

УДК 550.831

П.О. Міненко¹, Р.В. Міненко¹, Ю.П. Мечніков²

¹ДВНЗ "Криворізький національний університет",
просп. Гагаріна, 54, Кривий Ріг 50086, Україна,
e-mail: maestozo.1_pavel@mail.ru

²Криворізьська геофізична партія, вул. Геологічна, 2,
Кривий Ріг 50001, Україна

СТІЙКІ РОЗВ'ЯЗКИ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ ГРАВІМАГНІТОМЕТРІЇ НА ЩИТАХ

Наведено результати розв'язків обернених задач з різним співвідношенням площі карти поля і площі інтерпретаційної моделі. Встановлено, що за рівності цих площ отримують найвищу стійкість розв'язків. При цьому поле відновлюється майже повністю з дуже малим середньоквадратичним відхиленням і дуже малими його залишками в кожній точці після розв'язку оберненої задачі. За будь-якого перевищення цього відношення, а особливо вдвічі і більше разів, результати розв'язків обернених задач спотворюються, з'являються на великій площі аномалії одного знака, які не можна пояснити розподілом поля. Незважаючи на відомі труднощі, отримано деякі кількісні та просторові підтвердження результатів інтерпретації магнітного поля геологічними даними після буріння свердловин на геологічному профілі, що перетинає структуру залізородного родовища. Виділено зони високої намагніченості залістистих порід, які за даними буріння відповідають пластам з найбільшим вмістом магнетитового заліза. В цілому, місцезположення структури і зміна намагніченості в ній встановлюються досить надійно, ізолінії намагнічування простежуються на доволі великих площах. Установлено межі зони окиснення залістистих порід, яка майже точно збігається з межею, яку виділено за геологічними даними. Недотримання вказаного співвідношення площ карти поля та інтерпретаційної моделі призводить до нестійкого розв'язку оберненої задачі з порушенням реального розподілу намагніченості на картах шарів і вертикальних розрізах намагніченості гірських порід.

Ключові слова: гравіметрія, магнітометрія, обернена задача, ітераційний метод, ітераційна поправка.

Вступ. Розв'язки обернених лінійних задач гравіметрії (ОЛЗГ) та магнітометрії (ОЛЗМ), з одного боку є необхідною складовою успішних пошуків будь-яких родовищ корисних копалин, з іншого – вони некоректні, зокрема, через те, що прямими або ітераційними методами з різними ітераційними формулами та критеріями оптимізації, з різними початковими умовами чи з різними інтерпретаційними моделями інтерпретатори отримують різні значення відповідних елементів у розв'язках. Під час перевірки стійкості розв'язків часто виявляють невідповідність: за ма-

лих похибок поля в деяких точках отримують великі зміни густини порід у блоках, розташованих під цими точками [1]. Тому над розв'язанням цієї проблеми продовжують працювати багато вчених і практиків. При цьому успішні приклади засвідчують, що її можна розв'язати у загальному і конкретному випадках [2–4]. Негативні розв'язки, навпаки, вказують на те, що проблема є досить складною і до її повного розв'язання ще дуже далеко.

Вагомі успіхи були досягнуті після вирішення таких питань.

1. Академік В.М. Страхов виставив умову: стійкий та геологічно змістовний розв'язок ОЛЗГ може бути отриманий тільки методами умовної оптимізації [6]. Для розв'язку ОЛЗГ він розробив ітераційний метод найменших квадратів нев'язок поля [6].
2. У статті [5] було опубліковано ітераційну поправку (ІП) для розв'язків СЛАР.
3. П.О. Міненко довів теорему: для стійкого розв'язку обернених задач (ОЗ) необхідною умовою є рівність площ карти поля та проекції інтерпретаційної моделі на карту поля [1].

