

О. Восс, Н. Абрахамсен,
Т. М. Смекалова

МАГНІТНА ЗЙОМКА СТАРОДАВНЬОГО ЗАЛІЗОДОБУВНОГО ЦЕНТРУ В м. СНОРУП (ДАНІЯ)



У статті викладені результати магнітної зйомки стародавнього центру екстенсивного залізодобування у Південній Ютландії (м. Сноруп, Данія). Розглядаються три послідовні стратегії магнітної зйомки: метод вільного пошуку, метод фіксованих профілів, метод фіксованої сітки, а також питання щодо поліпшення роздільної здатності магнітної зйомки за допомогою диференційного методу вимірювання.

Широке розповсюдження на межі I тис. до н. е. — I тис. н. е. залізодобувних центрів екстенсивного типу в Центральній, Північній та Східній Європі (рис. 1, а) обумовило підвищену зацікавленість дослідників до їх вивчення¹.

Археологічні залишки у межах залізодобувних центрів цього типу подані, головним чином, скупченнями (або кластерами) шлакових ям із застиглими шлаковими блоками (рис. 1, б). Шлаки містять значну кількість заліза у вигляді різних оксидів, у тому числі феромагнітних (магнетит, магеміт та ін.), і тому є досить магнітними об'єктами. У давнину ями завглибшки 0,4—0,7 м розташовувалися безпосередньо під поверхневим шаром, але нині шлакові блоки або розміщені під гумусним горизонтом², або перекриті нанесеними шарами ґрунту чи піску³. Отже, подібні залізодобувні центри є компактними групами намагнічених тіл, розташованих на невеликих глибинах. Тому саме магнітна зйомка дуже перспективна для їх виявлення та картографування. Особливо актуальним стає питання щодо проведення магнітної зйомки у разі дослідження великих територій і при відсутності наявних візуальних ознак шлакових ям.

За умови низького рівня магнітних шумів (тобто за відсутності поблизу сучасних залізних конструкцій, металобрухту, високовольтних електромереж, промислових перешкод тощо) магнітна розвідка дозволяє вирішити багато проблем, що виникають під час дослідження залізодобувних центрів. Це, зокрема, виявлення та обмежування робочих майданчиків, визначення їх площі, встановлення окремих кластерів шлакових ям. За сприятливих умов, тобто коли залишки розташовуються на незначній глибині, можна навіть визначити кількість шлакових ям, їх розміри.

Необхідно зазначити, що, незважаючи на явну перспективність, магніторозвідка ще не часто використовується під час дослідження центрів екстенсивного типу.

На початку 60-х років за спільним проектом двох датських установ — Інституту доісторичної археології (Олферт Восс) та Геологічного Орхуського університету (Нільс Абрахамсен) — була проведена магнітна зйомка на залізодобувному центрі неподалік від с. Дренгстед у Північно-Західній Ютландії. Вдалося локалізувати групи окремих магнітних аномалій, джерелом яких були 47 шлакових ям, розташованих двома компактними групами, що було підтверджене перевірними розкопками. Була запропонована проста модель шлакової ями у вигляді похило намагніченого зануреного диполя, еквівалентного одно-рідно намагніченій сфері (або короткому вертикальному циліндру). Магнітна

аномалія над такою моделлю суттєво відповідає вимірній аномалії над типовими незруйнованими шлаковими блоками, які й були згодом розкопані ⁵.

Широкомасштабні комплексні археолого-геофізичні роботи на залізодобувних центрах були проведені у 60—80 роках у декількох районах Польщі ⁶. У басейні річкової системи Береза в районі Лешно (Західна Польща) на площі 20 га за допомогою геофізичної розвідки було виявлено 8 скупчень шлакових ям, 5 з яких було розкопано ⁷. Використання у «Свентокшиському дослідному проєкті» аерофотозйомки та магніторозвідки в Ломжинському воеводстві (Північно-Східна Польща) дозволило виявити близько 26 нових залізодобувних центрів ⁸.

За результатами магнітної зйомки на ділянці у Західній Моравії між селами Судети і Паметиче виявлено 3 залізодобувні робочі майданчики. За допомогою протонного магнітометра було визначено, що ці майданчики, які датуються 3—4 ст. н. е., містили 72, 17 та 47 шлакових ям ⁹.

Коротка згадка щодо проведення магніторозвідки на залізодобувному центрі екстенсивного типу Умань II є у статті С. В. Панькова ¹⁰.

Найперспективнішою комплексною археолого-геофізичною програмою вивчення пам'яток давнього екстенсивного залізодобування слід визнати проєкт німецьких вчених. У 1980 р. Геофізичний інститут Університету м. Кіля та Музей давньої історії Шлезвіга і Гольштейна почали проведення магнітної зйомки на території Йолделунда (Північна Німеччина) у місці концентрації залишків чорної металургії. Зазначимо, що цей район знаходиться від дослідженого авторами залізодобувного центру у м. Сноруп на відстані лише 100 км. За допомогою протонного магнітометра була досліджена велика площа (близько 4 га), на якій за магнітними даними, що піддані спеціальній фільтрації, виявлені скупчення шлакових ям. Вдалося навіть визначити кількість окремих горен ¹⁰. У 1990 р. цей проєкт у розширеному вигляді було відновлено. Його мета — висвітлити такі питання, як організація виробництва, точне датування пам'яток, значення залізодобувного ремесла для розвитку стародавніх місцевих поселень, його вплив на навколишнє середовище. У цій науково-дослідній програмі, яку завершили у 1993 р., брали участь не лише археологи та геофізики, а й географи, ботаніки, металурги. У 1990 р. ділянка площею 1000 м², яку перед тим дослідили за допомогою магнітометра, була розкопана і на ній виявлено 21 шлакову яму, а також залишки поселення, датованого IV—V ст. н. е. ¹¹.

Магнітна зйомка на залізодобувному центрі у м. Сноруп була здійснена ще у 1967 р., але вона виявилася невдалою. Пізніше дослідження тут відновились ¹². За допомогою протонного магнітометра вдалося отримати карту магнітного поля на ділянці 20 × 45 м і виділити декілька кластерових шлакових ям. На дослідженій площі експедицією Національного музею в Копенгагені під керівництвом О. Восса були проведені розкопки, які повністю підтвердили результати магніторозвідки.

Фізико-археологічна модель залізодобувного центру. У східній та південній частинах півострова Ютландія відкрито на цей час понад 60 залізодобувних центрів зі скупченням (або кластерами) шлакових ям. Лише тільки в одному районі, на площі 500 × 700 м, на околиці м. Сноруп, у 12 км від м. Варде, відомо 25 кластерів, які містять близько 2000 шлакових ям, 1400 з яких розко-

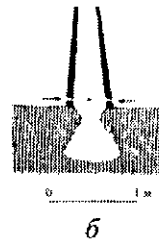
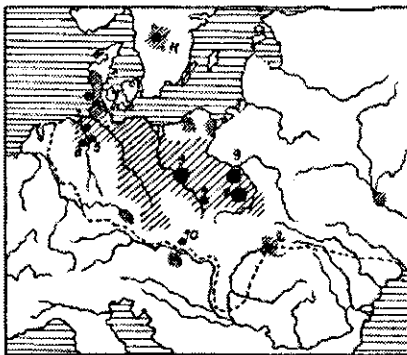


Рис. 1. Розповсюдження залізодобувних центрів зі шлаковими ямами в пізньоантичній Європі (а) і реконструкція горна зі шлаковою ямою, за О. Воссом (б)

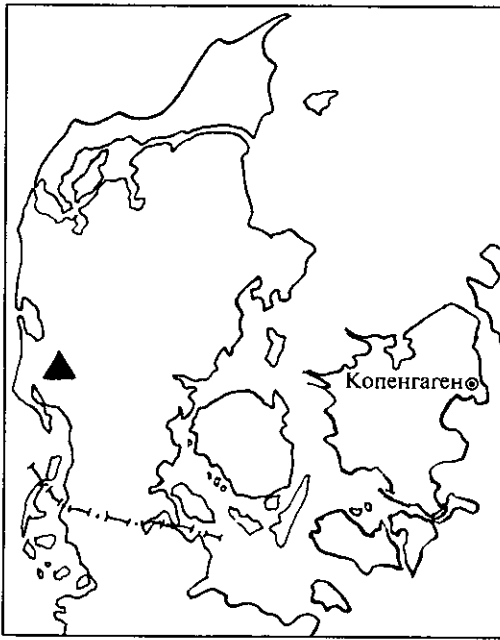


Рис. 2. Залізодобувний центр поблизу м. Сноруп (позначено трикутником)

