

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.837:550.8.05

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.02>К. Бондар, д-р геол. наук, наук. співроб.,
E-mail: ks_bondar@ukr.net;С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vyzhvas@gmail.com;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;І. Шейко, канд. іст. наук,
E-mail: ira.sheiko@gmail.com,Інститут археології НАН України,
просп. Героїв Сталінграда, 12, м. Київ, 04210, Україна;Р. Козленко, канд. іст. наук,
E-mail: rknoval@ukr.net,Национальний історико-археологічний заповідник "Ольвія" НАН України,
вул. Ольвійська, 47, с. Парутине, Миколаївська обл., 57540, УкраїнаНациональний історико-археологічний заповідник "Ольвія" НАН України,
вул. Ольвійська, 47, с. Парутине, Миколаївська обл., 57540, Україна**ПОЛЬОВІ МЕТОДИ АРХЕОЛОГІЧНОЇ ГЕОФІЗИКИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ:
ВИТОКИ, СТАНОВЛЕННЯ, СУЧАСНІСТЬ***(представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О. В. Шабатурою)*

Відображено історію застосування геофізичних методів в археологічних дослідженнях вченими з Європи, США, колишнього СРСР та України. У 1950-х рр. дослідники швидко перейшли від перших вдалих спроб до виконання масових магнітних та електричних знімаль, у 1980-х р. відбувся перехід до цифрової реєстрації під час польових спостережень, а також бурхливий розвиток засобів оброблення даних. Це, у свою чергу, зумовило впровадження до археологічної практики низки активних геофізичних методів, які потребують складних обчислень при обробленні сигналу та інверсії даних: георадарного методу, томографії електричного опору, індукційного методу тощо. На сучасному етапі гострої актуальності набувають питання інтерпретації даних усе більш детальних і масштабних геофізичних знімаль у контексті розрізнення все більш слабких за контрастом фізичних властивостей і дрібних за розмірами неоднорідностей у ґрунтового покриві. Підтвердження антропогенного і техногенного походження геофізичних аномалій шукають шляхом прямих вимірювань і моделювання фізичних показників ґрунтів та археологічної речовини. Також представлено здобутки вітчизняних геофізиків, які стали основою для великих сучасних археологічних проєктів і зробили археологічну геофізику фундаментальною складовою пам'яткоохоронних досліджень в Україні.

Ключові слова: геофізичні методи, археологічна пам'ятка, магнітометрія, методи опору, георадарний метод.

Вступ. Як серед широкого загалу, так і у професійному середовищі досі побутує думка про геофізичні дослідження як новітні археологічні методи і технології. Втім, застосування цих методів в археології має 70-річну історію, повну спроб, відкриттів і розчарувань, не тільки в Європі і світі, а й в Україні. Наша робота покликана ознайомити читача з історією розвитку археологічної геофізики як окремої наукової дисципліни на стику гуманітарної та природничої сфер знання.

Застосування геофізичних технологій для розв'язання завдань археології почалося з електричних та магнітних методів, які й досі залишаються найбільш важливими та інформативними (Aitken, 1974; Scollar et al., 1990).

Історія і хронологія впровадження геофізичних методів до археологічної практики нерозривно пов'язані з розвитком і появою нових вимірювальних систем, автоматизацією процедур оброблення і візуалізації даних, зростанням рівня обізнаності археологічної спільноти щодо пошукових можливостей геофізичних методів, вдосконаленням пам'яткоохоронного законодавства.

Становлення археологічної геофізики має розглядатися як безперервний процес, який мав як етапи розвитку в часі, так і територіальні особливості. Автор достатньо повного огляду застосувань магнітометрії в археології Т. Хербіш пропонує виділяти: 1) початок досліджень у кінці 1950-х – на початку 1960-х рр.; 2) поступовий розвиток у 1960–80х рр.; 3) бурхливий розвиток у 1980–90-х рр. – етап, який, на думку автора, продовжується дотепер (Herbich, 2015). Оскільки магнітометрія є провідним методом неруйнівної археологічної розвідки, то ця періодизація відображає загальні тренди розвитку археологічної геофізики загалом, але, на нашу думку,

шлях автоматизації та моторизації вимірювань, на який стала ця наукова галузь із другої половини 1990-х рр., слід виділити в окремий етап. Крім того, зараз, на наших очах відбувається поворот від кількості до якості знання, про що буде сказано під час висвітлення поточних здобутків геофізиків у межах комплексних археологічних проєктів. Основним предметом нашого розгляду стануть визначні віхи в розвитку кожного із трьох основних геофізичних методів (магнітометрії, методів опору, георадарного методу), оскільки осягнути тут тисячі публікацій, які існують на сьогодні за нашою темою, неможливо.

У нашому огляді висвітлений як світовий (європейський та американський) досвід, так і досвід у колишньому СРСР і далі в незалежній Україні, про який європейські дослідники майже не мали уявлення (Gaffney & Gatters, 2003; Herbich, 2015) аж до появи масштабних спільних проєктів у 2010-х рр., коли вражаючі напрацювання вітчизняних фахівців у 1960–90-х рр. стали поштовхом для сучасних високоточних і ультрадетальних досліджень, зокрема на пам'ятках трипільської культури (Koshelov, 2005b; Charman et al., 2014; Rassman et al., 2014).

Початок та здобутки геофізики у світовій археології. Спроби здобути археологічні знання, не порушуючи цілісність ґрунтового покриву, із застосуванням прикладних методів досліджень відомі від 30-х рр. ХХ ст. (du Mesnil du Buisson, 1934), однак першими систематичними та результативними археолого-геофізичними дослідженнями у світі вважають роботи Р. Аткінсона з вимірювання питомого електричного опору на археологічній пам'ятці у Дорчестері-на-Темзі. Використовуючи просту чотирихелектродну установку, він здійснив успішне знімання, у результаті якого були виявлені рови та

© Бондар К., Вижва С., Шейко І., Козленко Р., 2022

ями за пониженими значеннями електричного опору зволоженого заповнення цих об'єктів, викопаних у кам'янистому ґрунті (Atkinson, 1953).

Магнітометрія. Найраніші спроби застосування магнітометра в археології були зроблені в Англії у 1956 р. (Belshé, 1957; Aitken, 1958), коли вперше було помічено, що горн з обпаленої глини спричиняє зміни в геомагнітному полі, які можна зафіксувати протонним магнітометром. М. Ейткін зауважив також, що можна виявляти ями, заповнення яких має підвищену намагніченість, і навіть зауважив, що величина аномалії залежить від вмісту гумусу і того, чи розводили там вогнище раніше. Дослідник назвав цей метод "magnetic prospecting" (магнітний пошук).

Наприкінці 1950-х – початку 1960-х рр. запит на розроблення геофізичного обладнання, яке відповідало б високим вимогам до чутливості та роздільної здатності методів при дослідженні археологічних об'єктів, підштовхнув до створення одразу кількох типів магнітометрів і різних модифікацій електрометричного устаткування. Зокрема, протонний магнітометр, яким користувались Дж. Белше та М. Ейткін, був розроблений в Оксфордському університеті вже за кілька років після того, як явище вільної прецесії протонів у магнітному полі Землі було вперше спостережене експериментально (Packard and Varian, 1954). Цей прилад важив 10 кг і мав чутливість 1 нТ, що дозволяло дослідникам впевнено реєструвати аномалії від британсько-римських печей, які становили близько 100 нТ і ровів (10–15 нТл). У кінці 1950-х рр. з'являються комерційні протонні магнітометри із чутливістю 1–10 гамма, а також перші градієнтметри на їх основі. Перший ферозондовий градієнтметр був також розроблений в Оксфорді та протестований на городищі раннього залізного віку у 1961 р. (Tite, 1961). Він вимірював градієнт вертикальної складової магнітного поля, мав чутливість 1 нТл і можливість запису на паперову стрічку, що дозволяло виконувати відносно детальні вимірювання на великих ділянках.

На початку 1960-х рр. американська дослідниця Е. Ральф, проводячи дослідження в Сибарісі (Греція), стикнулася з умовами, які вимагали більш чутливого інструменту, ніж протонний градієнтметр, використаний там раніше. Розкопки показали, що руїни грецького міста VI століття до н. е. розташовані на глибині від 4 до 6 м, покриті шарами алювіальної глини. Протонний градієнтметр виявився ефективним у пошуку археологічних споруд до глибини 3 м, що в цьому конкретному випадку дозволило дослідити лише залишки римської доби. Тоді американська компанія Varian Associates запропонувала археологам квантовий рубідієвий магнітометр з оптичним накачуванням із чутливістю у сто разів більшою, ніж у протонного магнітометра (0,01 гамма), який і був використаний для розв'язання описаної задачі (Ralph, 1964). Випробування показали, що вимірювання з рубідієвим магнітометром у диференціальній конфігурації (тобто один прилад записує варіації геомагнітного поля, а другий використовується власне для знімання) були в чотири рази швидшими, ніж із протонним магнітометром.

Різні модифікації геофізичних технологій і приладів проходили випробування на широкому розмаїтті пам'яток, серед яких римські табори, етрусські некрополі, грецькі колонії, середньовічні індіанські поселення, античні міста тощо. У 1960-х роках такі наукові центри, як Фонд Лерічі при Міланському університеті (Італія), Рейнський краєзнавчий музей у Бонні (Німеччина), Центр геофізичних досліджень НЦНД у Гарші (Франція), Центр прикладних наук в археології при Музеї Університету

Пенсільванії (MASCA) включили геофізичну розвідку до своєї практики. Цими організаціями виконані сотні знімань на пам'ятках Греції, Італії, Туреччині, Ірландії, Центральної Америки, у Сполучених Штатах та Канаді (Herbich, 2015).

У 1970-х рр. геофізичні методи стають важливими інструментами археологічного дослідження завдяки високій результативності при пошукових роботах у рутинній археологічній практиці, що особливо актуально за нагальної необхідності обстеження територій, запланованих під будівництво. Крім того, до цього часу було налагоджено масове виробництво апаратури, яка відповідала саме археологічним потребам, а також здійснювалась підготовка фахівців на базі кращих університетів і наукових центрів Європи.