Ця теорема якраз і задовольняє вимогу В.М. Страхова. П.О. Міненко використав її для розв'язку ОЗ ітераційним методом найменших квадратів Страхова для нев'язок поля і розробив фільтраційний ітераційний метод простої ітерації з поправкою [5], оптимізувавши мінімум суми квадратів ітераційних поправок до густини гірських порід. У результаті П.О. Міненко розробив оптимізований ітераційний метод гарантованого стійкого розв'язку ОЗ для багатошарової інтерпретаційної моделі, у якій кожен горизонтальний шар щільно упакований блоками, що мають форму прямокутного паралелепіпеда та різну й невідому густину [1, 2].

Мета роботи – порівняти розв'язки ОЛЗМ з урахуванням теореми Міненка з розв'язками без її врахування і встановити, наскільки точно при цьому відновлюється вимірюване магнітне поле.

Методика та викладення основного матеріалу. Виконаємо розв'язки ОЛЗМ для магнітного поля, спостереженого на дільниці Петровського залізорудного родовища у Кіровоградській області в межах Українського щита (рис. 1). Результати розв'язку ОЗ для випадку, коли інтерпретаційна модель складається із блоків розмірами 145×116 м у горизонтальній площині, а її загальна площа за теоремою Міненка дорівнює площі карти магнітного поля, представлені картою інтенсивності намагнічування (ІН) другого шару (рис. 2), яка відповідає карті магнітного поля: їх ізолінії

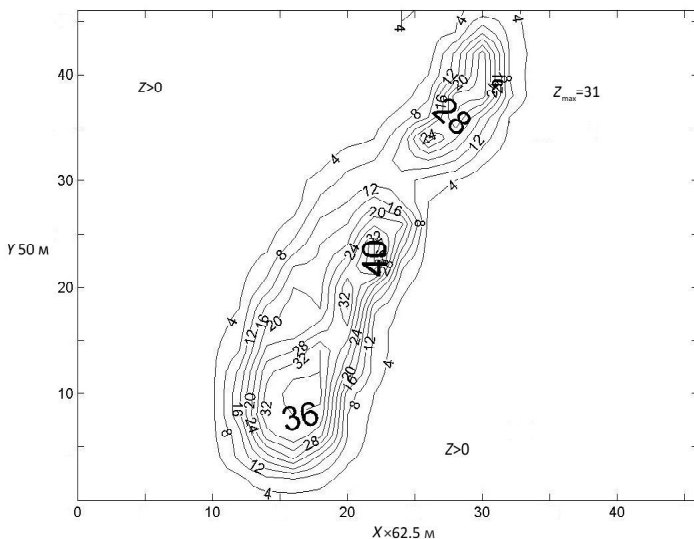


Рис. 1. Карта магнітного поля залізорудного родовища Петрівське (ізолінії – в тис. нТл; відстань між пікетами по осі X – 62,5 м, по осі Y – 50 м)

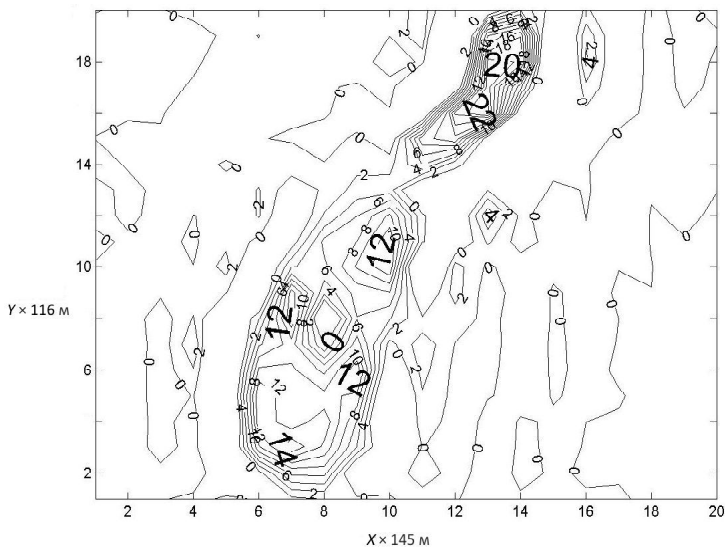


Рис. 2. Результати розв'язку ОЛЗМ за магнітним полем Петрівського родовища: ІН 2-го шару в межах глибин $H = 130\text{--}220$ м (розміри блоків по осі X – 145 м, по осі Y – 116 м; тут і далі в 1 од. ІН – 8 мА/м)

