

ЗАСТОСУВАННЯ 3D МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДАНИХ АРХЕОМАГНІТОМЕТРИЧНИХ ЗЙОМОК

© І.В. Віршило, К.М. Бондар, 2008

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

The features of 3D magnetic modeling application for archaeomagnetic survey data interpretation are analyzed in the paper. The advantages of new modeling method are demonstrated on example of Bronze age settlement Malopolovetske-2A. Magnetic survey data, field magnetic susceptibility measurements, laboratory measurements of magnetic properties of soil and archeological materials are involved in modeling.

Вступ. Серед широкого розмаїття природних методів вивчення археологічних пам'яток особливе місце займає магнітометрія. Популярність різних видів магнітометричних зйомок для вирішення археологічних завдань пояснюється тим, що вони є ефективним інструментом пошуків і картування пам'яток, дають змогу оптимально планувати подальші розкопки [1–3]. По магнітограмах успішно визначають горизонтальні розміри археологічних об'єктів, тоді як робити висновки про глибину їх залягання немає достатніх підстав. Крім того, якщо об'єкт розташований неглибоко у магнітоактивному ґрунтовому шарі, можлива значна похибка при визначенні його бокових меж. Глибина залягання об'єкта, його структура і співвідношення із вмісним середовищем (ґрунтом) піддається кількісній оцінці за допомогою математичного моделювання. Його завданням є побудова такого просторового розподілу магнітних властивостей середовища, який чисельно пояснював би спостережене поле.

У статті наведено магнітні моделі ділянок поселення доби бронзи Малополовецьке-2А, створені з використанням даних магнітної зйомки й польової капаметрії, а також лабораторних вимірювань магнітних властивостей зразків ґрунтів і археологічних матеріалів. Археомагнітометрична зйомка виконана квантовим магнітометром КМ-8 (ІЗМІРАН, Росія), досягнута точність зйомки модуля магнітної індукції B , що оцінена за повторними вимірами, – 0,3 нТл. Детальність мережі спостережень 25×75 см. Польова капаметрія ґрунту в процесі розкопок виконана приладом Bartington Instruments Ltd MS2 Magnetic Susceptibility Meter с датчиком-кільцем MS2D діаметром 185 мм. У лабораторних умовах на зразках ґрунтів і археологічних матеріалів вивчали об'ємну магнітну сприйнятливість (χ) на капамістку KLY-2 (Geofyzyka, Чехія) та природну залишкову намагніченість (J_n) на спін-магнітометрі JR-4 (Geofyzyka, Чехія).

Постановка проблеми 3D магнітного моделювання археологічних пам'яток. Розв'язання просторової оберненої задачі мікромагнітометрії для вивчення розподілу джерел магнітного поля у верхній частині розрізу, а саме в ґрунтовому шарі, має свою специфіку, що відрізняє її від класичних методик, які застосовують, наприклад, під час пошуків рудних тіл. Як об'єкт математичного моделювання система культурний шар – природний ґрунт досить складна. У найпростішому варіанті природний ґрунтовий покрив може бути описаний горизонтально-шаруватою моделлю, кількість шарів якої й зміну магнітних властивостей у них із глибиною визначають за типом ґрунту й історією його існування. Господарська діяльність людини зазвичай приводить до порушення цілісності природних шарів, зміни їхніх фізичних властивостей, виносу/привнесенню матеріалу. Власне археологічний матеріал представлений об'єктами або окремими знахідками. Крім того, не завжди можливо абстрагуватися від впливу ландшафту на морфологію і властивості ґрунтового розрізу, що відображується у магнітному полі.

Мала відстань від рівня спостереження магнітного поля до такого комплексного диференційованого об'єкта дуже сильно обмежує застосування однорідних апроксимувальних тіл правильної геометричної форми й великої розмірності під час магнітного моделювання. Разом з тим розв'язання оберненої задачі не може бути зведене до задачі пошуку характеристик ізольованих однорідних тіл у немагнітному просторі. Крім того, математична модель не має суперечити експериментальним даним вивчення зразків ґрунту й археологічних предметів із цього об'єкта або сусідніх з ним ділянок.