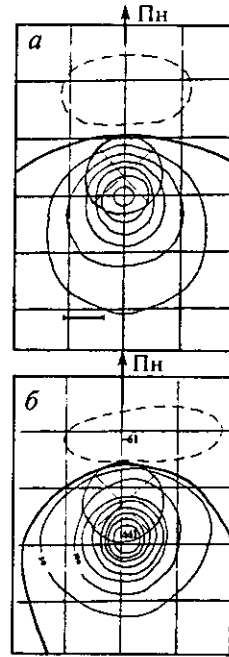


Рис. 3. Карти ізоліній напруженості магнітного поля: *a* — змодельоване магнітне поле над диполем або сферою; *б* — магнітне поле над розкопаною шлаковою ямою № 859 у м. Сноруп

пані (рис. 2). Радіовуглецеве датування показало, що залізо видобувалось тут близько 500 років, з початку II до початку VII ст. н. е.¹³ (рис. 2). Залізодобувні горна в Ютландії були, як видно, того ж типу, що й відомі по дослідженнях у Німеччині, Польщі, Чехії та Україні, які віддалені на відстань понад 2000 км від ютландських.

Як відомо, виробництво заліза вимагає наявності залізної, болотної або іншої руди, глини для спорудження горен та здобування деревного вугілля. В районі м. Сноруп у достатку є глина та руда, але запас деревного вугілля був, як видно, обмеженим та витрачався швидко. Відкриті 25 кластерів у м. Сноруп, можливо, відповідають 24 перервам у виробництві заліза тривалістю не менше 20 років кожний, що було пов'язане з природним відновленням дубових гаїв в околицях.

Проведення магнітної зйомки суцільною площею і часткові розкопки можуть допомогти перевірити і цю гіпотезу, яка має важливе значення для розуміння суспільної організації виробництва доби заліза.

Фізико-археологічна модель шлакової ями у вигляді точкового магнітного диполя (або рівномірно намагніченої сфери), розташованого на глибині, що дорівнює відстані від земної поверхні до центру ями, є достатньо наближеною до дійсності. Внаслідок того що звичайно параметр Q (відношення залишкової намагніченості до індукованої) набагато менший 1, шлакові блоки мають, головним чином, індуковану намагніченість. Нахил вектора намагніченості збігається з нахилом магнітного поля земної кулі, що для широти м. Сноруп становить: $I = 69^\circ$. На рис. 3 відображено ізолінії напруженості над такою моделлю (*a*) і наведено карту ізоліній (*б*) над одним із розкопаних шлакових блоків (№ 859).

У центральній частині кластера шлакові ями, звичайно, розташовуються майже впритул одна до одної, тому аномалії від сусідніх блоків накладаються одна на одну і кластер можна уявити у вигляді деякого еквівалентного магнітного шару. Форма й інтенсивність цієї аномалії буде залежати від співвідношення висоти зйомки і довжини еквівалентного шару (рис. 4, *a*, *в*)¹⁴. Це змодельоване уявлення добре відповідає виміряним магнітним полям за профілями, що перерізають один із кластерів шлакових ям (рис. 4, *б*, *г*).

Отже, нами побудовано фізико-археологічні моделі як для окремої шлакової ями, так і для кластеру таких ям. Першу модель можна використати під час

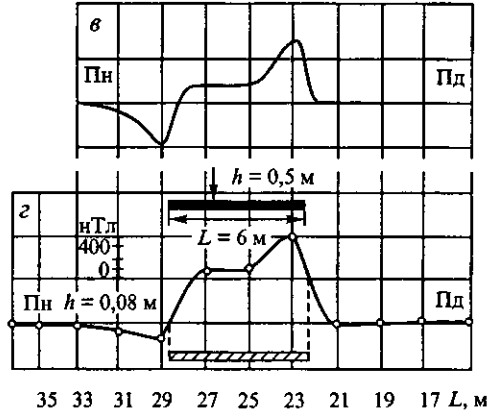
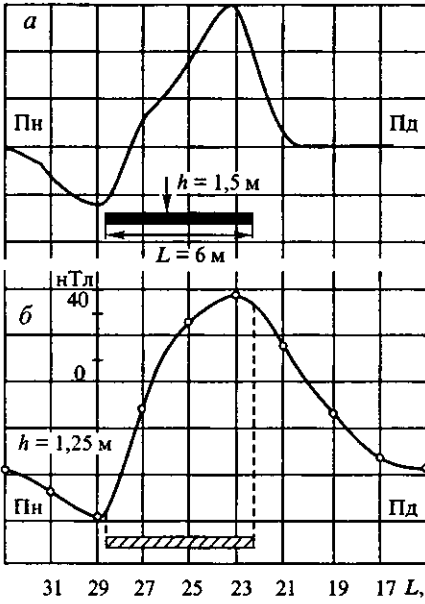


Рис. 4. Модельні поля: а, в — над тілами у вигляді магнітних шарів (за різними співвідношеннями висоти зйомки h і довжини шару L); б, г — відповідні дані магнітних вимірів по профілю, що проходить через центр одного з виявлених кластерів шлакових ям

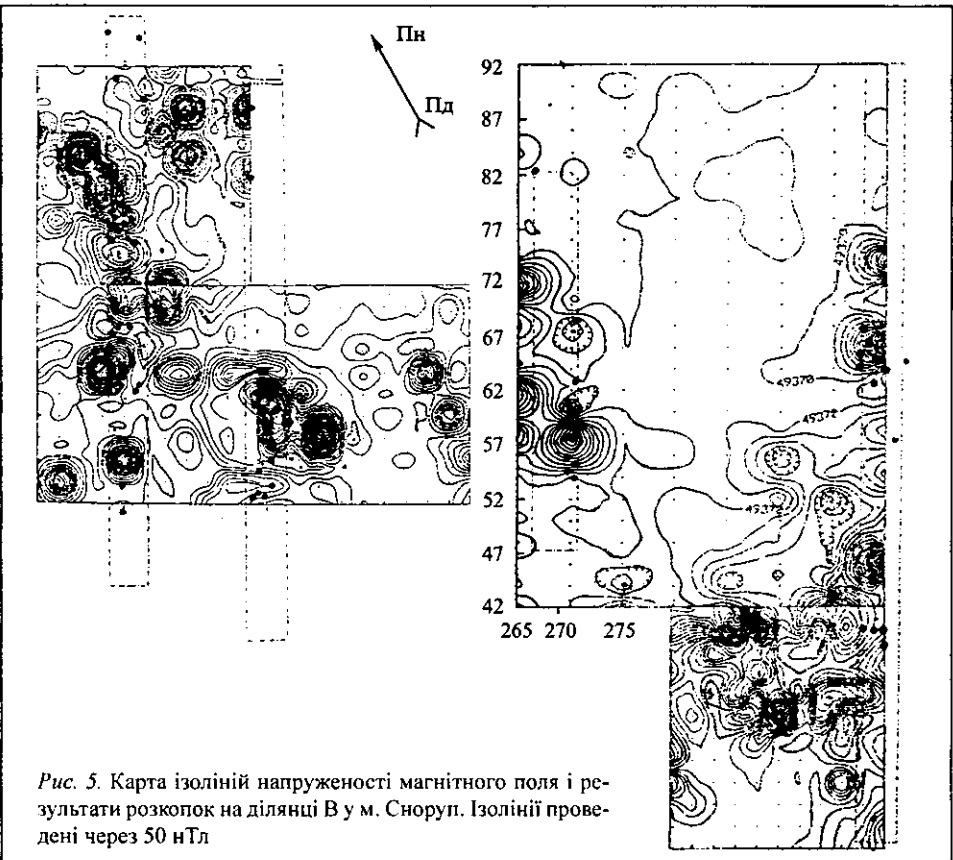
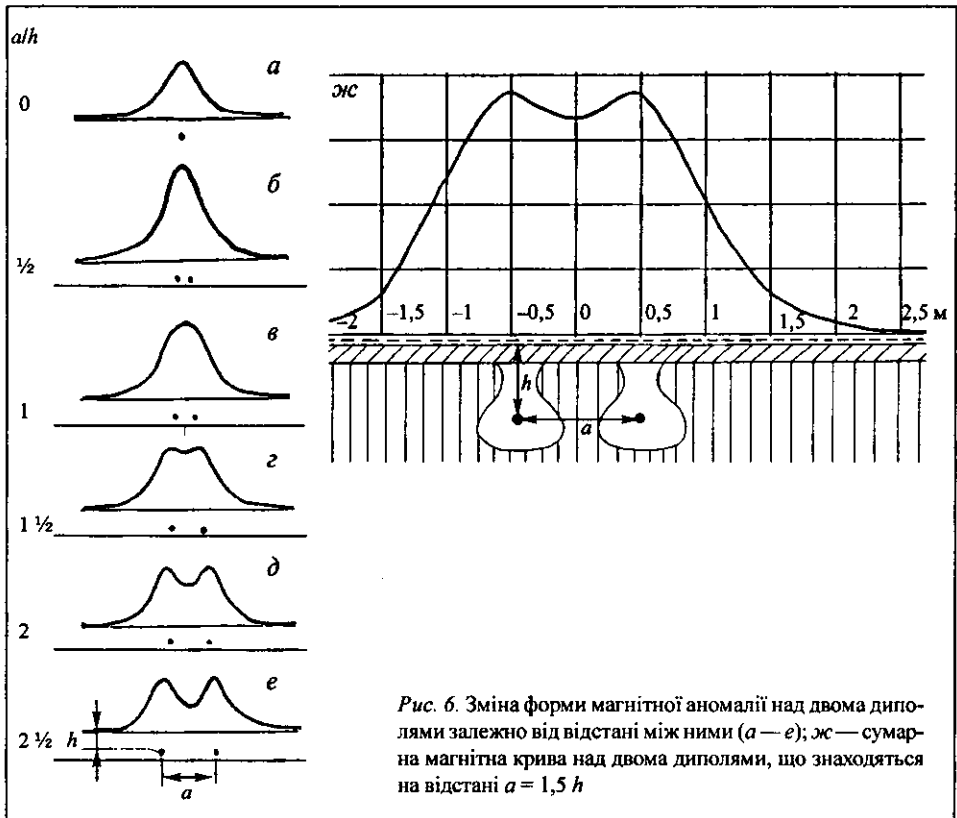