До цього додалася нова тенденція в археології – прагнення до реконструкції ландшафту та довкілля в межах цілих культурних і географічних регіонів, а не тільки на окремих пам'ятках (Gaffney & Gater, 2003). Цей підхід захоплював застосування методів, які допомагали зрозуміти масштаби освоєння простору в минулому.

У 1980-ті та 1990-ті роки у європейських країнах і США швидко зростання кількості археологічних проектів, у яких застосовані геофізичні методи, було зумовлене подальшим технологічним розвитком апаратури і методів оброблення інформації, змінами пріоритетів в археологічній науці та пам'яткоохоронному законодавстві і, нарешті, широким впровадженням геофізичних курсів до археологічних освітніх програм. Найважливішою технологічною зміною, яка відбулася у 1980-х рр., став остаточний перехід до більш чутливої апаратури з високою продуктивністю. Повільні протонні магнітометри поступилися приладам з більшою швидкістю (порядку 0,1 сек.) і роздільною здатністю в діапазоні від 0,1–0,01 (ферозондові) до 0,001 нТ (цезієві) із можливістю запису показань до пам'яті приладу.

Автоматизація вимірювань спричинила зростання продуктивності наземного знімання. Водночас поліпшення роздільної здатності даних, обумовлене підвищенням чутливості апаратури та щільності мережі спостережень, зумовило значне поліпшення ідентифікації археологічних об'єктів. Бурхливий розвиток комп'ютерної техніки вплинув на якість оброблення та інтерпретації даних, відкрив можливість використання більш складних алгоритмів. Поліпшені ПК стали спроможними підтримувати нові програмні комплекси для візуалізації геофізичної інформації, з'явилась можливість виявляти аномалії, які складно було побачити у паперовому графічному зображенні. У магнітометрії, наприклад, з'явилися карти у відтінках сірого кольору, які значно випередили за інформативністю карти ізольовані і стали загально визнаним стандартом для зображення даних.

Німецькі й австрійські геофізики у 1980-х роках відмовляються від використання протонних магнітометрів на користь цезієвих, які вони застосовували як у конфігурації градієнтметра (на ділянках із високим рівнем магнітних завад – біля ЛЕП, електропотягів тощо), так і в диференціальній конфігурації (за відсутності завад) (Becker, 1985; Neubauer et al., 1995). Важливими технологічними удосконаленнями стали автоматична реєстрація даних у русі (збільшення просторової роздільної здатності при режимі реєстрації 10 замірів за секунду означає, що при спокійному крокуванні оператора фізичні точки спостережень розташовуються через кожні 12 см (Becker, 1985)), а також використання спеціальних картів (возиків) для переміщення приладів.

Найбільш яскраві роботи команди Х. Бекера – це картування неолітичних пам'яток, таких як рондели (як, наприклад, Schmiedorf та Kothingeichendorf) і залишки довгих жител у Балдінгені, реконструкція римського табору Макбрайт, де за 1986–1991 рр. досліджень було відзнято площу близько 25 га.

Безсумнівно, бурхливий розвиток археологічної геофізики був би неможливий без належної підготовки спеціалістів у закладах освіти. Освітня спеціалізація з археологічної геофізики була відкрита в університетах Бредфорда, Дарнема та Глазго, де геофізичні дослідження вчать сприймати як компоненту цілісного археологічного дослідження і на аналітичній стадії проєктів, і на етапі синтезу й узагальнення інформації. Обізнаний фахівець може адаптувати та змінювати методологію дослідження з метою досягнення кращих результатів у конкретних умовах. Як показує практика, методологічні рішення, запропоновані геофізиками, необізнаними з археологічним контекстом, часто виявляються неоптимальними, а результати – незрозумілими або недостатньо інформативними для археологів. Це змушує деяких археологів насторожено ставитися до геофізичних методів і, на жаль, призводить до дискредитації геофізики у фаховій археологічній спільноті.

У 1995 р. були складені методичні рекомендації з геофізичних досліджень при археологічній експертизі (*English Heritage, 1995*), покликані допомогти досягти стандартизації методів прикладної геофізики в археології.

Принциповою зміною в методології магнітних вимірювань, що відбулася у 1990-х рр., стало розроблення мультисенсорних мобільних систем, які транспортувалися на спеціальному карті або переносилися оператором і дозволяли реєструвати магнітне поле за один прохід оператора одночасно уздовж кількох профілів. Ідея використання кількох датчиків одночасно виникла у зв'язку із необхідністю збільшити швидкість польових досліджень. Зокрема, мюнхенська група, очолювана Х. Беккером, тестувала мультисенсорну технологію із цезієвими магнітометрами в античній Трої. Вимірювання з ферозондовим градієнтметром продемонстрували ефективність магнітного методу для ідентифікації римського міста (Троя-Х), але залишки, які належать до більш ранніх фаз існування міста, простежити не вдалося. Вимірювання цезієвим магнітометром Scintrex із роздільною здатністю 0,1 нТл були виконані Х. Беккером та Й. Фасбіндером з метою картування більш глибоких археологічних верств. Вони справді надали можливість вивчити планування міста Троя-VI доби пізньої бронзи за магнітною картою, що охоплює площу 18 га. Сенсаційна інформація про реконструкцію планування Гомерової Трої привернула увагу Р. Павліка, конструктора з компанії "Picodas", який запропонував створити прилад з роздільною здатністю 1 пікотесла, що і було зроблено. CS2/MEP720 (Scintrex/Picodas) стала найбільш чутливою системою, що використовувалась в археології (*Becker, 1995*). Система була змонтована на карті, що обмежувало її використання місцями, де цей колісний карт міг проїхати.

Наступною була побудована система Smartmag SM4G (Scintrex), яка працювала в конфігурації градієнтметра і змонтована на дерев'яній рамі, датчики були розташовані на відстані 0,5 м один від одного. Маючи роздільну здатність 0,01 нТл, ці датчики були менш чутливі, ніж у системи CS2/MEP720. Х. Бекер та Й. Фасбіндер виконали десятки знімів із цієї системою поза межами Німеччини, в рамках кооперації з різними археологічними установами. Серед найбільш видатних

проєктів – картування столиці Єгипту епохи Рамзесидів за Нового царства Квантір у дельті Східного Нілу, дослідження планування елліністичного району в Пальмірі (Сирія), знімання на скіфських поселеннях та курганах у Сибіру. Дослідження, проведені на городищі Чіча (доба бронзи – раннього залізного віку), що в Барабинському лісостепу, стали класичним прикладом сучасних можливостей магнітометричного методу і охоче цитуються авторами оглядових монографій з магнетизму (напр. *Evans & Heller, 2003*). Геофізичне мікромагнітне знімання виконано на території в 58 800 кв. м (5,88 га). Як зазначають самі автори, "результати геофізичних досліджень перевершили всі сподівання: на орному полі були виявлені нові системи укріплення, житлових і виробничих майданчиків, які, без сумніву, становлять єдиний комплекс із рельєфом вираженим городищем і перевершують його за площею не менше ніж у п'ять разів" (*Becker & Fassbinder, 1999*).

Аби ще зменшити час на польові роботи, Х. Бекер установив усі чотири цезієві сенсори градієнтметра Smartmag на одному рівні на відстані 0,5 м один від одного. Цю систему він назвав *магнітосканером* і за його допомогою виконав кілька визначних проєктів в Італії, напр. Остія (де виявлено ранньохристиянську базиліку), і в Баварії, напр. Рюффенхофен (реконструкція повного плану римського укріплення). В останньому випадку швидкість вимірювань мала важливе значення з огляду на те, що пам'ятка була доступна для дослідження протягом коротких періодів між сільськогосподарськими роботами. Однак система із чотирма датчиками не знайшла такого широкого застосування, як магнітометр із двома датчиками, який і зараз використовується групою Й. Фасбіндера.

Австрійці також активно тестували можливості систем із датчиками високої роздільної здатності в різних конфігураціях. Спільними зусиллями академічних дослідників і приватної компанії (Archeo Prospections) була створена група, яка активно займалася розвідкою на пам'ятках, одночасно вдосконалюючи способи візуалізації результатів та їх археологічну інтерпретацію. Їхнім полігоном став Карнунтум, римське містечко поблизу Відня (*Neubauer & Eder-Hinterleitner, 1997*). Дослідження в різних регіонах Австрії привели до відкриття і картографування десятків пам'яток неоліту із характерними кільцевими ровами (*Neubauer & Melichar, 2010*).

Окрім цезієвих магнітометрів, великої популярності набули ферозондові градієнтметри, головним чином через їхню відносну дешевизну та легкість у використанні (*Bartington & Chapman, 2004; Gaffney et al., 2000*).

У 1990-х рр. німецька компанія "Förster" розробила ферозондовий градієнтметр із багатьма датчиками, який був впроваджений до археологічної практики колективом Інституту наук про Землю Університету Кіля у 1992–94 рр. (*Stümpel, 1995*). Ця система не постала з археологічного досвіду (як це було у випадку із цезієвими системами), а була первинно розроблена для військових потреб, тобто передусім для пошуку набоїв, які не розірвалися.

Система з п'ятьма ферозондовими датчиками, встановленими на рамі, що переносилася двома людьми, була використана для складання карти хетського міста Carica в Туреччині (*Trinks, Stümpel, Lorra, 1999*). За допомогою вдосконаленого варіанта системи, встановленого на візку, який тягнув мінітрактор, була повністю закартована територія (65 га) грецької колонії Селінус на сході Сицилії.

Подібні мультисенсорні системи використовувались і на пам'ятках України, про що буде сказано нижче.