Методичний підхід та його обґрунтування. Магнітна модель (ММ) є частковим випадком фізико-археологічної моделі [2, 4]. Її створюють на основі магнітометричних і петромагнітних даних і використовують для археологічної

інтерпретації результатів магнітних досліджень. ММ дає підставу для виділення низькоінтенсивних археомагнітометричних аномалій на фоні ландшафтних, зумовлених впливом ґрунтового покриття. ММ значно підвищує інформативність археологічних схем, оскільки кількісно характеризує об'єкт, як і будь-яка петрофізична побудова. Моделювання магнітних властивостей ґрунтових і культурних шарів має супроводжувати магнітні зйомки. Ефективність такого комплексного підходу показано для пам'яток трипільської культури [5].

Методика моделювання та її реалізація. З метою створення універсального інструменту для вирішення археомагнітометричних завдань була адаптована спеціалізована авторська програма [6–8]. Головними її алгоритмічними особливостями є:

- поділ досліджуваного об'єкта на велику кількість комірок малого розміру, для кожного з яких визначають магнітні властивості (магнітну сприйнятливість (χ) і природну залишкову намагніченість (J_n));
- під час розв'язання оберненої задачі магнітні властивості середовища для всіх комірок моделі обчислюють ітераційними методами оптимізації [9]; підбір параметрів моделі припиняють, коли середня різниця між розрахунковим і спостереженим полем у пунктах спостереження стає менше заданої величини точності зйомки (у нашій роботі – 0,3 нТл);
- результати якісної інтерпретації археомагнітометричних аномалій можуть бути закладені в модель першого наближення у вигляді ділянок з відмінними від фонових значеннями χ і J_n , а також більш широкими/вузькими рамками змін магнітних параметрів;
- контури передбачуваних археологічних об'єктів визначають за візуалізованою ММ; співвідношення магнітних властивостей у сусідніх комірках дає змогу вводити градацію фонових, слабких і сильних магнітних об'єктів; висновки про їхню природу можна зробити сукупно за формою, розміром та інтенсивністю ділянок моделі, що складаються з однієї або багатьох комірок з подібними властивостями.

Цей алгоритм має низку переваг перед методами [10, 11], які раніше використовували для моделювання археологічних об'єктів [2]:

- він дає змогу працювати як з культурним шаром у цілому, так і зі слабконамагніченими об'єктами малих розмірів й слабкими аномаліями, які їм відповідають;
- точність відтворення геометричної форми об'єкта обмежена лише детальністю моделі;
- є можливість врахування впливу ґрунтового шару за допомогою використання ефективних величин намагніченості;

- розрахунок/підбір аномального поля виконують за індуктивною та залишковою компонентами вектора сумарної намагніченості.

Результати моделювання. Моделювання включало на першому етапі розв'язання прямої задачі для розкопаної ділянки і порівняння результатів із спостереженим полем, на другому етапі – розв'язання оберненої задачі та складання археологічного прогнозу для перспективної ділянки поселення доби бронзи Малополовецьке-2А (Київська обл.).

Перший етап. За результатами археологічних досліджень побудована магнітна модель ділянки, у якій кожний об'єкт апроксимований сукупністю елементарних осередків правильної геометричної форми із заданими величинами χ і J_n (рис. 1, а). Множини елементарних комірок для жител-землянок 14 і 16 представлені сферами, центри яких розташовані на відстані 30 см одна від одної. Вогнище 15 змодельовано одним шаром сфер з відстанями між центрами 20 см. На рис. 1, а зазначені середні глибини залягання шарів моделі. Шар 0–30 см із середньою глибиною 15 см не включено до моделі, тому що він унаслідок багаторічної оранки перемішаний і має однорідні магнітні властивості, тобто вважається таким, що не дає внеску в аномальне магнітне поле.