Рис. 5. Карта ізоліній напруженості магнітного поля і результати розкопок на ділянці В у м. Сноруп. Ізолінії проведені через 50 нТл

детального магнітного картографування залізодобувного центру, другу — під час розвідкових пошукових магнітних вимірів.

Методика магнітних вимірів у м. Сноруп. Вибір методики магнітних вимірів базувався на побудові фізико-археологічних моделей (ФАМ).

Метод фіксованих профілів та метод вільного пошуку. Розміри залізодобувних центрів за планом можуть дуже відрізнятися, а лінійні параметри окремих



шлакових блоків, які відповідають одному робочому майданчику (кластеру), залишаються майже незмінними і становлять зазвичай 4—10 м. ФАМ кластера наведена на рис. 4, а, в. Площа аномалії дещо більша, ніж площа кластера, амплітуда при висоті зйомки близько 1—1,5 м дорівнює 100 нТл¹⁵ (рис. 5).

Для того щоб не випустити магнітну аномалію під час зйомки, необхідно пересікти її не менш як двома точками¹⁶. З урахуванням побудованої для кластера шлакових ям фізико-археологічної моделі максимально припустима відстань між профілями буде становити близько 5 м. Точки на профілі можуть розташовуватися і густіше, наприклад через 2 м. Це збільшує точність визначення межі кластера без суттєвих додаткових витрат часу на розбивання сітки вимірів.

Разом з пошуковим методом, що базується на регулярній сітці (наприклад 5 × 2 м), можна застосовувати так званий метод вільного пошуку (МВП)¹⁷, тобто проводити заміри без розбивання сітки по вільних маршрутах, але так, щоб відстань між точками виміру була не менш 1—1,5 м. Аномальні зони відмічаються кілками. МВП характеризується досить високою швидкістю проведення (0,2 га за робочий день), проте значні аномалії від групи шлакових ям не можуть бути непоміченими.

Під час досліджень за методами фіксованих профілів або вільного пошуку можна визначити межі окремих залізодобувних центрів та окремих кластерів.

Детальне картографування залізодобувного центру за допомогою фіксованої сітки вимірів. Після того, як виявлені приблизні місцезнаходження і розміри пам'яток стародавньої металургії, можна розпочати детальне магнітне картографування центрів.

ФАМ, яка відповідає цій стадії досліджень, — однорідна намагнічена сфера або диполь (рис. 3, а). У центральній частині кластерів шлакові ями розташовуються на близькій відстані одна від одної. У цьому випадку моделлю кластерів є серія диполів. Аномалії від близькорозташованих диполів можуть підсумовуватися одна з одною тою чи іншою мірою, відповідно до величини нормалізованої відстані a між ямами, де h — глибина занурення диполя (рис. 6, а—е)¹⁷. Сигнали від сусідніх об'єктів можуть бути розрізнені, якщо відстань a між ними перевищує 1,5 м

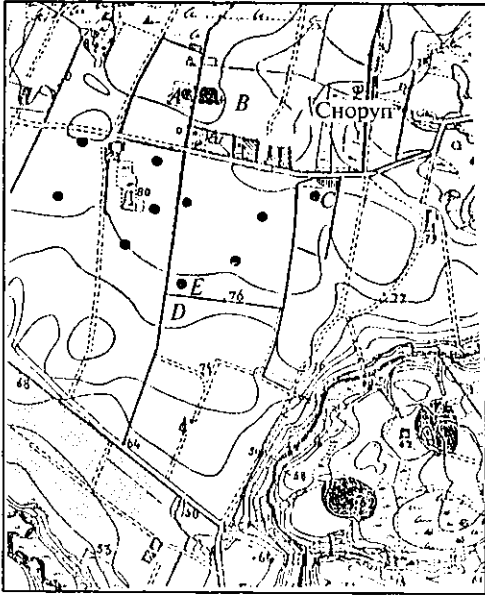


Рис. 7. Схема розташування ділянок (А — Е) магнітних вимірів на околицях м. Сноруп

(рис. 6, з—е). Тому якщо шлакові ями розміщені безпосередньо під гумусним шаром (як це було у м. Сноруп), то глибина h до центру ями (або глибина занурення модельного диполя) дорівнює 0,65—0,70 м. Тоді найменша відстань між центрами сусідніх шлакових блоків, які ще можуть бути розрізнені в магнітному полі, становить 1,0—1,5 м (рис. 6, ж).

Щоб отримати максимальне розділення аномалій від поблизу розташованих шлакових ям, необхідно гранично зменшувати висоту зйомки, тобто встановлювати обладнання на поверхні ґрунту. Крок виміру при цьому не повинен перевищувати

0,5 м для того, щоб зафіксувати усі особливості аномального поля, як це показано на рис. 6, ж. Під час магнітного знімання на поверхні пам'ятки виникає загроза зростання шумів внаслідок можливих сигналів від шматків шлаку та сучасних залізних предметів у верхнього ґрунтового шарі.

Проте, за досвідом подібних вимірів, такі об'єкти створюють «крапкові аномалії», тобто значні сплески амплітуд різного знаку на одній або двох сусідніх точках. Подібні аномалії легко відфільтровуються від корисних аномалій, ознаки яких наводяться далі.

Іноді шлакові блоки розташовані під значним шаром нанесеного ґрунту¹⁸. У цьому випадку зменшення кроку вимірів (наприклад до 0,5 м) не приведе до бажаного поліпшення роздільної здатності. Дійсно, з наведених вище графіків (рис. 6) та вимірів на залізодобувному центрі у м. Йолделунд (Північна Німеччина) виходить, що мінімальна відстань між сусідніми шлаковими ямами, які розміщені на глибині 1,5 м і які не можна розділити за магнітним ефектом, становить 3 м¹⁹, а рекомендований крок вимірів — 1 м. Тому для залізодобувних центрів, що покриті шарами відкладів, неможливо отримати детальний план і виявити кількість шлакових ям на пам'ятці.

Результати вимірів. Запропонована методика була реалізована під час дослідження декількох кластерів шлакових ям у м. Сноруп. На плані місцевості літерами А — Е позначені ділянки, де проводилися розвідкові й детальні магнітні виміри (рис. 7). Найцікавіші результати були отримані на ділянках А та В.