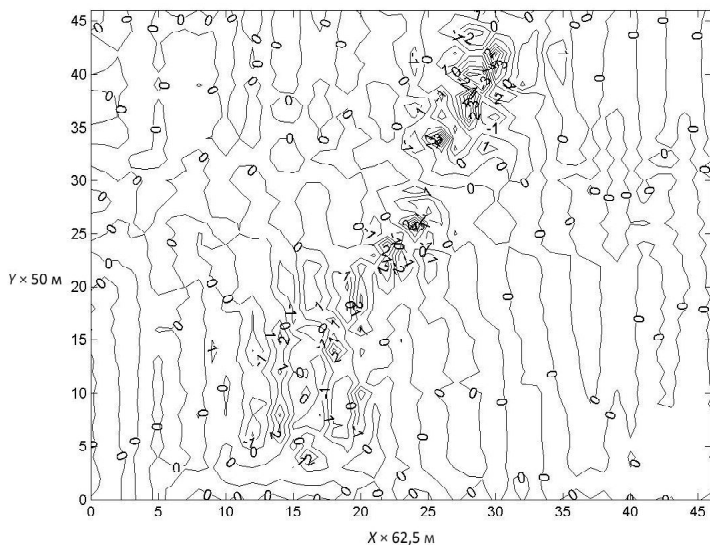


Рис. 3. Свійкий розв'язок ОЛЗМ ітераційним методом з ІП [5] та з урахуванням теореми Міненка: карта залишків магнітного поля після розв'язку ОЗ (тут і далі ізолінії – в тис. нТл)

майже повторюють форму одна одної, а екстремуми майже збігаються. Крім того, на карті залишків магнітного поля (рис. 3) отримано повністю відновлене поле за межами аномальних тіл, а великі нев'язки поля в точках над аномальним тілом виникли тільки через те, що намагніченість порід, які потрапили у блоки, змінюється в межах одного блока декілька разів і дуже нерівномірно. Як видно, залишкові аномалії дуже локальні і чергуються з такими самими аномаліями протилежного знака.

Тепер виконаємо розв'язок ОЗ для випадку, коли модель геологічної структури займає половину карти поля. В цьому разі блоки моделі мають розміри $72,5 \times 116$ м. Карта намагніченості другого шару (рис. 4, а) значно відрізняється від карти коректного розв'язку ОЗ (див. рис. 2). За межами аномального тіла отримали мінімуми ІН, які нічим не пояснюються. Карта залишків поля некоректного розв'язку ОЗ (рис. 4, б) значно відрізняється від карти залишків поля для коректного розв'язку ОЗ (див. рис. 3), особливо за межами аномальних тіл у нейтральному полі. Напрошується висновок, що поле за межами аномального тіла практично непотрібне для розв'язку оберненої задачі. Майже на всій карті нев'язок поля залишки створюють групи аномалій одного знака. Аномальна зона виділяється на фоні