Коміркам ґратки надані повні (модель А) та ефективні (модель В), тобто різниці відносно властивостей вмісного ґрунтового шару, значення модельних параметрів χ і J_n . Для моделей А і В розрахована магнітна індукція над ділянкою (рис. 1, в, г). Як видно, у першому випадку, генерованому моделлю А, всі три аномалії мають однакову інтенсивність, що суперечить спостереженням. У другому випадку, якому відповідає модель В, інтенсивність аномалії 15 від високонамагніченого вогнища залишилася на колишньому рівні, а аномалії від жител-землянок 14 і 16 трохи приглушені, адже їхня намагніченість не набагато перевищує ґрунтову. Така модель краще пояснює спостережене поле (рис. 1, б).

З досвіду розв'язання прямої задачі отримано кілька емпіричних критеріїв, що дало нам змогу зменшити неоднозначність розв'язання оберненої задачі (підбору параметрів моделі, яка задовольняє спостереженому полю магнітної індукції) для ще не розкопаної ділянки (фрагмент магнітограми, показаний на рис. 2, а):

- орний шар ґрунту приймаємо однорідним і таким, що не впливає на аномальне магнітне поле;
- з урахуванням глибини залягання археологічних об'єктів, знайдених на досліджуваній і сусідніх ділянках [12], до моделі першого наближення слід включати шари до глибини 180 см;
- параметри моделі поза межами аномалії варто обмежити величинами, характерними для ґрунтів;

