

# Геомагнітне знімання та петромагнітна характеристика ґрунтів та археологічних об'єктів пам'яток пізньоримського часу біля Комарова у Середньому Подністрів'ї

*К.М. Бондар<sup>1</sup>, О.В. Петраускас<sup>2</sup>, Р.В. Хоменко<sup>1</sup>, С.А. Попов<sup>1</sup>, 2022*

<sup>1</sup>Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут археології НАН України, Київ, Україна

Надійшла 14 травня 2021 р.

У статті наведено результати геомагнітного знімання на поселенні та могильнику виробничого центру III—V ст. Комарів (Кельменецький р-н, Чернівецька обл.), що розташовані на правому березі Дністра. На території поселення зафіксовано близько семи десятків аномалій, джерелами яких можуть бути археологічні об'єкти. Археологічні дослідження окремих аномалій очікувано підтвердили надійність геофізичної інтерпретації стосовно теплотехнічних споруд (горнів, пічок) і напівземлянок житлового та виробничого призначення, заглиблених до лесової материкової породи.

Магнітне знімання на могильнику показало близько восьми десятків локальних аномалій з інтенсивністю 1,5—4,5 нТл. Розкопками на місцях окремих аномалій виявлено землянку раннього залізного віку та два трупопокладення пізньоримського часу. При цьому дві інші розкопані інгумації не спричинили збурень геомагнітного поля.

Лабораторні вимірювання магнітної сприйнятливості, природної залишкової намагніченості та інших показників концентрації і гранулометрії феромагнітної фракції, а також магнітно-мінералогічні дослідження показали, що ями поховань, які проявилися у магнітному полі, заповнені майже виключно матеріалом гумусового горизонту ґрунту. Магнітне моделювання довело, що поховання можуть створити вимірні аномалії, якщо їхня намагніченість дорівнює намагніченості гумусового горизонту ґрунту. Отже, ями вказаних поховань були залишені відкритими і затікали зволеним гумусованим матеріалом ґрунту поступово. Зокрема, створилися умови для формування орієнтаційної залишкової намагніченості.

При відновленні просторової структури пам'яток Комарова за магнітними даними необхідно враховувати їх імовірну багат шаровість, геоморфологічні особливості місцевості, які можна помилково визначити як археологічні об'єкти, а також те, що важливі зразки давньої архітектури, споруджені з немагнітних матеріалів, і ями поховань, засипані одразу після розкопування, не створюватимуть магнітних аномалій.

**Ключові слова:** геомагнітне знімання, петромагнітні властивості, магнітне моделювання, Комарів, пізньоримський час.

**Вступ.** До теперішнього часу в світі накопичений значний досвід пошуків і картування стародавніх поселень і могильників за допомогою археолого-геофізичних методів [Clark, 1996; Gater, Gaffney, 2003; Кошелев, 2005; Schmidt et al., 2016; Fassbinder, 2015; Орлюк и др., 2016]. Особливе місце у становленні археологічної геофізики, як і власне археології, в Європі займають

пам'ятки римського часу завдяки поширеності на територіях передових держав, насамперед у Німеччині та Великобританії. Римські міста і табори не тільки активно досліджуються, а й стають полігонами для апробації нових археогеофізичних технологій і обладнання [Neubauer, Eder-Hinterleitner, 1997; Neubauer et al., 2002; Fassbinder&Gorka, 2009; Fassbinder, 2015;

Garcia-Garcia et al., 2016; Garcia-Garcia et al., 2017].

Так, детальні магнітні знімання цезієвими магнітометрами римського міста Карнунтум, що на сході Австрії, дали змогу скласти план міста, який був доповнений за результатами дослідження георадарами та методами опору заземлень. Просторова структура пам'ятки отримала додаткову деталізацію з використанням мультиплексації та спільної обробки зображень [Neubauer et al., 1996; Neubauer, Eder-Hinterleitner, 1997; Neubauer et al., 2002].

Магнітометрія стала інструментом хронологічного аналізу багатошарових пам'яток. Цей прийом отримав назву «магнітної стратиграфії». Так, на римському таборі Бургзалах (Burgsalach) у Баварії за магнітними даними були розпізнані принаймні дві фази будівництва. Маленький табір розміром 40×40 м був укріплений палісадом, визначеним за аномалією від маленького вузького рівчака. Пізніше табір був розбудований до підпрямокутної структури розміром 100×120 м. Сліди старого палісаду перекриваються новими, що помітно на стику обох конструкцій. Геофізична інтерпретація підтверджується висновками з аналізу висотної моделі місцевості: симетрія та входи пізнішого табору успадковані від меншого та старшого таборів [Fassbinder, Gorka, 2009; Fassbinder, 2015].

Магнітне знімання загалом є ефективною технологією археологічної розвідки. Втім трапляються випадки, коли воно не може бути використано для остаточного оцінювання площі пам'ятки. Так, на нещодавно відкритому римському місті Ауріц (Бургет) у Наваррі (Іспанія) градієнтометрія за вертикальною складовою геомагнітного поля надала детальне планування основної частини міста, що постало уздовж римської дороги, яка хронологічно передувала будівлям [Garcia-Garcia et al., 2016; Garcia-Garcia et al., 2017]. Водночас результати показали важливі відмінності в магнітному контрасті відкладів у межах обстеженої ділянки. Попри те що стіни основної частини міста визначаються добре, деякі

його частини не виявляють помітного магнітного контрасту, хоча їх існування було доведено іншими методами. Причина полягає у маленькій товщині культурного шару, а також у перезволоженні місцевості, що призвело до вимивання магнітних оксидів з археологічних відкладів.

Найбільш цікавими і переконливими з точки зору інформативності геофізичних методів є роботи, в яких результати магнітних зніманий підтверджуються розкопками, а також роботи, в яких аномалії отримують якісне і кількісне пояснення в контексті магнетизму вмісних ґрунтів відповідної природно-кліматичної зони [Tite, Mullins, 1971; Smekalova et al., 2016; Fassbinder, 2017; Бондар та ін., 2019; Pickartz et al., 2020].

Поховані археологічні об'єкти — рови, житла, горни, ями тощо — і окремі артефакти викликають збурення геомагнітного поля. На магнітних картах чітко виділяються споруди, зроблені з обпаленої глини. Це печі, горни, вогнища, глинобитні споруди, керамічні вимостки різного призначення тощо. Під час обпалення або внаслідок пожежі утворюються нові магнітні мінерали — магнетит і маггеміт — і об'єкт набуває сильної термозалишкової намагніченості.

Чутливість сучасної апаратури дає змогу впевнено реєструвати і менш контрастні аномалії, забезпечуючи високу роздільну здатність методу щодо структури культурного шару пам'яток.

Походження і розподіл намагніченості в культурному шарі зазвичай визначається підвищеною магнітною сприйнятливістю археологічної речовини порівняно з непорушеним вмісним ґрунтом. Навіть якщо об'єкт не містить обпалених матеріалів, таких як кераміка, обмазка, горілий ґрунт, він все одно може спричинити збурення геомагнітного поля, викликане заповненням археологічних структур з негативним рельєфом (ям, ровів тощо), гумусованим ґрунтом, збагаченим сильно магнітними оксидами заліза [Кошелев 2005; Fassbinder 2015].

Зростання намагніченості у верхньому (гумусовому) горизонті ґрунту порівняно з материнською породою є добре відомим

явищем. Було запропоновано кілька механізмів зростання намагніченості в природних ґрунтах, які включають природні пожежі, утворення бактеріального магнетиту, неорганічну ферментацію [Le Borgne, 1955; Tite, Mullins, 1971; Maher, Taylor, 1988; Maher, 1998; Fassbinder, Stanjek, 1993].

Магнітні мінерали верхнього шару ґрунту можуть зберігатись у заповнених археологічних об'єктах або зазнають перетворення внаслідок дії біологічних [Lovley et al., 1987; Fassbinder, Stanjek, 1993; Linford, 2004] або неорганічних [Maher, Taylor, 1988; Chen et al., 2005] процесів. Так, Й. Фассбіндер та Х. Штанійск виділили магнетит, який утворився всередині ґрунтових магнітотактичних бактерій у стовпових ямах, що привело до формування відповідних магнітних аномалій [Fassbinder, Stanjek, 1993]. Н. Лінфорд спостерігала позитивні магнітні аномалії над окремими могилами і довела, що розкладання похованого людського тіла й інших органічних залишків може спричинити зростання вмісту мінералів заліза через локальні зміни рН, окисно-відновного потенціалу і стану поживних речовин [Linford, 2004].

Роль природної залишкової намагніченості (NRM — natural remanent magnetization) у формуванні слабких аномалій археологічного походження вивчається рідко, хоча нехтувати нею не можна, адже відношення залишкової намагніченості до індуктивної для археологічних ґрунтів становить  $Q \sim 1$  [Bevan, 2016; Smekalova et al., 2016; Fassbinder, 2017; Бондар та Матвіїшина, 2018]. Інакше кажучи, керуючись при оцінюванні намагніченості земляної конструкції тільки магнітною сприйнятливістю ( $k$ ), можна недооцінити її вдвічі. Слабка NRM формується в ґрунтах за відсутності дії високих температур унаслідок орієнтаційних та посторієнтаційних процесів, а також хімічних перетворень первинних магнітних мінералів [Fassbinder, 2015, 2017]. Відомо, що руйнування NRM у разі механічного перемішування ґрунту, яке відбувається кожного разу під час копання і засипання ями матеріалом, який з неї вийняли, пояснює наявність негативних

магнітних аномалій на місцях поховань [Fassbinder, Irlinger, 1998; Fassbinder, 2015]. Тому кількісна оцінка слабких магнітних аномалій від заповнення ям має враховувати NRM.

Інтенсивність геомагнітної аномалії від могили суттєво залежить від типу ґрунту. Педогенні оксиди заліза є чутливими індикаторами ґрунтоутворення [Churchman, Lowe, 2012; Jordanova, 2016]. Відповідно магнітний сигнал від подібного об'єкта визначається складом і трансформаціями матеріалу заповнення.

Отже, збурення геомагнітного поля над похованнями бувають зумовлені: 1) поховальними спорудами типу склепів, кам'яних ящиків, закладів та ін.; 2) ґрунтовим заповненням поховальної ями; 3) контрастом намагніченості, яка формується у ґрунті внаслідок розкладання безпосередньо самого тіла і супровідних органічних матеріалів [Linford, 2004; Fassbinder, 2015; Бондар та ін., 2019].

У 2012—2019 рр. на поселенні та могильнику пізньоримського часу Комарів автори статті виконували дослідження, які включали високоточні геомагнітні знімання ділянок поселення та могильника, відбір орієнтованих зразків ґрунтів та археологічних матеріалів з розкопів, лабораторні петромагнітні дослідження, а також створення фізико-археологічних моделей окремих об'єктів. Окреслений комплекс досліджень наштовхнув на низку висновків і дав змогу по-новому оцінити магнітометрію як метод вивчення організації простору поселень і могильників черняхівської культури.

**Характеристика пам'яток археологічного комплексу Комарів.** Комплекс пам'яток пізньоримського часу із залишками скляного виробництва Комарів розташований у Кельменецькому р-ні Чернівецької обл. на правому березі р. Дністер. Він складається з поселення (Комарів) та могильника (Комарів-1) (рис. 1).

Культурний шар поселення зафіксовано вздовж двох схилів (південного і північного) невеликого безіменного струмка, який через 5 км впадає в р. Дністер. За-



Рис. 1. Положення пам'яток археологічного комплексу Комарів на карті України (а), біля сіл Комарів та Дністрівка (б) та схема розташування полігонів геомагнітного знімання (в).

Fig. 1. Location of Komariv archaeological complex on the map of Ukraine (a), near villages Komariv and Dnistrivka (b) and a map of magnetic survey plots (v).

гальна площа поселення становить близько 30—35 га. Моги́льник, синхронний поселенню, розташований на південному березі струмка і займає мис, утворений долинами двох маленьких струмків. Уся поверхня поселення та моги́льника розорюється до глибини 0,2—0,3 м. Найбільші пошкодження поселення отримало через будівництво дороги Комарів—Кельменці у 1960-х роках.

