

УДК 551.31+634.2

К. Бондар, канд. геол. наук

## ГЕОФІЗИЧНІ МЕТОДИ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ПРИРОДНИМИ ТА ІСТОРИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук співроб. М.І. Орлюком)

*Проаналізовано інформативність польових і лабораторних геофізичних методів при вивченні змін природного середовища та еволюції просторових структур археологічних пам'яток. Оглянуті шляхи пошуку загальних закономірностей та взаємозв'язків між природними та історичними процесами. Запропонований оптимальний геофізичний комплекс, який пропонується впровадити для вивчення перетворень просторових археологічних структур та палеокліматичних режимів в окремих мікрорегіонах.*

*This paper analyzes informativity of field and laboratory geophysical methods in the study of environmental change and evolution of spatial structures of archaeological monuments. The ways to find common patterns and interrelation links between the natural and historical processes are explored. The optimum geophysical complex, which is offered to study spatial transformation of archaeological structures and palaeoclimatic regimes in selected microregions is proposed.*

**Вступ.** Археологія вивчає і пояснює культурну еволюцію людства на протязі довготривалих періодів часу у значній мірі спираючись на дані спеціальних досліджень методами природничих наук. Одною з ключових причин трансформацій культури виступає мінливість природного середовища. Різні культури адаптуються до довкілля за допомогою технологій, тому моделі технологічних підсистем дозволяють археологам отримувати порівняно повну картину культурної системи як такої.

У рамках системно-екологічного підходу людські культури розглядаються як складні агломерати таких компонентів, як технології, стратегії існування, соціальна організація, які взаємодіють між собою і з більш глобальними системами оточуючого середовища, частиною яких вони є [7;11].

При з'ясуванні просторових відносин археологи визначають яким чином залишки матеріальної культури групуються в рамках певного ландшафту і відображують взаємодію з довкіллям, що постійно змінюється. Просторовий контекст є важливим для наукової археології.

**Постановка завдання.** До порівняно молодих змін природного середовища відноситься не лише кліматична мінливість і пов'язані з нею процеси (зміни рослинного покриву, зволоженості, температурного режиму тощо), а й процеси, що призводять до змін рельєфу (формування річкових заплав і розвиток молодих терас, зсувні явища на схилах і обвальні в гірських районах, карстові процеси, ерозійні явища тощо).

Носіями палеокліматичних записів виступають, насамперед, ґрунти і відклади, які містять ґрунтовий матеріал, наприклад, відклади привхідних залів печер. Для дослідження рельєфоутворюючих процесів і еволюції ландшафтів в цілому, першочергове значення мають потужності окремих шарів відкладів верхньої частини геологічного розрізу.

Відповідно, дослідження кліматичних змін у середньому і пізньому голоцені в основному зводяться до вивчення палеопедологічних та геофізичних властивостей зразків ґрунтів. Динаміку ландшафтоутворюючих процесів доцільно вивчати методами польової геофізики.

У традиційних суспільствах принципи організації простору з властивими йому фізичними характеристиками завжди відображали міфопоетичні уявлення про навколишній світ і саму людину і, тим самим, були так звані культурними ознаками. Цим пояснюється існування різних способів освоєння простору, що існують у різних народів у різні часи. По-різному освоєний і організований простір в різні історичні епохи дозволяє розглядати не тільки етапи заселення того чи іншого регіону, але також отримувати дані щодо соціо-економічного та духовного розвитку суспільства [2, с. 49].

Геофізика у складі археологічних вишукувань допомагає зафіксувати розподіл археологічних пам'яток на ландшафті. Про структуру і межі археологічної пам'ятки достовірно можна судити по локалізації геофізичних аномалій безпосередньо пов'язаних з археологічними об'єктами. Рівень структурованості давніх поселень у певний період їх існування, розвиненість ремісничих комплексів, межі території, охопленої господарською діяльністю успішно визначається методами геофізичного картування.

На базі сучасних геоінформаційних систем можливо проводити спільну обробку просторової інформації методами багатofакторного аналізу, досліджуючи приховані природно-соціальні зв'язки.

