

9. Лялько В. І., Попов М. О., Федоровський О. Д. та ін. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування. – Київ: Наук. думка, 2006. – 357 с.
10. FLUXNET Data Sets. – www.daac.ornt.gov.net – 2002.
11. Myneni R.B. et al. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests: Proc. Nat. Acad. Sci. [10.1073/pnas.261555198]. – 11 Dec., 2001. – New York, 2001. – 15 p.
12. Rahman A. F. et al. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow band indices from AVIRIS imagery. <http://vcsars.calstatela.cdu/boreas/avirisoo/modelling.2001>.
13. SPECTRA. Newslet. of the Carnegie Instit. of Washington. CO₂ Has a Day in Congr. – Spring, 2000. – Winter and Summer 2003. – News Release, 5 April, 2004. – [http // www. carnegieinstitution. org. globalecology](http://www.carnegieinstitution.org.globalecology).
14. Watson R. T., Noble I. R., Bolin B. et al. Land use change, and forestry. – Cambridge: Cambr. univ. press, 2000. – 377 p.
15. Schwartz P., Doving R. An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implication for United States National Security. – Oct., 2003. – Intern. site. – 22 p.

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшло до редакції 10.10.2006

УДК 550.831

© 2007

П. А. Миненко

Экстремальные итерационные методы решения обратной задачи магнитометрии при исследованиях на кристаллическом фундаменте

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Е. Г. Булахом)

Iterative methods of the solution of the inverse linear and nonlinear problems of magnetometry are developed. Extreme algorithms of the calculation of depths down to the horizontal division borders of blocks with the maximal difference of magnetic properties are used. By practical examples, the opportunities to determine the intensity of the magnetization of rocks are shown. The depths down to the top sides of approximating parallelepipeds of the physical model of a geological environment are calculated.

Для картирования магнитных и немагнитных горных пород кристаллического фундамента используются методы магнитометрии и гравиметрии [1–5].

Поскольку горные породы фундамента обладают небольшими разбросами плотности (до 10%), то в результате решения обратной задачи гравиметрии получают надежные средние значения плотности для каждого блока аппроксимирующей модели геологической среды [2, 3, 5]. В магнитометрии этот вопрос значительно сложнее. Интенсивность намагничивания в одних и тех же породах изменяется в десятки и сотни раз на небольших расстояниях. Поэтому в наблюдаемом магнитном поле Z_{aj} присутствуют очень интенсивные помехи, чаще всего, в виде одно- и двухточечных отрицательных и положительных аномалий, приводящие к неустойчивости решения обратной задачи. В связи с этим очень важно

установить, можно ли выделить в геологическом массиве блоки с относительно постоянными магнитными свойствами горных пород и для средних значений их магнитных параметров J_i решать обратную линейную задачу магнитометрии теми же методами, которые дают устойчивое решение обратной задачи гравиметрии [5–7], что невозможно проверить на теоретических примерах. Это можно сделать, решая обратную линейную задачу для измеренного в полевых условиях магнитного поля Z_{aj} .

Целью настоящей работы является разработка экстремальных итерационных методов устойчивого решения обратной задачи магнитометрии с разделением горных пород по магнитным свойствам и последующей коррекцией глубин H_i расположения верхних граней блоков.

Если в работах [3, 5] поставленная цель достигается использованием модели геологической среды, аппроксимированной блоками в виде прямоугольных параллелепипедов, то для магнитного поля выгоднее использовать контактную обратную задачу, так как в ней используются положительно определенные коэффициенты матрицы прямой задачи магнитометрии b_{ij} для полубесконечного вертикального бруса [1] и разности интенсивностей намагничивания $J_i = J_{2i} - J_{1i}$ нижнего и верхнего соприкасающихся блоков. Формула для вычисления магнитного поля от всех блоков ($i = \overline{1, M}$) в j -й точке карты ($j = \overline{1, N}$) имеет вид: $Z_{aj} = \sum_i b_{ij} J_i$. Воспользуемся итерационной формулой для магнитного параметра J_i в том виде, в котором она приведена в статьях [3, 5–7] для аномальной плотности горных пород: $J_{i,n+1} = J_{i,n} - \tau_{n+1} B_{i,n}$, где τ_{n+1} — оптимизирующий коэффициент экстремального итерационного процесса на $n+1$ -й итерации; $B_{i,n}$ — поправка к значению магнитного параметра, которая впервые введена в гравиметрию акад. НАН Украины В. И. Старостенко [3], в дальнейшем опробована в работах, описанных в статьях [5–7], а для магнитометрии она используется здесь в таком же виде, как и для гравиметрии:

$$B_{i,n} = \sum_j \frac{b_{ij,n} r_{j,n}}{\lambda_i \lambda_j}; \quad \lambda_i = \sum_j b_{ij,n}; \quad \lambda_j = \sum_i b_{ij,n};$$

$$r_{j,n} = (b_{ij,n} J_{i,n}) - Z_{aj}; \quad r_{j,n+1} = (b_{ij} J_{i,n+1}) - Z_{a,j},$$