Під час багаторічних робіт встановлено, що на пам'ятці наявні матеріали: доби палеоліту, бронзи (II тис. років до н.е.), раннього залізного віку (IX/VIII—IV/III ст. до н.е.) і раннього середньовічного часу (VI—VII ст. н.е.). Проте це окремі комплекси та поодинокі знахідки. Переважна частина археологічного матеріалу належить до пізньоримського часу (III — перша пол. V ст. н.е.) [Смішко, 1964; Петраускас, 2014].

Поселення черняхівської культури біля Комарова було відкрито А. П. Чернишом у 1950 р. У 1956—1957, 1962, 1965 та

1969 рр. розкопки на пам'ятці провадив М. Ю. Смішко. За цей час було розкопано 3732 м<sup>2</sup> площі і досліджено близько 37 об'єктів пізньоримського часу та три споруди раннього залізного віку. У 1974 р. розкопки на поселенні продовжила Ю. Л. Щапова [Щапова, 1978]. На площі 192 м<sup>2</sup> були відкриті дві житлові споруди та один гончарний горн.

У 2012—2020 рр. археологічні дослідження пам'ятки продовжила спільна експедиція Інституту археології (Київ), Рятівної археологічної служби України (Львів) НАН України. З 2014 р. роботи виконують у рамках українсько-німецького проєкту з Вільним Університетом Берліну та Інститутом старожитностей ім. Генріха Шлімана Університету Росток. За час роботи експедиції розкопано понад 1100 м<sup>2</sup> площі поселення, де досліджено 29 стаціонарних археологічних об'єктів. Основні типи споруд, які зафіксовані на поселенні, такі: наземні будівлі з глинобитними кон-



струкціями (до гл. 0,6/0,7 м); наземні споруди стовпової конструкції (до гл. 0,3—0,5 м); напівземлянки (заглиблені в материк до 1,7 м); будинок на кам'яному фундаменті; гончарні горни; піч склоплавильна з плінфи; наземні вогнища переважно з каменю; споруди господарського та виробничого призначення (ями, будівлі тощо).

У 2012 р. експедицією відкритий синхронний поселенню могильник Комарів-1, на якому за цей час розкрита площа 400 м<sup>2</sup> і досліджено 12 трупопокладень. [Петраускас, Шишкін, 2020; Петраускас, Авраменко, 2020].

**Методика досліджень.** *Магнітне знімання.* Роботи проводили в межах трьох полігонів, два з яких розташовані на поселенні і опрацьовані у 2012 і 2014 рр., а третій — на могильнику, відзнятому у 2014 та 2019 рр. (рис. 1, в).

Модульні магнітометричні спостереження — вимірювання індукції геомагнітного поля — виконано цезієвими магнітометрами з оптичною накачкою ПКМ-1 (Геологоразведка, РФ), датчики яких мають роздільну здатність 0,001 нТл, межа СКВ вимірювання магнітної індукції 0,01 нТл.

Методика детально описана в роботі [Бондар та ін., 2019]. Тут коротко наведемо основні особливості. Було використано два магнітометри, закріплені горизонтально на алюмінієвій рамі на відстані 0,5 м один від одного. Обидва прилади працювали в режимі 10 вимірювань на секунду, що давало просторову роздільну здатність близько 0,12 м за профілем. Таким чином, індукцію геомагнітного поля реєстрували із просторовою детальністю 0,5×0,12 м. Описана методика геомагнітного знімання подібна до застосованих у публікаціях [Becker, 2001; Fassbinder, 2015; Fassbinder, 2017]. Знімання двома приладами одночасно без реєстрації варіацій зумовлено бажанням оптимально використати наявний апаратний ресурс (2 магнітометри).

В процесі обробки польових даних добова варіація геомагнітного поля, яка має плавний характер, врахована при відніманні медіанного значення за профілем. Ця процедура є фактично вилученням

нормальної складової поля. Високочастотний «шум» прибрали, застосувавши фільтр нижніх частот з арсеналу Golden Software Surfer 15. Отримані у такий спосіб залишкові аномалії відображають археологічні структури, магнітне сміття й ефекти, що виникають унаслідок оранки та проїзду важкої техніки.

За інтерпольованою мережею залишкових значень поля з детальністю 0,25×0,25 м побудовано карти аномалій магнітної індукції ( $B_a$ ) по трьох полігонах (рис. 2, 4, 6).

*Ґрунтовий покрив і відбір зразків.* Ґрунтовий покрив на пам'ятках археологічного комплексу Комарів складений темносірим ґрунтом (Greyzem Naplic відповідно до міжнародної класифікації WRB-FAO) [IUSS Working Group WRB..., 2015]. Опис його генетичних горизонтів, розкритих на могильнику Комарів-1, наведено в табл. 1. Це так званий фоновий ґрунт, в якому заглиблені археологічні об'єкти (в даному випадку, поховання). Ще один фоновий ґрунтовий розріз було досліджено на території поселення (полігон 2).

Під час археологічних розкопок відбирали орієнтовані зразки ґрунтів та археологічних матеріалів, які потім підлягали лабораторним магнітним дослідженням. З археологічних об'єктів полігона 2 всього відібрали 45 зразків.

Детально опробовано три вертикальні колонки ґрунтів: 1) 49 зразків фонового ґрунту з поселення; 2) 36 зразків фонового ґрунту з могильника; 3) 18 зразків із заповнення поховання № 11 на могильнику. Відбір виконано з вертикальним кроком 5—10 см, по 2—3 зразки з кожного рівня. Всі зразки орієнтовані, монолітні, являють собою циліндри з висотою і діаметром основи, що дорівнюють одному дюйму і об'ємом 10 см<sup>3</sup>. Зразки вирізали за допомогою ручного пробовідбірника, елементи залягання в розрізі фіксували за допомогою гірського компаса. Весь період перед лабораторними вимірюваннями моноліти зберігали за напрямком геомагнітного поля.

*Лабораторні магнітні вимірювання.* Вимірювання на зразках виконано у ННІ «Ін-

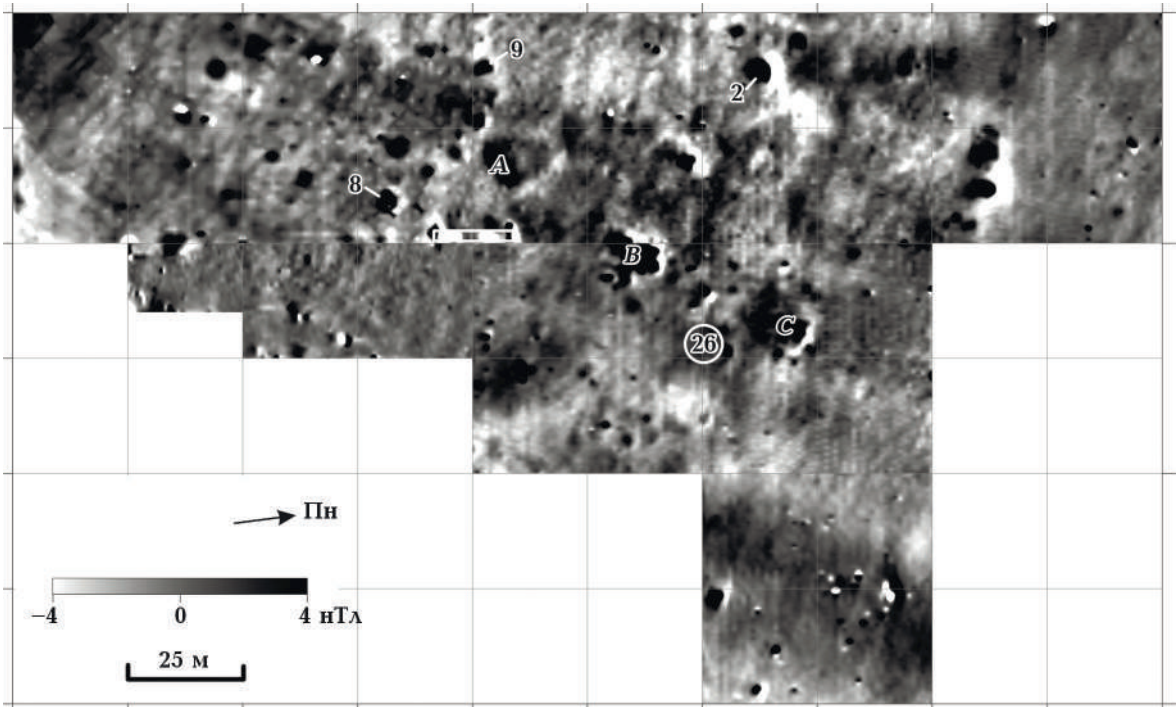


Рис. 2. Карта аномалій магнітної індукції полігона 1 на поселенні. Цифрами позначено розкопані археологічні об'єкти — джерела відповідних аномалій; цифрами в колах — місцезнаходження об'єктів, які не дали аномалій; літерами — комплексні аномалії, описані в тексті. Білим прямокутником показано контур розкопу 2011 р. (за рік до дати знімання).

Fig. 2. Magnetic map of plot 1 at the settlement. Figures show location of excavated archaeological objects — sources of particular anomalies; figure in circle show location of excavated archaeological object creating no anomaly; letters show combined anomalies explained in the text; white rectangle shows excavation trench of 2011 (one year before surveying).

ститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, а також у геомагнітній лабораторії Відділення наук про Землю Університету Людвіга-Максиміліана в Мюнхені.

*Параметри, що характеризують здатність археологічного об'єкта до утворення аномалії геомагнітного поля.* Щоб розрахувати магнітну аномалію від об'єкта, необхідно знати його сумарну намагніченість ( $M_T$ ), а в разі слабкої аномалії —  $M_T$  вмісного середовища (грунту). Аномальний ефект створюється завдяки різниці цих намагніченостей.

$M_T$  є векторною сумою індуктивної ( $M_i$ ) та природної залишкової намагніченості (NRM — natural remanent magnetization).  $M_i$  та NRM археологічних об'єктів можна вважати спрямованими за сучасним геомагнітним полем, отже,  $M_T$  є простою сумою їх модулів:

$$M_T = M_i + \text{NRM}.$$

Індуктивна намагніченість ( $M_i$ ) розрахована як добуток об'ємної магнітної сприйнятливості ( $k$ ) і медіанного значення модуля індукції геомагнітного поля на пам'ятці  $B=50166$  нТл;  $k$  є найважливішим показником здатності речовини намагнічуватись під дією магнітного поля. Вона виміряна на приладі Bartington MS2B на нижній частоті з точністю  $10^{-5}$  од. СІ. NRM, а також лабораторні види намагніченості, описані нижче, виміряно на спін-магнітометрі Agico JR6. Обраховано відношення Кениксбергера ( $Q=\text{NRM}/M_i$ ) [Koenigsberger, 1930].

*Магнітна мінералогія* на зразках ґрунтів досліджена на підставі температур Кюрі і фазових перетворень, що спостерігаються при вимірюванні намагніченості  $M$  в процесі нагрівання і охолодження. Експерименти проводились на магнітних вагах

VFTB (Variable Field Translation Balance), Petersen Instruments [Krása et al., 2007].

Намагніченість автоматично реєструвалася при нагріванні зразків зі швидкістю 40°/хв до температури 700 °С і подальшому охолодженні до кімнатної температури. За такого швидкого нагрівання відбувається вивільнення газів СО/СО<sub>2</sub> внаслідок розпаду карбонатів, які зазвичай наявні у лесових ґрунтах, і створюються відновні умови, за яких фазові перетворення магнітних мінералів виявляються яскравіше [Jordanova, Jordanova, 2016]. Напруженість магнітного поля становила 180 мТл, що недостатньо для того, аби намагнітити до насичення такі висококоерцитивні мінерали, як гематит або гетит.

Параметри і відношення, які характеризують концентрацію і гранулометрію магнітних мінералів. Питома магнітна сприйнятливість ( $\chi$ ) є показником концентрації магнітних мінералів у речовині, вона розрахована як  $k$  і віднесена до маси висушеного зразка.