Магнітна зйомка на ділянці А. Методом вільного пошуку була визначена межа аномальної зони, у якій магнітне поле характеризується дуже помітною мінливістю. Потім на визначеній аномальній ділянці була проведена детальна магнітна зйомка за допомогою протонного магнітометра на мінімально можливій висоті (7—8 см від поверхні ґрунту до середини датчика). Крок зйомки: у середині аномальної зони — 0,5 м, за відсутності значних аномалій — 1 м. На периферійних частинах ділянки А, для того щоб бути впевненими у повній відсутності магнітних аномалій, були проведені виміри через 2 м по профілях, що проходять через 5 м.

З метою контролю за тимчасовими варіаціями наприкінці кожного профілю здійснювалися контрольні виміри в пунктах, що були відібрані в області нормального поля. Похибка зйомки за результатами повторних вимірів становила $\pm 2,2$ нТл.

Результати детального магнітного картографування на ділянці А (з урахуванням денних варіацій) подані на рис. 8 у вигляді карти ізоліній напруженості магнітного поля. Ізолінії проведені через 50 нТл. З урахуванням того, що «корисними» сигналами для нас були ті, які перевищували 50 нТл (під час знімання на мінімальній висоті), нульова ізолінія на карті випущена.

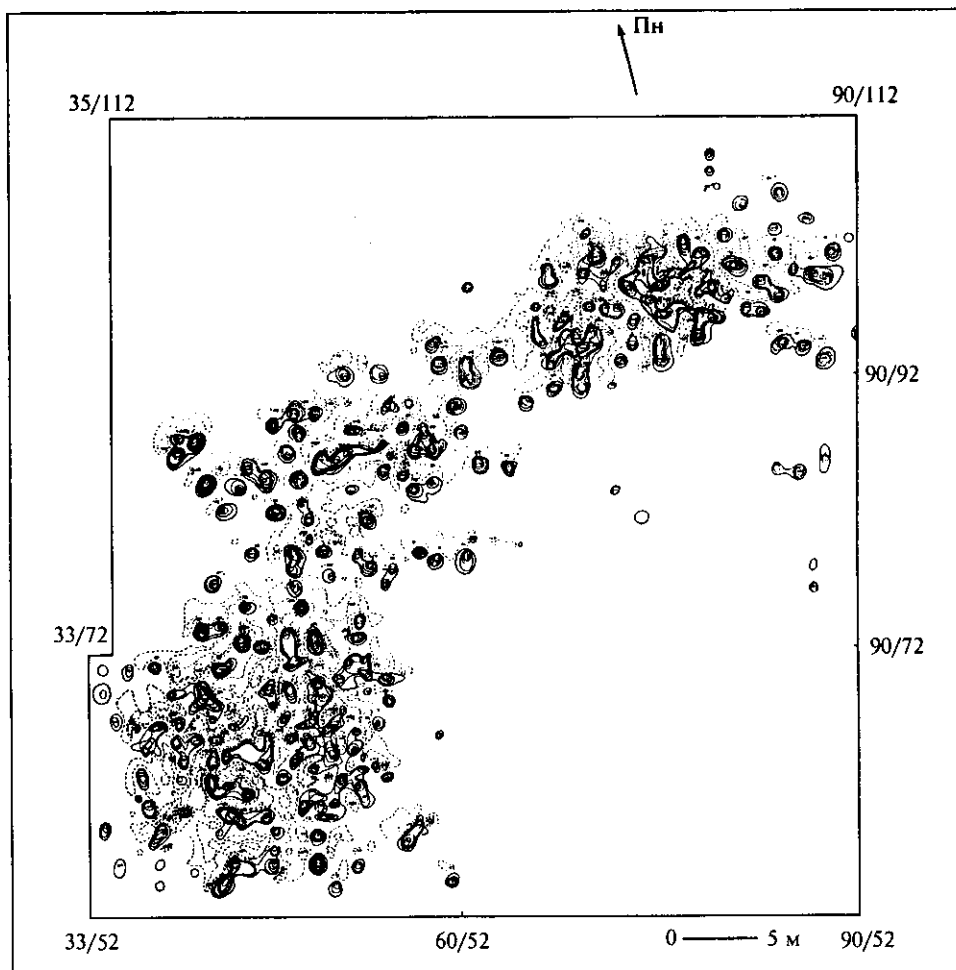


Рис. 8. Карта ізолій напруженості магнітного поля ΔT на ділянці А в м. Сноруп. Ізолії проведені через 50 нТл

Інтерпретація даних на ділянці А. Вона полягала у виділенні «корисних» сигналів. На основі визначених особливостей полів над побудованою ФАМ та розкопаною піччю № 859 (рис. 3) можна сформулювати основні ознаки магнітних аномалій над шлаковими ямами:

- максимальні значення інтенсивності змінюються від 100 до 1000 нТл;
- пряма, що поєднує точки максимуму та мінімуму аномалій, має напрямок північ — південь;
- величина мінімуму аномалій становить приблизно 1/6 величини максимуму;
- точка мінімуму знаходиться на відстані 0,5—1 м на північ від точки максимуму;
- кількість сусідніх аномальних точок (тобто, в яких напруженість магнітного поля перевищує 100 нТл при мінімальній висоті знімання і кроці 0,5 м) становить 2—5.

На інтерпретаційній карті (рис. 9) різними позначками показані припустимі археологічні об'єкти — шлакові блоки або шлакові ями, аномалії від яких задовольняють повністю або частково наведеним ознакам «корисних» сигналів. Отже, на дослідженій площі зафіксовано три кластери, що містили близько 240 шлакових ям.

Невеличкі руйнування торкнулися кластера в південно-західній частині ділянки, що відобразилося на магнітному полі у вигляді великої кількості «крапчастих» аномалій, як видно, від шматків шлаку, що були розтягнуті під час оранки. На недоторканій території «корисні» аномалії фіксуються досить впевнено.

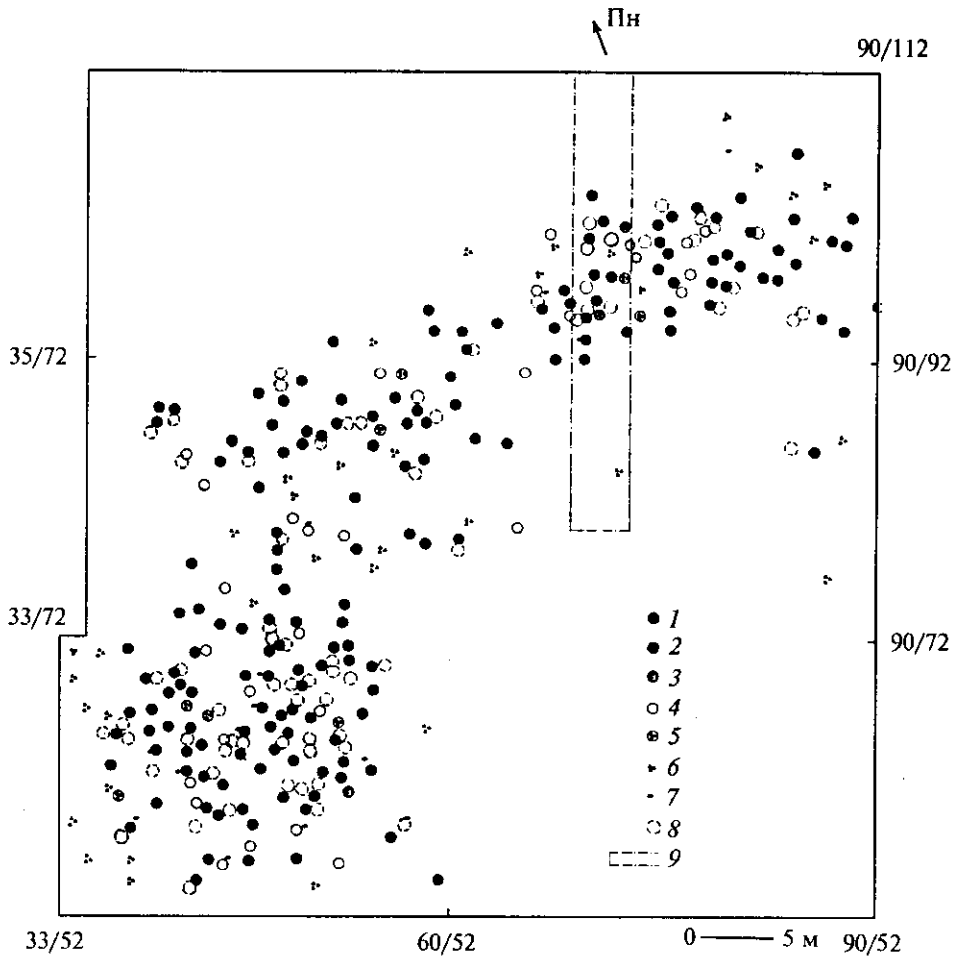


Рис. 9. Інтерпретаційна карта магнітних вимірів, наведених на рис. 8: 1 — аномалії понад 400 нТл; 2 — аномалії від 200 до 400 нТл; 3 — аномалії, що задовольняють не всім ознакам «корисних» сигналів; 4 — можливі шлакові ями або подібні об'єкти; 5 — розбиті шлакові блоки; 6 — окремі шматки шлаку; 7 — шматки шлаку на поверхні; 8 — додаткові шлакові ями, що виявлені перевірною траншеєю; 9 — перевірні траншеї

