

1. *Барбот-де-Марни Н. П.* Отчет о поездке в Галицию, Волынь и Подолию в 1865 году: Юбилейн. сб. минерал. общ-ва. – Санкт-Петербург, 1866. – С. 499–645.
2. *Семененко В. Н.* Стратиграфическая корреляция верхнего миоцена и плиоцена Восточного Паратетиса и Тетиса. – Киев: Наук. думка, 1987. – 230 с.
3. *Андрусов Н. И.* Понтический ярус. Геология России. – Петербург: Изд-во Геол. ком. – 1917. – 4, ч. 2, вып. 2. – С. 1–41.
4. *Колесников В. П.* Нижний плиоцен: Понтический ярус // Стратиграфия СССР: 12. Неоген. – Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1940. – С. 377–406.
5. *Эберзин А. Г.* О происхождении плиоценовых родов кардид в Эвксинском бассейне. / (Тр. Палеонтол. ин-та / АН СССР; Т 12). – Москва; Ленинград: Наука, 1949. – С. 209–232.
6. *Эберзин А. Г.* О горизонте с *Congerina subrhomboides* Andrus. в Кубанской области // Докл. АН СССР. – 1938. – 21, № 8. – С. 412–415.
7. *Stevanovic P. M.* Umfang und Charakter des Portaferrien (O. Pont s. str.) im Westteil der Paratethys vor allem in Jugoslavien // Foldt. Kozl. – 1971. – 101, No 2. – /3. – P. 296–306.
8. *Синегуб В. В.* Нижний плиоцен: Понтический ярус // Геология СССР: Т. 45. Молдавская ССР. – Москва: Недра, 1969. – С. 173–187.
9. *Певзнер М. А., Семененко В. Н., Вангенгейм Э. А., Садчикова Т. А., Коваленко В. А., Люльева С. А.* О морском генезисе и понтическом возрасте отложений опорного разреза Любимовка в Крыму // Стратиграфия. Геол. корреляция. – 2004. – 12, № 5. – С. 96–106.
10. *Коваленко В. А., Присяжнюк В. А.* Расчленение понтических отложений с. Виноградовка (Северное Причерноморье) по остракодам // Проблемы стратиграфии фанерозою України. Національна Академія наук України // НАН України. Палеонт. товариство. – Київ, 2004. – С. 183–187.
11. *Крстић Н., МекКензија К.* *Mediocytherideis Mandelstam*, 1956. – Диагностика и сродности // Геол. ан. Балк. полуостр. – Београд, 1991. – 55, вып. 1. – С. 175–205.
12. *Коваленко А. А.* Кандониды (Candonidae, Ostracoda) юго-запада СССР. – Кишинев: Штиинца, 1988. – С. 138; 150.

Институт геологических наук НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 09.11.2006

УДК 550.831

© 2007

П. А. Миненко

Экстремальные итерационные методы в обратной задаче магнитометрии при косом намагничении

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

Practical examples of the use of iterative methods of solving the inverse linear and nonlinear problems of magnetic measurements with the application of extreme algorithms to the calculation of depths up to the horizontal borders of the section of blocks and three components of the magnetism intensity vector of rocks are given. The results will be useful in the detailed geological mapping and the search for ore deposits.

В связи с существенным увеличением стоимости электроразведочных работ для определения глубины до поверхности раздела слабомагнитных горных пород УЩ и немагнитного осадочного чехла в последнее время используется решение обратной линейно-нелинейной задачи магнитометрии (ОЛНЗМ) [1].

Известны экстремальные итерационные методы получения устойчивого решения ОЛНЗМ для вертикальной проекции магнитного поля Z_a при вертикальном намагничении горных пород $J = J_z$; $Z_a = J_z V_{zz}$ [2]. Однако исследованиями на образцах установлено, что многие горные породы имеют значительное отклонение вектора намагничения от вертикального направления. Это обстоятельство является недостатком известных методов, так как существенно искажает результаты решения ОЛНЗМ.

Целью настоящей работы является разработка экстремального итерационного метода получения устойчивого решения ОЛНЗМ при косом намагничении горных пород.