Отже, використовуючи сучасні геофізичні та геоінформаційні технології існує принципова можливість встановити емпіричні залежності між природними змінами довкілля та трансформаціями археологічних культур.

**Грунти як носії палеокліматичної інформації і їх магнітні властивості.** При вивченні кліматичної мінливості важливо знайти об'єкти спостережень, параметри, які виступили би надійними індикаторами кліматичної мінливості. Вони мають задовольняти певним обов'язковим вимогам: їх зручно вимірювати, вони достатньо чутливі і, одночасно, відображають крупномасштабні зміни.

Грунт з гетерогенним середовищем, властивостями якого можуть суттєво змінюватись під впливом різних факторів як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямку. По мірі віддалення від поверхні у профілі ґрунтів зменшується кількість органічної речовини і біологічна активність, змінюється склад ґрунтової мікрофлори [2]. Неоднорідність властивостей ґрунтів, яка визначається мікрорельєфом, в першу чергу впливає на характер горизонтального переносу вологи разом з розчиненими у ній елементами або твердими частинками. Це, у свою чергу, може відбиватись на педогенетичних градієнтах, продуктивності рослинного покриву, кількості органічної речовини, що потрапляє до ґрунту, й інших біофільних елементів, призводячи до зміни активності біологічних процесів і фізико-хімічних властивостей ґрунту [6].

Зміни природних умов голоцену зумовили розвиток полігенетичних ґрунтових профілів. Інформативними є ґрунти з синседиментним типом ґрунтоутворення. Елювіально-ілювіальний процес призводить до більш глибокого перетворення підстилаючих шарів, при цьому ілювіальний шар зазвичай є постседиментним. Чорноземні і дернові ґрунти "ростуть" вниз значно повільніше і, як правило, є синседиментними утвореннями. Виявити син- або постседиментний характер ґрунтоутворення допомагає зіставлення даних про ґенезу ґрунтових шарів і тип спор-пилкових спектрів, що в них містяться [1, с. 6].

Характер ґрунтоутворення регулює кількість і мінеральний склад ґрунтового заліза, значна частина якого міститься у вигляді магнітних мінералів. Ґрунтоутворення з точки зору магнітної мінералогії сприяє швидкому накопиченню дрібнозернистого магнетиту і магеміту –

мінералів, які обумовлюють підвищення магнітної сприйнятливості й інших магнітних параметрів [8].

Серед магнітних параметрів для вивчення місцевих кліматичних змін у минулому особливе значення має магнітна сприйнятливість, також досліджуються ідеальна та нормальна залишкова намагніченість, коерцитивні спектри та частотна залежність магнітної сприйнятливості. Діагностика магніто-мінералогічного складу термомагнітними методами дає необхідну інформацію для оцінки типу палеоґрунту з актуалістичних позицій, тобто шляхом зіставлення даних з результатами вивчення сучасних ґрунтів. Також користуючись магніостратиграфічною колонкою на основі відомостей про магнітні властивості ґрунтів голоценового віку і сучасної вологості існує можливість визначення вологості в минулому [8].

Складні умови існування ґрунтів знайшли відображення у магнітних властивостях, які, без сумніву, є індикаторами фізико-хімічних і біохімічних процесів у ґрунті. На сьогодні магнітні дані є єдиним надійним інструментом кількісної палеокліматології похованих ґрунтів. Вони дозволяють не тільки виділити аридні й гумідні кліматичні періоди, а й оцінювати ступінь розвиненості ґрунтоутворення процесу і перетворення органічної фракції ґрунту після його поховання. Нижче наведені основні магнітні параметри ґрунтів, які кількісно характеризують кліматичні режими [8]:

- $\chi$ ,  $\chi_{if}$  – низькочастотна магнітна сприйнятливість, характеризує валовий вміст магнітних мінералів;
- $\chi_{fd}$  – частотна залежність магнітної сприйнятливості, залежить від вмісту суперпарамагнетиків, характеризує рівень педогенезису;
- $\chi_{ARM}$  – показник відносного вмісту однодомного магнетиту;
- $S = IRM_{100} / SIRM$  – відношення, яке характеризує магнітну жорсткість речовини. Часто використовується для оцінки ролі антиферромагнетика ("магнітожорсткого" гематиту) порівняно з ферромагнетиком ("магнітом'яким" магнетитом);
- $SIRM/\chi_{if}$  та  $ARM/SIRM$  – показники гранулометричного складу магнетиту. Відношення  $SIRM/\chi_{if}$  також використовується для визначення вмісту сульфіду заліза – грейгіту;
- $M_{rs}/M_s$ ,  $V_{cr}/B_c$  – показники магнітної жорсткості речовини.

Встановлені закономірності формування магнітних властивостей ґрунтів успішно застосовуються для відтворення кліматичних режимів минулого. У цьому зв'язку на особливу увагу заслуговують ґрунти, одночасно поховані людиною під різного роду давніми насипами – курганами, валами тощо.

Слід зазначити, що навіть за короткі періоди часу можуть відбуватися значні зміни магнітних властивостей, записи яких зберігаються у відповідних археологічних об'єктах. Як видно з рис. 1, зростання магнітної сприйнятливості внаслідок утворення магнітних мінералів супроводжує процес ґрунтоутворення і може розглядатися як його кількісна характеристика.

**Польові геофізичні методи при вивченні еволюції ландшафтів.** Перетворення ландшафтів на протязі голоцену доцільно вивчати приповерхневими малоглибинними геофізичними методами, при постановці яких виникають деякі специфічні складнощі. Одною з них є висока мінливість температурного і вологісного режимів ґрунтів. Ці умови можуть суттєво впливати на геофізичні параметри, змінюючи їх значення протягом декількох днів або навіть годин. Крім того, фізичні властивості ґрунтів часто демонструють істотну мінливість по вертикалі ґрунтового профілю і по латералі в межах генетичних ґрунтових горизонтів.

Дослідження зазвичай проводяться методами опору та радіолокаційним методом високочастотного зондування (георадар).

**Геофізичні методи при археологічних дослідженнях.** Традиційно, геофізичні методи поділяються на дві основні групи пасивних та активних методів. Методи першої групи ґрунтуються на вимірюваннях амплітуд постійних збурень гравітаційних, магнітних і електричних полів, викликаних фізичними особливостями похованих об'єктів. У методах другої групи, застосовуються засоби штучного сейсмічного, електричного і електромагнітного (індуктивного та імпульсного) збудження сигналу з подальшою реєстрацією відгуку, який несе інформацію про підземні неоднорідності [5].

У категорії пасивних методів найбільш вживаними є методи магнітної розвідки [10]. *Магнітна розвідка* здійснюється шляхом вимірювання сумарного геомагнітного поля та його компонентів за допомогою високочувливої апаратури. Джерелами магнітних аномалій мо-

жуть виступати будь-які тіла, намагніченість яких відрізняється від намагніченості вміщуючої матриці. На цьому принципі ґрунтується магнітометричне картування археологічних пам'яток, адже поховані археологічні об'єкти – житла, горни, поховання тощо – і окремі артефакти викликають збурення геомагнітного поля різної інтенсивності. На магнітних картах чітко виділяються споруди, зроблені з обпаленої глини, ґрунту, лесу. Це печі, горни, вогнища, керамічні вимостки різного призначення тощо. Підчас обпалення або внаслідок пожежі глинисті мінерали розпадаються з утворенням сильно магнітних оксидів заліза і об'єкт набуває сильної термозалишкової намагніченості. Чутливість сучасної апаратури дозволяє впевнено реєструвати і менш контрастні аномалії, забезпечуючи високу роздільну здатність методу щодо структури культурного шару пам'яток. Магнітна розвідка – найбільш розповсюджений і найефективніший метод археологічного пошуку.

