магнітна модель загалом відповідає даним буріння. Перспективи розробки пов'язані зі збільшенням кількості шарів розрізу, зменшенням розмірів блоків і застосуванням підбору тривимірних даних.

Список бібліографічних посилань

1. Булах Е.Г., Корчагин И.Н. О подборе аномальных источников гравитационного поля методом последовательных приращений. *Доклады АН УССР. Сер. Б*, 1978. № 10. С. 1059—1062.
2. Булах Е.Г., Корчагин И.Н., Кутас Р.И., Цвященко В.А. Автоматизированный подбор гравитационных, магнитных и геотермических аномалий: алгоритмы и результаты решения модельных и практических задач. Киев: Ин-т геофизики АН УССР, 1988. 236 с. (Деп. в ВИНТИ 21.11.88. № 8217-В88).
3. Гришук П.І. Аналіз сучасних методологічних і теоретичних підходів до розв'язання задачі комплексної інтерпретації даних гравімагнітометрії. Теоретичні

- та прикладні аспекти геоінформатики. Київ, 2008. С. 88—98.
4. Гура К.А. Таблично-аналитическая интерпретация магнитных аномалий: учеб. пособие. Киев: УМК ВО, 1990. 147 с.
 5. Гура К.О., Гришук П.І. Інтерпретація магнітних аномалій у автоматизованому режимі: навч. посібник. Київ: ВЦ «Київ. університет», 2000. 155 с.
 6. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности. Абакан: ООО «Фирма-МАРТ», 2002. 188 с.
 7. Завойский В.Н., Неижсал Ю.С. Декомпозиционно-итерационный метод решения обратной задачи магнитоторазведки. *Геофизический журнал*. 1979. Т. 1, № 2. С. 46—52.
 8. Кобрунов А.И. Эволюционно-динамические принципы при реконструкции плотностных моделей седиментационных бассейнов. *Геофизический журн*. 2004. Т. 26, № 4. С. 45—54.
 9. Кошелев И.Н. Гравитационная и магнитная разведка. Практикум. Киев: Вища школа, 1984. 240 с.
 10. Логачев А.А., Захаров В.П. Магнитоторазведка. Ленинград: Недра, 1979. 351 с.
 11. Миненко П.А. Особенности решения обратной линейно-нелинейной задачи гравиметрии. *Геоінформатика*. 2005. № 4. С. 31—35.
 12. Нагата Т. Магнетизм горных пород. Москва: Мир, 1965. 347 с.
 13. Непомнящих А.А. Об условиях однозначности решения обратной задачи геофизики. Геология, горное дело, металлургия. Москва: Металлургиздат, 1956. Вып. 13. С. 136—151.
 14. Овчаренко А.В. Подбор сечения двумерного тела по гравитационному полю. *Вопросы нефтяной и рудной геофизики*. 1975. Вып. 2. С. 71—75.
 15. Петровский А.П., Федченко Т.А., Суятинов В.Н. Быстрый алгоритм решения прямой задачи гравиметрии. *Геофизический журнал*. 2007. Т. 29, № 2. С. 141—145.
 16. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. Киев: Наук. думка, 1978. 228 с.
 17. Страхов В.Н., Лапина М.И. Монтажный метод решения обратной задачи гравиметрии. Доклады АН УССР. 1976. Вып. 227, № 2. С. 344—347.
 18. Тафеев Г.П., Соколов К.В. Геологическая интерпретация магнитных аномалий. Ленинград: Недра, 1981. 327 с.
 19. Юньков А.А., Булах Є.Г. Про точність визначення щільності аномальних мас методом сіток. *Доповіди АН УССР*. 1958. № 11. С. 1234—1237.
 20. Bhattacharyya B.K. A generalized multibody model for inversion of magnetic anomalies. *Geophysics*. 1980. Vol. 45. 255—270.
 21. Coggon J.H. Magnetic and gravity anomalies of polyhedra. *Geoexploration*. 1975. Vol. 14. P. 93—105.
 22. Coles R.L. A flexible iterative magnetic anomaly interpretation technique using multiple rectangular prisms. *Geoexploration*. 1975. Vol. 14. P. 125—141.
 23. Gerard A., Debeglia N. Automatic three-dimensional modeling for the interpretation of gravity or magnetic anomalies. *Geophysics*. 1975. Vol. 40. P. 1014—1034.
 24. Hjelt S.-E. Magnetostatic anomalies of dipping prisms. *Geoexploration*. 1972. Vol. 10. P. 239—254.
 25. Li S.-L., Li Y. Inversion of magnetic anomaly on rugged observation surface in the presence of strong remanent magnetization. *Geophysics*. 2014. Vol. 79. P. J11—J19.
 26. Li Y., Oldenburg W. 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*. 1996. Vol. 61. P. 394—408.
 27. Melo F.F., Barbosa V.C.F., Uieda L., Oliveira V.O., Silva J.B.C. Estimating the nature and the horizontal and vertical positions of 3D magnetic sources using Euler deconvolution. *Geophysics*. 2013. Vol. 78. P. J87—J98.
 28. Plouff D. Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain correction. *Geophysics*. 1976. Vol. 41. P. 727—741.
 29. Portniaguine O., Zhdanov M.S. 3-D magnetic inversion with data compression and image focusing. *Geophysics*. 2002. Vol. 67. P. 1532—1541.