Поставленная цель достигается тем, что измеренные значения магнитного поля Z_a используются в полной интерпретации с учетом горизонтальных проекций вектора намагничения [3]:

$$\begin{aligned} J &= (J_x; J_y; J_z); \\ Z_a &= J_x V_{xz} + J_y V_{yz} + J_z V_{zz}, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_{xz} , V_{yz} , V_{zz} — формулы для вторых производных гравитационного потенциала при единичной аномальной плотности [4, 5].

В результате вычислительных экспериментов установлено, что линейную обратную задачу (1) в корректной постановке [6] можно решать методами, изложенными в работах [1, 2, 4, 6], при следующей комбинации формул матричных элементов:

$$\begin{aligned} Z_{a,j} &= \sum_{i=1}^{3M} J_i b_{i,j}; \\ \{J_i &= J_{x,i}, b_{i,j} = V_{xz,i,j}, i = 1, M; J_i = J_{y,i}, b_{i,j} = V_{yz,i,j}, i = M + 1, 2M; j = 1, N; \\ J_i &= J_{z,i}, b_{i,j} = V_{zz,i,j}, i = 2M + 1, 3M\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где M — количество блоков (прямоугольных параллелепипедов) в модели, аппроксимирующей геологическую среду; N — количество точек измеренного магнитного поля.

Аналогично можно решать и линеаризованную контактную задачу ОЛНЗМ для одновременного вычисления магнитного параметра $J_i = J_{2i} - J_{1i}$ и глубины h_i до верхней грани каждого i -го блока модели.

Воспользуемся итерационными формулами для J_i и h_i на следующей $n + 1$ -й итерации в том виде, в котором они приведены в работах [1, 2]:

$$J_{i,n+1} = J_{i,n} - \tau_{n+1} B_{i,n}; \quad (3)$$

$$h_{i,n+1} = h_{i,n} - \mu_{n+1} C_{i,n}; \quad b_{ij,n+1} = b_{ij,n} + \mu_{n+1} c_{ij,n} C_{i,n}, \quad (4)$$

где $B_i = \sum_j b_{i,j} r_{i,n} / (\lambda_i \lambda_j)$; $C_i = \sum_j c_{i,j} r_j / (\lambda_{1i} \lambda_{1j})$ — формулы поправок для магнитного параметра и глубины до границ слоев для следующей итерации; τ_{n+1} и μ_{n+1} — оптимизирующие коэффициенты экстремального итерационного процесса на $n + 1$ -й итерации;

$$\lambda_i = \sum_j |b_{i,j}|; \quad \lambda_j = \sum_i |b_{i,j}|; \quad \lambda_{1i} = \sum_j |c_{i,j}|; \quad \lambda_{1j} = \sum_i |c_{i,j}|$$

(здесь $b_{i,j}$, $c_{i,j}$ — формулы коэффициентов прямых задач для вертикальной проекции магнитного поля Z_a и ее производных по координате z).

Формулы для невязок r на смежных итерациях имеют вид

$$r_{i,n} = \sum_i b_{i,j} J_{i,n} - Z_{a,j};$$

$$r_{j,n+1} = r_{j,n} + \mu_{n+1} \beta_j - \tau_{n+1} \gamma_j - \mu_{n+1} \tau_{n+1} \beta_{1j}$$

(здесь $\beta_j = \sum_i c_{i,j} C_{i,n} J_{i,n}$; $\beta_{1j} = \sum_i c_{i,j} C_{i,n} B_{i,n}$; $\gamma_j = \sum_i b_{i,j} B_{i,n}$).

Воспользуемся критерием минимума суммы квадратов поправок для контактной разности магнитного параметра J :

$$F = \sum_i B_{i,n+1}^2 = \sum_i (B_{i,n} + \mu_{n+1} D_{1,i} - \tau_{n+1} D_{2,i} - \mu_{n+1} \tau_{n+1} D_{3,i})^2 = \min,$$