У 2005 р. в Інституті фотонних технологій ім. Лейбніца в Йені (Німеччина) була побудована принципово нова система для високоточної магнітної розвідки на базі СКВІД-датчиків (від англ. SQUID, Superconducting Quantum Interference Device – "надпровідний квантовий інтерферометр") (Stolz et al., 2004). СКВІД-магнітометри володіють рекордно високою чутливістю 1 фемтотесла. Ця система розроблена для широкомасштабного сканування місцевості, подібно до ферозондових і цезієвих систем. Щоб зробити СКВІД-сенсори придатними для геофізичного застосування, розробникам довелося розв'язати кілька серйозних проблем. Основна складність полягала в постійній наявності магнітного поля Землі, яке в 109 разів сильніше, ніж поріг чутливості SQUID-магнітометра. Таким чином, лінійний рух у земному магнітному полі векторних датчиків, таких як SQUID або ферозондові магнітометри, спричиняє отримання сигналів, які містять переважно шуми від невеликих нахилів або обертань датчиків. Єдиний вихід – реєструвати просторову похідну магнітного поля в одному напрямку в конфігурації градієнтметра замість самої компоненти поля. База градієнтметра, тобто відстань між двома квадратними петлями надпровідних антен, становить лише 6 см, роздільна здатність – 16 фТл/см. Градієнтметр змонтований всередині кристата, де постійно підтримується температура нижче 9,2 К, необхідна для функціонування СКВІДів. Система була вперше випробувана в пустелі Наска в Перу, де вона продемонструвала археологічну інформативність, не гіршу за цезієві магнітометри (Linzen et al., 2009), але говорити про перспективу її широкого впровадження в археологічну практику зарано через високу собівартість досліджень.

Методи опору. З 50-х рр. XX ст. постійно зростали обсяги застосування і продовжувався методичний розвиток методів опору, які стали надзвичайно популярними при дослідженні археологічних пам'яток і картуванні похованих старожитностей. Успіх методів опору забезпечується значною різницею питомого електричного опору між такими структурами, як стіни, дороги, будівлі, канали, і ґрунтом, у якому вони поховані. Найбільш уживаними в археології стали конфігурації чотириелектродних установок Веннера та Шлюмберже. Переваги і недоліки різних установок широко обговорювались. Наприклад, головною вадю установки Шлюмберже визнано значну залежність результатів від орієнтації вимірювальної лінії відносно об'єкта, оскільки структури, паралельні орієнтації установок, погано розпізнавались.

При площинних вимірюваннях найбільшої популярності набула чотириелектродна установка (Clark, 1990) для досліджень методами опору та зближених електродів. Практична реалізація такої конфігурації дуже проста: по пікетах профілю переміщують два електроди (один живлячий та один приймальний), тоді як два інші залишають нерухомими на близькій відстані один до одного, але водночас далеко від полігону, який обстежується. Дані такого обстеження легко інтерпретувати, отже, метод був успішно використаний при картуванні похованих споруд і об'єктів на різних археологічних пам'ятках і продовжує широко застосовуватись.

У 1990-х рр. значним кроком на шляху до підвищення археологічної інформативності електричних методів стала адаптація нової технології томографії електричного опору (ТЕО, англ. ERT – electrical resistivity tomography) до археологічних потреб (Mol, Preston, 2010). Цей метод також добре зарекомендував себе при

розв'язанні гідрогеологічних, геологічних, інженерних та екологічних завдань.

При виборі типу установки для роботи методом електротомографії ключовими характеристиками є глибинність, роздільна здатність і завадостійкість. Тому з'явилася серія робіт, присвячених аналізу типів установок і критеріїв вибору оптимальної конфігурації, часто на основі даних математичного моделювання (Loke, 2009; Zhou & Dahlin, 2003).

Вперше метод томографії електричного опору був використаний для візуалізації археологічних споруд під час експериментальних досліджень римського міста Веруламіум у Великобританії (Noel & Xu, 1991). В археологічній практиці електрична томографія служила переважно для доповнення і поліпшення інформаційного контексту, отриманого за допомогою інших геофізичних методів. ТЕО ефективно застосовується для заходження стін, порожнин та інших структур на різних глибинах (Papadopoulos et al., 2006; Drahor et al., 2008).

Розвиток технологій автоматизації та мультиплексації вимірювань за допомогою установок різної конфігурації посприяв можливості отримання великої кількості польових даних за обмеженого часу. Крім того, поява швидких комп'ютерів стимулювала розроблення автоматизованих алгоритмів інверсії позірної опору, які дозволяють побудувати геоелектричні розрізи за експериментальними даними. Популярним методом інтерпретації даних томографії електричного опору стала гладкообмежена (або блокова) інверсія (the smoothness constraint inversion) (Constable et al., 1987). Вона створює спрощену модель підповерхневого розподілу питомого опору, яка є розумним відображенням геологічного розрізу. У результаті використання алгоритму гладкообмеженої інверсії отримують найбільш стійкий розподіл питомого опору. Така модель є хорошим стартовим наближенням для подальшої інтерпретації. Блокову інверсію рекомендується використовувати в більшості випадків, особливо за відсутності апріорної інформації про геоелектричний розріз. У літературі описано кілька двовимірних алгоритмів гладкообмеженої інверсії даних ТЕО (Sasaki, 1992; Loke & Barker, 1995). Крім того, було представлено кілька алгоритмів для реалізації інверсії даних ТЕО у трьох вимірах.

Для виконання тривимірних досліджень методом ТЕО з метою отримання 3D-моделі досліджуваного середовища використовують різні конфігурації електродів, можливі в межах мережі з конкретною геометрією (Berge & Drahor, 2011; Fischanger et al., 2019).

Утім, незважаючи на розробку вдосконаленого устаткування та методів тривимірної інтерпретації, загальна геофізична практика все ще спирається переважно на двовимірні підходи як при польових вимірюваннях, так і при інтерпретації даних. Дані, отримані по мережі профілів, зазвичай інтерпретуються за допомогою двовимірних алгоритмів, а результати комбінуються пізніше для створення квазітривимірних (x, y, z) візуалізацій.

Для подолання основних обмежень установок із фіксованою конфігурацією були розроблені мобільні системи картування електричного опору (Panissod et al., 1998; Papadopoulos et al., 2006; Dabas, 2008). Зокрема, мобільні мультиполярні багатоелектродні системи дозволяють виконувати дослідження методом електропрофілювання опору в русі, що суттєво скорочує час на збирання польової інформації. Одним із перших технологічних рішень стала прямокутна установка з електродами, вмонтованими в колеса, яка дозволяла вимірювати позірний опір ґрунту на постійній глибині.

Глибину дослідження можна було збільшити за рахунок зміни відстані між колесами. Пізніше були розроблені й описані інші варіанти мультиполярних мобільних систем. Зокрема, К. Паніссод із колегами (*Panissod et al., 1998*) запропонував конфігурацію на мобільній платформі, яка складалася із восьми електродів, розміщених на V-подібній рамі (так звана установка "Vol-de-canards", тобто "пташиний клин" – фр.). Це обладнання використовувалося для малоглибинних досліджень (до 3 м). Означена мультиполярна конфігурація забезпечує отримання тривимірної моделі підземного простору зі значною економією часу на збирання даних порівняно з мобільною установкою "pole-pole" в однакових умовах (*Panissod et al., 1998*). Подальші дослідження (*Dabas, 2008*) були присвячені вдосконаленню мультиполярних систем з метою зменшення впливу шуму на вихідні дані. Зокрема, М. Дабас розробив обладнання, відоме як "автоматизована установка електропрофілювання" (Automated Resistivity Profiling – ARP). Прилад складається із поперечного живлячого диполя і трьох поперечних приймаючих диполів, встановлених на зростаючій відстані від живлячого. Ця конфігурація призначена для одночасних вимірювань видимого опору на трьох різних глибинах. Н. Пападопулос зі співавторами (*Papadopoulos et al., 2009*) описав розв'язання оберненої задачі для даних позірного опору, отриманих за допомогою системи ARP, з метою отримання надійної числової моделі, здатної описати просторовий розподіл електричного опору у приповерхневому шарі ґрунту досліджуваної області. Описаний авторами процес інверсії заснований на методі найменших квадратів і використовує гладкообмежений алгоритм, який враховує нестійкість моделі та неєдність розв'язку.

Розроблення мобільного устаткування дозволила збільшити охоплення території вимірюваннями, а також різко скоротила час, необхідний для проведення досліджень. Доступними стали дослідження електричного опору великих площ археологічних пам'яток і ландшафтів. Наприклад, у 2013–2015 рр. на археологічній пам'ятці Мон-Прама в Сардинії (Італія) вимірюваннями позірного опору високої детальності було покрито 22 800 м² (*Piroddi et al., 2020*). Дані про електричний опір отримували в реальному часі із сантиметровою горизонтальною точністю завдяки синхронізації геофізичних вимірювань із даними диференціальної системи позиціонування GPS. Додатковою перевагою стала можливість спільного аналізу тривимірної геофізичної інформації та детальної цифрової моделі місцевості, що сприяло точному визначенню ділянок, найбільш перспективних для майбутніх археологічних досліджень.

Георадарний метод. Зацікавленість фахівців у використанні методу георадіолокації, або георадарного методу (англ. GPR – ground-penetrating radar), не зростала стабільно із часом. Починаючи зі стадії лабораторних розробок у 1970-х рр., метод одразу привернув до себе увагу геофізиків-дослідників приповерхневої частини геологічного розрізу, яка потім послабшала приблизно на 10 років. Згодом, у середині 1980-х рр., у зв'язку з бурхливим розвитком електроніки, обчислювальної мікропроцесорної техніки і одночасним зростанням потреб в інженерній розвідці, інтерес до георадарного методу підвищується, але, наштотхнувшись на відсутність задовільних систем оброблення хвильової інформації, знову згасає (*Владов и Старовойтов, 2004*).

Перші застосування георадара в археології припадають на 1975 р., дослідження були виконані у США. У наступні десятиліття було опубліковано результати низки

успішних впроваджень методу у сприятливих умовах, зокрема американськими та японськими вченими (*Goodman & Nishimura, 1993; Conyers & Goodman, 1997*). Сприятливими умовами дослідники справедливо вважали сухі піщані ґрунти або лід, де не спостерігається швидкого затухання електромагнітного сигналу і є можливість отримати радарограму задовільної роздільної здатності щодо археологічних об'єктів.

У європейській археології перші експерименти з використання аналогової георадарної системи для пошуків похованих об'єктів відбулися у 1980 р. у південній Швеції (*Viberg, Trinks, & Lidén, 2011*) та на Кіпрі (*Fischer, 1980 a*). Результати останнього знімання були пізніше підтверджені археологічними розкопками, під час яких виявилось, що найбільш яскраві відбиття на радарограмах відповідали залишкам давніх стін.