Через центральну частину важливого північно-східного кластера був прокладений контрольний профіль, вздовж якого здійснювалися виміри для уточнення методики виявлення кластерів. Результати повисотних вимірів з кроком 2 м наведені на рис. 4, б, г; 10. Вони демонструють відповідність з аномаліями над змодельованими тілами у вигляді магнітного шару (рис. 4, а, в).

Для впевненості, що у найближчій, приблизно 20-метровій, околиці досліджуваного майданчика (кластера) немає інших кластерів, територія навколо ділянки була перевірена методом вільного пошуку, який показав відсутність шлакових ям.

Магнітна зйомка на ділянці В. Ділянка розташована у 200 м на схід від ділянки А. Для виявлення меж кластерів після проходження досліджуваної площі декількома маршрутами, що перетинаються, та фіксації аномальних зон була розбита сітка вимірів, яка відповідала єдиній сітці розкопок і вимірів на ділянці А.

Результати знімання з кроком 2 м по профілях, що проходять через 2 та 5 м один від одного, подано на рис. 5 у вигляді карти ізоліній магнітного поля. Тут помітні зони значних за величиною знакозмінних аномалій, які можуть бути пов'язані з кластерами шлакових ям.

На ділянках С — Е, відзначених на схемі околиць м. Сноруп на рис. 7, була проведена магнітна зйомка методом вільного пошуку. На ділянці Е магнітні розвідка підтвердила припущення археологів щодо існування тут скупчення шла-

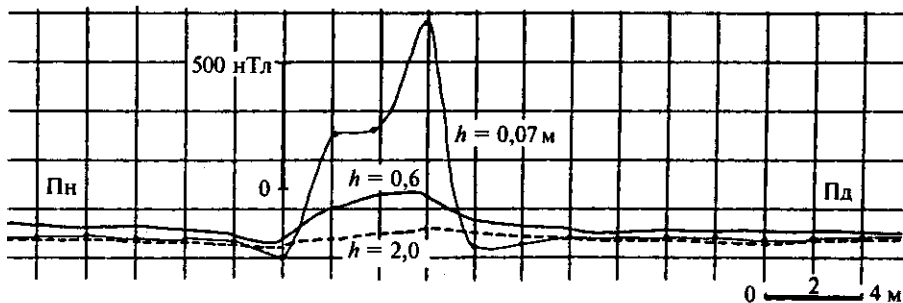


Рис. 10. Криві магнітного поля, що вимірювалися на різних рівнях над поверхнею землі

кових блоків. Проте їх існування на ділянці D свого відображення в магнітному полі не знайшло. Найперспективніші результати отримані на ділянці С, де вдалося оконтурити в північно-східному куті розораного поля велике скупчення шлакових ям, які утворювали потужні магнітні аномалії.

Результати перевірених розкопок. Розкопки, проведені у серпні 1992 р. на окремих досліджених за допомогою магніторозвідки ділянках, надали можливість виявити переваги та недоліки запропонованих методик магнітних вимірів.

На ділянці А була прокопана траншея завширшки 4 м і завдовжки 32 м, яка проходила приблизно крізь центральну частину означеного магніторозвідкою північно-східного кластера. Карта ізоліній магнітного поля цієї ділянки, інтерп-

Номер розкопаної шлакової ями	Маса, кг	Максимальна амплітуда магнітного поля, нТл	Додатки
3001	135	383	—
3002	—	843	—
3003	—	246	—
3004	76	411	—
3005	40	966	Шлакові ями 3005—3007 розташовані впритул одна до одної в центральній частині кластера
3006	85	612	
3007	55	283	
3008	45	45	—
3009	—	445	—
3010	28	29	—
3011	36	374	—
3012	193	473	—
3013	45	152	—
3014	—	101	—
3015	—	492	Аномалії від шлакових ям 3015, 3016 злилися
3016	—	—	
3017	—	-151?	—
3018	—	70	—
3019	—	334	—
3020	45	221	—
3021	245	1127	—
3022	—	223	—
3023	62	393	—
3025	—	356	—
3026	—	422	—

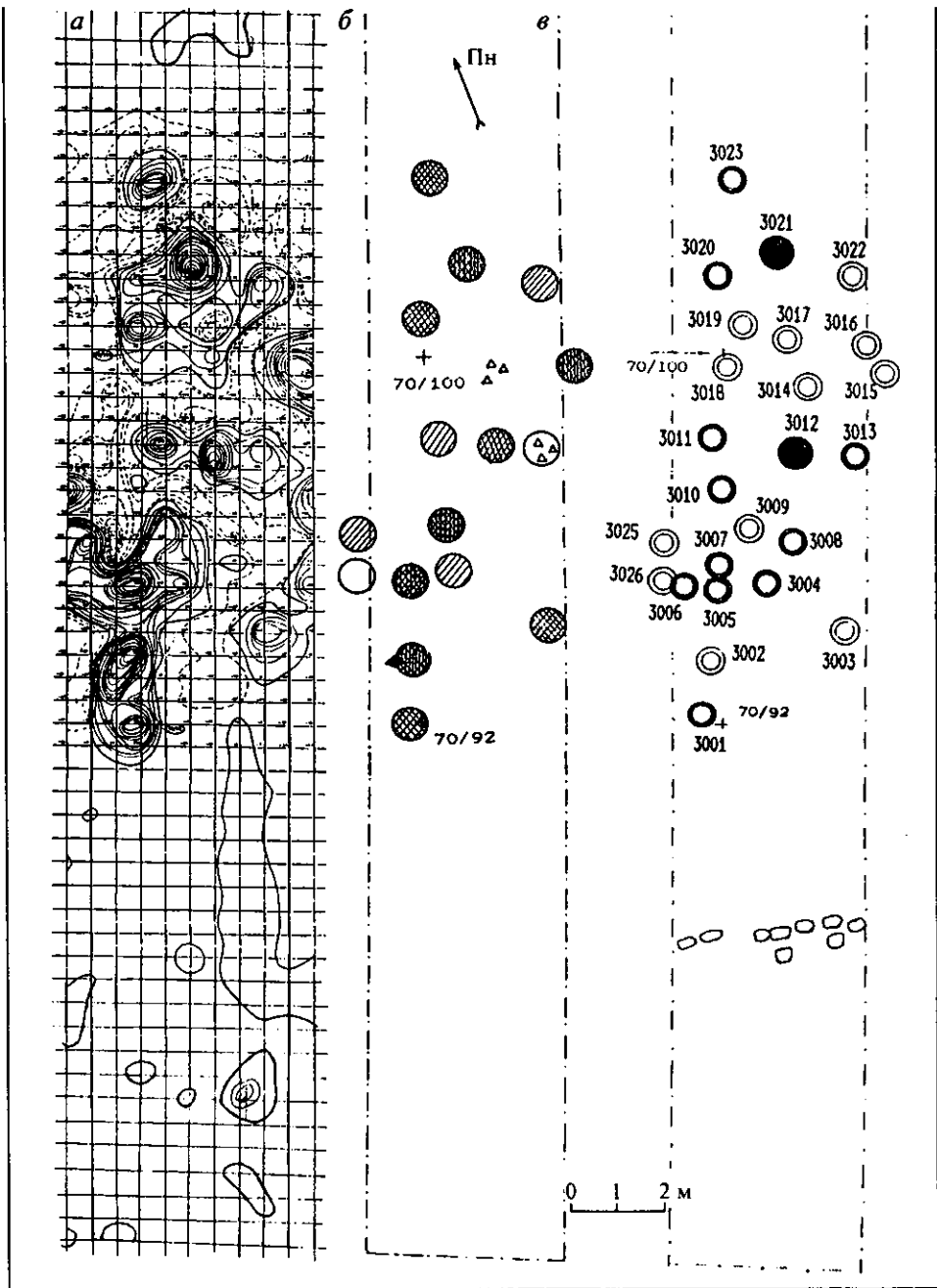


Рис. 11. Карта ізоліній ΔT (а), інтерпретаційний план (б) і план розкопу (в) на ділянці площі А

ретаційна карта за результатами магнітної зйомки і план розкопу наведені на рис. 11, а—в, а результати зважування розкопаних шлакових блоків і максимальні значення аномалій, що вони утворюють, — у таблиці. При порівнянні цих даних можна перевірити правильність виділення «корисних» аномалій, пов'язаних зі шлаковими блоками, а також уточнити інтерпретаційну карту всієї ділянки А.