где

$$D_{1,i} = \sum_j \frac{b_{i,j} \beta_j + c_{i,j} C_{i,n} r_{j,n}}{\lambda_i \lambda_j}; \quad D_{2,i} = \sum_j \frac{\gamma_j b_{i,j}}{\lambda_i \lambda_j}; \quad i = 1, 3M; \quad j = 1, N;$$

$$D_{3,i} = \sum_j \frac{b_{i,j} \beta_{1,j} + c_{i,j} C_{i,n} \gamma_j}{\lambda_i \lambda_j};$$

$$\mu_{n+1} = \frac{A_{0,2}(A_{1,2} + A_{0,3}) - A_{0,1} A_{2,2}}{Tc}; \quad (5)$$

$$\tau_{n+1} = \frac{A_{1,1} A_{0,2} - A_{0,1}(A_{1,2} + A_{0,3})}{Tc}, \quad (6)$$

где $A_{0,0} = (B_{i,n}, B_{i,n})$, $A_{0,1} = (B_{i,n}, D_{1,i})$, $A_{0,2} = (B_{i,n}, D_{2,i})$, $A_{1,1} = (D_{1,i}, D_{1,i})$, $A_{1,2} = (D_{1,i}, D_{2,i})$, $A_{0,m} = (B_{i,n}, D_{m,i})$, $A_{k,m} = (D_{k,i}, D_{m,i})$, $Tc = A_{1,1} A_{2,2} - (A_{1,2} + A_{0,3})^2$; формулам (3), (4) с учетом (5), (6) вычисляются новые значения $J_{i,n+1}$, $h_{i,n+1}$ по их значениям $J_{i,n}$, $h_{i,n}$, вычисленным на предыдущей итерации. Аналогично вычисляются те же параметры по картам измеренного поля горизонтальных проекций полного вектора: H_x , H_y .

Рис. 1 и 2 иллюстрирует результаты интерпретации поля Z_a (рис. 1, з), а на рис. 3 — поля H_x (рис. 3, в). На рис. 1, а приведена карта вычисленных значений полного вектора J_p интенсивности намагничения горных пород кристаллического фундамента. На рис. 1, б, в представлены соответственно карты вычисленных значений его проекций J_z и J_x ; на рис. 2 — карта глубин до поверхности магнитных пород фундамента, полученная в результате решения ОЛНЗМ, на рис. 3, а, б, з — карты распределения полного вектора J_p и его проекций J_z , J_y . Из рис. 1 и 3 следует, что карты полного вектора J_p существенно отличаются от карт его вертикальной проекции J_z , так как его горизонтальные проекции соизмеримы с вертикальной по интенсивности на значительной площади. Поэтому для точного определения глубин до фундамента необходимо учитывать наклонное намагничение горных пород.

Из рис. 1 и 3 также следует, что на картах одноименных проекций есть места, в которых наблюдаются значительные различия между параметрами, вычисленными по картам Z_a и H_x , что обусловлено различным уровнем помех, создаваемых сильной неоднородностью горных пород в аппроксимирующих блоках и недостаточным учетом аномальных магнитных масс, расположенных за пределами исследуемого участка. Для устранения этих недостатков необходимо использовать модели совместного решения обратной задачи для