Із 1990-х рр. інтерес до використання GPR перебував у стадії постійного бурхливого зростання. Крім георадарів широкого спектра використання, випускається і спеціалізована апаратура для вузьких цілей, зокрема для роботи на археологічних пам'ятках. Перші георадарні системи були великими за розмірами, громіздкими конструкціями, приймач і передавач були з'єднані кабелями із принтером, який друкував радарограми на термопапері. Переваги методу для археологічної розвідки стали очевидні з появою систем цифрового запису вимірювань і програмного забезпечення для оброблення хвильових даних на основі алгоритмів, запозичених із сейсмозвідки, а також із початком застосування моделювання георадарних даних для поліпшення розуміння спостережених хвильових полів (*Neubauer et al., 2002*).

За останні 20 років кількість прикладів успішного застосування георадара в археології істотно збільшилась, про що, зокрема, свідчить зростаюче значення археологічних секцій таких спеціалізованих форумів, як The International Conferences on GPR та EuroGPR.

До порівняно недавнього часу бракувало досліджень ефективності георадарних технологій на глинистих і перезволожених ґрунтах. Перезволоження зменшує швидкість передавання радіохвиль, випромінюваних георадаром, і отже, зменшує ефективну глибину дослідження. Однак, оскільки більшість археологічних решток лежать відносно неглибоко, то потенційної глибинності георадара цілком може бути достатньо для виконання успішного обстеження. Це не стосується високопровідних ґрунтів, насичених вологою зі значним вмістом мінеральних речовин (напр., певні глинисті та сольові відклади). У цьому випадку сигнал розсіюється, створюючи струм у ґрунті, а не повертаючись до приймальної антени, що призводить до часткової або повної втрати інформації. Зокрема, поширеність глинистих ґрунтів на Британських островах у поєднанні з неповним розумінням фізичних обмежень георадарного методу часто призводили до незадовільного результату (*McCann, 1995*). Деякі дослідження були присвячені аналізу причин низької інформативності георадарного методу в умовах перезволоження (напр. *Meats & Tite, 1995*). Серед ранніх досліджень є приклади, коли начебто успішне знімання згодом викликані обґрунтовані методологічні сумніви (*McCann, 1995*) і не отримало археологічного підтвердження.

Хоча георадіолокація часто вважається невідповідним методом для водно-болотних середовищ, саме вона була успішно застосована для виявлення дерев'яних шляхів на данських торфовищах, вимірювання товщини торфу у Швеції та картування водно-болотних угідь у Нідерландах. Доведено, що торфи з низьким вмістом мінеральних речовин ідеально підходять для

георадіолокаційного знімання, навіть в умовах заболочення (Clarke et al., 1999).

Поширеною практикою стало використання георадарів при дослідженні архітектурних споруд (Conyers, 2017). В архітектурно-археологічних дослідженнях георадар успішно застосовується при вивченні елементів конструкцій, зон розтріскування і замощення, а також для пошуків і діагностики стану комунікацій і різних підземних конструкцій. На сьогоднішній день існує також багато публікацій, присвячених георадарному скануванню у церквах.

Більшість георадарних досліджень виконувалася у двовимірному (2D) варіанті, однак, ураховуючи те, що археологічні об'єкти часто мають складну тривимірну структуру, дослідники скоро перейшли до побудови тривимірних моделей окремих об'єктів і культурного шару загалом (Gołębowski, 2006).

Технологія георадарних вимірювань розвивалася в напрямі більш повного охоплення тривимірного простору шляхом створення багатосенсорних установок і багаточастотних систем (Dabas, 2008). Вимірювальні системи найновіших конструкцій, інтегровані з диференціальними GPS, дозволяють проводити швидкі та ефективні знімання в русі з горизонтальним розрізненням від дециметра до сантиметра (Van De Vijver et al., 2015).

В останні роки до археологічної практики активно запроваджуються багатоканальні георадіолокаційні системи. Вони використовуються як для одночасного знімання кількох паралельних профілів, так і в "багато-розносний" (multi-offset, multi-static) конфігурації, коли сигнал від одного передавача реєструється кількома приймачами, розташованими на різних відстанях (Leckebusch, 2003; Trinks et al., 2018).

Технологія multi-offset дозволяє поліпшити якість візуалізації підповерхневих цілей за рахунок підвищення роздільної здатності, однак виробництво спеціалізованих вимірювальних систем і відповідного програмного забезпечення вимагає затрат, несумісних із вимогами комерційного сектору, і цей фактор поки що стримує розвиток означеної технології. Опубліковані успішні знімання археологічних пам'яток із використанням однієї пари передавач-приймач (передавач встановлювався на визначеній точці мережі спостережень, а приймач рухався в межах заданого відстані) (Booth et al., 2008).

Виробники георадарного обладнання почали випускати дво- і чотириканальні системи, що дозволяють паралельно використовувати кілька пар антен. Такі системи працювали лише в пішохідному варіанті, за невеликих швидкостей руху, але дуже швидко на зміну їм прийшли багатоканальні системи з високою швидкістю, які одразу ж почали використовуватись в археології. Ефективність 16-канальної системи з робочою частотою 400 MHz MALÅ Imaging Radar Array (MIRA) у 2009 р. була переконливо продемонстрована при дослідженні форуму римського міста Карнунтум, яке з 2002 р. стало традиційним місцем тестування нових георадарних технологій. За даними, зібраними MIRA та обробленими MALÅ Geoscience, вперше виявлені акуратно розташовані паралельні ряди похованих цегляних стовпів римської опалувальної системи – гіпокаусту в одній із будівель Форуму. Цей гіпокауст вже був передбачений В. Нойбауером на основі аналізу магнітних даних, які свідчили про наявність тут конструкцій із сильною термозалишковою намагніченістю (Neubauer et al., 2002).

Іншою популярною системою є Sensors & Software SPIDAR, яка складається із шести 500 МГц Pulse Ekko Pro антенних блоків (Gabler et al., 2019). Обидві системи

використовуються в моторизованому варіанті на тракторах і квадроциклах.

Розроблення багатоканальних систем ведеться багатьма фірмами, більшість із них не втрималися на ринку. Наприклад, 14-канальна система з антен 400 МГц, яка отримала назву Terravision, розроблена у 2002 р. компанією Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI), проходила тестування на археологічних об'єктах в Італії, але з 2008 р. знята з виробництва (Trinks et al., 2018).

Величезні масиви георадарних даних, отримані за допомогою інноваційних багатоканальних антенних систем з нерегулярною геометрією, на відміну від традиційних одноканальних вимірювань, що проводяться вручну зі збереженням постійного інтервалу між профілями, вимагають нових підходів до оброблення даних. Кількість даних стала настільки великою, що традиційні способи перевірки якості знімань, такі як перегляд окремих радарограм, стали надмірно трудомісткими. Крім того, з'явилися нові джерела похибок, які можуть бути спричинені різними несправностями вимірювального обладнання, неточностями в організації мережі збирання даних, неврахованими часовими затримками між георадарним записом і геопозиціонуванням, зовнішніми високочастотними перешкодами тощо.

Подальший розвиток георадарного методу в археології може бути пов'язаний із вивченням інформативності низько- (нижче 200 МГц) та високочастотних (вище 800 МГц) антен, а також потенційних можливостей багаточастотних антен з якомога ширшим спектром робочих частот (Sala & Linford, 2012). Поліпшення інтерпретації георадарних аномалій може бути досягнуто в контексті моделювання комплексної стратиграфії пам'яток (Warren, Giannopoulos, & Giannakis, 2016). При роботі з надзвичайно щільними масивами георадарних даних можливі нові підходи до 3D-рендерингу простору як до більш реалістичної візуалізації даних.

Комплексування ефективних широкомасштабних і детальних георадарних даних із результатами інших приповерхневих геофізичних методів, таких як високоточна детальна магнітометрія, лежить в основі ретельного вивчення і аналізу археологічного ландшафту.

Експерименти і досягнення у колишньому СРСР.

У колишньому СРСР розвиток археологічної геофізики почався у 1960-х рр., коли були проведені успішні експериментальні дослідження із застосування магніто- і електророзвідки на низці археологічних пам'яток.

У 1962 р. Лабораторія археологічної технології Ленінградського відділення Інституту археології (ЛВІА) вперше провела дослідні роботи з вивчення ефективності геофізичних методів розвідки в археології. Була організована експедиція для випробування деяких методів розвідки на неолітичній стоянці В'юн у Ленінградській області (Франтов, 1963). Результат виявився позитивним. Магнітне знімання проводилося за допомогою астатичного магнітометра М-2, який вимірює приріст вертикальної складової геомагнітного поля ΔZ . Виміри із цим магнітометром можуть бути виконані з похибкою менше ± 2 гамм (± 2 нТл). Знімання виконане по профілях, що перетинали стоянку. Поза межами стоянки у спокійному магнітному полі розміщався інший прилад для спостереження варіацій магнітного поля. Виявилось, що в районі стоянки, помітному по знахідках кераміки, каміння з вогнищ і культурного шару, спостерігалися підвищені значення ΔZ .

У 1960 р. завод "Геологоразведка" (Ленінград, СРСР) виготовив першу серію ферозондових магнітометрів М-17, із застосуванням яких у 1963 р. була здійснена

спроба вивчення планування середньовічного городища Ізяслава у Шепетівському районі Хмельницької області. На площі укріпленої частини городища знімання проводилося по мережі 1 x 1 м магнітометром М-17, а варіації геомагнітного поля вимірювалися магнітометром М-2. Єдиним об'єктом, який вдалося виділити за допомогою ферозондового магнітометра М-17, виявився розвал гончарного горна, який створив аномалію 110 нТл завдяки сильно обпаленій червоній глині. Поруч за магнітними аномаліями були виявлені розвали ще двох менших пічок, а також ще один потужний гончарний горн. Ця робота, опублікована автором у 1965 р. (*Шулик, 1965*) і описана у книзі "Геофізика в археології", опублікованій у 1966 р. (*Франтов, Пинкевич, 1966*), вважається першою спробою застосування магнітометрії в археології в СРСР. У наступні роки група працювала переважно на середньовічних пам'ятках Криму (*Шулик, 1968, 1974*), застосовуючи, крім магніторозвідки, електричні методи.