Показником відносного вмісту суперпарамагнітної фракції у ґрунті є частотна залежність магнітної сприйнятливості ( $k_{fd}$  %). Вона розрахована за даними вимірювань зразків на двох частотах на приладі Bartington MS2B ( $k_{lf}$  на 0,47 і  $k_{hf}$  на 4,7 кГц):  $k_{fd} \% = [(k_{lf} - k_{hf}) / k_{lf}] \times 100$  %. За високого вмісту дрібних зерен у суперпарамагнітному однодоменному стані  $k_{fd} \% > 6$  %, тоді як домінування багатодоменних зерен приводить до зменшення  $k_{fd} \% < 6$  % [Dearing et al., 1996; Dearing, 1999]. Показниками

концентрації є також лабораторні види намагніченості. Ідеальна залишкова намагніченість (ARM — Anhyseretic remanent magnetization) створена за дії постійного поля 100 мкТл і максимального змінного поля 100 мТл. Залишкова ізотермічна намагніченість насичення (SIRM — saturation isothermal remanent magnetization) створена у полі 1 Тл.

Відносний внесок мінеральних фаз з різною жорсткістю оцінено за співвідношенням  $S = \text{IRM}_{100} / \text{SIRM}$ , де  $\text{IRM}_{100}$  — залишкова намагніченість, отримана в полі 100 мТл, прикладеному у зворотному напрямку до поля насичення, в якому попередньо була створена SIRM. Значення  $S$ , близькі до одиниці, засвідчують домінування магнітом'яких мінералів на кшталт магнетиту; значення, близькі до нуля, вказують на переважання магнітожорсткої фази (гематит або гетит) [Evans, Heller, 2003; Peters, Dekkers, 2003].

Аналогічну інформацію несуть співвідношення  $k_{\text{ARM}}/k$  та ARM/SIRM. За однакової мінералогії вони можуть слугувати як порівняльні параметри, чутливі до розміру зерен. Високі значення засвідчують домінування однодоменних (SD) зерен, низькі — багатодоменних (MD) і суперпарамагнітних (SP) [King et al., 1982; Liu et al., 2012; Jordanova, 2016].

Петлі гистерезису зразків зняті за допомогою магнітних ваг VFTB (Variable Field Translation Balance), Petersen Instruments. Параметри петлі (намагніченість насичення ( $M_s$ ), залишкова намагніченість наси-



Рис. 3. Фотографії вибраних археологічних об'єктів, розкопаних в межах полігона 1: а — горн № 2, б — житло-напівземлянка № 8, в — споруда на кам'яному фундаменті № 26.

Fig. 3. Images of selected archaeological objects excavated within plot 1: а — kiln No 2, б — dugout No 8, в — stone building basement No 26.



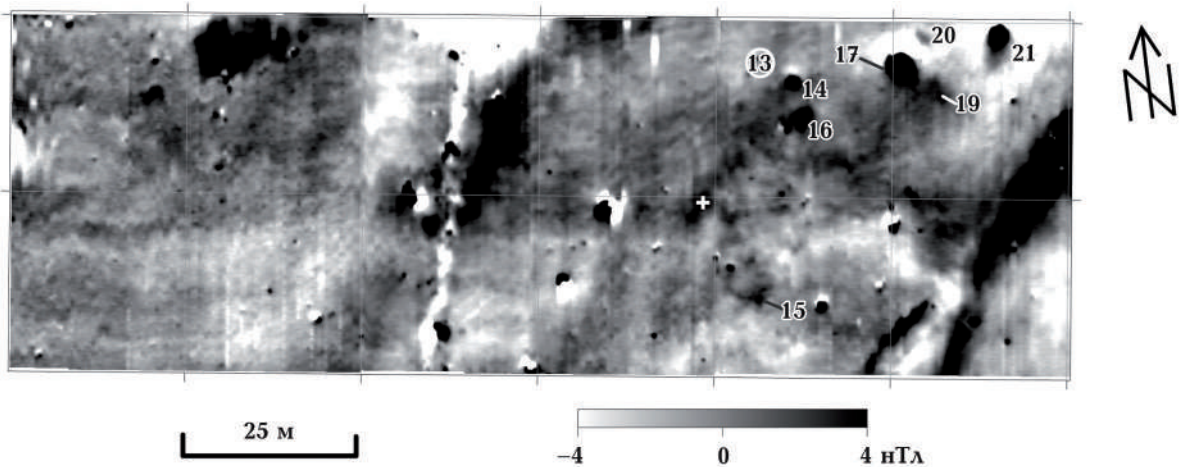


Рис. 4. Карта аномалій магнітної індукції полігона 2 на поселенні. Цифрами позначено розкопані археологічні об'єкти — джерела відповідних аномалій, цифрами в колах позначені місцезнаходження об'єктів, які не дали аномалій, хрестиком — геоморфологічна аномалія, описана в тексті.

Fig. 4. Magnetic map of plot 2 at the settlement. Figures show location of excavated archaeological objects — sources of particular anomalies; figures in circles show location of excavated archaeological objects creating no anomaly; cross shows an anomaly of geomorphological origin explained in the text.

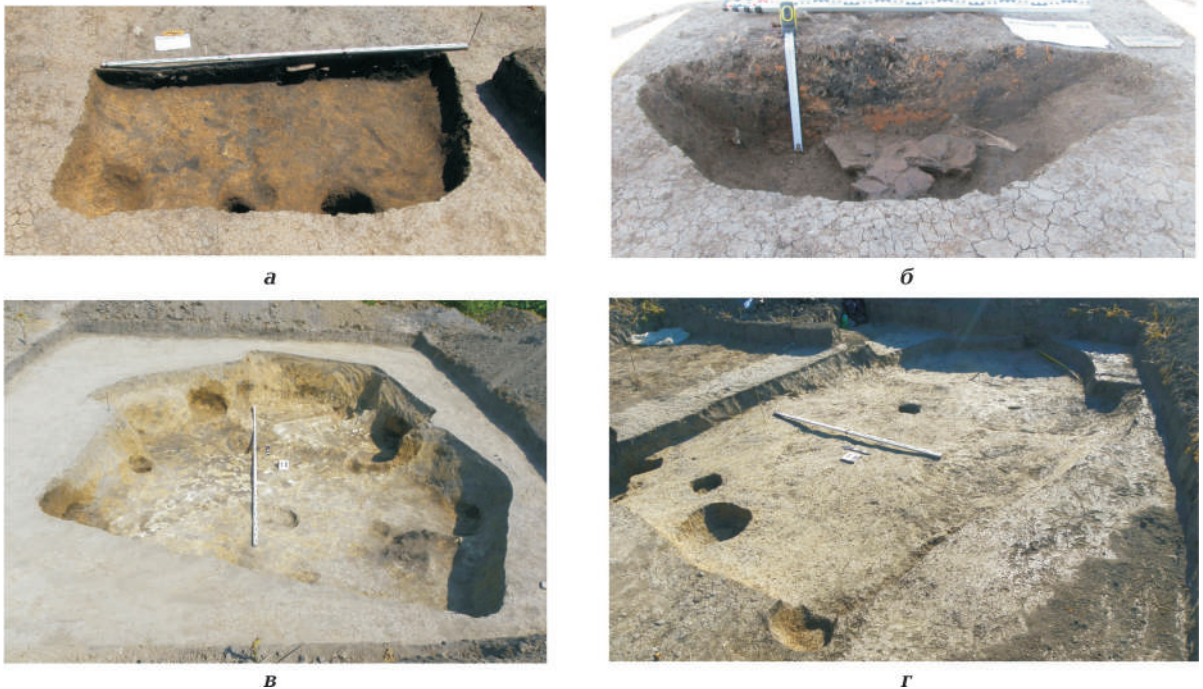


Рис. 5. Фотографії вибраних археологічних об'єктів, розкопаних в межах полігона 2: а — житло-напівземлянка № 13, б — сміттєва яма № 14, в — виробнича споруда № 15, г — житлова споруда № 19.

Fig. 5. Images of selected archaeological objects excavated within plot 2: а — dugout No 13, б — pit No 14, в — workshop No 15, г — dwelling No 19.

чення (SIRM), коерцитивна сила ( $B_c$ ) визначені після редукції за парамагнітний вплив, окремо знята крива розмагнічування SIRM — оберненим полем, з якої визначено руйнуюче поле  $B_{cr}$ .

**Результати геомагнітного знімання на поселенні, їх інтерпретація та археологічна перевірка.** Полігони 1 та 2 геомагнітного знімання знаходяться в межах північно-західної та південної частин поселення від-



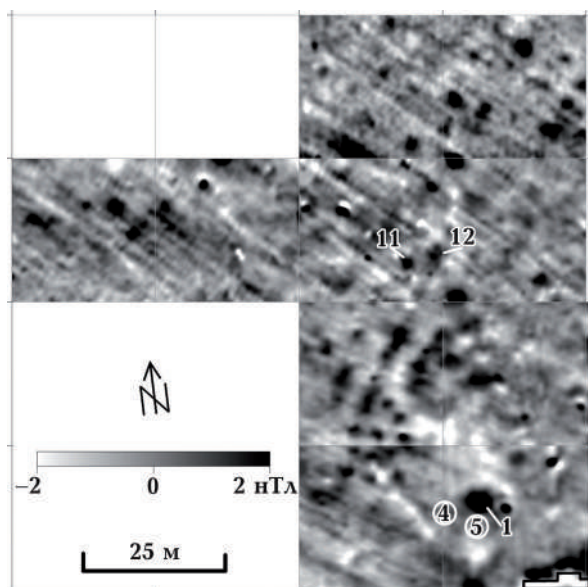


Рис. 6. Карта аномалій магнітної індукції полігона 3 на могильнику. Цифрами позначено розкопані археологічні об'єкти — джерела відповідних аномалій, цифри в колах — місцезнаходження об'єктів, які не дали аномалій. Чорним показано контур розкопу 2013 р. (за рік дати до знімання).

Fig. 6. Magnetic map of plot 3 at the cemetery. Figures show location of excavated archaeological objects — sources of particular anomalies; figures in circles show location of excavated archaeological objects creating no anomaly; black polygon shows excavation trench of 2013 (one year before surveying).



Рис. 7. Фотографії вибраних археологічних об'єктів, розкопаних в межах полігона 3: а — напівземлянка доби раннього залізного часу № 1, б — інгумація № 4, в — інгумації № 11 та 12.

Fig. 7. Images of selected archaeological objects excavated within plot 3: а — dugout from the Early Iron Age No 1, б — grave No 4, в — graves No 11 and 12.

повідно (див. рис. 1). На картах аномалій магнітної індукції виділяється чимало локальних збурень, більше семи десятків з яких можуть бути віднесені до окремих археологічних об'єктів або цілих комплексів давніх споруд (див. рис. 2, 4). Насамперед

це знаковмінні аномалії, в яких позитивна частина з інтенсивністю 27—100 нТл має ізометричну форму, а з півночі її облямовує негативна аномалія, інтенсивність якої становить 16—18 % від позитивної. Такі аномалії властиві потужним об'єктам з гли-

ни, які зазнали обпалення *in situ* — виробничим горнам. Площа аномалії зазвичай набагато перевищує розміри об'єкта. За останні роки деякі з них досліджено археологічно, виявлено потужні гончарні горни двоярусної конструкції № 2, 9, 17, 21, а також сміттєва яма № 14, яка містила великі шматки обпаленої глини (табл. 2, рис. 3, 5). Наявність передгорнової ями, заповненої ґрунтом з рештками керамічного виробництва, часто зумовлює видовжену форму позитивної частини магнітної аномалії.

Аномалію понад 10 нТл створило житло № 8 з потужною пічкою-кам'янкою всередині. Інші житлові і господарські споруди зумовили слабкі аномалії (4—9 нТл) з розмірами, що приблизно відповідають розмірам об'єктів.

В межах полігона 1 звертають на себе увагу позитивна аномалія А з розмірами 12×5 м і комплексні аномалії В та С, які можуть бути попередньо проінтерпретовані як виробничі майстерні (рис. 2).