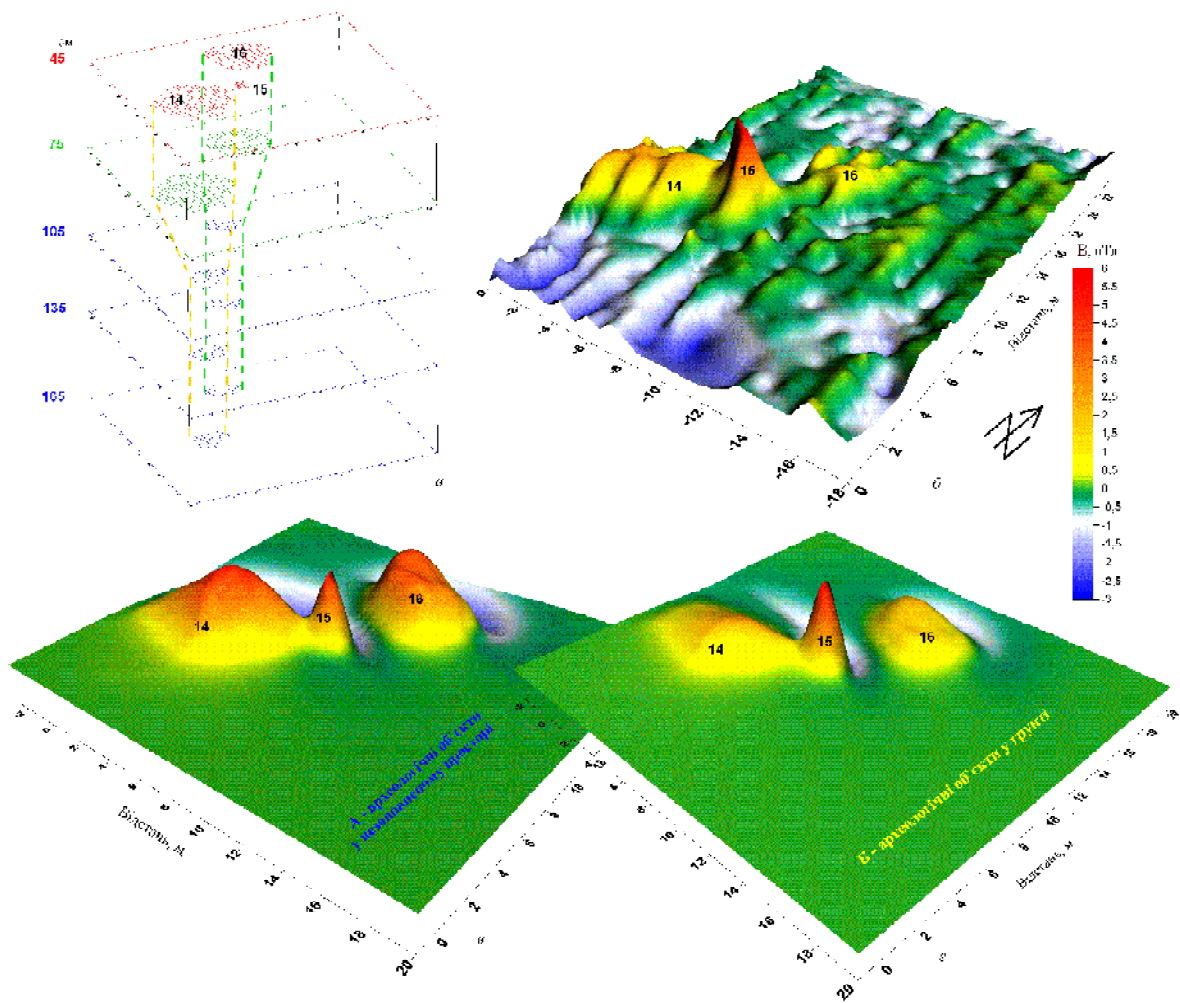


Рис. 1. Просторова модель (а) і магнітне поле, спостережене (б) та розраховане для моделей А (в) і В (г) магнітною індукцією розкопаної ділянки поселення Малополовецьке-2А

- глибина об'єктів визначається за останнім шаром моделі, значно зміненим оптимізацією;
- високочастотні аномалії моделюються неоднорідностями верхнього шару (20–40 см).

Другий етап. Створена ММ першого наближення й розрахована прогнозна модель С для фрагмента магнітограми, показаного на рис. 2, а. Кістяк ММ першого наближення складений з 4 шарів: 20–40 см, 40–60 см, 60–80 см, 80–100 см. Розрахункове магнітне поле від ММ С ілюструє рис. 2, б. Розрахунки магнітної індукції приведені до рівня виконаної зйомки (50 см над поверхнею ґрунту). ММ С візуалізована у вигляді картограми магнітної сприйнятливості χ на глибині 30 см з позначенням максимальних глибин закладення передбачуваних об'єктів (рис. 2, б).

Результати магнітного моделювання підтверджені розкопками Фастівської археологічної експедиції у 2007 р. (керівник Лисенко С.Д.). На місці аномалії розкопані залишки житла черняхівської культури. Основними джерелами магнітних аномалій є кілька об'єктів, величина χ яких досягає $150 \cdot 10^{-5}$ од. СІ (рис. 2, б). Об'єкт 1 виявився скупченням каміння, об'єкт 2 – вогнищем, об'єкт 4 – скупченням керамічних ткацьких грузил.

Крім того, за моделлю виділено витягнуту структуру 3, яка є рештками потужної західної стіни житла. Фактичні глибини залягання об'єктів відповідають передбаченим.

Обговорення. У нашій роботі новий метод археомагнітного моделювання уперше апробовано на конкретній археологічній пам'ятці. В подальшому, у міру нагромадження магнітометричної, петромагнітної та археологічної інформації, усе більше чинників залучатиметься до процесу моделювання, що, у свою чергу, підвищить точність прогнозів. Серед таких чинників можуть бути і магнітні, і геоінформаційні дані, наприклад, стосовно географічного й ландшафтного положення пам'яток різних культур Малополовецького археологічного комплексу.