Детальний аналіз отриманих результатів дав змогу дійти таких висновків:

- усі виявлені магніторозвідкою «корисні» аномалії відповідають шлаковим ямам;
- деякі розкопані шлакові ями, за тими або іншими причинами, не були відзначені на інтерпретаційній карті магнітної зйомки.

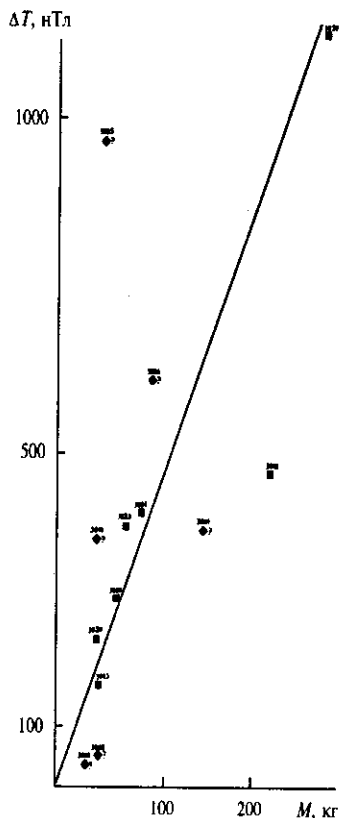


Рис. 12. Залежність маси розкопаних шлакових блоків та амплітуд аномалій магнітного поля над ними

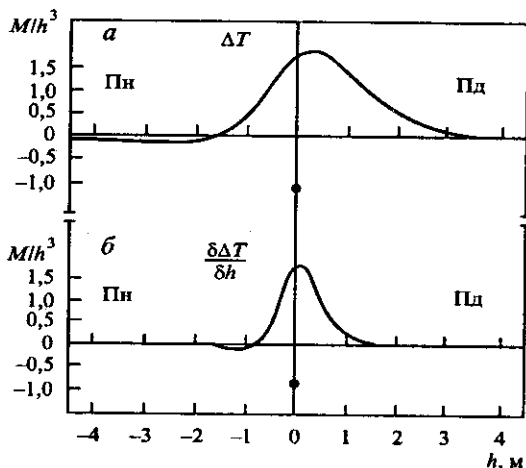


Рис. 13. Графік магнітного поля ΔT (а) та вертикальної похідної поля (б) над моделлю у вигляді диполя

Головна причина пропуску «корисних» аномалій, сигналів, що була з'ясована після розкопок, полягала у щільній скупченості шлакових ям у центральній частині кластерів. Іноді вдається визначити кількість та місцезнаходження ям лише за конфігурацією ізоліній внаслідок накладення окремих максимумів один на один. Крім цього, як показали розкопки, деякі ями містять невелику кількість шлаку (див. таблицю) і тому утворюють слабкі магнітні аномалії (іноді до 50 нТл).

Це було спричинене тим, що кількість припустимих об'єктів, що були у пошуку, виявилася дещо менша від реальної. На розкопаній ділянці їх було приблизно на 27 % більше, ніж уявлялося. Цей результат, на наш погляд, можна розповсюдити і на всю ділянку А та помітити на інтерпретаційній карті додаткові «корисні» об'єкти (позначені на рис. 9 кружками, наведеними пунктиром). Отже, загальна кількість припустимих шлакових ям зростає до 305 (рис. 9). До того ж межі кластерів лишаються незмінними.

Результати зважування деяких розкопаних шлакових блоків надають можливість визначити залежність між масою блока та аномалією, яку він створює (таблиця, рис. 12). Беручи до уваги цей зв'язок, можна дійти деяких припущень не лише щодо кількості, місцезнаходження, а також маси окремих шлакових блоків за величиною та формою створених магнітних аномалій.

На ділянці В було закладено п'ять розвідкових траншей завширшки 4 м і завдовжки відповідно 71, 35, 53, 53 та 26 м кожна (рис. 5). Загалом було розкопано 78 шлакових ям, які розташовувалися декількома компактними групами. Ці кластери знаходяться у межах аномальних зон, виявлених за результатами магнітної зйомки. Зазначимо, що на ділянці В завдання отримати сигнали від окремих шлакових ям не ставилося через надто великий для цього крок вимірів (2×2 та 2×5 м). На цій ділянці лише визначались межі кластерів для подальшого детального магнітного картографування. На наш погляд, розкопки підтвердили, що аномальні зони були виявлені правильно.

Подальше удосконалення методики магнітних вимірів. Для підвищення роздільної здатності магніторозвідки було розглянуто теоретичну можливість застосування градієнтометричного методу. Відомо, що матеріали магнітної зйомки (карти, графіки), подані у значенні вертикального градієнта магнітного поля, точніше, ніж сама функція, вимальовують контури збудованих об'єктів, відбивають локалізацію і тонку структуру аномального поля²⁰.