На поселенні були також розкопані об'єкти, які не створювали збурень магнітного поля. Це напівземлянка № 13, а також кам'яна будівля 26. Імовірно, відсутність аномалії над напівземлянкою № 13 пояснюється її малою вертикальною потужністю, адже вона заглиблена в материковий лесоподібний суглинок лише на 20 см. Втім подібна до неї за потужністю споруда № 19 створила слабку аномалію, отже, найбільш обґрунтоване пояснення криється у слабкій намагніченості заповнення напівземлянки № 13, що може бути в разі значної домішки лесоподібного суглинка в заповненні. Відсутність аномалії від кам'яної споруди № 26 пояснюється тим, що залишки її фундаментів складені з діамагнітного матеріалу — вапняку, і не є достатньо масивними, щоб спричинити негативне збурення поля.

Крім того, також була рекомендована до археологічної перевірки слабка аномалія, на місці якої (позначено хрестиком на рис. 2) не виявлено об'єкта. Розглядаючи магнітну карту полігона 2, можна бачити кілька паралельних лінійних структур — слідів колишніх ярів, орієнтованих у пів-

нічно-східному напрямку. Аномалія, позначена хрестиком, вкладається до ланцюжка дрібних магнітних збурень, орієнтованого так само. На цій підставі можемо стверджувати, що вона має геоморфологічне походження — утворилася шляхом заповнення западини гумусованим матеріалом.

**Результати геомагнітного знімання на могильнику, їх інтерпретація та археологічна перевірка.** Магнітне знімання на могильнику (полігон 3) виконано у два етапи. Роботи 2014 р. виконували на початку травня, а у 2019 р. — наприкінці липня, невдовзі після оранки (рис. 6). На «липневому» сегменті карти аномалій  $B_a$  можна бачити характерні збурення від орних борозен, менш помітних на «травневому» зніманні. На ділянці виділяється близько 80 невеликих слабких аномалій, деякі з них утворюють упорядковані скупчення. Увагу археологів привернула найбільша аномалія, джерелом якої виявилася землянка раннього залізного віку (рис. 7, а).

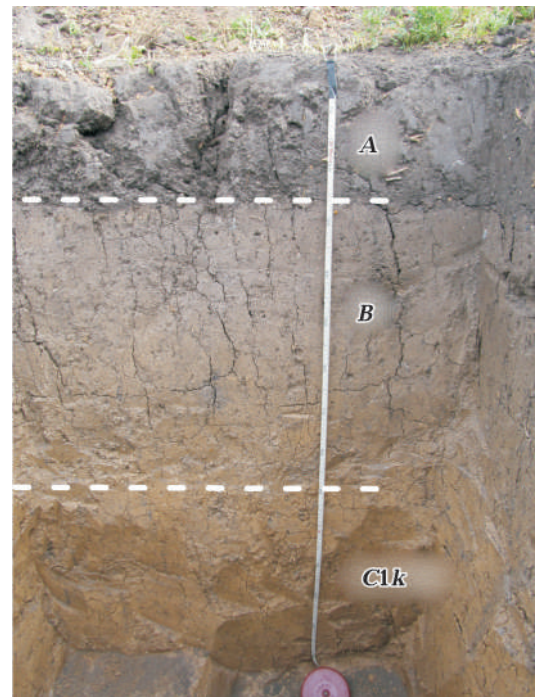


Рис. 8. Фоновий ґрунт Greyzem Naplic на могильнику.

Fig. 8. Section of background soil Greyzem Naplic at the cemetery.



Таким чином, пам'ятка виявилася багатошаровою, що необхідно враховувати при подальших дослідженнях (табл. 3). Поруч були розкопані два трупопокладення 4 та 5, які не створили магнітних аномалій (рис. 7, б). Кістки скелетів, похованих в обох могилах, були перемішані (так звані зруйновані поховання), а заповнення складалося з лесоподібного суглинку з домішкою гумусованого ґрунту.

У 2019 р. розкопано дві слабкі аномалії, джерелами яких виявились зруйновані поховання-інгумації 11 та 12, заповнення яких складалося з темно-сірого суглинку (рис. 7, в). У процесі досліджень постало питання, чому деякі зруйновані поховання спричиняють збурення в магнітному полі, а інші — ні? Відповідь шукали шляхом лабораторних магнітних вимірювань на зразках ґрунтів.

**Магнітні властивості ґрунтів і археологічних матеріалів поселення.** Фоновий ґрунт на поселенні має ознаки змиву, а саме короткий гумусовий горизонт А порівняно з фоновим ґрунтом на могильнику, де немає яскравого вияву схильних процесів (рис. 8).

Коефіцієнт  $k$  фонового темно-сірого ґрунту поступово зменшується з глибиною від  $79 \times 10^{-5}$  од. СІ в гумусовому горизонті А до  $62-30 \times 10^{-5}$  од. СІ, в ілювіальному горизонті В і  $(27-25) \times 10^{-5}$  од. СІ у материковому лесоподібному суглинку С1к. NRM та  $M_T$  також спадають з глибиною від поверхні до 70 см і мають стабільно низькі значення у горизонті С1к (рис. 9).

NRM та  $k$  заповнення житлових та виробничих об'єктів на поселенні очікувано трохи підвищена порівняно з фоновим ґрунтом завдяки домішкам фрагментів кераміки та обпаленої глини (табл. 4). У сотні разів сильніша намагніченість, властива обпаленій глині, з якої зроблено стінки теплотехнічних споруд (горнів), відношення  $Q$  досягає 41,8. У цілому дані лабораторних магнітних вимірювань підтверджують подану вище інтерпретацію археологічних об'єктів.

**Магнітні властивості природних та археологічних ґрунтів на могильнику.** Параметри, які характеризують здатність археологічного об'єкта до утворення аномалії геомагнітного поля. Розподіл магнітних властивостей за глибиною фо-

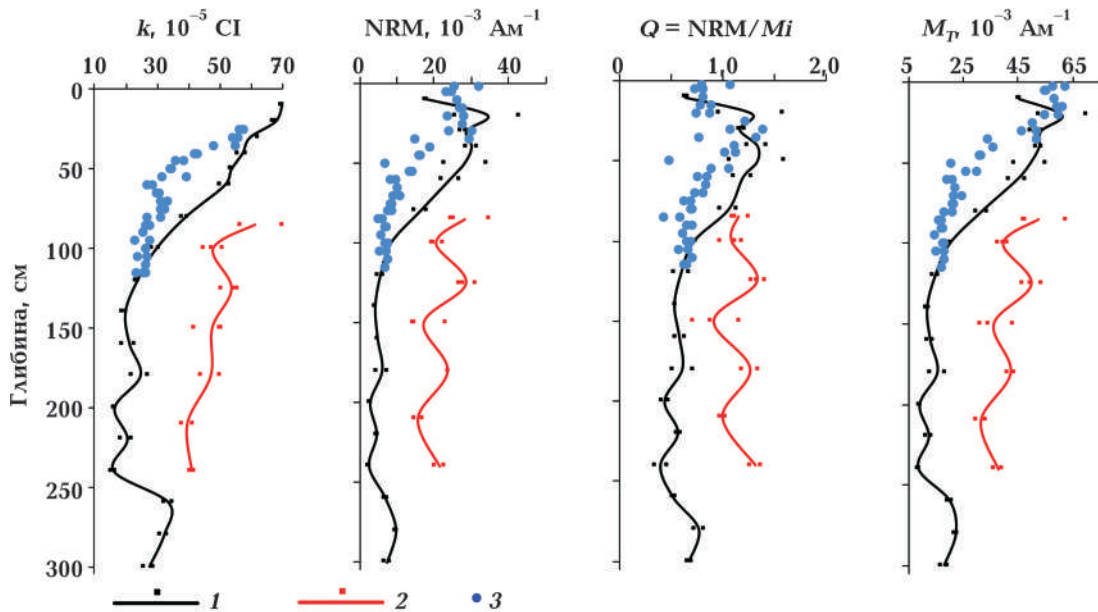


Рис. 9. Вертикальний розподіл параметрів, які характеризують здатність об'єкта до утворення аномалії геомагнітного поля: 1 — фоновий ґрунт на могильнику, 2 — заповнення поховання № 11, 3 — фоновий ґрунт на могильнику.

Fig. 9. Vertical distribution of parameters determining ability of object to create magnetic anomaly: 1 — background soil at the cemetery, 2 — infill of the grave No 11, 3 — background soil at the settlement.



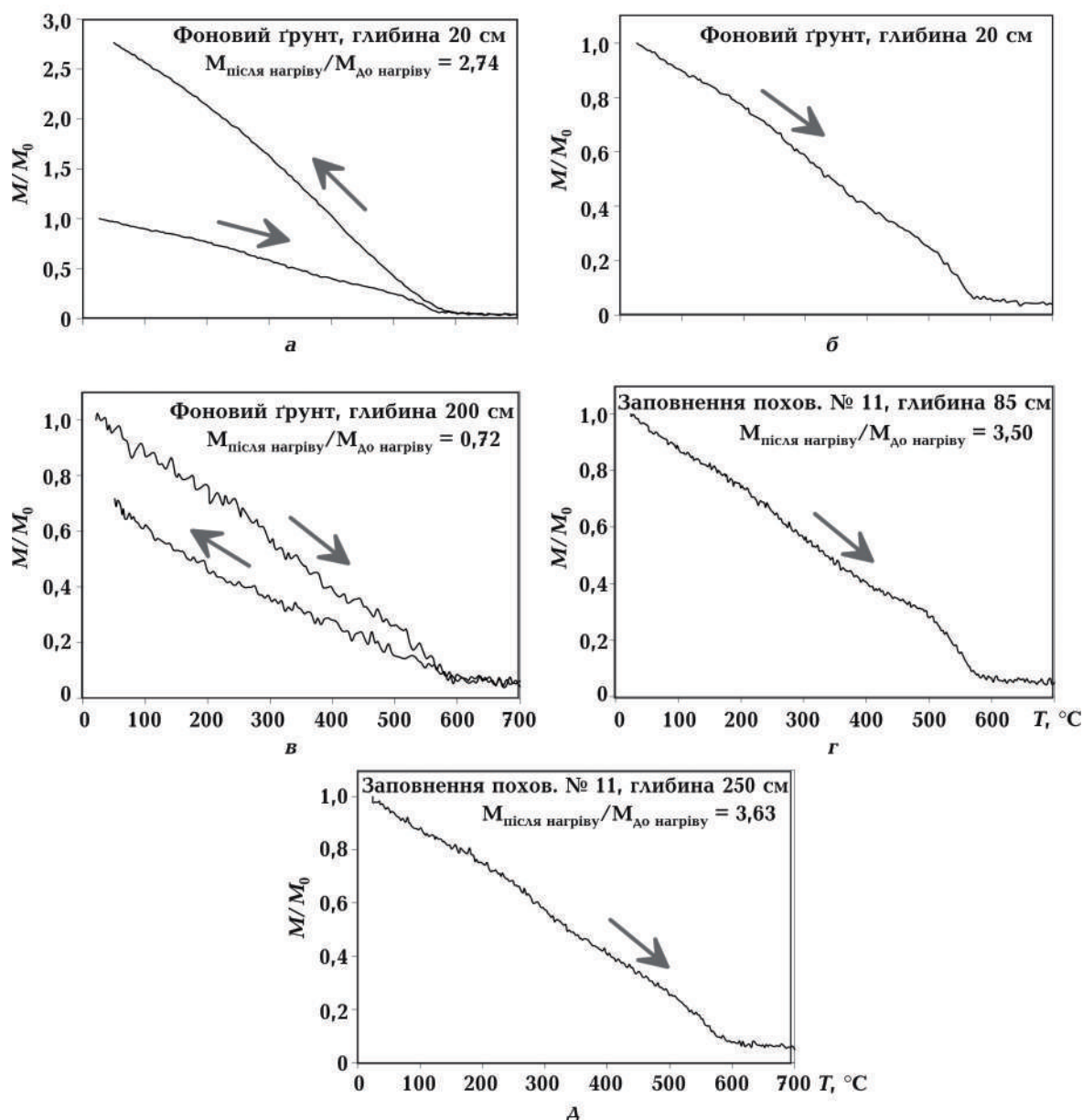


Рис. 10. Результати термомагнітного аналізу зразків фонового та археологічного ґрунтів з могильника.  
 Fig. 10. Thermomagnetic curves of background and archaeological soil samples from the cemetery.