где $r_{j,n}$ — невязка поля на n -й итерации.

Было установлено [5], что устойчивое решение обратной задачи, фильтрующее интенсивные помехи поля, можно получить, минимизируя по параметру τ_{n+1} критерий квадратичной нормы поправки:

$$F = \sum_i B_{i,n+1}^2 = \sum_i \left(\sum_j \frac{b_{ij} \left(\sum_{i_1} b_{ji_1} (J_{i_1} - \tau_{n+1} B_{i_1,n}) - Z_{aj} \right)}{\lambda_i \lambda_j} \right)^2 = \min.$$

Дифференцируя F по τ_{n+1} , приравнявая производную нулю и решая уравнение, получим итерационный параметр $\tau_{n+1} = (B_{i,n}, P_{i,n}) / (P_{i,n}, P_{i,n})$, где $P_{i,n} = (b_{ij} / \lambda_i \lambda_j, (b_{ji_1}, B_{i_1,n}))$.

На рис. 1 приведены результаты опробования предложенного метода при интерпретации магнитного поля, измеренного в 1116 точках по сети 50×100 м на участке 1 в Западном Кривбассе. При выборе параметров физической модели геологической среды, в соответствии с требованиями [6, 7], площадь карты магнитного поля и общая площадь проекции блоков на нее должны совпадать. Потому в каждом из двух слоев модели выбрано по 400