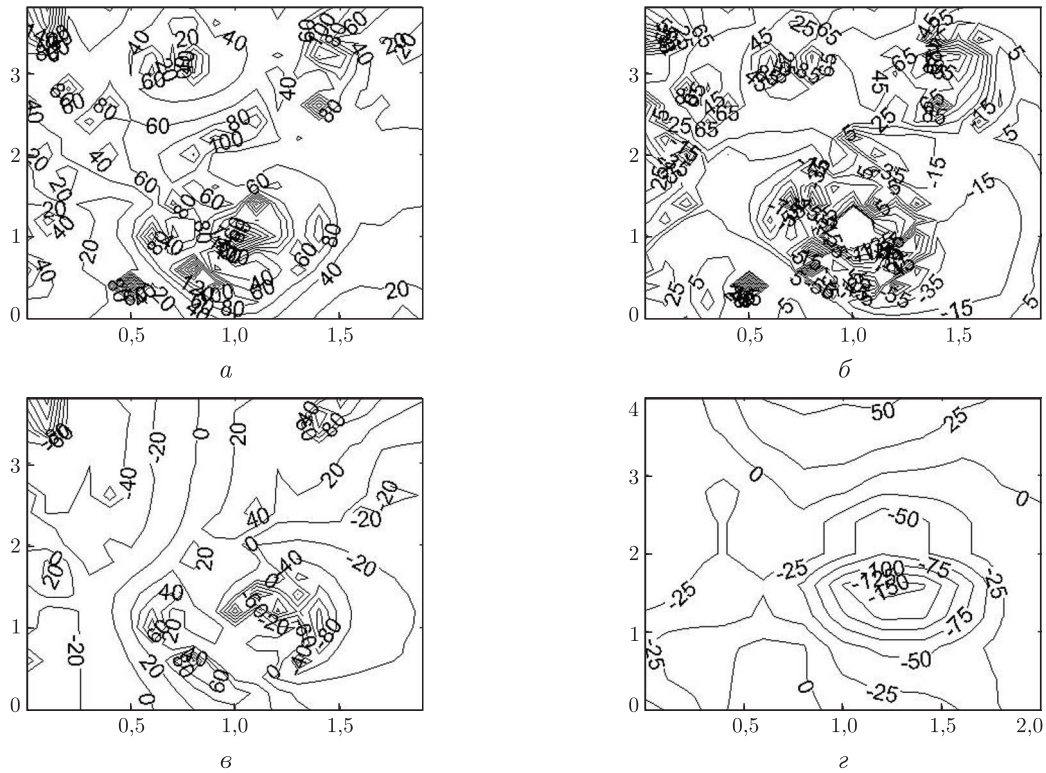


Рис. 1. Результаты решения обратной задачи магнитометрии по распределению вертикальной проекции поля Z_a .
 а, б, в — карты полного вектора интенсивности намагничения J_p , его вертикальной J_z и горизонтальной J_x компонент для верхнего магнитного слоя горных пород фундамента (расстояние, сотни метров, изолинии, нТл); г — карта неосредненного магнитного поля Z_a (изолинии, нТм)

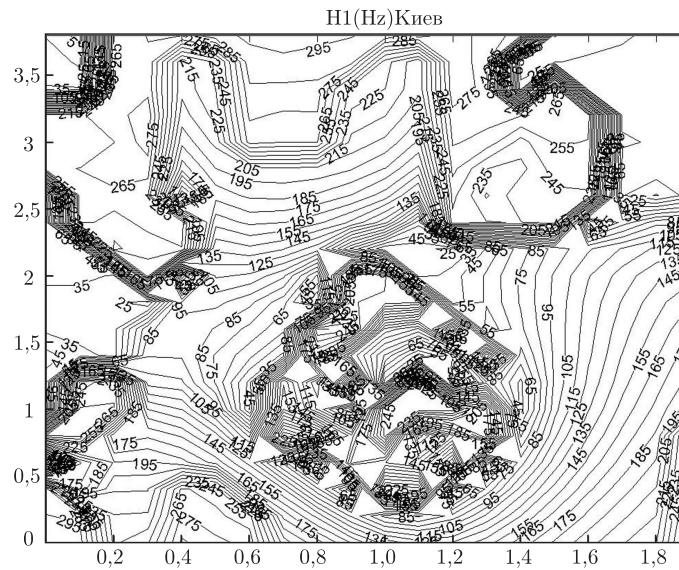


Рис. 2. Результаты решения обратной задачи магнитометрии по распределению вертикальной проекции поля Z_a .
 Карта глубин H_1 до верхней поверхности первого верхнего слоя горных пород кристаллического фундамента (расстояние, сотни метров, изолинии, м)