нового ґрунту на могильнику дещо відрізняється від ситуації на поселенні завдяки більш потужному горизонту *B* (див. рис. 9). Магнітна сприйнятливість ( $k$ ) найвища в орному шарі *A*, який також відрізняється за кольором від підстильного горизонту. В горизонті *B*  $k$  поступово зменшується і досягає низьких значень в породі горизонту *C*. NRM становить від  $15$  до  $43 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  до глибини  $80$  см, а у нижній частині горизонту *B* спадає до величин, властивих лесам

$((3 \div 8) \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1})$ . Значна варіабельність NRM у верхньому шарі ґрунту ймовірно пов'язана з його перемішуванням під час оранки, коли NRM механічно руйнується по орних борознах. На глибині  $253$  см лесоподібний суглинок підстиляється зеленкуватою глиною (горизонт  $C_{k2}$ ). Як показали археологічні дослідження, межа  $C_{k1}/C_{k2}$  слугувала маркером глибини, до якої копали могили у давнину. На цьому фоні матеріал заповнення могили № 11, виявленої

археологами за темним кольором плями на рівні 80 см, демонструє стабільні за глибиною значення  $k$  та NRM, такі самі за величиною, як у гумусовому горизонті  $A$  та верхній частині горизонту  $B$  фонового ґрунту.

Відношення  $Q$  близьке до 1 як у фошовому ґрунті, так і в заповненні. Нижче 100 см, у материковому лесі, воно спадає до 0,5.

Відповідно і сумарна намагніченість  $M_T$  заповнення не змінюється з глибиною. Вона становить  $(35\div 63)\times 10^{-3}$  за середнього

значення  $45\times 10^{-3} \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ , що значно перевищує  $M_T$  лесоподібного суглинку на відповідній глибині ( $13\times 10^{-3} \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

Різниця сумарної намагніченості заповнення та вмiсного ґрунту становить  $32\times 10^{-3} \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$  і використана для створення магнітних моделей поховань № 11 та 12.

*Магнітна мінералогія.* Міркування про мінералогію магнітної фази зразків фонoвих та археологічних ґрунтів висловлені на підставі аналізу поведінки їх намагніченості в процесі нагрівання/охолодження.

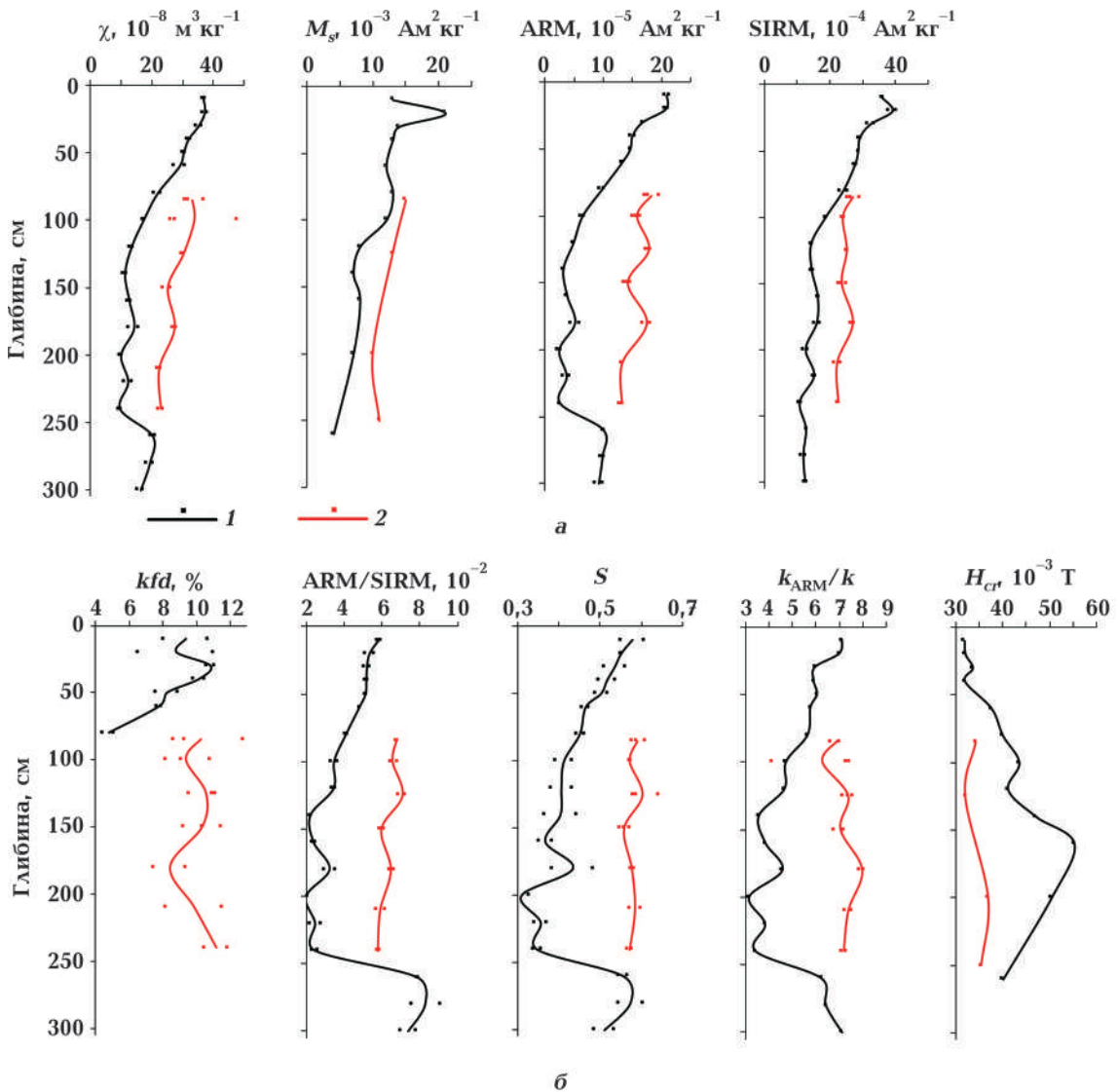


Рис. 11. Вертикальний розподіл петромагнітних параметрів, які характеризують концентрацію (а) та гранулометрію (б) магнітних мінералів: 1 — фоновий ґрунт на могильнику, 2 — заповнення поховання № 11.  
 Fig. 11. Vertical distribution of concentration-dependent (a) and grain-size-dependent (b) rock magnetic parameters: 1 — background soil at the cemetery, 2 — infill of the grave No 11.

З літературних даних відомо, що основним магнітним мінералом в українських чорноземах є маггеміт/окиснений магнетит педогенного походження. Кількість цього мінералу зменшується з глибиною, в материкових лесоподібних суглинках разом з маггемітом діагностують також гематит [Jeleńska et al., 2004, 2008; Gorka-Kostrubiec et al., 2016].

Приклади кривих  $M(T)$  для гумусового горизонту ґрунтів, материкового лесу і заповнення поховання № 11 показано на рис. 10. Для зразків верхнього шару ґрунту, так само як і з заповненням поховання, крива охолодження йде значно вище кривої нагрівання. В результаті після експерименту намагніченість зразків при кімнатній температурі зростає втричі. Можна припустити, що первинний метастабільний маггеміт в процесі нагрівання окиснюється до гематиту, який в подальшому відновлюється до магнетиту за наявності органічної речовини [Hanesch et al., 2006]. Для зразків лесу крива охолодження йде нижче, ніж крива нагрівання, що засвідчує перетворення сильномагнітного мінералу на менш магнітний (маггеміту на гематит) [Dunlop, Ozdemir, 1997; Evans, Heller, 2003].

Температури Кюрі ( $T_c$ ), отримані з кривих нагрівання і охолодження, становлять 580 °C для ґрунту і близько 600 °C для лесу.  $T_c \sim 600$  °C, ймовірно, характеризує первинний маггеміт/окиснений магнетит у лесі.

Криві нагрівання для ґрунту і для заповнення ідентичні, вони відрізняються від кривих  $M(T)$  лесового зразка. Намагніченість поступово зменшується в інтервалі температур від кімнатної до 400 °C. Невеликий вигин при 400 °C і подальше збільшення намагніченості вказують на початок утворення вторинного магнетиту в ґрунті. Цей вигин краще видно в зразках ґрунту та заповнення, він відсутній у зразках лесу.

Хоча фазові перетворення, що відбуваються під час нагрівання, не дають змоги розпізнати первинні магнітні мінерали за їхніми точками Кюрі, можна зробити висновок щодо подібності терромагнітної поведінки зразків фонового ґрунту і заповнення поховання № 11, які засвід-

чують подібність їх магнітної мінералогії.

*Параметри, які характеризують концентрацію та гранулометрію магнітних мінералів* (рис. 11). Лабораторні види намагніченості, як і показники магнітної жорсткості, демонструють зміни за глибиною, аналогічні магнітній сприйнятливості ( $k$ ,  $\chi$ ) та NRM. Високі значення ARM, SIRM і відношень ARM/SIRM,  $k_{ARM}/k$  спостерігаються у горизонті А та верхній частині горизонту В ґрунту і в заповнювачі поховання № 11, що вказує на користь більшого вмісту в них однодомених зерен сильномагнітного мінералу (маггеміту/окисненого магнетиту) порівняно з лесоподібним суглинком.

Значення  $k_{fd}$  % в гумусових горизонтах А та В фонового ґрунту і по всій потужності заповнення поховання № 11 лежать у межах 7—11 %, що свідчить про високий вміст суперпарамагнітних зерен педогенного походження [Dearing et al., 1996; Dearing, 1999].

У нижній частині горизонт У В у магнетизмі фонового ґрунту зростає роль висококоерцитивного мінералу (гематиту) з більшим розміром зерна, що приводить до зменшення  $k_{fd}$  %, ARM/SIRM, S.

Таким чином, у заповненні поховання № 11 у складі феромагнітної фракції домінують дрібні (суперпарамагнітні та однодоменні) зерна педогенного маггеміту/окисненого магнетиту, що однозначно вказує на гумусовий шар ґрунту як основне джерело матеріалу заповнення.

**Магнітне моделювання поховань.** Щоб перевірити, чи дійсно розкопані поховання № 11 та 12 є джерелами виміряних аномалій, ми звернулися до процедури синтетичного магнітного моделювання (розв'язання прямої задачі магнітометрії). Моделювання проводили за допомогою генератора геопотенціальних полів GaMField, запрограмованого у середовищі MATLAB<sup>®</sup>(R), який конструює та візуалізує підповерхневі джерела у тривимірному просторі та розраховує їхнє магнітне поле [Pignatelli et al., 2011]. Модель підповерхневих джерел створюється з шарів прямокутних призм, яким надається потрібна намагніченість.



Модель джерела включала поховання № 11 та 12. Їх форма була апроксимована шарами кубиків 20×20×20 см у діапазоні глибин 0,8—2,6 м. Кубикам присвоєна намагніченість  $32 \times 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$ , яка за напрямком збігається із сучасним магнітним полем ( $I=65^\circ, D=4^\circ$ ). На рис. 12, а, б показано 3D-модель поховань та розраховане поле. Максимуми аномалій зсунуті на 0,7 м на південь відносно центрів поховань.

Оскільки в реальності територія могильника спотворена орними борознами, ми спробували включити до моделювання також орний шар. Його модель має вигляд паралельних смуг завширшки 1 м і завтовшки 20 см, повернутих на  $45^\circ$  відносно півночі. Смугам була присвоєна від'ємна намагніченість, яка дорівнювала 50 % NRM ( $M = -15 \times 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$ ) (рис. 12, в).

Магнітне моделювання показало, що заповнення поховань № 11 та 12 має достатній контраст намагніченості із вмісним ґрунтом, щоб їх можна було виявити

навіть після недавньої оранки (рис. 12, г). Магнітні моделі також кількісно доводять, що намагніченість заповнення поховань має бути такою самою, як і намагніченість верхнього шару ґрунту, щоб створились аномалії зі спостереженою інтенсивністю.

**Узагальнення та обговорення результатів.** Локальні збурення геомагнітного поля на поселенні *Комарів* викликають насамперед теплотехнічні споруди (горни, пічки) і особливо їх скупчення (виробничі майстерні?), а також заглиблені в материковий лес житлові та виробничі споруди, заповнення яких містить значну домішку обпаленої глини, кераміки, криці тощо.