Серед найперспективніших напрямів роботи щодо зменшення неоднозначності розв'язку оберненої задачі археомагніторозвідки виділимо такі:

- використання спостережених значень вертикального градієнта магнітної індукції замість розрахованих;
- залучення інформації про фактичний напрямок вектора залишкової намагніченості високомагнітних обпалених об'єктів, який не завжди

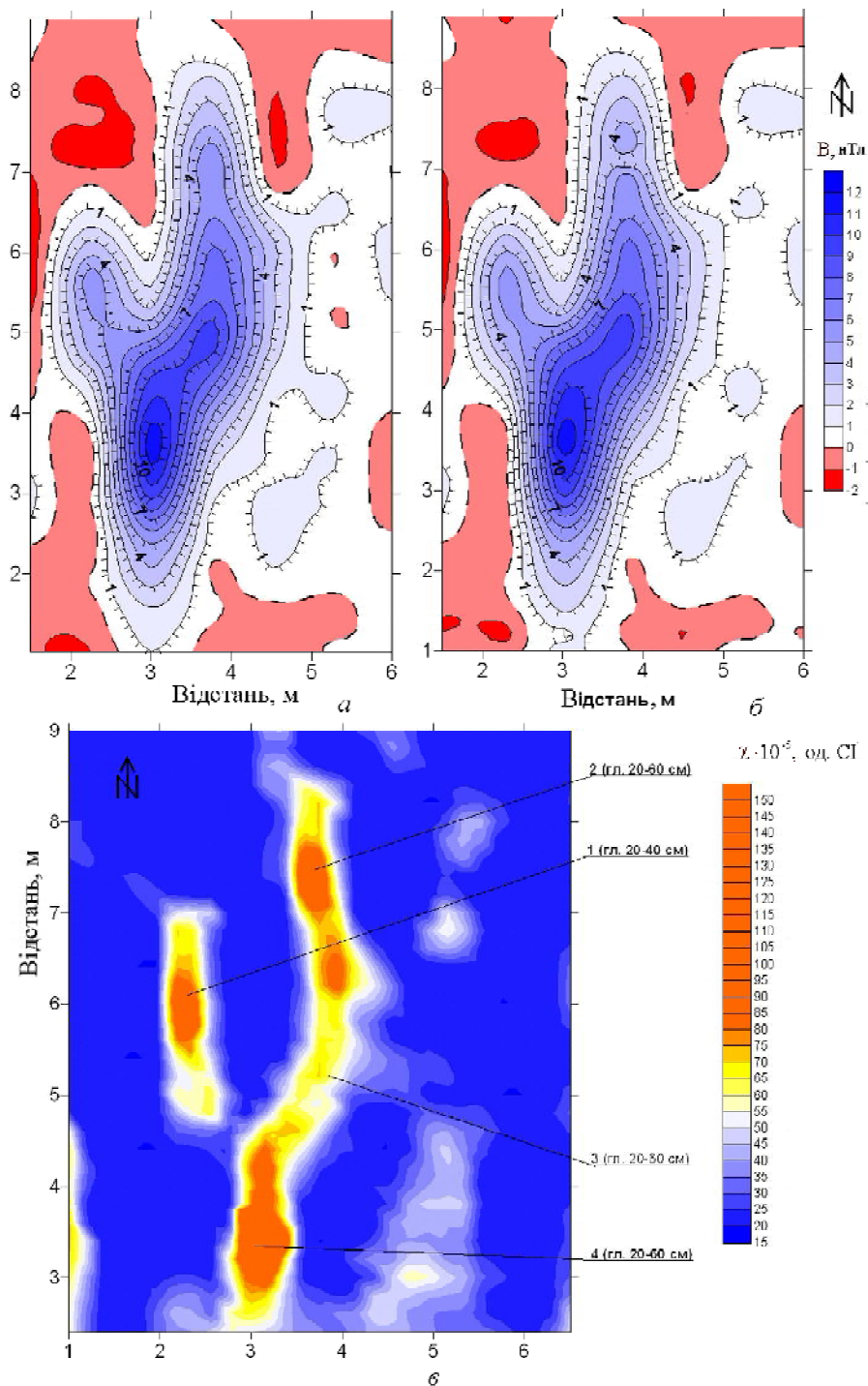


Рис. 2. Спостережене (а) і розраховане (б) магнітне поле для обчисленої моделі С (в) археологічно перспективної ділянки поселення Малополовецьке-2А