У 1965 р. Інститут археології АН СРСР анонсує створення диференціального магнітометра направленої дії МНД-1, а пізніше МНД-2 та МНД-3, зробленого на базі існуючого в СРСР градієнтметра, який використовувався у далекій від археології сфері (*Грошевой і др., 1966*). Прилад працював за принципом вимірювання двох магнітних потоків під час руху.

Цей прилад пройшов успішні, на думку авторів, випробування на могильниках біля городищ Кепи та Фаногорія на Тамані, на Звенигородському городищі та інших пам'ятках, де за його допомогою були виявлені склепи, ґрунтові поховання, фундаменти давніх споруд, печі, скупчення кераміки (*Грошевой і др., 1967; Дудкин, 1970*). Автори також повідомляли про успішні порівняльні випробування диференціального магнітометра МНД із протонним магнітометром Р-5 НИИЗМИРАН. Однак подальшого розвитку в археології ця технологія не отримала.

В Україні перші магнітометричні дослідження древніх поселень провели В. П. Дудкін, Г. Ф. Загній, О. М. Русаков у 60-х рр. ХХ століття. Ці дослідники сформуливали початкові положення методики магнітного знімання пам'яток трипільської культури і визначили загальні підходи до археологічної інтерпретації магнітних аномалій (*Кошелев, 2005 а, 2005 б*).

Магнітна розвідка за магнітометром МНД-3 була проведена у 1966 р. на трипільських, ранньослов'янських та давньоруських поселеннях (*Даниленко і др., 1967*), а у 1967 р. група Г. Ф. Загнія здійснила геофізичну розвідку за допомогою протонного магнітометра М-20 на багаточисельній пам'ятці Чапаївка і трипільському поселенні Старі Безрадиці на Київщині (*Загний і др., 1971*). У 1969–1970 рр. геофізична розвідка була успішно застосована для пошуків горнів на поселенні гончарів VII ст. біля с. Любимівка у Дніпропетровській області. Вивчення матеріалів розкопок минулих років, а також результатів експериментальних геофізичних досліджень, проведених Г. Ф. Загнієм на одній із локальних ділянок за допомогою протонного магнітометра М-20, дозволило зробити висновок про можливість виділення шуканих об'єктів магнітометричним методом. Такий висновок обґрунтований насамперед тим, що залишки гончарних горнів складаються із великих скупчень сильно обпаленої глини (до 1000 кг) і, згідно з розрахунками, утворюють значні аномалії магнітного поля (до кількох сотень нТл). Це добре узгоджувалося з даними експериментальних досліджень і дозволяло використовувати для пошуків горнів і масивних обпалених трипільських площадок не тільки дефіцитні на той час протонні магнітометри, але й менш чутливі, проте поширені оптико-механічні

магнітометри типу М-27 (НПО "Рудгеофізика", Москва) (*Дудкин, 1978*). Із цим приладом під керівництвом В. П. Дудкіна були розпочаті планомірні дослідження трипільських пам'яток і за 30 років діяльності підготовлені магнітні плани майже 50 різночасових поселень.

До видатних досягнень магнітної розвідки минулих років слід віднести результати досліджень найбільших із відомих поселень ("протоміст") трипільської культури в Черкаській області – Майданецького (площа зйомки 180 га) і Таллянків (230 га).

Поселення Майданецьке було раніше відоме за результатами археологічних вишукувань, але сприймалось як кілька близько розташованих поселень невеликих розмірів. Гіпотеза про існування єдиного поселення-гіганта трипільської культури була висунута К. В. Шишкіним на підставі дешифрування аерофотознімків і доведена засобами магнітної розвідки (*Кошелев, 2005 а*). Факт існування дуже великих поселень на Черкащині в корені змінив уявлення про трипільську цивілізацію, яка за масштабами і рівнем розвитку виявилася подібною до широковідомих перших землеробських цивілізацій на території Месопотамії, Близького Сходу і Східного Середземномор'я.

За результатами магнітних знімань із використанням доступних на той час засобів оброблення інформації вручну В. П. Дудкіним були побудовані перші варіанти планів поселень. Ці плани були, можливо, недостатньо докладними і не супроводжувалися побудовою структурних схем забудови поселень, але, тим не менш, давали цінну інформацію про розташування житла на площі пам'яток і деяке уявлення про загальну структуру поселень. Матеріали цих досліджень опубліковані в низці робіт (*Шмаглій та ін., 1973; Дудкин та Відейко, 1992 та ін.*).

У цей самий період В. П. Дудкіним та Г. Ф. Загнієм проводився відбір зразків з археологічних об'єктів для лабораторних визначень їхніх магнітних характеристик. Хоча отримані дані не були статистично оброблені, але й у такому вигляді вони дозволяли наближено оцінювати наявність сприятливих передумов для постановки магнітних знімань і застосовувались для розпізнавання достатньо інтенсивних магнітних аномалій у процесі їхньої первинної археологічної інтерпретації. Повною мірою використання цих фактичних даних стало можливим тільки на наступному етапі розроблення теорії археологічної магніторозвідки, а саме після проведення повноцінного статистичного аналізу (*Кошелев, 2005*).

У радянський період на території України успішно застосовувались також інші геофізичні методи. Зокрема, у роботі І. Антонової та співавторів (*Антонова і др., 1979*) описаний досвід застосування методів опору (електропрофілювання) і сейсмозрозвідки для знаходження склепів на некрополі Херсонесу II–VI ст. н. е. Автори зазначають, що електророзвідка необхідна на першому етапі досліджень для картування уступів терас, похованих під пухкими відкладами. Самі ж склепи проявляються у динамічних та кінематичних особливостях поля повздовжніх сейсмічних хвиль.

Поточний стан досліджень в Україні. Поштовхом до поновлення археолого-геофізичних досліджень вже в незалежній Україні став масовий перехід в кінці 1980-х – на початку 1990-х рр. геологічної і археологічної магнітометрії до використання протонних магнітометрів ММП-203 ("Рудгеофізика", Ленінград). Цей пішохідний магнітометр призначений для вимірювання модуля магнітної індукції. Магнітометр характеризується відносно високою чутливістю (похибка становить ± 1 нТл), великим діапазоном вимірювань (20–100 мкТл), відносно високою

швидкодією (тривалість одного виміру до 3 с). За допомогою цих приладів у 1992–95 рр. групою В. П. Дудкіна були відзняті плани двох десятків трипільських поселень, включаючи такі великі, як Глибочок (100 га), Ольховець (100 га), Ятранівка (70 га). Точність цих зніманих 2,2–2,8 нТл, як і детальність 3 x 3 м, 4 x 4 м, є недостатніми для обґрунтованих висновків щодо планування і демографії давніх поселень, що визнають самі автори, однак саме ці напрацювання стали поштовхом для високоточних і ультрадетальних вимірювань на пам'ятках трипільської культури у 2010-х рр., здійснених англійськими та німецькими геофізиками (*Chapman et al., 2014; Rassman et al., 2014*).

Загальна площа археологічних пам'яток, обстежена групою В. П. Дудкіна, становила близько 1200 га на теренах від Пруту до Дніпра, зафіксовано тисячі аномалій від споруд і господарських ям. Дослідниками набутий позитивний досвід магнітних вимірювань не тільки на поселеннях трипільської культури, а й на пам'ятках ранньослов'янського і доскіфського часів (*Дудкін, Відейко, 1992; Кошелев, 2005*).

У 2005 р. І. М. Кошелев видає методичну монографію, у якій викладені фізичні основи магнітометричного методу археологічних досліджень (*Кошелев, 2005 а*). На прикладах стародавніх пам'яток України описані структурні, геометричні та фізичні особливості археологічних об'єктів. Наведено результати статистичного аналізу магнітних властивостей їхнього речовинного складу та фізико-археологічне обґрунтування методу. Проведено порівняння магнітометрії з іншими методами геофізичної розвідки і аналіз можливостей їх включення до комплексу досліджень археологічних пам'яток. Значну увагу приділено створенню, розрахунку і використанню фізико-археологічних моделей. Розглянуто основні положення методики і техніки польових досліджень, наведені необхідні відомості про вимірювальну апаратуру. Проаналізовано різні методи оброблення і перетворень вихідної магнітометричної інформації з найбільш простих, але здатних забезпечити достатньо високу якість, надійність, повноту і результативність археологічного тлумачення магнітометричних даних.

І. М. Кошелев переобробив і узагальнив дані зніманих В. П. Дудкіна на трипільських поселеннях. Застосування розробленої автором більш досконалої системи комп'ютерного оброблення та інтерпретації вихідних магнітометричних даних забезпечило можливість побудови значно повніших і детальніших планів поселень (*Кошелев, 2005б*).

На початку 2000-х рр. у сфері археологічної геофізики починає працювати група фахівців з Інституту геофізики НАН України під керівництвом М. І. Орлюка. У 2004 р. група здійснила магнітне знімання на Хотівському городищі скіфської доби. Магнітометричні спостереження виконані протонними магнітометрами МИНИМАГ ("Геологоразведка", РФ) з роздільною здатністю датчиків 0,1 нТл на площі 6,1 га. Знімання виконане в межах полігонів розмірами 50 x 50 м. Крок по профілю становив 1 м, відстань між профілями – 1 м. Загальна площа знімання становила 67500 м². Розкопками було зафіксовано 12 аномалій, з яких чотири відповідали археологічним об'єктам (завали глиняної обмазки і кам'яні вимостки) (*Ивакин и др., 2005*). Це знімання дозволило археологам зробити важливі висновки щодо функції городища і його заселеності, зокрема такі, що більша частина території городища не була забудована, залишалася вільною.