Поселення розташоване на схилах південної експозиції, які, на відміну від протилежних схилів, зазнають процесів змивання ґрунту і яроутворення, що добре відображено на космознімках. Виходячи з морфології профілів фонових ґрунтів, можна припустити, що за пізньоримського часу територія була здебільшого вкрита

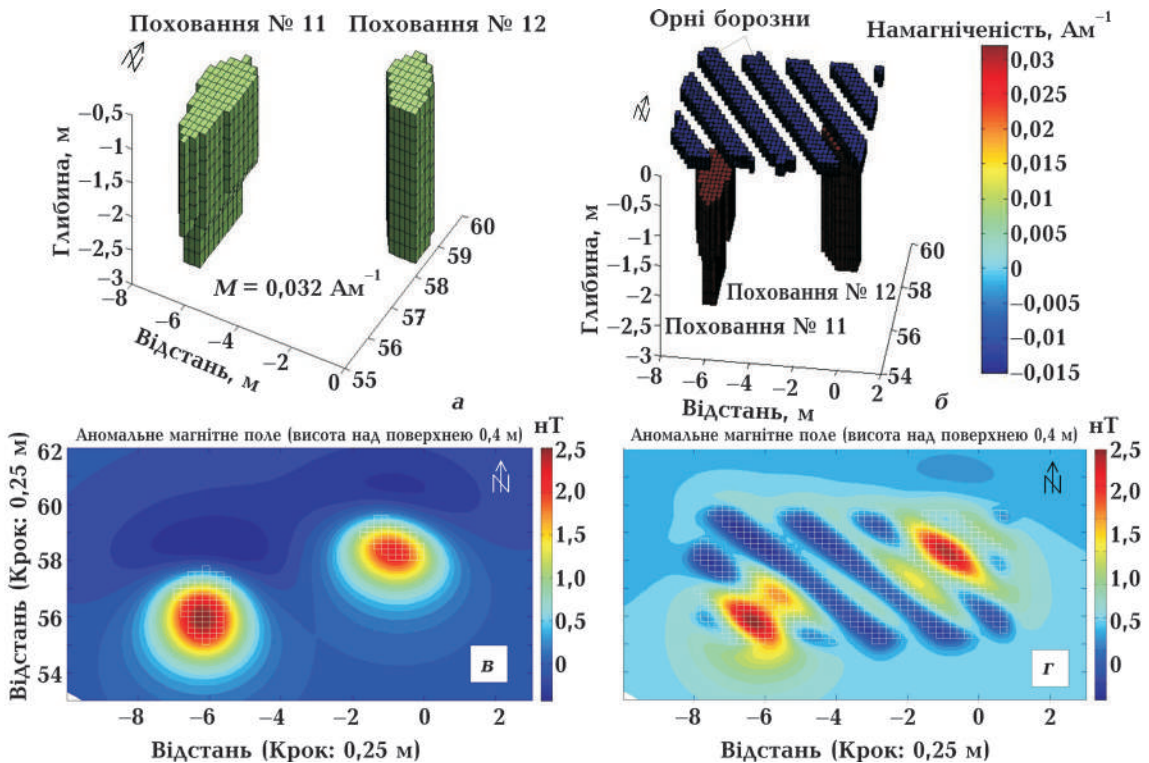


Рис. 12. 3D магнітні моделі та розраховане магнітне поле від поховань № 11 та 12 (а, б); те саме з урахуванням впливу орних борозен (в, г).

Fig. 12. 3D model of magnetic sources and calculated field from graves No 11 and 12 (a, b); the same with plough furrows effect (в, г).

лісом, а схиліві процеси активізувалися у ХХ ст. унаслідок масштабного розорювання. Часом на ділянках замулених ярів можуть формуватися локальні аномалії, які легко сплутати з археологічними. Одна з таких аномалій розкопана на полігоні 2 (див. рис. 5). Щоб уникнути помилкової інтерпретації, слід аналізувати напрямки поширення аномалій, які утворюють ланцюги, і обережно ставитись до тих, які збігаються з напрямками безсумнівних ярів і промоїн.

Крім того, до зони геомагнітних досліджень на поселенні потрапив об'ємний та фактурний археологічний об'єкт, який не відобразився на геомагнітних картах. Мова йде про фундамент будинку розмірами 7,0×6,2 м. Ширина фундаменту становила 0,6—0,75 м, висота кладки від підшви -0,4—0,5 м. Кладка зроблена з діаманітного матеріалу — вапнякових брил без використання розчину. Слід пам'ятати, що відсутність геомагнітних аномалій не завжди означає відсутність об'єктів.

Археологічно підтвердженими джерелами магнітних аномалій на *могильнику Комарів-1* стали землянка раннього залізного віку, а також зруйновані в давнину поховання-інгумації пізньоримського часу. Віднайдення землянки змушує нас обережно ставитись до трактування локальних аномалій з огляду на підтвержену багат шаровість пам'ятки. Слід мати на увазі, що крім поховань черняхівської культури тут розташовані давніші археологічні об'єкти.

Що стосується поховань, то на сьогодні в межах полігона 3 розкопані чотири інгумації, всі виявилися поруйнованими в давнину (кістки скелета перемішані). Зруйновані поховання на могильниках черняхівської культури відомі в усіх регіонах культури і протягом всього часу її існування. Висуваються дві версії щодо причин руйнування — грабунок та ритуальні дії [Петраускас, 2014]. Причому поховання № 11 та 12 створили магнітні аномалії, а № 4 та 5 — ні. Розібратися в причинах допомогли лабораторні дослідження зразків заповнення поховання № 11.

Дослідження магнітних властивостей темно-сірого щільного заповнення могили № 11 показало, що його  $k$ , NRM, ARM, SIRM, параметри гістерезису  $M_s$ ,  $B_c$ ,  $B_{cr}$ , а також  $k_{fd}$  % і різні співвідношення ( $Q$ ,  $S$ ,  $k_{ARM}/k$  та ARM/SIRM) за величинами повністю відповідають таким для поверхневого шару фонового ґрунту. У верхньому шарі ґрунту міститься велика кількість SP-SD зерен педогенного походження, що засвідчують максимальні значення  $k$ , NRM, ARM, SIRM,  $M_s$  а також  $k_{fd}$  %. Jelenska et al. (2008) та Gorka-Kostrubiec et al. (2016) повідомляють, що українські чорноземні ґрунти містять дрібнозернистий окиснений магнетит/маггеміт, утворений шляхом вивітрювання літогенного гематиту з лесових порід.

Термомагнітна поведінка зразків заповнення і поверхневого ґрунту ідентична і відрізняється від експериментальних даних для зразків лесоподібного суглинку.

Таким чином, було отримано беззаперечні докази ідентичності кількості та якості магнітних фаз могильного заповнення та верхнього шару ґрунту. Склад магнітної фази визначається як сукупність невзаємодіючих зерен маггеміту/окисненого магнетиту в суперпарамагнітному (SP) та однодомному (SD) стані.

Суперпарамагнітні зерна визначають магнітну сприйнятливість відкладів, але не мають залишкової намагніченості, носіями якої є однодомні зерна [Dearing et al., 1996; Dunlop, Özdemir, 1997; Hroudá, 2011]. Оскільки відношення  $Q$  як ґрунту та заповнення поховання близьке до одиниці, обидва типи зерен рівною мірою визначають їх сумарну намагніченість.

Можна стверджувати, що у заповненні поховань не відбувається значних магніто-мінералогічних змін, які можуть привести до зростання їхнього магнетизму. Незважаючи на можливість короточасного перезволоження на дні поховальної ями, розкладання органічної речовини та тіла похованого у присутності магнітотактичних бактерій не відіграє значної ролі, оскільки кількість органічної речовини мала [Linford, 2004; Pickartz et al., 2020].

За умов достатнього зволоження одно-доменні зерна можуть орієнтуватися за діючим геомагнітним полем, тобто відклади отримують орієнтаційну намагніченість [Verosub, 1989]. Це означає, що заповнення поховань може отримати NRM та  $M_T$  тої самої інтенсивності, що і ґрунт, якщо поховальна яма була залишена відкритою і поступово затікала поверхневим гумусованим матеріалом, що транспортувався водою атмосферних опадів.

Магнітне моделювання поховань № 11 та 12 показало відповідність розрахованих та спостережених магнітних аномалій.

Постає питання, чому зруйновані інгумації № 4 та 5 не створили магнітних аномалій? Відповісти на це питання можна, якщо припустити, що яма поховання була засипана одразу після акту руйнування. Подібні ситуації описані в літературі [Fassbinder, Irlinger, 1998; Fassbinder and Becker, 2003; Fassbinder and Gorka, 2009; Fassbinder, 2010]. Перемішування відкладів у процесі викопування і засипки ями приводить до «механічного розмагнічування NRM» — рандомізації/розорієнтування магнітних доменів [Fassbinder, 2015]. Таким чином, формується негативна аномалія. З часом завдяки процесам посторієнтаційного і в'язкого намагнічування намагніченість частково відновлюється аж до повного зникнення аномалії.

Відповідно, можна стверджувати, що не порушені стародавні інгумації «невидимі» для магніторозвідки.

Негативні аномалії, сформовані за описаним механізмом, часто спостерігаємо на місцях старих розкопів, в том числі на Комарові (див. рис. 2, б). Подібним чином формуються також аномалії-завади від орних борозен.

В результаті дослідження доходимо важливого археологічного висновку про те, що на могильнику можуть траплятися зруйновані інгумації, які були засипані одразу, і ті, які були покинуті відкритими

після зруйнування.

**Висновки.** Високоточним геомагнітним зніманням на пам'ятках комплексу Комарів пізньоримського часу охоплено 2,3 га на поселенні і 0,63 га на могильнику.

Розкопками підтверджена висока інформативність методу при пошуках горнів, жител і виробничих споруд. Обпалена глина, з якої зроблені горни, і заповнення всіх споруд мають підвищені магнітну сприйнятливність та природну залишкову намагніченість порівняно із вмісним ґрунтом, до материкового шару якого вони заглиблені. Втім розкопками виявлено важливі конструкції, які не проявилися в магнітному полі, що змушує обережно ставитись до реконструкцій планування поселення на підставі карти магнітного поля.

Показано вибіркочувальну інформативність методу магнітометрії щодо виявлення поховань на могильнику. Археологічні дослідження, проведені за результатами магнітометрів, підтвердили ефективність останнього для пошуків деяких тотально зруйнованих поховань. Петромагнітні та магнітомінералогічні дослідження зразків археологічних ґрунтів довели, що магнітні аномалії створюють зруйновані в давнину інгумації, ями яких були покинуті відкритими і поступово затікали ґрунтом поверхневого шару, тобто існували сприятливі умови для попадання в яму сильномагнітного гумусованого матеріалу і формування орієнтаційної NRM. Інгумації, засипані одразу після акту руйнування, а також не порушені інгумації, не створюють аномалій. Принципова можливість і необхідні критерії формування аномалій над похованнями кількісно обґрунтовані за допомогою синтетичного моделювання.