Додаткові переваги градієнтного методу полягають в автоматичному вилу-

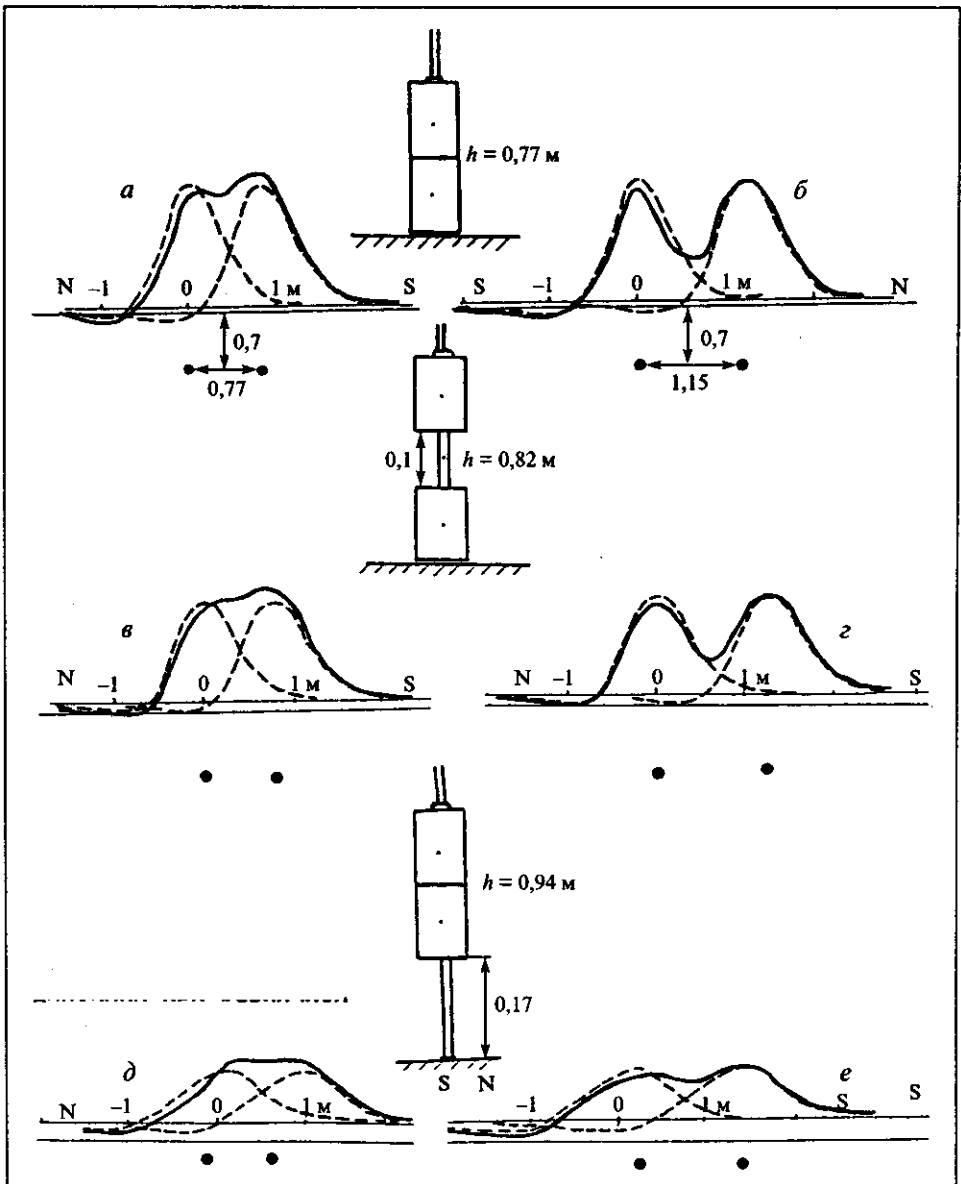


Рис. 14. Зміна характеру кривої вертикального градієнта магнітного поля над двома диполями за різної конфігурації датчиків

ченні регіональних та тимчасових варіацій земного магнітного поля. Вираз для першої вертикальної похідної напруженості наведений у праці ²¹. Для диполя, який має лише індуктивну намагніченість і довжина якого дорівнює глибині занурення, крива першої похідної наведена на рис. 13. Для умов м. Сноруп можна прийняти, що $h = 0,7$ м. Порівняння рис. 13, а, на якому подано графік самої функції напруженості магнітного поля, та рис. 13, б, де відображена її похідна по висоті, показує, що з північного боку обох аномалій є невеликий мінімум. Спостерігається також деяке зміщення точки максимуму до півдня. Але найважливішим є той факт, що відстань між точками на прямій, в яких функція приймає значення, що дорівнює половині максимуму (напівширина), приблизно однакова: для похідної дорівнює глибині залягання об'єкта, а для самої функції — подвоєній глибині. Інакше, спостерігається значне звуження аномалії градієнта порівняно з аномалією самої функції, що відкриває можливість поліпшення роздільної здатності магнітометричного методу.

Для вибору оптимальної конфігурації датчиків і висоти зйомки у градієнтометричному режимі (тобто з двома датчиками) був проведений графічний аналіз характеру зміни вертикального градієнта магнітного поля для двох модельних диполів, що імітують сусідні шлакові ями. Були розглянуті випадки, коли ці ями розташовувалися впритул одна до одної, тобто центри диполів знаходилися на відстані a , що становила 0,7—0,8 м, і коли ями були щільно віддалені одна від одної: a становить 1,5; 1,1—1,2 м. Порівнювалися декілька різних конфігурацій датчиків (рис. 14, $a—e$).

Як було визначено раніше, найкращу роздільну здатність має метод, коли зйомка проводиться на мінімальній висоті, тобто з поверхні ґрунту. Тому і в градієнтометричному режимі нижній датчик слід встановлювати на поверхні. Щоб тримати максимально звужену аномалію, необхідно і верхній датчик розміщувати впритул до нижнього. Для протонного магнітометра ПМ-856 відстань між датчиками не може бути меншою за 0,13—0,14 м. При цьому, як показано на рис. 14, a , шлакові ями, розташовані щільно одна від одної, будуть розрізнятися в магнітному полі, а ями, розташовані на відстані $a = 1,5$ м, вирізняються дуже чітко (рис. 14, b). Можливо, така конфігурація датчиків є оптимальною за роздільною здатністю.

Дійсно, невелика зміна у розташуванні датчиків приводить до значного розширення аномалій і втрати в амплітудах (рис. 14, $c—e$).

Отже, за допомогою графічного аналізу показано, що найбільш вдалим за роздільною здатністю є розташування датчиків, що зображено на рис. 14, a , b . Магнітне знімання з такою конфігурацією датчиків необхідно проводити з кроком близько 0,25 см. Для зменшення витрат часу під час знімання у градієнтному режимі можна рекомендувати застосовувати два датчики на окремих ділянках, наприклад у центральній частині досліджуваних кластерів*.

Таким чином, здійснена спроба детальної розробки магнітометричного дослідження залізодобувних центрів, які містять шлакові ями. За умови відсутності магнітних перешкод (тобто сучасних залізних предметів у поверхневому шарі, споруд, ліній електромереж тощо) у безпосередній близькості до ділянки стає можливим вирішувати важливі питання дослідження центрів цього типу: виявляти центр або кластер шлакових ям; визначати їх місцерозташування і межі; у деяких випадках — здійснити детально планування центра та визначити кількість і навіть масу окремих шлакових блоків.

Отже, магніторозвідка подає інформацію, подібну тій, яку археолог отримує внаслідок розкопок. Це відкриває можливості вивчати нечисленною дослідницькою групою великі території, перспективні для виявлення пам'яток залізодобувного виробництва, притому з порівнянно незначними витратами, часу і коштів.

¹ Bielenin K., Holvevinski S. Przegląd geologiczny. — 1961. — P. 134—138; Bielenin K. Zastosowanie metody magnetycznej w badaniach stanowiska Nova Slupia 4, pow. Kielce // Materiały archeologiczne. — 1963. N 4. — S. 303—324; Bielenin K. Badania nad starożytnym hutnictwem świetokrzyskim przeprowadzone w 1964 r. // Ibid. — 1966. — N 7. — S. 159—177; Bielenin K. Sprawozdanie z badan nad starożytnym hutnictwem świetokrzyskim w 1965 r. // Ibid. — 1967. — N 8. — S. 241—251; Bielenin K. Starożytne gornictwo i gutnictwo zelaza w Gorach świetokrzyskich. — Warszawa; Krakow, 1974. — 179 s.; Bielenin K. Erkundung archaologischer Objekte mit modernen Bodendenk-malpflege und naturwissenschaftlichen Methoden. — Berlin, 1983. — S. 79—97; Bielenin K. Fruhzeitliche Eisenverhuttungszentren in Polen // Archaeometallurgy of iron: Inter. Symp. of the Comite pour la siderurgie ancienne de L'UISPP (Lubllice, 5—9 October, 1987). — Prague, 1989. — S. 139—150; Hingst H. Das Eisenverhuttungsrevier auf dem Kammbergelände in Ioldelund, Kreis Nordfrisland. — Offa, 1983. — N 40. — S. 163—176; Piaskowski I. O wytapianiu zelaza w ogniskach dymarskich na ziemiach polskich // Kwartalnik historii Kultury materialnej. — 1970. — N 1. — S. 37—52; Pleiner R. Extensive Eisenverhuttungsgebiete im freien Germanien // Symposium ausklang der Latenezivilisation und anfang der germanischen besiedlung im mittleren donaugebiet. — Bratislava, 1976; Pleiner R. Iron-making and working on the territory of Czechoslovakia until middle ages (Resentresults) //

* Кластерами, за термінологією західноєвропейських дослідників, звуться скупчення ямних металургійних горен, поданих шлаковими конгломератами, що їх заповнювали. За вітчизняною термінологією, кластери — «робочі майданчики» (ред.).