Надійшла до редакції 15.10.2018 р.

ОРИГИНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПОДБОРА МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ИСТОЧНИКОВ

П.И. Гришук

Международный хаб природных ресурсов, ул. Дубровицкая, 28, г. Киев, 04114, Украина, 044-428-20-70,
e-mail: pgryshchuk@gmail.com

Рассмотрен оригинальный алгоритм подбора магнитных источников. В основе подхода лежит принцип перемещения масс, что приводит к формированию геологических образований. Для двумерной сеточной модели перемещение намагниченности в блоках выполняется в четырех направлениях: влево, вправо, вверх и вниз. В исключительных случаях намагниченность может перемещаться на значительное расстояние, например, вследствие течения лавы. Значение избыточной намагниченности и направление движения блоков определялись случайным образом. Теоретическая модель состояла из трех прямоугольных тел. Рассмотрены разрезы с количеством шаров от трех до семи. Модели подбирались при условии, что значения и направ-

ление намагниченности известны. Каждый блок имел форму куба со стороной 1 м. Сравнение исходных и рассчитанных аномалий полного вектора магнитного поля выполнялось с помощью средней нормы и погрешности в процентах. Геометрия тел с одинаковой намагниченностью (1 А/м) определена точно для трех и четырех слоев, а для пяти, шести и семи — с расхождениями на большей глубине. Модель с двумя значениями намагниченности (1,0 и 0,5 А/м) имела существенные погрешности при определении геометрии тел. Отсутствие скачков на графике целевой функции гарантировало определение точной модели. С помощью нового алгоритма, основанного на перемещении массы между блоками, подбор магнитной модели осуществляется достаточно быстро. Основными факторами, которые влияют на точность геометрии, являются данные о намагниченности тел и количество слоев. Созданный подход позволяет выполнять оценку разреза по сеточному распределению избыточной намагниченности. Разработка применена для двумерной интерпретации Курской магнитной аномалии. Глубина залегания, наклон и горизонтальная толщина железистых кварцитов, которые определены методом перемещения магнитных масс, согласуются с данными бурения.

Ключевые слова: подбор модели, количество слоев модели, намагниченность, алгоритм перемещения магнитной массы, отклонение в процентах, точность подбора, Курская магнитная аномалия.

ORIGINAL FITTING ALGORITHM OF MAGNETIC ANOMALIES USING GRID COVERING SOURCES

P.I. Gryshchuk

*International Hub of Natural resources, 28, Dubrovyska, Str., Kyiv, 04114, Ukraine,
e-mail: pgryshchuk@gmail.com*

Purpose. An original algorithm for the selection of magnetic sources is considered. In the base of the approach lies the principle of mass movement, which leads to the formation of geological objects.

Design/methodology/approach. For a two-dimensional grid model, the movement of magnetization in blocks is performed in four directions: left, right, up and down. In exceptional cases, the magnetization can move at a considerable distance, for example, due to the flow of lava. The magnitude of the apparent magnetization and the direction of motion of the blocks were determined in a random manner. The theoretical model consisted from three rectangular bodies. Vertical sections from three to seven layers were considered. The selection of the model was carried out provided that the magnitude and direction of the magnetization are known. Each block had the form of a cube with side 1 m. Comparison of initial and calculated anomalies of the total magnetic field was performed using the average norm and error in percent.

Findings. The geometry of the body with homogenous magnetization (1 А/м) was determined exactly for three and four layers, and for five, six and seven with differences at a greater depth. A model with two values of magnetization (1.0 and 0.5 А/м) had significant errors in determining the geometry of the bodies. The absence of leaps in the curve of the objective function guaranteed the definition of the exact model.

The practical significance and conclusions. The development is used for two-dimensional interpretation of the Kursk magnetic anomaly. Depth, inclination and horizontal thickness for ferruginous quartzite are consistent with the data of drilling. The new algorithm, which is based on displacement of magnetic masses between the blocks, performs the fitting of the magnetic model quite quickly. The main factors influencing the accuracy of fitting are the data of magnetization and number of layers. The developed approach allows to define the distribution of apparent magnetization in vertical section.

Keywords: model fitting, number of model layers, magnetization, algorithm of magnetic mass movement, deviation in percent, accuracy of the fitting, Kursk magnetic anomaly.