*The authors would like to acknowledge the contribution of the COST Action SAGA: The Soil Science & Archaeo-Geophysics Alliance — CA17131 ([www.saga-cost.eu](http://www.saga-cost.eu)), supported by COST (European Cooperation in Science and Technology).*



## Список літератури

- Бондар К.М., Дараган М.М., Прилуков В., Полін С.В., Цюпа І.В., Діденко С.В. Магнітометрія скіфського курганного могильника Катеринівка у Нижньому Подніпров'ї. *Геофіз. журн.* 2019. Т. 41. № 3. С. 134—152. doi: org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3. 2019. 72438.
- Бондар К.М., Матвіїшина Ж.М. Магнітні властивості похованого сірого лісового ґрунту з-під валу Східного укріплення Більського городища. *Феномен Більського городища — 2018: Пам'яті П.Я. Гавриша (1956—2018): збірник наук. праць.* 2018. С. 94—100.
- Кошелев И.Н. Магнитная разведка археологических памятников. Киев, 2005. 255 с.
- Орлюк М., Ролле Р., Роменец А., Ульрих Б., Цольнер Х. Микромагнитная съёмка Большого Бельского городища скифского времени, Полтавская область. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 5. С. 25—39.
- Петраускас О.В. Разрушенные погребения на могильниках черняховской культуры Поднепровья — анализ археологической структуры. В кн.: Від Венедів до Русі. Київ: Вид. Інституту археології НАНУ, 2014. С. 125—152.
- Петраускас О.В., Шишкін Р.Г. Дослідження ремісничої факторії черняхівської культури в Комарові на Подністров'ї. *Археологічні дослідження в Україні у 2018 р.: сб.* Київ: Вид. Інституту археології НАНУ, 2020. С. 251—252.
- Петраускас О.В., Авраменко М.О. Дослідження могильника черняхівської культури Комарів-1. *Археологічні дослідження в Україні у 2018 р.: сб.* Київ: Вид. Інституту археології НАНУ 2020. С. 250—251.
- Смішко М. Поселення III—IV ст. н. е. із слідами скляного виробництва біля с. Комарів Чернівецької області. *Матеріали і дослідження з археології — Прикарпаття і Волині.* 1964. Вип. 5. С. 67—80.
- Щапова Ю.Л. Мастерская по производству стекла у с. Комарово (III—IV вв.). *Советская археология.* 1978. № 3. С. 230—242.
- Becker, H. (2001). Duo- and Quadro-sensor Configuration for High Speed/High Resolution Magnetic Prospecting with Caesium Magnetometer. In H. Becker, J.W.E. Fassbinder (Eds.), *Magnetic Prospecting in Archaeological Sites* (pp. 20—25). Munich: ICOMOS.
- Bevan, B.W. (2016). Forward magnetic models: Creation and calculation. Geosight. <http://doi:10.13140/RG.2.1.2296.0242/1>.
- Chen, T., Xu, H., Xie, Q., Chen, J., Ji, J., & Lu, H. (2005). Characteristics and genesis of magnetite in Chinese loess and paleosols: mechanism for magnetic susceptibility enhancement in paleosols. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(3-4), 790—802. <https://doi:10.1016/j.epsl.2005.09.026>.
- Churchman, G.J., & Lowe, D.J. (2012). Alteration, formation, and occurrence of minerals in soils. In P.M. Huang, Y. Li, M.E. Sumner (Eds.), *Handbook of Soil Sciences, Properties and Processes* (Vol. 1, pp. 20.1—20.72). CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, FL.
- Clark, A. (1996). *Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology*, 2nd ed. Batsford: London, UK.
- Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A., & O'Grady, K. (1996). Frequency dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International*, 124, 228—240. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06366.x>.
- Dearing, J. (1999). Magnetic susceptibility. In J. Walden, F. Oldfield, J.P. Smith (Eds.), *Environmental Magnetism: A Practical Guide* (pp. 35—63). Technical Guide No 6. Quaternary Research Association, London.
- Dunlop, D.J., & Özdemir, Ö. (1997). Rock Magnetism. Fundamentals and Frontiers. *Geological Magazine*, 135(2), 287—300. <https://doi.org/10.1017/S0016756898218437>.
- Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmental Magnetism*. San Diego.
- Fassbinder, J.W.E. (2010). Magnetometerprospektion des neolithischen Erdwerkes von Altheim. *Das archäologische Jahr in Bayern*, 26—29.
- Fassbinder, J.W.E. (2017). Magnetometry for Archaeology. In *Encyclopedia of Geoarchaeology* (pp. 499—514). Springer Verlag.

- Fassbinder, J.W.E. (2015). Seeing beneath the farmland, steppe and desert soil: magnetic prospecting and soil magnetism. *Journal of Archaeological Science*, 56, 85—95. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.02.023>.
- Fassbinder, J.W.E., & Gorka, T. (2009). Vermessen? Das Römerkastell burgsalach, Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen, Mittelfranken. *Das archäologische Jahr in Bayern*, 76—79.
- Fassbinder, J.W.E., & Irlinger, W.E. (1998). Magnetometerprospektion eines endneolithischen Grabenwerkes bei Riekofen, Lkr. Regensburg. *Beiträge zur Archäologie in der Oberpfalz*, (2), 47—54.
- Fassbinder, J.W.E., & Stanjek, H. (1993). Occurrence of bacterial magnetite in soils from archaeological sites. *Archaeologia Polona*, 31, 117—128.
- Garcia-Garcia, E., Andrews, J., Iriarte, E., Sala, R., Aranburu, A., Hill, J., & Agirre-Mauleon, J. (2017). Geoarchaeological Core Prospection as a Tool to Validate Archaeological Interpretation Based on Geophysical Data at the Roman Settlement of Auritz/Burguete and Aurizberri/Espinal (Navarre). *Geosciences*, 7(4), 104. <https://doi.org/10.3390/geosciences7040104>.
- Garcia-Garcia, E., Mtz. Txoperena, J.M., Sala, R., Aranburu, A., & Agirre-Mauleon, J. (2016). Magnetometer Survey at the Newly-discovered Roman City of Auritz/Burguete (Navarre). Results and Preliminary Archaeological Interpretation. *Archaeological Prospection*, 23, 243—256. <https://doi.org/10.1002/arp.1537>.
- Gater, J., & Gaffney, C. (2003). *Revealing the Buried Past: Geophysics for Archaeologists*. Tempus: Stroud, UK.
- Gorka-Kostrubiec, B., Teisseyre-Jelenska, M., & Dytłow, S.K. (2016). Magnetic properties as indicators of Chernozem soil development. *Catena*, 138, 91—102. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.014>.
- Hanesch, M., Stanjek, H., & Petersen, N. (2006). Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: the role of organic carbon. *Geophysical Journal International*, 165, 53—61. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.02933.x.
- Hrouda, F. (2011). Models of frequency-dependent susceptibility of rocks and soils revisited and broadened. *Geophysical Journal International*, 187(3), 1259—1269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05227.x>.
- IUSS Working Group WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.
- Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokl, M., Sukhorada, A., Bondar, K., & Matviishina, Zh. (2008). Magnetic iron oxides occurring in chernozem soil from Ukraine and Poland as indicators of pedogenic processes. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 52 255—270. <https://doi.org/10.1007/s11200-008-0017-z>.
- Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Bondar, (Tyamina) K., Kądziałko-Hofmokl, M., & Matviishina, Zh. (2004). Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophysical Journal International*, 159(1), 104—116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02370.x>.
- Jordanova, N. (2016). *Soil Magnetism*. 466 p. Academic Press.
- Jordanova, D., & Jordanova, N. (2016). Thermomagnetic behavior of magnetic susceptibility heating rate and sample size effects. *Frontiers in Earth Science*, 3, 15. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00090>.
- Koenigsberger, J.G. (1930). Größenverhältnis von remanentem zu induziertem Magnetismus in Gesteinen, Größe und Richtung des remanenten Magnetismus. *Zeitschrift für Geophysik*, 6, 190—207.
- King, J., Banerjee, S.K., Marvin, J., & Özdemir, Ö. (1982). A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some results from lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(2), 404—419. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90142-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90142-X).
- Krásá, D., Petersen, K., & Petersen, N. (2007). Variable Field Translation Balance. In D. Gubbins, E. Herrero-Bervera (Eds.), *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6\\_312](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_312).

- Le Borgne, E. (1955) Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Annals of Geophysics*, 11, 399—419.
- Linford, N. (2004). Magnetic Ghosts: Mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves. *Archaeological Prospection*, 11, 167—180. <https://doi.org/10.1002/arp.232>.
- Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoana, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L., & Oldfield, F. (2012). *Environmental magnetism: principles and applications*. *Reviews of Geophysics*, 50, RG4002. doi: 10.1029/2012rg000393.
- Lovley, D.R., Stolz, J.F., North, G.L., & Phillips, E.J.P. (1987). Anaerobic production of magnetite by dissimilatory iron-reducing microorganism. *Nature*, 330, 252—254. <https://doi.org/10.1038/330252a0>.
- Maher, B.A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137(1-2), 25—54. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00103-X).
- Maher, B.A., Taylor, R.M. (1988). Formation of ultrafine-grained — magnetite in soils. *Nature* 336, 368—370. <https://doi.org/10.1038/336368a0>.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A. (1997). Resistivity and magnetics of the Roman town Carnuntum, Austria: an example of combined interpretation of prospection data. *Archaeological Prospection*, 4(4), 179—189. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0763\(199712\)4:4<179::AID-ARP85>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0763(199712)4:4<179::AID-ARP85>3.0.CO;2-U).
- Neubauer, W., Melichar, P., & Eder-Hinterleitner, A. (1996). Collection, visualization and simulation of magnetic prospection data. *Analecta Praehistorica Leidensia*, 28, 121—129.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., & Melichar, P. (2002). Georadar in the Roman civil town Carnatum, Austria: An approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9(3), 135—156. <https://doi.org/10.1002/arp.183>.
- Peters, C., & Dekkers, M.J. (2003). Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 659—667. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00120-7).
- Petrauskas, O.V. (2014). Komariv — ein Werkstattzentrum barbarischen Europas aus spätrömischer Zeit (Forschungsgeschichte, einige Ergebnisse und mögliche Perspektiven). *Ephemeris Napocensis*, 24, 87—116.
- Pickartz, N., Rabbel, W., Rassmann, K., Müller-Scheessel, N., Furholt, M., Müller, J., & Dreier, S. (2020). What over 100 drillings tell us: a new method for determining the Koenigsberger ratio of soils from magnetic mapping and susceptibility logging. *Archaeological Prospection*, 1—22. <https://doi.org/10.1002/arp.1782>.
- Pignatelli, A., Nicolosi, I., Carluccio, R., Chiappini, M., & von Frese, R. (2011). Graphical interactive generation of gravity and magnetic fields. *Computers and Geosciences*, 37, 567—572. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.10.003>.
- Schmidt, A., Linford, P., Linford, N., David, A., Gaffney, C., Sarris, A., & Fassbinder, J. (2016). *EAC Guidelines for the Use of Geophysics in Archaeology: Questions to Ask and Points to Consider*, Europae Archaeologiae Consilium: Namur, Belgium.
- Smekalova, T., Bevan, B., Chudin, A., & Gari-pov, A. (2016). The Discovery of an Ancient Greek Vineyard. *Archaeological Prospection*, 23, 15—26. <https://doi.org/10.1002/arp.1517>.
- Tite, M.S., & Mullins, C. (1971) Enhancement of the magnetic susceptibility of soil on archaeological sites. *Archaeometry*, 13(2), 209—219. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1971.tb00043.x>.
- Verosub, K.L. (1989). Detrital remanent magnetism (DRM). In *Geophysics. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/0-387-30752-4\\_25](https://doi.org/10.1007/0-387-30752-4_25).



# Magnetic prospecting and rock magnetic study of soils and archaeological objects on the Late Roman time sites near Komariv in Middle Transnistria

K.M. Bondar<sup>1</sup>, O.V. Petrauskas<sup>2</sup>, R.V. Khomenko<sup>1</sup>, S.A. Popov<sup>1</sup>, 2022

<sup>1</sup>Kyiv National University named after Taras Shevchenko, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Archeology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The paper presents the outcome of the magnetic survey at the settlement and cemetery of the production center of the 3<sup>rd</sup>—5<sup>th</sup> centuries, Komariv (Khotyn district, Chernivtsi region), which is located on the right bank of the Dniester. The settlement has about seventy anomalies that may have an archaeological origin. The archaeological study of individual anomalies has confirmed, as expected, the reliability of geophysical interpretation of thermal structures (kilns, furnaces) and living and production dugouts deepened into the loess parent rock.

Magnetic imaging at the cemetery showed about eight tens of local anomalies with an intensity of 1.5—4.5 nT. Excavations of some anomalies revealed the Early Iron Age dugout and two Late Roman graves. However, the other two excavated graves did not cause disturbance of magnetic field.

Laboratory measurements of magnetic susceptibility, natural remanent magnetization and other concentration-dependent and grain-size-dependent parameters of the ferromagnetic phase, as well as magnetic mineralogy examination have shown that grave pits, which appeared on a magnetic map, are refilled almost exclusively with humus soil material. Magnetic modeling proved graves can create measured anomalies if their magnetization is equal to the magnetization of the humus horizon of the soil. Thus, these grave pits were left open and gradually refilled with moist soil material. In particular, conditions have been created for the formation of detrital remanence.