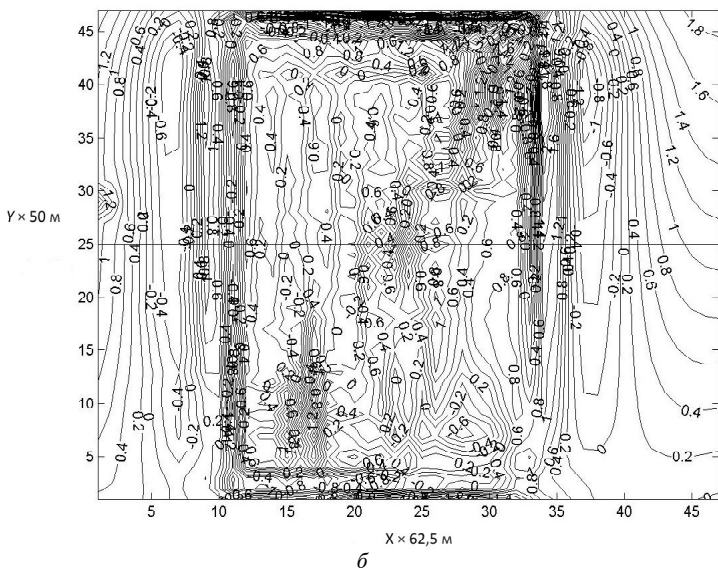
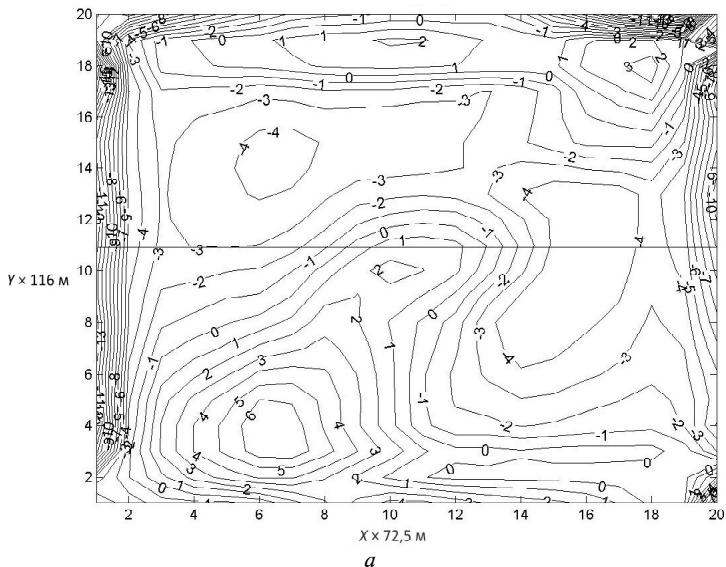


Рис. 4. Нестійкий розв'язок ОЛЗМ ітераційним методом з ІП [5] і без урахування теореми Міненка: а – карта ІН 2-го шару в межах глибин 160–240 м (розміри блоків 72,5×116 м); б – карта залишків магнітного поля

інших дещо збільшеними аномаліями. Однак за межами моделі залишки поля мають розподіл у вигляді аномалій різного знака. Це пов'язане з тим, що похибки поля не перетворюються в малі похибки намагніченості блоків, що лежать під цими точками. Замість цього похибки поля перераховують у великі додатки I_H до будь-якого блока.

Оскільки магнітні породи дуже неоднорідні, як за намагніченістю, так і за вмістом магнетитового заліза, порівнювати будь-які геологічні та геофізичні результати дуже важко. Утім у цілому структура комплексу магнітних порід виділяється на фоні вмісних порід. Крім того, в самій структурі виділяють блоки в середньому з високою намагніченістю, хоча за геологічними даними малопотужні пачки магнітних і немагнітних порід чергуються дуже часто. Оскільки вихід керна в таких умовах різний, то дані магнітного каротажу, опробування на зразках і визначені за результатами розв'язку ОЗ значно відрізняються.