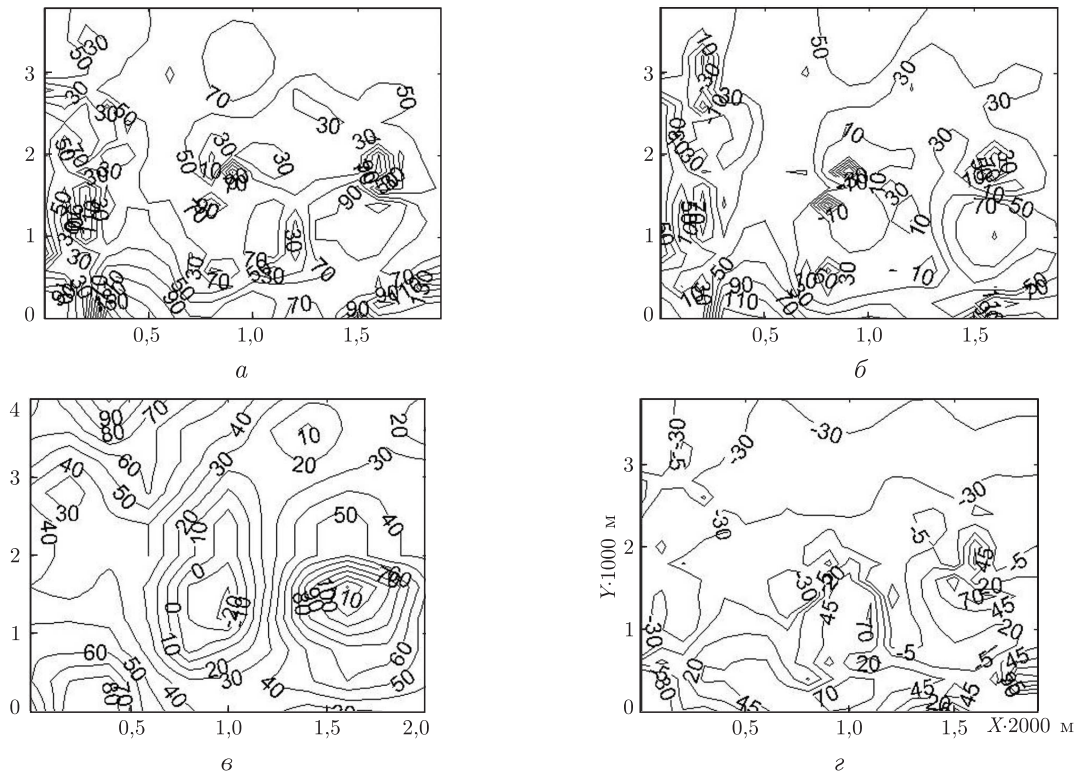


Рис. 3. Результаты решения обратной задачи магнитометрии по распределению горизонтальной проекции поля H_x .

a, б, г — Карты полного вектора интенсивности намагничивания J_p , его вертикальной J_z и горизонтальной J_y компонент для верхнего магнитного слоя горных пород фундамента (расстояние, сотни метров, изолинии, нТл); *з* — карта неосредненного магнитного поля H_x (изолинии, нТл)

двух или трех проекций поля (H_z , H_x , H_y) алгоритмами на основе аналогов фильтров Винера–Калмана, которые в настоящее время разработаны только для гравиметрии [7], но могут быть созданы и для магнитометрии с целью обеспечения надежной фильтрации высокоинтенсивных помех поля и получения устойчивых решений ОЛНЗМ.

1. *Миненко П. А.* Применение линейно-нелинейных методов магнитометрии и гравиметрии при исследованиях на кристаллическом фундаменте // Сб. науч. тр. Нац. горн. ун-та, 2006. — № 26. — С. 81–87.
2. *Миненко П. А., Миненко Р. В.* О поисках избирательно экстремальных решений обратной задачи магнитометрии при исследованиях на кристаллическом фундаменте // Наук. Вісн. Нац. гірн. ун-ту, 2006. — № 9. — С. 39–44.
3. *Логачев А. А.* Магниторазведка. — 3-е изд., перераб. и доп. — Ленинград: Недра, 1968. — 295 с.
4. *Булах Е. Г., Маркова М. Н., Тимошенко В. И.* Математическое обеспечение автоматизированной системы интерпретации гравитационных аномалий. — Киев: Наук. думка, 1984. — 112 с.
5. *Миронов В. С.* Курс гравиразведки. — Ленинград: Недра, 1972. — 512 с.
6. *Миненко П. А.* Проблемы и перспективы применения линейных методов интерпретации гравиметрических измерений в рудных районах // Теорет. та прикл. аспекти геоінформатики. — Київ, 2006. — С. 244–256.
7. *Миненко П. А.* Обратная линейная задача гравиметрии на основе композиции нескольких векторов начальных русловий // Доп. НАН України. — 2006. — № 9. — С. 126–130.

Европейський університет, Київ

Поступило в редакцію 23.11.2006