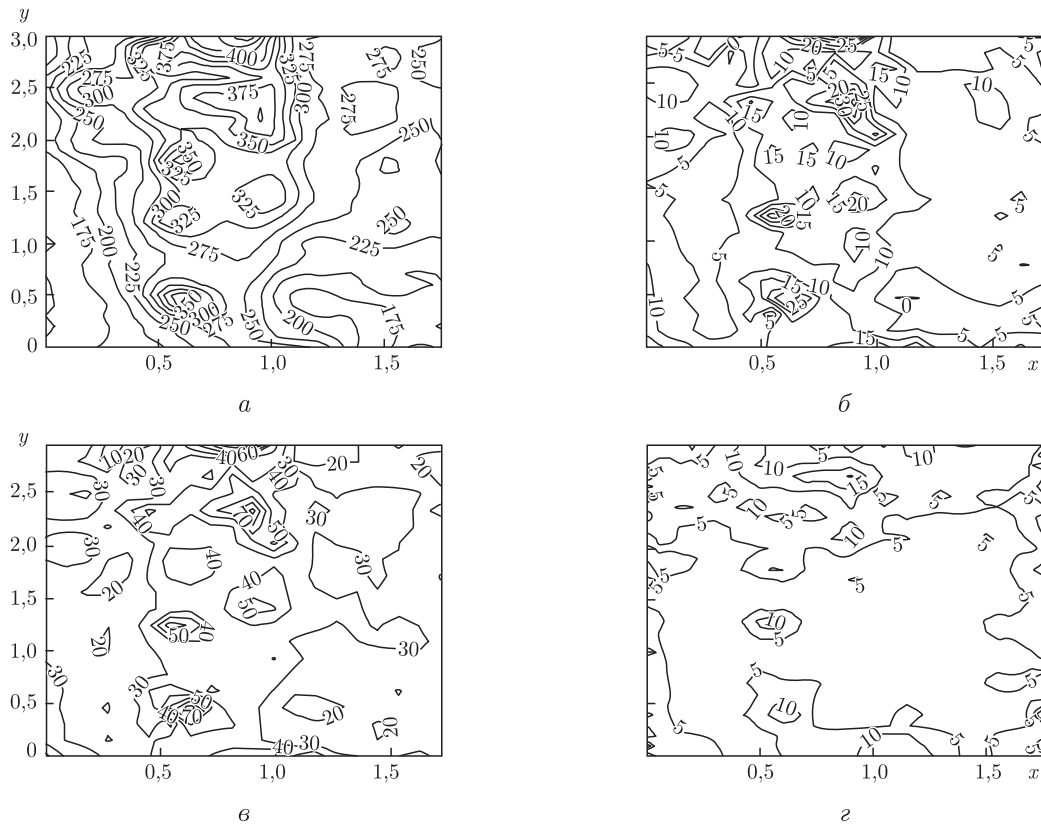


Рис. 1. Результаты решения обратной линейной задачи магнитометрии: *а*: Карта осредненного магнитного поля Z_a участка 1 (расстояние, тыс. м, изолинии, нТл). *б*: Карта интенсивности намагничения J_1 первого магнитного слоя блоков частично окисленных горных пород двухслойной физической модели геологической среды (изолинии, нТл). *в*: Карта интенсивности намагничения J_2 второго магнитного слоя блоков неокисленных горных пород. *г*: Карта положительных остатков магнитного поля (сечение изолиний 5 нТл)

прямоугольных параллелепипедов с горизонтальными размерами 90×150 м. Начальные глубины расположения верхних горизонтальных граней всех блоков для каждого слоя выбраны одинаковыми: $h_{0,1} = 30$ м и $h_{0,2} = 60$ м. Вертикальные блоки нижнего слоя полубесконечные. В модель включено еще пятнадцать больших блоков для автоматического учета регионального фона. Общее количество блоков в модели 815. Начальные значения магнитных свойств для всех блоков каждого слоя взяты одинаковыми (10 и 33 нТл). На рис. 1, *а* приведена карта осредненного магнитного поля участка 1, которое имеет сложное строение, а его интенсивность изменяется от 150 до 500 нТл. В результате решения обратной задачи получены разности магнитных параметров на контактах каждого слоя, а затем они пересчитаны в интенсивности намагничения. На рис. 1, *б*, *в* приведены карты вертикальных проекций векторов интенсивности намагничения горных пород блоков 1-го и 2-го магнитных слоев. На рис. 1, *г* приведена карта положительных остатков измеренного магнитного поля сечением 5 нТл. Остатки поля не превышают 20 нТл, что свидетельствует о высокой точности восстановления поля. После решения по приведенному выше для магнитных свойств алгоритму обратной линейной задачи решена нелинейная обратная задача магнитометрии с определением глубин до поверхностей магнитных слоев (рис. 2)