Однак у разі фіксації контурів структури магнітні властивості залізистих порід у великих блоках все таки виділяються. На геологічному профілі (рис. 5) у верхній частині розрізу спостерігаємо зону окиснених

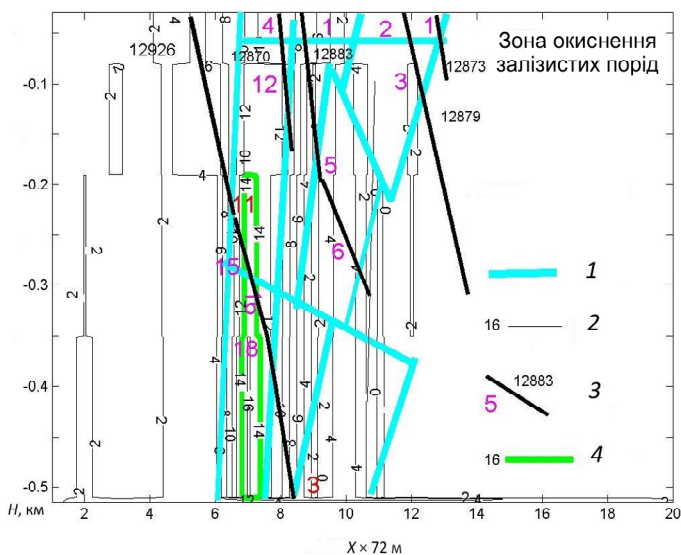


Рис. 5. Результати розв'язку ОЛЗМ: a – вертикальний розріз I_H по профілю 10-го ряду блоків моделі ($Y = 10$ од.×116 м, див. рис. 2), суміщеного з геологічним профілем 5–5, на якому виконано бурові роботи: 1 – геологічні межі залізистих порід; 2 – ізолнії I_H , од.×8 мА/м; 3 – свєдрдловина з I_H за керном по інтервалах; 4 – контур порід з $I_{H_{\max}}$

залістистих порід до глибини 65–80 м, а далі залягають залістисті породи, які мають пропластки з великим вмістом магнетитового заліза (30–45 %). У цьому розрізі свердловини перетинають залістисті породи на глибині 530 м, але в інших розрізах вони знаходяться і нижче 900 м. У південній частині родовища ($Y = 2-4$ од. $\times 116$ м) глибина залягання структури 300–500 м. Вміст магнетитового заліза значно більший у північній частині родовища, що підтверджено не тільки великими ІН у розв'язку ОЗ, а й опробуванням по ряду свердловин. На профілі 10 (рис. 5) виділяються зони високої та низької ІН порід.

Висновки. На практичних прикладах виконано порівняння методів розв'язку ОЗ для різних за горизонтальними розмірами інтерпретаційних моделей. В цілому можна стверджувати, що стійкі розв'язки обернених задач магнітометрії в умовах великого діапазону зміни намагніченості кристалічних порід дають змогу виділяти комплекси різних порід і вивчати структури аномальних тіл з метою вивчення родовищ корисних копалин. У перспективі треба дослідити характер розподілу нев'язок поля з глибиною до блоків під час обчислення поправок до ІН.

1. *Миненко П.А.* Теоретическое обоснование преобразования моделей решения некорректной линейной задачи гравиметрии в корректную с оптимизацией итерационного процесса на основе условно-экстремальных критериев / П.А. Миненко // Теория и практика геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий: Материалы 32-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского Перм. (29.01–01.02.2005). – Пермь, 2005. – С. 115–118.
2. *Миненко П.А.* Исследование кристаллического фундамента линейно-нелинейными методами магнитометрии и гравиметрии // Геоінформатика. – 2006. – № 4. – С. 41–45.
3. *Миненко П.А.* Упрощенные алгоритмы решения обратных задач гравиметрии фильтрационными методами / П.А. Миненко, Р.В. Миненко // Геоінформатика. – 2012. – № 2(42). – С. 27–29.
4. *Миненко П.О.* Обернені лінійні задачі гравіметрії та магнітометрії з уточнюючими ітераційними поправками вищого порядку // Вісн. КНУ. Геологія. – 2014. – № 1(64). – С. 78–82.
5. *Старостенко В.И.* Сейсмогравитационный метод: принципы, алгоритмы, результаты / В. И. Старостенко, В.Г. Козленко, А.С. Костюкевич // Вісн. АН УРСР. – 1986. – № 12. – С. 28–42.
6. *Страхов В.Н.* Об устойчивых методах решения линейных задач геофизики. 21. Основные алгоритмы / В.Н. Страхов // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1990. – № 8. – С. 37–64.