Archaeometallurgy of iron: Inter. Symp. of the Comite... — S. 93—107; *Mamzer H.* Bloomery site of la Tene and Early Romano-Barbarian periods at Psary. Poland // *Archeologicke rozhledy*. — 1984 b. — N 36. — S. 682—683; *Mamzer H.* Problem rozwoju metalurgii zelaza w Europie srodkowej u schyłku starożytności // *Przedlag archeologiczny*. — 1984. A. — N 32. — S. 69—103; *Martens I.* Some reflection on the classification of prehistoric and medieval ironmelting furnaces // *Norwegian archaeological review*. — 1978. — N 1, n. 11. — S. 27—36; *Voss O.* Iernudvinding i Danmark i forhistorisk tid // *KUML*. — 1962. — P. 7—32; *Voss O.* Ierproduktionen i Danmark i perioden 0—550 e. Kr // *Iysk Arkeologisk selskabs skrifter*. — 1991. — N 24. — P. 151—157; *Voss O.* Iron furnaces in Denmark. *Archaeometallurgy of iron* // *Internat. Symposium of the Comite pour la siderurgie ancienne de L'UISPP (Lublice 5—9 October 1987)*. — Prague, 1989. — P. 171—184; *Wegewitz.* Ein Rennfeurofen aus einer Siedlung der alteren Romerzeit in Scharmbeck (Kreis Harburg) // *Nachrichten aus Niedersachsens Urgeschichte*. — 1953. — N 22. — P. 3—25; *Бидзіля В. И., Вознесенская Г. А., Недопако Д. П., Паньков С. В.* История черной металлургии и металлообработки на территории УССР (III в. до н. э. — III в. н. э.). — Киев, 1983. — 112 с.; *Паньков С. В.* О развитии черной металлургии на территории Украины в конце I тысячелетия до н. э. — первой половине I тысячелетия н. э. // *СА*. — 1982. — 4. — С. 201—213; *Паньков С. В.* Металлургия железа у племен Восточной Волыни (Житомирщины) рубежа и первой половины I тыс. н. э. // *СА*. — 1992. — № 1. — С. 192—197.

² *Bielenin K.* Fruhzzeitliche Eisenverhuttungszentren... — S. 154; *Паньков С. В.* О развитии черной металлургии... — С. 206.

³ *Паньков С. В.* О развитии черной металлургии... — С. 207; *Utecht von Tomm U., Stumpel H.* Magnetic prospection in Ioldelund, North-West Germany // *Archeologicke rozhledy*. — 1985. — N 38. — P. 467—468.

⁴ *Abrahamsen N.* Archaeomagnetism and iron age slaggs // *KUML*. — Aarhus, 1965. — P. 115—132.

⁵ *Abrahamsen N.* Ibid. — P. 128—129.

⁶ *Dubrowski K., Stopinski W.* Zastosowanie metody magnetycznej do badan cementarzysty Kultyury cialopalnych z okresu rzymskiego // *Kwartalnik historii Kultyury materialnej*. — 1962. — N 2. — S. 45—50; *Bielenin K.* Zastosowanie metody magnetycznej... — S. 303—324; *Bielenin K.* Sprawozdanie z badan nad starozytnym hutnictwem swietokrzyskim w 1965 r. // *Materiały archeologicke*. — 1967. — N 8. — S. 241—251; *Bielenin K.* Badania nad starozytnym hutnictwem... — S. 159—177; *Bielenin K.* Sprawozdanie z badan... — S. 24—251; *Bielenin K.* Starozytne gornictwo i hutnictwo... — 179 s.

⁷ *Mamzer H.* Bloomery site of la Tene and Early Romano-Barbarian periods at Psary. Poland // *Archeologicke rozhledy*. — 1984 b. — N 36. — S. 682—683.

⁸ *Bielenin K.* Erkundung archaologischer Objekte... — S. 79—97.

⁹ *Hazek V., Mayer S.* Prispевek k uplatneni geofyziky pri archeologicckem vyzkumu zelezarskych peci na Blansku // *Sbornik okresneho vastivegneho muzea v Blansku*. — 1974/75. — 6/7. — 1977. — S. 57—65; *Hazek V., Horak T., Ludikovskyy K., Souchopova V.* Komplexni archeologiccki vyzkum hutnickeho strediska v Sudicich // *Geologiccki vyzkum hutnickeho strediska v Sudicich* // *Geologiccky pruzkum*. — 1977. — N 19. — S. 296—300; *Grollich V., Souchopova V.* Uziti geoficikalnych mereni pri zjstovani Lokalit zelezarskych peci // *Rozprawy narogniho technickeho muzea v Ptaze*. — 1977. — N 69. — S. 13—23; *Ludikovskyy K.* Die Fragen der Archeologischen Kampfeldforschungen in Mahren // *Inter. Symp. Mechanization of the Archeological Fieldwork (chojnice 15—17. IX 1977)* // *Archeologia Baltica*. — 1978. — T. 3. — S. 79—103.

¹⁰ *Паньков С. В.* О развитии черной металлургии на территории Украины в конце I тысячелетия до н. э. — первой половине I тысячелетия н. э. // *СА*. — 1982. № 4. — С. 201—213.

¹¹ *Utecht von Tomm U., Stumpel H.* Magnetic prospection in Ioldelund, North-West Germany // *Archeologicke rozhledy*. — 1985. — N 38. — S. 467—468; *Ions H.* Early iron smelting at Ioldelund Kreis Nord Frisland, Germany // *Ibid.* — 1992. — T. XLIV. — S. 313.

¹² *Abrahamsen N., Breiner N.* Archaeomagnetic investigations in Denmark // *A review NAC*. — 1992.

¹³ *Voss O.* Iron furnaces in Denmark. *Archaeometallurgy of iron* // *Inter. Symp. of the Comite pour la siderurgie ancienne de L'UISPP (Lublice, 5—9 October 1987)*. — Prague, 1989. — P. 171—184.

¹⁴ *Aitken M. I., Alldred I. C.* A simulator-trainer for magnetic prospection // *Archaeometry*. — 1964. — T. 7. — P. 27—35; *Тархов А. Г., Бондаренко В. М., Никитин А. А.* Комплексование геофизических методов. — М., 1982. — 231 с.

¹⁵ *Abrahamsen N., Breiner N.* Archaeomagnetic investigations...

¹⁶ *Тархов А. Г., Бондаренко В. М., Никитин А. А.* Комплексование геофизических методов...

¹⁷ *Станюкович А. К., Ружин Ю. Я.* Методы обнаружения локальных ферромагнитных изменений объектов в грунте при помощи цифровых магнитометров // *Препр. ИЗМИР АН СССР*. — 1988. — № 73. — 25 с.

¹⁸ *Паньков С. В.* О развитии черной металлургии на территории Украины... С. 201—213; *Його ж.* Металлургия железа у племен Восточной Волыни (Житомирщина) рубежа и первой половины I тыс. н. э. // *СА*. — 1992. — № 1. — С. 192—197.

¹⁹ *Utecht von Tomm U., Stumpel H.* Magnetic prospection in Ioldelund... — P. 467—468.

²⁰ *Linington R. F.* The use of the simplified anomalies in magnetic surveying // *Archaeometry*. — 1964. — N 7. — S. 3—13; *Фаустовский У. Ф.* Методика морской съемки. — М., 1989. — 116 с.

²¹ *Hood P., McClure D. I.* Gradient measurements in ground magnetic prospecting // *Geophysics*. — 1965. — N 30. — P. 403—410.

O. Voss, N. Abrahamsen, T. M. Smekalova

МАГНИТНАЯ СЪЕМКА ДРЕВНЕГО ЖЕЛЕЗОДОБЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА В г. СНОРУП (ДАНИЯ)

В статье изложены результаты магнитной съемки центра экстенсивной железодобычи 3—4 ст. н. э., выявленного в районе г. Сноруп на территории Южной Ютландии. Рассмотрена последовательность магнитной съемки: метод свободного поиска, метод фиксированных профилей и метод фиксированной сетки. Разработан вопрос об улучшении разрешающей способности магнитной съемки с помощью дифференцированного метода измерения. Сделан вывод о том, что магнитная съемка позволяет решать важные проблемы полевого исследования центров древней экстенсивной железодобычи — определять места их расположения и границы, выявлять детальную планировку, количество и массу отдельных шлаковых конгломератов, заполняющих углубленные в землю котлованы металлургических горнов.

O. Voss, N. Abrahamsen, T. M. Smekalova

MAGNETIC SURVEY OF THE ANCIENT IRON-MINING CENTER AT SNORUP (DENMARK)

The results of the magnetic survey of the center of extensive iron-mining dated to the 3-4 centuries AD, which was revealed near the town of Snorup on the territory of the South Jutland, are presented. The sequence of the magnetic survey is as follows: the method of free search, method of fixed profiles, and method of a fixed net. We analyze the problem of improvement of the resolving power of magnetic survey by using the differential method of measurement and infer that magnetic survey allows one to solve the important tasks of the field investigation of centers of ancient extensive iron-mining, e.g., to determine the places of their location and boundaries and to reveal a detailed planning as well as the amount and mass of separate slag conglomerates filled the deepened trenches of metallurgical furnaces.

Одержано 24.01.2000