збігається із напрямком сучасного магнітного поля;

- врахування фактичних величин фактора Кеніксбергера $Q = J_n/J_i$ всіх шарів ґрунту й археологічних об'єктів;
- створення банку даних ММ і розрахованих аномалій від них для всіх класів археологічних об'єктів Малополовецького комплексу.

Крім того, позитивний результат дає комплексування магнітометрії з іншими видами геофізичних досліджень. У нашому дослідженні використані польова капаметрія і петромагнітні дані.

Аналіз результатів роботи нашої роботи також на низку важливих методичних висновків. Показано, що розв'язання оберненої задачі археоманіторозвідки не може бути зведене до задачі пошуку характеристик ізольованих однорідних тіл у немагнітному просторі. Використання оптимізаційних алгоритмів виправдано за сучасного рівня точності й детальності магнітометричних зйомок. Правдивість прогнозних ММ прямо пропорційна кількості додаткової, немагнітометричної, інформації, закладеної в моделі першого наближення.

1. *Becker H., Fassbinder J.W.E.* Magnetometry of a Scythian settlement in Siberia near Cich in the Baraba Steppe 1999 // 3rd Int. Conf. on Archaeol. Prospection. – 1999. – P. 168–172.
2. *Кошелев І.М.* Магнітна розвідка археологічних пам'яток. – К., 2004. – 337 с.
3. *Ролле Р., Орлюк М., Романець Н., Ульрих Б., Цольнер Х.* Археогеофізичні дослідження Більського городища та його округи // Більське городище та його округи. – К.: Ін-т археології НАН України, 2006. – С. 19–32.
4. *Мачинин В.А., Смекалова Т.Н. и др.* Геофизические исследования в античной археологии. – М., 1989. – 25 с. – (Препр. / ИЗМИРАН; 15(841)).
5. *Кошелев И.Н.* Памятники трипольской культуры по магниторазведочным данным. – Киев, 2004. – 470 с.
6. *Віришло І.В.* Автоматизована система розв'язання задач інверсії даних сейсмоакустики для багатокомпонентного анізотропного геологічного середовища: Автореф. дис... канд. геол. наук. – К., 2004.
7. *Віришло І.В., Бондарь К.М.* Методика пространственного магнитного математического моделирования и ее применение для задач археоманиторазведки // Материалы VIII молодеж. науч. школы по геофизике. – Пермь, 2007. – С. 68–72
8. *Бондарь К., Віришло І.* Archeological interpretation of magnetometric data using 3D magnetic modeling examples from Ukraine // 7th Int. Conf. on Archaeol. Prospection, Studijne zvesti Archeologicheskogo ustavu SAV, Nitra. – 41. – P. 117–120.
9. *Банди Б.* Методы оптимизации. – М.: Радио и связь, 1988. – 127 с.
10. *Завойский В.Н.* Вычисление магнитных полей от анизотропных трехмерных тел в задачах магниторазведки // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1978. – № 1. – С. 76–85.
11. *Левашов С. П., Цимбал Т.И.* Моделирование плотностных неоднородностей методом последовательного накопления и разрастания масс // Докл. АН УССР. Сер. Б. – 1984. – № 3. – С. 16–19.
12. *Лысенко С.Д.* Дополнения к археологической карте Фастовского района (1999–2004 гг.) // Археологічні пам'ятки Фастівщини. Матеріали до археологічної карти Київської області // ФДКМ. Прес-музей № 20–21. – Фастів, 2004. – С. 85–152.

Надійшла до редакції 09.02.2007 р.