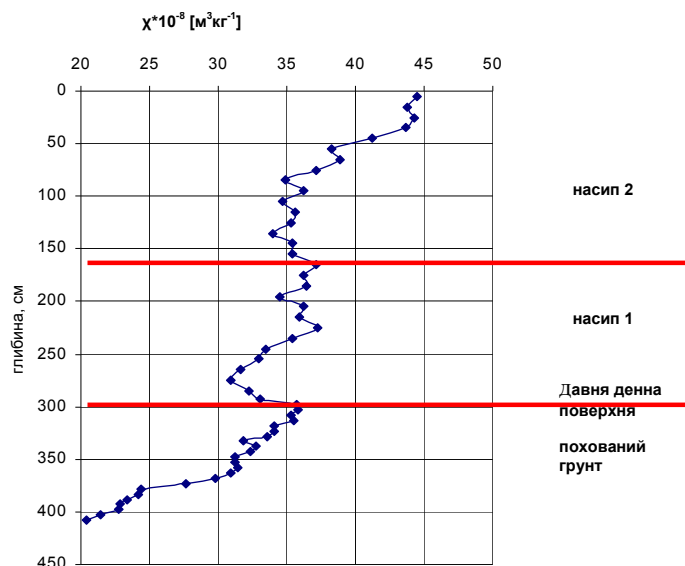


Рис. 1. Розподіл магнітної сприйнятливості по глибині багатощарового насипу кургану Лявдіва (Київська обл.).

Насип 1 датується добою бронзи (кінець 3 – перша половина 2 тис. р. до н.е.), насип 2 – добою раннього заліза 800-550 cal. BC. Голоценове ґрунтоутворення супроводжується підвищенням магнітної сприйнятливості у верхньому шарі відносно субстрату (материнської породи або матеріалу насипу) на  $10 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$  [4]

Інші пасивні геофізичні методи, які знайшли своє застосування в археології – *гравірозвідка, метод потенціалів власної поляризації* не є широко вживаними, але вони можуть виявитись дуже корисним для масштабної розвідки давніх поселень, а також при деяких спеціальних дослідженнях.

Серед активних методів найбільш інформативними для археології є метод електричного опору на постійному струмі та георадарні дослідження.

*Методи постійного струму або гальванічні методи* використовуються в археології з 1950-х років [5]. Найбільш широко вживаним є електричне профілювання установками Веннера або петля-петля або диполь-диполь. Методи постійного струму в основному корисні при виявленні значних змін пористості ґрунтів, які вміщують поховані кам'яні структури. Гальванічні методи чутливо реагують на будь-які локальні зміни опору/провідності ґрунту, викликані діяльністю людини. Це досить повільна, але дешева технологія. Сучасне обладнання для вимірювання електричної провідності дозволяє пришвидшити отримання корисної археологічної інформації.

Розвиток технології гальванічних методів відбувається по шляху створення багатоелектродних установок і

автоматизації процесу вимірювань, що дозволяє робити велику кількість вимірів за короткий час. Крім того, з появою швидкісних комп'ютерів почали розвиватися автоматизовані системи інтерпретації, які розв'язують обернену задачу електророзвідки підбираючи розподіл опорів шарів на підставі експериментальних вимірювань позирного опорів. В літературних джерелах представлені кілька алгоритмів інверсії даних ERT (томографії електричного опорів) для двовимірного випадку.

*Георадарні дослідження (GPR) або радіолокаційне високочастотне зондування* характеризується високою роздільною здатністю щодо дрібних об'єктів з розмірами від перших сантиметрів, глибина залягання яких не перевищує десяти метрів. Глибинність зменшується до перших метрів у провідних середовищах, таких як глини і ґрунти, просякнуті соляною або забруднені поровою вологою.

Георадар посилає в землю сигнали, які відбиваються від границь тіл з різними електричними властивостями. Часові розрізи відбитих електромагнітних хвиль дозволяють оцінити глибину об'єктів. Метод GPR може бути досить швидким при постановці в польових умовах, але ані устаткування, ані інтерпретація радарограм не є простими.