Група М. І. Орлюка спільно з компанією "Eastern Atlas" у 2002–2005 рр. проводила археолого-геофізичні

дослідження на Більському городищі скіфської доби в межах роботи спільної українсько-німецької експедиції (*Zollner et al., 2007; Орлюк и др., 2016*). Під час цих робіт застосовувався магнітний градієнтометр на основі ферозондів Ferrex 4.021 з точністю визначення вертикального градієнта магнітного поля $\pm 0,5$ нТл/м. Робочий варіант приладу складається із п'яти зондів, закріплених на відстані 40 см один від одного. У результаті досліджень на Західному Більському виявлена велика кількість залишків селітроварних печей XVII–XVIII ст., що розташовані вздовж валів городища, описана структура кількох скіфських курганів поруч із городищем.

У 2010-х рр. в Україні починають працювати дві потужні закордонні наукові групи, зацікавлені у вивченні трипільських пам'яток. Це команда Університету Дарема (Великобританія) під керівництвом Дж. Чепмана, а також німецька група, у складі якої геофізичні дослідження виконували фахівці з Університету Кіля.

Впровадження магнітного картування отримало назву "друга методологічна революція у вивченні протоісторичних (megasites)" (*Chapman et al., 2014*). Команда з Великобританії здійснила знімання на поселенні Небелівка. Використовувала градієнтометр Bartington Grad 601-2, оснащений двома датчиками. За 38 тижнів роботи була відзнята площа 286 га. Переважна більшість спостережених аномалій належать до обпалених і частково обпалених трипільських площадок, а також заповнених ґрунтом ям та ровів. Важливою складовою оброблення магнітометричних даних було видалення регіонального фону від магнітоактивних порід Українського кристалічного щита. Особлива увага приділялась периферії поселення, оскільки дослідники хотіли бути впевненими, що всі його структури відзняті.

З 2011 р. внаслідок співпраці ІА НАН України, Римсько-Германської комісії, Інституту пре- і протоісторичної археології та Аспірантської школи Кільського Університету ім. Крістіана Альбрехта (Німеччина) було отримано плани для сотень гектарів трипільських поселень Буго-Дніпровського межиріччя, таких як Тальянки, Майданецьке, Доброводи, Аполянка, Петрені (*Rassman et al., 2014*), Тростяничик (*Рудь та ін., 2016*). Для реконструкцій планування поселень застосовано мобільну магнітометричну вимірювальну систему, розроблену для обстеження великих площ – Sensys MAGNETO® MX V3, оснащену вісьмома ферозондовими градієнтометрами FGM650/3, які мають чутливість 0,6 В/мкТл і діапазон вимірювань ± 8000 нТл. Вимірювання здійснені за системою паралельних профілів, відстань між якими визначається відстанню між зондами – 50 см. Висота знімання, тобто відстань від землі до зондів, становить 20 см. Географічну прив'язку вимірювань здійснено за допомогою системи із двох взаємопов'язаних GPS-приймачів (RTK DGPS Leica GNSS): один служив базовою станцією, а інший був закріплений на вимірювальній системі. Це дало змогу отримати дані з похибкою планової прив'язки ± 1 см. За середньої швидкості пересування вимірювальної системи 3,6 км/год і частоти запису DGPS у 20 Гц у підсумку отримані геоприв'язані вимірювання на кожні 5 см, тобто мережа знімання мала детальність 50 x 5 см.

Основною метою цих робіт були перевірка й уточнення старих геомагнітних планів і створення нових за допомогою використання сучасного геофізичного обладнання. Завдяки високоточному геомагнітному зніманню на поселеннях вдалося виявити низку невідомих раніше об'єктів, які змінюють наші уявлення про різні аспекти життя трипільського суспільства. Відкрито та розкопано мегаструктури,

горни для обпалу кераміки, рови, ями (*Rassman et al., 2014; Champan et al., 2014*). Зокрема, на поселенні Таплянки було відзнято 195 га площі, 120 га з яких мають ознаки давньої заселеності. Дослідженнями В. П. Дудкіна було охоплено 140 га, тобто майже вся територія, яку займають трипільські житла, була перезнята.

Як можна побачити, видатні пам'ятки археології в Україні продовжують привертати увагу іноземних дослідників. Наприклад, геомагнітне знімання, проведене у 2014 р. німецькими геофізиками (*Patzelt et al., 2016*) біля західних воріт Ольвії з боку її хори, виявило яскраві аномалії розмірами 2-12 м, пов'язані із житлами-напівземлянками, заглибленими в материковий ґрунт на 1,2 м. Знімання дозволило встановити, що заселена частина хори не підходила безпосередньо до кордонів міста, а відстояла від нього на 100–200 м. Геомагнітні дослідження у передмісті й на терасній частині Ольвії на площі 20 га (*Patzelt & Waldhör, 2021*) виявили також давній рів, який, очевидно, розмежував ділянку передмістя та міста протягом ранньоантичного часу. Крім того, керуючись просторовим розповсюдженням магнітних аномалій різних типів, вдалося відмежувати житлову частину міста від некрополя. У центральній частині міста проводилися георадарні знімання з метою пошуку залишків античного театру, про який відомо з епіграфічних джерел (*Буйський та ін., 2020*).

Магнітні знімання в Криму, виконані за допомогою оверхаузеровських магнітометрів-градієнтометрів GSM19WG виробництва GEM systems Inc. (Онтаріо, Канада), додали багато нової інформації щодо структури поселень, курганів, сільськогосподарського освоєння територій в різні епохи (*Smekalova et al., 2005, 2016*). Геофізичні дані разом із даними аерофотознімання та дистанційних зондувань Землі стали важливим внеском до археологічної карти Криму.

Із 2005 р. у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка працює археолого-геофізична група під керівництвом К. Бондар. Група проводить дослідження, спрямовані на виявлення археологічних об'єктів, а також дослідно-методичні роботи зі створення і вдосконалення археолого-геофізичних технологій. Проаналізувавши світовий досвід із застосування неруйнівних методів для потреб археології, ми зосередились на розвитку найефективніших технологій для масового вивчення археологічних пам'яток України, збереження і контролю за станом нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини. Нашими фахівцями розроблені спеціалізована методика польових магнітометричних досліджень археологічних пам'яток і оригінальне програмне забезпечення для оброблення та інтерпретації даних вимірювань (*Бондар та ін., 2019*). Створено багатоелектродну електрометричну установку на постійному струмі з максимальною глибинністю 11 м, призначену для дослідження вертикальної структури культурних шарів (*Хоменко, Бондар та Попов, 2013*). Нами успішно застосовуються георадарні технології в археології (*Бондар, Бобровський та Цюпа, 2016; Бондар та ін., 2018; Бондарь и др., 2020*).

Наша дослідницька група вивчала різні пам'ятки як в Україні, так і за кордоном. Серед досліджених об'єктів – палеолітичні пам'ятки Закарпаття та околиць Меджибожа у Хмельницькій області, пам'ятка трипільської культури печера Вертеба (*Bondar et al., 2021 a*), пам'ятки Малополовецького археологічного комплексу (Київська обл.), Більське городище (Полтавська обл.), ранньоскіфськi городища Жаботин (Київська обл.), Немирів (Вінницька обл.), Хотів, курганний могильник Катеринівка (*Бондар та ін., 2019; Polin, Daragan & Bondar, 2020*) та

інші кургани Дніпропетровщини, Полтавщини, Київщини, Ешерське городище античної доби в Абхазії, могильники черняхівської культури Червоне (Київська обл.), Легедзине (Черкаська обл.), Війтенки-1 (Харківська обл.), Комарів-1 (Чернівецька обл.) (*Bondar et al., 2022*), ранньослов'янське поселення Обухів-2 (Київська обл.), поселення пізньоримського часу Війтенки (Харківська обл.), Комарів (Чернівецька обл.) (*Бондар та ін., 2022*) та Дмитрівка III (Полтавська обл.), Іллінська церква в Суботіві (*Бондарь и др., 2020*), заповідники "Софія Київська" та "Києво-Печерська лавра", масові поховання Холокосту на Львівщині, Інкерманські штольні в Севастополі та інші об'єкти Другої світової війни тощо. Наша наукова група бере участь у георхеологічних проєктах, досліджуючи магнітостратиграфію, а також палеокліматичні зміни під час голоцену – верхнього плейстоцену на ґрунтах і печерних відкладах.

У співпраці з Інститутом археології НАН України, історико-культурними заповідниками, обласними органами охорони пам'яток нами реалізовані проєкти, які отримали широкий суспільний резонанс, наприклад дослідження місця поховання Б. Хмельницького у Суботіві, локалізація місця Мельгуновського кургану, вивчення масових поховань Другої світової війни тощо. На рис. 1 представлено результат нашого геомагнітного знімання на місці кургану Лита могила (Мельгуновського) у 2018 р., насип якого був відновлений за ініціативою Кропивницької ОДА у 2020 р. після проведення відповідних археологічних досліджень.

Висновки і перспективи. Всупереч розповсюдженій думці, що археологічна геофізика виникла і розвивалася шляхом адаптації методологічних підходів і апаратури, раніше застосованої в геології, з ретельного аналізу світового досвіду можна бачити, що найбільш успішні методологічні й технологічні рішення були цілеспрямовано віднайдені для археологічного застосування. Це справедливо, зокрема, щодо розроблення всіх типів найбільш уживаних сьогодні приладів для магнітного знімання в археології – протонних і цезієвих магнітометрів, ферозондових градієнтометрів. Крім того, нові модифікації геофізичних методів, які розвинулися завдяки прогресу цифрових технологій в електроніці (георадарний метод, метод томографії електричного опору тощо), одразу впроваджувалися у практику для археологічних потреб. До адаптації апаратури і методів польових спостережень, прийнятих у геології, вдавалися переважно радянські дослідники.

На сьогодні можна впевнено стверджувати, що найбільш точні й детальні геофізичні знімання з використанням чутливої апаратури виконуються саме на археологічних пам'ятках.