References

1. Bulakh E.G., Korchagin I.N. About the fitting of anomalous sources of gravitational field by the method of sequential increments. *Doklady AN USSR. Ser. B.* 1978. N 10. P. 1059—1062 [in Russian].
2. Bulakh E.G., Korchagin I.N., Kutas R.I., Tsvashchenko V.A. Automated fitting of gravitational, magnetic and geothermal anomalies: algorithms and results of solving model and practical problems. — Kiev: Institute Geophysics Academy of Sciences of Ukraine, 1988. 236 p. (Dep. in VINITI on 11/21/88. N 8217-B88) [in Russian].
3. Gryshchuk P.I. Analysis of modern methodological and theoretical approaches for the solution of problem for complex interpretation of gravity and magnetic data. Theoretical and applied aspects of geoinformatics. Kyiv, 2008. P. 88—98 [in Ukrainian].
4. Gura K.A. Table-analytical interpretation of magnetic anomalies: Tutorial. Kiev: UMK VO, 1990. 147 p. [in Russian].
5. Gura K.O., Gryshchuk P.I. Interpretation of magnetic anomalies in automated mode: Tutorial. Kyiv: VC «Kyivskyi University», 2000. 155 p. [in Ukrainian].
6. Dolgal A.S. Computer technology data processing and interpretation of gravity and magnetic surveys in the highlands. Abakan: Firma Mart, 2002. 188 p. [in Russian].

7. Zavoyskiy V.N., Neizhsal Yu.E. Decomposition and iterative method for solving the inverse problem of magnetic prospecting. *Geofizicheskii zhurnal*. 1979. Vol. 1, N 2. P. 46—52 [in Russian].
8. Kobrunov A.I. Evolutionary dynamic principles in the reconstruction of density models for sedimentary basins. *Geofizicheskii zhurnal*, 2004. Vol. 26, N 4. P. 45—54 [in Russian].
9. Koshelev I.N. Gravitational and magnetic exploration. Practical work. Kiev: Vyshcha shkola, 1984. 240 p. [in Russian].
10. Logachev A.A., Zakharov V.P. Magnetism. Leningrad: Nedra, 1979. 351 p. [in Russian].
11. Minenko P.A. Features of the solution of the inverse linear-nonlinear gravimetry problem. *Geoinformatika*. 2005. Vol. 4. P. 31—35 [in Russian].
12. Nagata T. Rock magnetism. Moscow: Mir, 1965. 347 p. [in Russian].
13. Nepomnyashchikh A.A. About conditions for the uniqueness of the solution of the inverse problem of geophysics. Geology, Mining, Metallurgy. Moscow: Metallurgizdat, 1956. P. 136—151 [in Russian].
14. Ovcharenko A.V. Selection of section of two dimensional body on the gravitational field. *Questions of oil and ore geophysics*. Alma-Ata, 1975. Vol. 2. P. 71—75 [in Russian].
15. Petrovskiy A.P., Fedchenko T.A., Suyatinov V.N. Fast algorithm for solving direct problem of gravimetry. *Geofizicheskii zhurnal*. 2007. Vol. 29, N 2. P. 141—145 [in Russian].
16. Starostenko V.I. Stable numerical methods in problems of gravimetry. Kiev: Naukova dumka, 1978. 228 p. [in Russian].
17. Strakhov V.N., Lapina M.I. Mounting method for solving the inverse problem of gravimetry. *Doklady AN USSR*. 1976. Vol. 227, N 2. P. 344—347 [in Russian].
18. Tafeyev G.P., Sokolov K.V. Geological interpretation of magnetic anomalies. Leningrad: Nedra, 1981. 327 p. [in Russian].
19. Yunkov A.A., Bulakh E.G. About the accuracy of determining the density of anomalous masses by grid method. *Reports of the Ukrainian Academy of Sciences*. 1958. N 11. P. 1234—1237 [in Ukrainian].
20. Bhattacharyya B.K. A generalized multibody model for inversion of magnetic anomalies. *Geophysics*. 1980. Vol. 45. P. 255—270.
21. Coggon J.H. Magnetic and gravity anomalies of polyhedra. *Geoexploration*. 1975. Vol. 14. P. 93—105.
22. Coles R.L. A flexible iterative magnetic anomaly interpretation technique using multiple rectangular prisms. *Geoexploration*. 1975. Vol. 14. P. 125—141.
23. Gerard A., Debeglia N. Automatic three-dimensional modeling for the interpretation of gravity or magnetic anomalies. *Geophysics*. 1975. Vol. 40. P. 1014—1034.
24. Hjelt S.-E. Magnetostatic anomalies of dipping prisms. *Geoexploration*. 1972. Vol. 10. P. 239—254.
25. Li S.-L., Li Y. Inversion of magnetic anomaly on rugged observation surface in the presence of strong remanent magnetization. *Geophysics*. 2014. Vol. 79. P. J11—J19.
26. Li Y., Oldenburg W. 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*. 1996. Vol. 61. P. 394—408.
27. Melo F.F., Barbosa V.C.F., Uieda L., Oliveira V.O., Silva J.B.C. Estimating the nature and the horizontal and vertical positions of 3D magnetic sources using Euler deconvolution. *Geophysics*. 2013. Vol. 78. P. J87—J98.
28. Plouff D. Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain correction. *Geophysics*. 1976. Vol. 41. P. 727—741.
29. Portniaguine O., Zhdanov M.S. 3-D magnetic inversion with data compression and image focusing. *Geophysics*. 2002. Vol. 67. P. 1532—1541.

Received 15/10/2018