Устойчивые решения обратных задач гравимагнитометрии на шитах

П.А. Миненко¹, Р.В. Миненко¹, Ю.П. Мечников²

¹Криворожский национальный университет, просп. Гагарина, 54,
Кривой Рог 50086, Украина, e-mail: maestozo.1_pavel@mail.ru

²Криворожская геофизическая партия, ул. Геологическая, 2, Кривой Рог 50001,
Украина

Приведены результаты решений обратных задач с различным соотношением площади карты поля к площади интерпретационной модели. Установлено, что при равенстве этих площадей получают самую высокую устойчивость решений. При этом поле восстанавливается почти полностью с очень малым среднеквадратичным отклонением и при очень малых его остатках в каждой точке после решения обратной задачи. При любом превышении этого отношения, особенно в 2 раза и более, результаты решений обратных задач искажаются, на большой площади появляются аномалии одного знака, которые не находят объяснения распределением поля. Несмотря на известные трудности, получены некоторые количественные и пространственные подтверждения результатов интерпретации магнитного поля по геологическим данным после бурения скважин на геологическом профиле, пересекающем структуру железорудного месторождения. Выделены зоны высокой намагнитченности железистых пород, которые по данным бурения соответствуют пластам с наибольшим содержанием магнетита железа. В целом, местоположение структуры и колебания намагнитченности в ней устанавливаются достаточно надежно, изолинии намагнитчивания прослеживаются на достаточно больших площадях. Установлена граница зоны окисления железистых пород, которая почти точно совпадает с границей, выделенной по геологическим данным. Несоблюдение указанного соотношения площадей карты поля и интерпретационной модели приводит к неустойчивому решению обратной задачи с нарушением реального распределения намагнитченности на картах слоев и вертикальных разрезах намагнитченности горных пород.

Ключевые слова: гравиметрия, магнитометрия, обратная задача, итерационный метод, итерационная поправка.

Stable solutions of inverse problems of gravity-magnetometry on shields

P.O. Minenko¹, R.V. Minenko¹, Yu.P. Mechnikov²

¹Krivoy Rog's National University, 54 Gagarina Ave., Krivoy Rog 50086, Ukraine,
e-mail: maestozo.1_pavel@mail.ru

²Krivoy Rog's Geophysical Department, 2 Geological Str., Krivoy Rog 50001, Ukraine

The results of the solutions of inverse problems with different ratios of the area map of the field to the area of interpretation model. It was found that the equality of these areas have the highest stability of the solutions. The field is recovered almost completely with very small standard deviation and its very low balances at any point after the

solution of the inverse problem. For any excess of this ratio, especially in the two or more times, the inverse result distorted, appear on large area anomalies of one sign that can not be explained distribution of the field. Despite certain difficulties, to get some quantitative and spatial validation of the interpretation of the magnetic field geological data after drilling wells in geological sections, the structure of the iron ore deposit crosses. Dedicated area of high magnetization ferruginous rocks, which according to the drilling layers correspond with the highest iron content of magnetite. In general, the structure and location of the magnetization oscillations in it reliably established, contour magnetization traced over large areas. Set the border zone of oxidized ferruginous rocks, which coincides almost exactly with the border, dedicated to geological data. Failure to observe the ratio of the areas of the field maps and interpretation model leads to instability of the solutions of the inverse problem with the violation of the actual distribution of the magnetization in the layers of maps and vertical sections of the magnetization of rocks.

Keywords: gravimetry, magnetometry, inverse problem, iterative method, iterative correction.

Надійшла до редакції 11.06.2015 р.