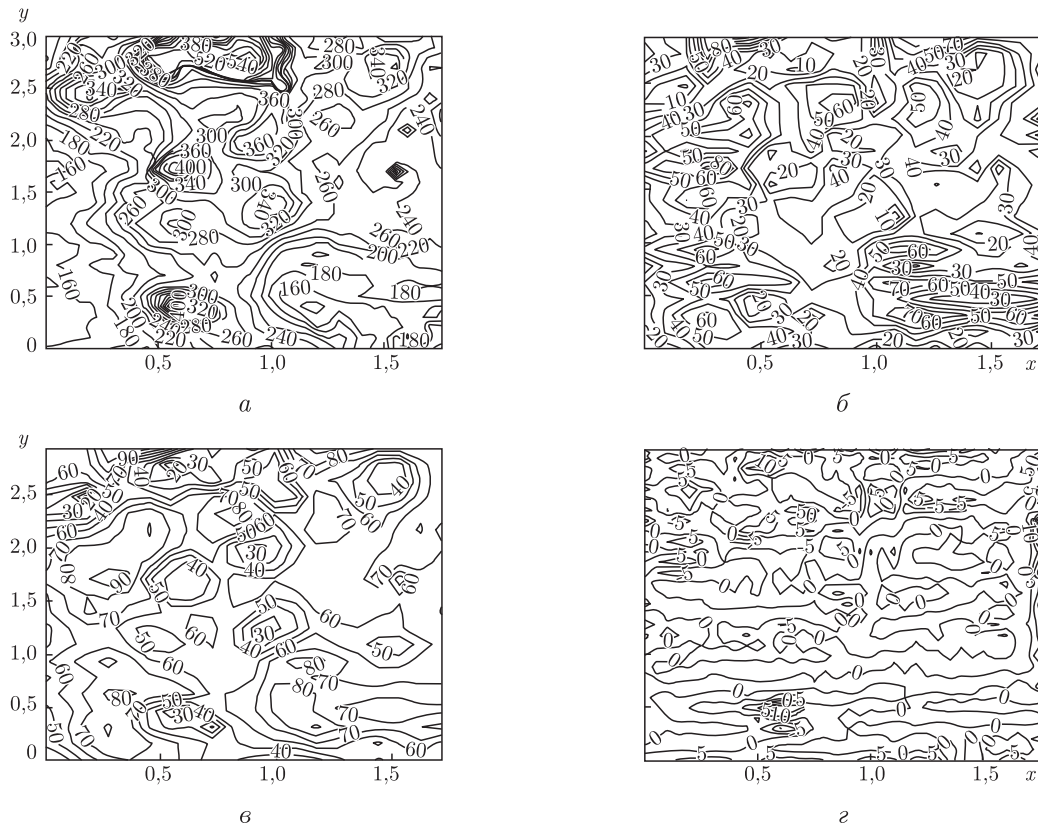


Рис. 2. Результаты решения обратной нелинейной задачи магнитометрии: *а*: Карта неосредненного магнитного поля Z_a участка 1 (обозначения те же). *б*: Карта глубин H_1 до верхней поверхности первого слоя (изолинии, м). *в*: Карта глубин H_2 до верхней поверхности второго слоя. *г*: Карта остатков магнитного поля (сечение изолиний 5 нТл)

по алгоритму, изложенному в статье [8] для гравиметрии. Это оправдано тем, что формулы прямой задачи магнитометрии для полубесконечного вертикального бруса совпадают с формулами прямой задачи гравиметрии для силы тяжести от вертикального конечного бруса и отличаются только пределами интегрирования. Согласно методике, приведенной в [8], решение линейной обратной задачи по физическому параметру необходимо несколько раз чередовать с выполнением нелинейной задачи по глубине. Поэтому на рис. 1 и 2 приведены окончательные результаты интерпретации: карты распределения переменной интенсивности намагничивания в двух слоях переменной мощности и глубины до их верхних поверхностей. Рис. 2, *а* иллюстрирует карта неосредненного магнитного поля того же участка, из которой получена карта рис. 1, *а*; рис. 2, *б*, *в* — карта глубин до верхних поверхностей 1-го и 2-го слоев, а рис. 2, *г* — остатки поля, представляющие собой разности в каждой точке между измеренным и вычисленным по результатам интерпретации магнитным полем. Эти разности почти во всех точках меньше точности съемки (10 нТл) и свидетельствуют об устойчивости полученного решения обратной задачи, а также о высокой степени восстановления магнитного поля используемыми экстремальными итерационными методами.

Таким образом, выполненными исследованиями установлено, что для магнитометрии возможно получение устойчивых решений обратной линейно-нелинейной задачи для слож-

ного магнитного поля с целью изучения геологического строения приповерхностной части кристаллического фундамента.

1. *Логачев А. А.* Магниторазведка. 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Недра, 1968. – 295 с.
2. *Математическое обеспечение автоматизированной системы интерпретации гравитационных аномалий* // Булах Е. Г., Маркова М. Н., Тимошенко В. И и др. – Киев: Наук. думка, 1984. – 112 с.
3. *Старостенко В. И., Козленко В. Г., Костюкевич А. С.* Сейсмогравитационный метод: принципы, алгоритмы, результаты // Вісн. АН УРСР. – 1986. – № 12. – С. 28–42.
4. *Страхов В. Н.* О решении линейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии // Докл. АН СССР. – 1991. – **310**, № 6. – С. 1348–1352.
5. *Миненко П. А.* Линейно-нелинейная обратная задача гравиметрии при поисках рудных месторождений в приповерхностной части Украинского кристаллического щита // Сб. науч. тр. Нац. гос. ун-та. – Днепропетровск, 2005. – № 23. – С. 136–143.
6. *Миненко П. А.* Проблемы и перспективы применения линейных методов интерпретации гравиметрических измерений в рудных районах // Сб. науч. тр. Всеукр. асоц. геоінформатики “Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики”. – Киев, 2006. – С. 244–256.
7. *Миненко П. А.* Состояние и перспективы применения линейных методов интерпретации гравиметрических измерений в рудных районах // Сб. науч. тр. Нац. гос. ун-та. – Днепропетровск, 2006. – № 25. – С. 16–23.
8. *Миненко П. А.* Особенности решения обратной линейно-нелинейной задачи гравиметрии // Геоінформатика. – 2005. – № 4. – С. 31–35.

Европейский университет, Киев

Поступило в редакцию 20.09.2006