Якщо говорити про перспективи археологічної геофізики у світі, то наразі настає момент, коли рішення про застосування тої чи іншої вартісної геофізичної технології напряму залежить від здатності дослідників передбачити позитивний результат. Це неможливо без детального знання фізичних властивостей ґрунтів і археологічних матеріалів, а також глибокого розуміння природних і антропогенних процесів, які зумовлюють зміни фізико-хімічних параметрів ґрунту. Орієнтованість світових наукових колективів саме на отримання додаткової інформації про ґрунтовий покрив з метою поліпшення археологічної інтерпретації геофізичних даних показує, зокрема, меморандум нині діючого проєкту SAGA COST Action CA17131 "Альянс ґрунтознавства та археологічної геофізики: вихід за межі розвідки" (The Soil Science & Archaeo-Geophysics Alliance: going beyond prospecting) Організації з Європейської Співпраці в Галузі Науки і Техніки.

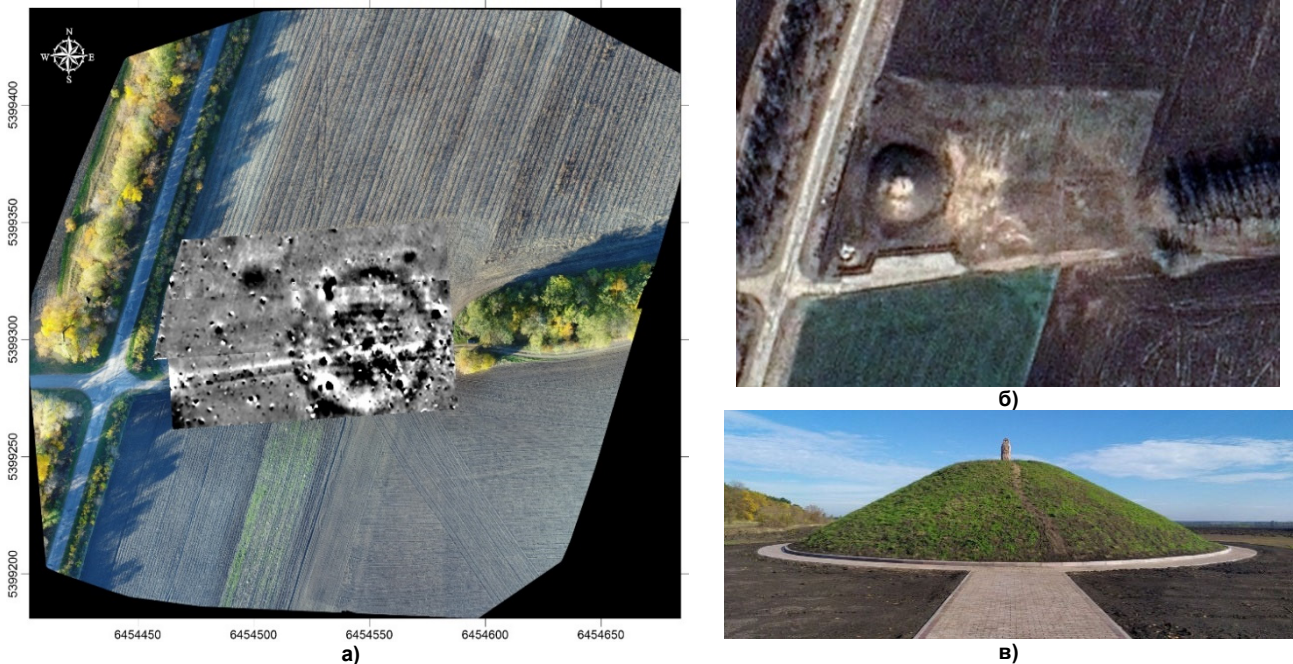


Рис. 1. Курган Лита могила (Мельгуновський). Карта аномалій геомагнітного поля за шкалою відтінків сірого кольору ± 5 нТл, накладена на ортофотоплан (а); відновлений насип кургану на космоснімку з ресурсу Google (б) і на фото (в)

Що стосується України, то нам належить пройти великий шлях, необхідними кроками якого є впровадження сучасних апаратних рішень гнучких конфігурацій, якими є, наприклад: мультисенсорні цезієві магнітometri-градієнтometri чи багаточастотні георадарні системи, вдосконалення пам'яток охоронного законодавства, розроблення національного стандарту застосування геофізичних методів в археології та відповідних освітніх програм.

Список використаних джерел

- Антонова, І.А., Глазунов, В.В., Гоц, І.А., Шевнин, В.А., Модін, І.Н., Беликов, В.В., Уразаєв, Н.И., Тарнопольская, Н.Б., Рыжов, С.Г. (1979). Геолого-геофізическіе исследования на некрополе Херсонеса. *Новое в применении физико-математических методов в археологии*. М.: Наука, 10–19.
- Бондар, К., Бобровський, Т., Цюпа, І. (2016). Вивчення ефективності георадарних досліджень на території Національного заповідника "Софія Київська" для вирішення археологічних завдань. *Геоінформатика*, 4 (60), 75–82.
- Бондар, К.М., Дараган, М.М., Прилуков, В., Полін, С.В., Цюпа, І.В., Діденко, С.В. (2019). Магнітотриєві скіфського курганного могильника Катеринівка у Нижньому Подніпров'ї. *Геофізичний журнал*, 41, 134–152.
- Бондар, К.М., Ієвлєв, М.М., Петраускас, А.В., Тарабукін, О.О., Хададова, М.В., Цюпа, І.В. (2018). Древлянські старожитності. *Археологічні дослідження в Житомирі*. К.: Видавництво "Стародавній світ".
- Бондар, К.М., Петраускас, О.В., Хоменко, Р.В., Попов, С.А. (2022). Геомагнітне знімання та петромагнітна характеристика ґрунтів та археологічних об'єктів пам'яток пізньоримського часу біля Комарова у Середньому Подністров'ї. *Геофізичний журнал*, 44, 2, 29–52.
- Бондарь, К.М., Хоменко, Р.В., Чернов, А.П., Кукса, Н.В. (2020). Результаты георадарного обследования Ильинской церкви — усыпальницы Богдана Хмельницкого в Субботове. *Геофизический журнал*, 3, 42, 175–194.
- Буйських, А.В., Формасье, И., Шейко, І.М., Чечупіна, І.О. (2020). Нові дослідження Терасного міста Ольвії. *Археологічні дослідження в Україні в 2018 р.*, Київ: ІА НАН України, 130–133.
- Владов, М.Л., Старовойтов, А.В. (2004). Введение в георадиолокацию. М.: Издательство МГУ.
- Грошевой, Г.В., Галкин, Л.Л., Зайончковский, М.А. (1967). Археологическая разведка магнитометром направленного действия. *Советская археология*, 3, 191–204.
- Даниленко, В.Н., Дудкин, В.П., Круц, В.А. (1967). Археолого-магнитная разведка в Киевской области. *Археологические исследования на Украине. 1965–1966 гг.* Киев.
- Дудкин, В.П. (1970). К вопросу о применении дифференциального магнитометра в археологической разведке. *Советская археология*, 1.
- Дудкин, В.П. (1978). Геофизическая разведка крупных трипольских поселений. *Использование методов естественных наук в археологии*. Київ: Наукова думка, 35–45.

- Загний, Г.Ф., Круц, В.А., Русаков, О.М. (1971). Опыт применения протонного магнитометра в археологии. *Советская археология*, 3, 203–207.
- Ивакин, Г.Ю., Дараган, М.Н., Орлюк, М.И., Кравченко, Э.А., Куприй, С.А. (2005). Геофизические археологические исследования на Хотовском городище скифской эпохи. *Археологические открытия на Украине за 2004 г.*, 400–406.

Кошелев, И.Н. (2005а). Магнитная разведка археологических памятников. Киев.

Кошелев, И.Н. (2005б). Памятники трипольской культуры (по данным магнитной разведки). Киев.

Орлюк, М., Ролле, Р., Роменец, А., Ульрих, Б., Цольнер, Х. (2016). Микромагнитная съемка Большого Бельского городища скифского времени, Полтавская область. *Геофизический журнал*, 5(38), 25–39.

Рудь, В., Улау, Р., Манігда, О. (2016). Геомагнітна зйомка та географічне моделювання у вивченні поселення трипольської культури Тростянички. *Вісник рятівної археології (Acta archaeologicae conservativae)*, 2, 55–76.

Франтов, Г.С. (1963). Применение геофизических методов разведки в археологии. *Тезисы докладов на Всесоюзном совещании по применению в археологии методов естественных и технических наук*. Ин-т археологии АН СССР.

Франтов, Г.С., Пинкевич, А.А. (1966). Геофизика в археологии. Л.: "Недра".

Хоменко, Р., Бондар, К., Попов, С. (2013). Нова малоглибинна багатоелектродна установка вимірювання електричного опору. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(61), 36–40.

Шилик, К.К. (1965). Опыт применения магниторазведки на древнерусском городище. *Археология и естественные науки*, Москва, 252–256.

Шилик, К.К. (1968). Применение магниторазведки при исследовании средневековых памятников в Крыму. *Средневековые памятники Восточной Европы. Краткие сообщения Института археологии*, 113, 123–130.

Шилик, К.К. (1974). О магниторазведке гончарных печей у Чабан-Куле. *Восточная Европа в I II тысячелетиях н.э. Краткие сообщения института археологии*. М.: Наука, 140, 115–120.

Шмаглій, М.М., Відейко, М.Ю. (1992). Трипольські поселення на Черкащині. *Археологія*, 3, 124–130.

Шмаглій, М.М., Дудкін, В.П., Зіньковський, К.В. (1973). Про комплексне вивчення трипольських поселень. *Археологія*, 10, 23–31.

Aitken, M.J. (1958). Magnetic prospecting. *Archaeometry*, 1(1), 16–20.

Atkinson, R.J.C. (1953). *Field Archaeology*. 2nd ed., London.

Bartington, G. and Chapman, C.E. (2004). A high-stability fluxgate magnetic gradiometer for shallow geophysical survey applications. *Archaeological Prospection*, 11 (1), 19–34.

Becker, H. (1985). Luftbild, Magnetik und digitale Bildverarbeitung zur Prospektion archäologischer Fundstätten. *Archaeologische Informationen*, 8, 135–142.

Becker, H. (1995). From nanotesla to picotesla – a new window for magnetic prospecting in archaeology. *Archaeological Prospection*, 2, 217–228.