Роздільна здатність системи покращується на більш високих частотах, при умові, що відношення ширини смуги пропускання до медіанної частоти залишається однаковим. Це одна з причин чому георадари пристосовані до роботи на різних діапазонах частот. Повинна виконуватись умова відповідності між робочим діапазоном і роздільною здатністю GPR-системи. Затухання зменшується зі зменшенням частоти у вологих геологічних середовищах. Роздільна здатність зростає на високих частотних діапазонах, а це, як правило вимагає, щоб медіанна частота радара була збільшена.

Основним обмеженням метода GPR є те, що він не може нормально проникати нижче глинистого горизонту. Часто при використанні неправильних антен важливі особливості розрізу не чітко виділяються або втрачаються повністю. Це відбувається через погану роздільну здатність або надмірне затухання сигналу в околі шуканого об'єкту. Нині проводяться дослідження з пристосування технологій обробки й інтерпретації сейсмічних сигналів для обробки георадарних даних.

В останні десять років спостерігається значний прогрес в області обробки і візуалізації георадарних даних, збільшилась інформативність цього методу археолого-геофізичної розвідки.

**Сейсмічні методи** ґрунтуються на різниці пружних властивостей природних і археологічних ґрунтів. Зокрема, для виявлення порожнеч в однорідному гірському масиві або в стародавніх кам'яних будівлях використовується метод відбитих хвиль [10]. У ході вимірювань відбувається переважно реєстрація відбиття сейсмічних хвиль, генерованих імпульсними або віброджерелами від границь археологічних об'єктів та горизонтальних границь і неоднорідностей культурних шарів. Методи заломлених хвиль не знайшли широкого застосування в археології, адже інтерпретація значно ускладнюється і навіть унеможливується при наявності шарів з пониженими швидкостями, наприклад, культурних археологічних шарів, або локальних об'єктів, таких як місця поховань, кам'яні стіни й фундаменти.

**Електромагнітні методи** – група, яка відома ще під назвою "індукційні методи". В методах цієї групи передавальна котушка посиляє первинний сигнал в землю викликаючи вторинний сигнал, відгук. Вторинний сигнал сприймається приймачною котушкою. Об'єкти і ґрунти, які проводять електричний струм або намагнічуються, здатні змінювати характер вторинного сигналу.

Метод викликаної поляризації (ВП), вперше був пристосований для вирішення археологічних задач у 1960-х роках. За допомогою цього методу успішно виявляють культурні шари збагачені глиною або піритом внаслідок людської діяльності. Обмежений досвід використання свідчить про те, що в деяких випадках метод ВП може виявитись більш інформативним ніж методи постійного струму. Метод ґрунтується на реєстрації процесів затухання параметрів штучного неусталеного поля в часі за допомогою електродів, що не поляризуються, використання яких значно уповільнює польові роботи. Метод рідко використовується через те, що потребує багато часу, і для його постановки необхідне дороге складне обладнання. Його застосування може бути виправдане тільки для деяких спеціалізованих досліджень.

#### **Принципи комплексування геофізичних методів досліджень археологічних пам'яток.**

Основною метою приповерхневих геофізичних досліджень є побудова якомога більш повної тривимірної моделі підземних об'єктів. При археологічних дослідженнях доцільним є комплексування різних неруйнівних методів, особливо якщо вони працюють з надвисокою роздільною здатністю в режимі 3-D томографії. Ме-

тодичні комплекси потрібно розробляти і застосовувати згідно з принципом потенційної кореляції між усіма методами, які продемонстрували найвищу ефективність при вивченні неоднорідних середовищ.

Крім того, оптимальний комплекс має включати як методи геофізичного картування, наприклад, магніторозвідку, електричне профілювання, георадар, так і методи дослідження вертикальної структури приповерхневої частини розрізу – томографію електричного опору, георадар тощо.

**Спільний аналіз інформації засобами ГІС.** Дані спостережень зазвичай засвоюються у вигляді локальних точкових вимірювань і, значно рідше у вигляді полів просторових і часових змін. Адекватна екстраполяція можлива на базі сучасних геоінформаційних систем, у яких можливе врахування низки факторів. Тому важливим етапом сучасного розвитку стало впровадження теорії і практики мультидисциплінарних досліджень географічних інформаційних систем (ГІС) [12].