When restoring the spatial structure of Komariv sites based on magnetic prospecting results, it is necessary to take into account probable multilayered structure of monuments, geomorphological features of the area, which can be misinterpreted as archeological objects, and the fact that important examples of ancient architecture constructed of non-magnetic materials and grave pits refilled immediately after digging will be absent on magnetic maps.

**Key words:** magnetic survey, rock magnetic properties, magnetic modeling, Komariv, Late Roman time.

## References

- Bondar, K.M., Daragan, M.M., Prilukov, V., Polin, S.V., Tsiupa, I.V., & Didenko, S.V. (2019). Magnetometry of the Scythian burial ground Katerinovka in the Lower Dnieper region. *Geophysical Journal*, 41(3), 134—152. doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172438 (in Ukrainian).
- Bondar, K.M., & Matviishyna, Zn.M. (2018). Magnetic properties of buried Greyzem Haplic under the rampart of Eastern fortification of Bilsk hillfort. *Phenomenon of Bilsk hillfort — 2018: In memory of P.Ya. Gavrysh (1956—2018): collection of papers* (pp. 94—100) (in Ukrainian).
- Koshelev, I. (2005) *Magnetic prospection of archaeological sites*. Kiev. 255 p. (in Russian).
- Orlyuk, M., Rolle, R., Romenets, A., Ulrich, B., & Zollner, H. (2016). Microscopic survey of the Great Belsky Settlement Scythian time, Poltava region. *Geophysical Journal*, 38(5), 25—39. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i5.2016.107818> (in Russian).

- Petrauskas, O.V. (2014). Destroyed graves on Chernyakhiv culture burial grounds from the Dnieper area — analysis of archaeological structure. In *From Wends to Rus* (pp. 125—152) (in Russian).
- Petrauskas, O.V., & Shishkin, R.G. (2020) Research of the craft factor of Chernyakhiv culture in Komariv at Transnistria. In *Archaeological Researches in Ukraine in 2018* (pp. 251—252). Kyiv: Publ. of the Institute of Archeology of the National Academy of Sciences of Ukraine (in Ukrainian).
- Petrauskas, O.V., & Avramenko, M.O. (2020) Investigation of Chernyakhiv culture burial ground Komariv-1. In *Archaeological Researches in Ukraine in 2018* (pp. 250—251). Kyiv: Publ. of the Institute of Archeology of the National Academy of Sciences of Ukraine (in Ukrainian).
- Smishko, M.Yu. (1964). Settlements of III-IV centuries AD with traces of glass production near the village of Komariv in Chernivtsi region. *Materials and investigations on the archeology of Ciscarpathia and Volyn*, (5), 67—80 (in Ukrainian).
- Shchapova, Yu.L. (1978). Workshop for the production of glass near the village of Komarovo. *Soviet archaeology*, (3), 230—242 (in Russian).
- Becker, H. (2001). Duo- and Quadro-sensor Configuration for High Speed/High Resolution Magnetic Prospecting with Caesium Magnetometer. In H. Becker, J.W.E. Fassbinder (Eds.), *Magnetic Prospecting in Archaeological Sites* (pp. 20—25). Munich: ICOMOS.
- Bevan, B.W. (2016). Forward magnetic models: Creation and calculation. Geosight. <http://doi:10.13140/RG.2.1.2296.0242/1>.
- Chen, T., Xu, H., Xie, Q., Chen, J., Ji, J., & Lu, H. (2005). Characteristics and genesis of magnetite in Chinese loess and paleosols: mechanism for magnetic susceptibility enhancement in paleosols. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(3-4), 790—802. <https://doi:10.1016/j.epsl.2005.09.026>.
- Churchman, G.J., & Lowe, D.J. (2012). Alteration, formation, and occurrence of minerals in soils. In P.M. Huang, Y. Li, M.E. Sumner (Eds.), *Handbook of Soil Sciences, Properties and Processes* (Vol. 1, pp. 20.1—20.72). CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, FL.
- Clark, A. (1996). *Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology*, 2nd ed. Batsford: London, UK.
- Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A., & O'Grady, K. (1996). Frequency dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International*, 124, 228—240. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06366.x>.
- Dearing, J. (1999). Magnetic susceptibility. In J. Walden, F. Oldfield, J.P. Smith (Eds.), *Environmental Magnetism: A Practical Guide* (pp. 35—63). Technical Guide No 6. Quaternary Research Association, London.
- Dunlop, D.J., & Özdemir, Ö. (1997). Rock Magnetism. Fundamentals and Frontiers. *Geological Magazine*, 135(2), 287—300. <https://doi.org/10.1017/S0016756898218437>.
- Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmental Magnetism*. San Diego.
- Fassbinder, J.W.E. (2010). Magnetometerprospektion des neolithischen Erdwerkes von Altheim. *Das archäologische Jahr in Bayern*, 26—29.
- Fassbinder, J.W.E. (2017). Magnetometry for Archaeology. In *Encyclopedia of Geoarchaeology* (pp. 499—514). Springer Verlag.
- Fassbinder, J.W.E. (2015). Seeing beneath the farmland, steppe and desert soil: magnetic prospecting and soil magnetism. *Journal of Archaeological Science*, 56, 85—95. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.02.023>.
- Fassbinder, J.W.E., & Gorka, T. (2009). Vermessen? Das Römerkastell burgsalach, Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen, Mittelfranken. *Das archäologische Jahr in Bayern*, 76—79.
- Fassbinder, J.W.E., & Irlinger, W.E. (1998). Magnetometerprospektion eines endneolithischen Grabenwerkes bei Riekofen, Lkr. Regensburg. *Beiträge zur Archäologie in der Oberpfalz*, (2), 47—54.
- Fassbinder, J.W.E., & Stanjek, H. (1993). Occurrence of bacterial magnetite in soils from archaeological sites. *Archaeologia Polona*, 31, 117—128.
- Garcia-Garcia, E., Andrews, J., Iriarte, E., Sala, R., Aranburu, A., Hill, J., & Agirre-Mauleon, J.

- (2017). Geoarchaeological Core Prospection as a Tool to Validate Archaeological Interpretation Based on Geophysical Data at the Roman Settlement of Auritz/Burguete and Aurizberri/Espinal (Navarre). *Geosciences*, 7(4), 104. <https://doi.org/10.3390/geosciences7040104>.
- Garcia-Garcia, E., Mtz. Txoperena, J.M., Sala, R., Aranburu, A., & Agirre-Mauleon, J. (2016). Magnetometer Survey at the Newly-discovered Roman City of Auritz/Burguete (Navarre). Results and Preliminary Archaeological Interpretation. *Archaeological Prospection*, 23, 243—256. <https://doi.org/10.1002/arp.1537>.
- Gater, J., & Gaffney, C. (2003). *Revealing the Buried Past: Geophysics for Archaeologists*. Tempus: Stroud, UK.
- Gorka-Kostrubiec, B., Teisseyre-Jelenska, M., & Dytłow, S.K. (2016). Magnetic properties as indicators of Chernozem soil development. *Catena*, 138, 91—102. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.014>.
- Hanesch, M., Stanjek, H., & Petersen, N. (2006). Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: the role of organic carbon. *Geophysical Journal International*, 165, 53—61. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.02933.x.
- Hrouda, F. (2011). Models of frequency-dependent susceptibility of rocks and soils revisited and broadened. *Geophysical Journal International*, 187(3), 1259—1269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05227.x>.
- IUSS Working Group WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.
- Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokl, M., Sukhorada, A., Bondar, K., & Matviishina, Zh. (2008). Magnetic iron oxides occurring in chernozem soil from Ukraine and Poland as indicators of pedogenic processes. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 52 255—270. <https://doi.org/10.1007/s11200-008-0017-z>.
- Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Bondar, (Tyamina) K., Kądziałko-Hofmokl, M., & Matviishina, Zh. (2004). Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophysical Journal International*, 159(1), 104—116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02370.x>.
- Jordanova, N. (2016). *Soil Magnetism*. 466 p. Academic Press.
- Jordanova, D., & Jordanova, N. (2016). Thermomagnetic behavior of magnetic susceptibility heating rate and sample size effects. *Frontiers in Earth Science*, 3, 15. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00090>.
- Koenigsberger, J.G. (1930). Größenverhältnis von remanentem zu induziertem Magnetismus in Gesteinen, Größe und Richtung des remanenten Magnetismus. *Zeitschrift für Geophysik*, 6, 190—207.
- King, J., Banerjee, S.K., Marvin, J., & Özdemir, Ö. (1982). A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some results from lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(2), 404—419. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90142-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90142-X).
- Krásá, D., Petersen, K., & Petersen, N. (2007). Variable Field Translation Balance. In D. Gubbins, E. Herrero-Bervera (Eds.), *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6\\_312](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_312).
- Le Borgne, E. (1955) Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Annals of Geophysics*, 11, 399—419.
- Linford, N. (2004). Magnetic Ghosts: Mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves. *Archaeological Prospection*, 11, 167—180. <https://doi.org/10.1002/arp.232>.
- Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoana, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L., & Oldfield, F. (2012). *Environmental magnetism: principles and applications*. *Reviews of Geophysics*, 50, RG4002. doi: 10.1029/2012rg000393.
- Lovley, D.R., Stolz, J.F., North, G.L., & Phillips, E.J.P. (1987). Anaerobic production of magnetite by dissimilatory iron-reducing microorganism. *Nature*, 330, 252—254. <https://doi.org/10.1038/330252a0>.
- Maher, B.A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography*,



- Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137(1-2), 25—54. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00103-X).
- Maher, B.A., Taylor, R.M. (1988). Formation of ultra-fine-grained — magnetite in soils. *Nature* 336, 368—370. <https://doi.org/10.1038/336368a0>.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A. (1997). Resistivity and magnetics of the Roman town Carnuntum, Austria: an example of combined interpretation of prospection data. *Archaeological Prospection*, 4(4), 179—189. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0763\(199712\)4:4<179::AID-ARP85>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0763(199712)4:4<179::AID-ARP85>3.0.CO;2-U).
- Neubauer, W., Melichar, P., & Eder-Hinterleitner, A. (1996). Collection, visualization and simulation of magnetic prospection data. *Analecta Praehistorica Leidensia*, 28, 121—129.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., & Melichar, P. (2002). Georadar in the Roman civil town Carnatum, Austria: An approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9(3), 135—156. <https://doi.org/10.1002/arp.183>.
- Peters, C., & Dekkers, M.J. (2003). Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 659—667. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00120-7).
- Petrauskas, O.V. (2014). Komariv — ein Werkstattzentrum barbarischen Europas aus spätromischer Zeit (Forschungsgeschichte, einige Ergebnisse und mögliche Perspektiven). *Ephemeris Napocensis*, 24, 87—116.
- Pickartz, N., Rabbel, W., Rassmann, K., Müller-Scheessel, N., Furholt, M., Müller, J., & Dreibrodt, S. (2020). What over 100 drillings tell us: a new method for determining the Koenigsberger ratio of soils from magnetic mapping and susceptibility logging. *Archaeological Prospection*, 1—22. <https://doi.org/10.1002/arp.1782>.
- Pignatelli, A., Nicolosi, I., Carluccio, R., Chiappini, M., & von Frese, R. (2011). Graphical interactive generation of gravity and magnetic fields. *Computers and Geosciences*, 37, 567—572. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.10.003>.
- Schmidt, A., Linford, P., Linford, N., David, A., Gaffney, C., Sarris, A., & Fassbinder, J. (2016). *EAC Guidelines for the Use of Geophysics in Archaeology: Questions to Ask and Points to Consider*, Europae Archaeologiae Consilium: Namur, Belgium.
- Smekalova, T., Bevan, B., Chudin, A., & Garipov, A. (2016). The Discovery of an Ancient Greek Vineyard. *Archaeological Prospection*, 23, 15—26. <https://doi.org/10.1002/arp.1517>.
- Tite, M.S., & Mullins, C. (1971) Enhancement of the magnetic susceptibility of soil on archaeological sites. *Archaeometry*, 13(2), 209—219. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1971.tb00043.x>.
- Verosub, K.L. (1989). Detrital remanent magnetism (DRM). In *Geophysics. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/0-387-30752-4\\_25](https://doi.org/10.1007/0-387-30752-4_25).