За їх допомогою можливе об'єднання кількох джерел інформації про пам'ятку – це можуть бути не тільки археологічні і топографічні дані, а й геоморфологічна, ландшафтна та геофізична інформація. Вони стають складовими багатогранного мультидисциплінарного пізнавального процесу, у якому в основному робиться акцент на вивчення просторового розподілу накопиченого матеріалу у тісному взаємозв'язку з оточуючим середовищем і людьми, що у ньому існували.

В останні десятиліття у Світі багатьма академічними і пам'яткоохоронними організаціями реалізуються комплексні мультидисциплінарні проекти пошуків, моніторингу і збереження археологічної спадщини регіонів. В рамках таких проектів можливо зібрати достатню кількість даних для проведення реконструкцій і пошуків взаємозв'язків між змінами палеоекологічних ситуацій і соціокультурною еволюцією доісторичних суспільств.

Реконструкцію соціальної організації та господарчих стратегій доісторичного життя в межах археологічного регіону можливо провести на прикладі серії пам'яток. Такий підхід сприятиме формуванню нових уявлень про історичний процес як явище, кероване імпульсами природного середовища в усьому його багатому різноманітті. Спробу прослідкувати зв'язки між природними й соціальними процесами на прикладі конкретних груп археологічних пам'яток епох, які хронологічно наслідують одна одну, слід розцінювати як надзвичайно важливий крок до пізнання наукової істини.

**Висновки.** Розглянуті можливості сучасних методів геофізичних досліджень при вирішенні проблемних питань палеоекології та археології.

Обґрунтована можливість створення комплексних моделей розвитку і змін адаптивних стратегій археологічних культур у співставленні із палеогеографічною динамікою регіонів на підставі даних геофізичних досліджень.

Застосування геофізичних і геоінформаційних методів створює надійне емпіричне підґрунття для дискусії про взаємовідносини природи і суспільства, наповнену численними свідченнями про природні умови давніх епох.

1. Герасименко Н.П. Природная среда обитания человека на Юго-Востоке Украины в позднеледниковье и голоцене (по материалам палеогеографического изучения археологических памятников) // Археологический альманах. – 1997. – № 6. – С. 3-64. 2. Дараган М.Н. Начало раннего железного века в Днепровской Правобережной Лесостепи. – К., 2011. 3. Девятова Т.А., Щербатов А.П. Биологическая активность черноземов центра русской равнины // Почвоведение. – 2006. – № 4. – С. 502-508. 4. Лысенко С.Д., Матвишина Ж.Н., Пархоменко А.Г., Бондарь К.М. Могила Лядвига – "царский" курган времени скифской архаики на Фастовщине (по результатам исследований 2005-2006 гг.) // Археологические памятники Фастовщины: Материалы та дослідження: До 75-річчя Надії Михайлівни Кравченко. – К.-Фастів, 2010. – № 26-27. – С. 65-90.

5. *Aitken M.J.* Physics and Archaeology. – Oxford, 1974. 6. *Allison V.J., Yermakov Z., Miller R.M., Jastrow J.D., Matamala R.* Using landscape and depth gradients to decouple the impact of correlated environmental variables on soil microbial community composition // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2007. – V. 39. – P. 505-516. 7. *Clarke D.L.* Analytical Archaeology. – London, 1968. 8. *Evans M.E., Heller F.* Environmental magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics // *International Geophysics series*. – 2003. – V. 86. 9. *Maher B., Thompson R.* Quaternary

*Climates, Environments and Magnetism*. – Cambridge, 1999. 10. *Seeing the unseen. Geophysics and Landscape Archaeology* / Eds. S. Campana, S. Piro. – London, 2009. 11. *Watson P.J., Le Blank S.A., Redman C.L.* Archaeological Explanation: The Scientific Method in Archaeology. – New York, 1984. 12. *Wheatley D., Gillings M.* Spatial Technology and Archaeology: The archaeological applications of GIS. – L.; N.-Y., 2001.

Надійшла до редколегії 24.07.12