Becker, H. and Fassbinder, J.W.E. (1999). Magnetometry of a Scythian settlement in Siberia near Cichahin the Baraba steppe. In J.W.E. Fassbinder and W.E. Irlinger (eds), *Archaeological prospection. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege* 108: 169–172.

- Belshé, J. C., (1957). Recent magnetic investigations at Cambridge University. *Advances in Physics*, 6(22), 192–193.
- Berge, M.A., Drahor, M.G. (2011). Electrical Resistivity Tomography Investigations of Multilayered Archaeological Settlements: Part I – Modelling. *Archaeol. Prospect*, 18, 159–171. <https://doi.org/10.1002/arp.423>
- Bondar, K., Fassbinder, J.W.E., Didenko, S.V., Hahn, S.E. (2022). Rock magnetic study of grave infill as a key to understanding magnetic anomalies on burial ground. *Archaeological Prospection*, 29(1), 139–156.
- Bondar, K.M., Sohatskij, M.P., Chernov, A., Popko, Ya., Petrokushyn, O., Baryshnikova, M., Khomenko, R., Boyko, M. (2021) Geophysical assessment of Verteba Cave Eneolithic site, Ukraine. *Geoarchaeology*, 36, 238–251.
- Booth, A.D., Linford, N.T., Clark, R.A., & Murray, T. (2008). Three-dimensional, multi-offset ground-penetrating radar imaging of archaeological targets. *Archaeological Prospection*, 15(2), 93–112.
- Chapman J., Videiko M., Gaydarska B., Burdo N., Hale D., Willis R., Swann N., Thomas N., Edwards P., Blair A., Hayes A., Nebbia M., Rud V. (2014). The Planning of the Earliest European Proto-Towns: A New Geophysical Plan of the Trypillia Mega-Site of Nebelivka, Kirovograd Domain, Ukraine, *Antiquity Gallery*.
- Clark, A. (1990). *Seeing Beneath the Soil-Prospicing Methods in Archaeology*. B.T. Batsford: London.
- Clarke, M.C., Utsi, E. and Utsi, V. (1999). Ground-penetrating radar investigations at North Ballachulish Moss, Scotland. *Archaeological Prospection*, 6, 107–121.
- Constable, S.C, Parker, R.L., Constable, C.G. (1987). Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289–300.
- Conyers, L.B. (2017). Ground-penetrating Radar. In: *Encyclopedia of Geoarchaeology*, Gilbert, A. (Ed.), Heidelberg, London, New York, 367–379.
- Conyers, L.B., Goodman, D. (1997). *Ground-penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. AltaMira Press, Walnut Creek, California.
- Dabas, M. (2008). Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP. In *Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology*. Campana, S., Piro, S. (Eds.) CRC Press, 105–126. <https://doi.org/10.1201/9780203889558>
- Drahor, M.G., Berge, M.A., Kurtulmus, T.O, Hartmann, M., Speidel, M. (2008). Magnetic and Electrical Resistivity Tomography Investigations in a Roman Legionary Camp Site (Legio IV Scythica) in Zeugma, Southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeol. Prospect*, 15, 159–186.
- Du Mesnil du Buisson, R. (1934). *La technique des fouilles archéologiques: les principes généraux*. Paris.
- English Heritage (1995). Geophysical survey in archaeological field evaluation, English Heritage, *Research and Professional Services Guideline 1*.
- Fischanger, F., Catanzariti, G., Comina, C., Sambuelli, L., Morelli, G., Barsuglia, F., Ellaithy, A., Porcelli, F. (2019). Geophysical anomalies detected by electrical resistivity tomography in the area surrounding Tutankhamun's tomb. *J. Cult. Heritage*, 36, 63–71.
- Fischer, P. M. (1980a). Geophysical prospecting at Hala Sultan Tekke, cyprus. *Journal of Field Archaeology*, 7, 479–484.
- Gabler, M., Trinks, I., Nau, E., Hinterleitner, A., Paasche, K., Gustavsen, L., Kristiansen, M., Tonning, C., Schneidhofer, P., Kucera, M., Neubauer, W. (2019). Archaeological Prospection with Motorised Multichannel Ground-Penetrating Radar Arrays on Snow-Covered Areas in Norway. *Remote Sens.*, 11, 2485. <https://doi.org/10.3390/rs11212485>
- Gaffney, C., & Gater, J. (2003). Revealing the buried past. *Geophysics for Archaeologists*, Stroud.
- Gaffney, C.F., Gater, J., Linford, A.P., Gaffney, V.L. and White, R. (2000). Large-scale systematic fluxgate gradiometry at the roman city of Wroxeter. *Archaeological Prospection*, 7(2), 81–99.
- Gołębiowski, T. (2006). 3D GPR measurements for archaeological application with interpretation aided by numerical modelling. *Acta Geophysica*, 54, 4, 413–429. DOI 10.2478/s11600-006-0027-6
- Goodman, D. and Nishimura, Y. (1993). A groundradar view of Japanese burial mounds. *Antiquity*, 67, 349–354.
- Herbich, T. (2015). Magnetic prospecting in archaeological research: a historical outline. *Archaeologia Polona*, 53, 21–68.
- Leckebusch, J. (2003). Ground-penetrating Radar: A modern three-dimensional prospecting method. *Archaeological Prospection*, 10, 213–240.
- Linzen S., Schultze V., Chwala A., Schüller T., Schulz M., Stolz R. and Meyer H. (2009). Quantum Detection Meets Archaeology—Magnetic Prospection with SQUIDS, Highly Sensitive and Fast. In: M. Reindel, G.A. Wagner (eds.), *New Technologies for Archaeology, Natural Science in Archaeology, Multidisciplinary Investigations in Palpa and Nasca*, Peru.
- Loke, M.H, Barker, R.D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60(6), 1682–1690.
- Loke, M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. *Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software*.
- McCann, W.A. (1995). GPR and archaeology in central London. *Archaeological Prospection*, 2, 155–166.
- Meats, C. and Tite, M. (1995). A ground-penetrating radar survey at Rowbury Copse Banjo enclosure Wiltshire. *Archaeological Prospection*, 2, 229–236.
- Mol, L., Preston, P. (2010). The writing's in the wall: A review of new preliminary applications of electrical resistivity tomography within archaeology. *Archaeometry*, 52(6), 1079–1095.
- Neubauer, W. and Eder-Hinterleitner, A. (1997). Resistivity and magnetics in the Roman town Carnuntum, Austria: an example of combined interpretation of prospecting data. *Archaeological Prospection*, 4, 179–189.
- Neubauer, W. and Melichar, P. (eds) (2010). *Mittelneolithische Kreisgrabenanlagen in Niederösterreich. Mitteilungen der Prahistorischen Kommission*, 71, Wien.
- 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, 135–156.
- Neubauer, W., Melichar, P. and Eder-Hinterleitner, A. (1995). Magnetische Prospektion der frühneolithischen Kreisgrabenanlage von Strögen, Niederösterreich. *Archaeologia Austriaca*, 79, 179–186.
- Noel M. and Xu B. 1991. Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, 107, 95–102.
- Packard, M. and Varian, R. (1954). Free nuclear induction in the Earth's magnetic field. *Phys. Rev.*, 93, 941.
- Panissod, C., Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, J., Tabbagh, A. (1998). Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics*, 63, 1542–1550.
- Papadopoulos, N.G., Tsourlos, P., Tsokas, G.N. and Sarris, A. (2006). Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeol. Prospect.*, 13: 163–181. <https://doi.org/10.1002/arp.276>
- Papadopoulos, N.G.; Tsokas, G.N.; Dabas, M.; Yi, M.-J.; Kim, J.-H.; Tsourlos, P. (2009). Three-dimensional inversion of automatic resistivity profiling data. *Archaeol. Prospect.*, 16, 267–278.
- Patzelt A., Fornasier J., Buysikh A., Ivchtchenko A., Kuzmischev A. (2016). Geomagnetic prospections in the suburb of Olbia Pontike – an ancient Greek Colony in the northern Black Sea area, Ukraine. *ISAP News*, 45, 3–6.
- Patzelt A., Waldhör M. (2021). Geomagnetische Prospektionen in der sogenannten Vorstadt Olbia Pontikes. In: Fornasier J., Bujskikh A.V. *An den Ufern des Bug. Deutsch-ukrainische Ausgrabungen in Olbia Pontike im Kontext internationaler Forschungen zu antiken Migrationsprozessen*. Bonn: Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH, *Frankfurt Archaeological Studies*, 42, 137–154.
- Piroddi, L., Calcina, S.V., Trogu, A., and Ranieri, G. (2020). Automated Resistivity Profiling (ARP) to Explore Wide Archaeological Areas: The Prehistoric Site of Mont'e Prama, Sardinia, Italy. *Remote Sens*, 12(3), 461.
- Polin, S., Daragan, M., Bondar, K. (2020). New investigations on Scythian kurgans in Ukraine: non-invasive studies and excavations. In: St.J. Simpson and S. Pankova, eds., *Masters of the Steppe: the Impact of the Scythians and Later Nomad Societies of Eurasia*. London: Archaeopress, 472–482.
- Ralph, E.K. (1964). Comparison of a Proton and a Rubidium Magnetometer for Archaeological prospecting. *Archaeometry*, 7, 20–27.
- Rassmann, K., Ohlrau, R., Hofmann, R., Mischka, C., Burdo, N., Videiko, M. & Müller, J. (2014). High precision Tripolye settlement plans, demographic estimations and settlement organization. *Journal of Neolithic Archaeology*, 16, 63 – 95.
- Sala, J., Linford, N. (2012). Processing stepped frequency continuous wave GPR systems to obtain maximum value from archaeological data sets. *Near Surface Geophysics*, 10 (1819), 3–10.
- Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453–464.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., & Herzog, I. (1990). *Archaeological prospecting and remote sensing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Smekalova, T., Voss, O., Smekalov, S., Myts, V. and Koltukhov, S. (2005). Magnetometric Investigations of Stone Constructions within Large Ancient Barrows of Denmark and Crimea. *Geoarchaeology*, 20, 5, 461–482.
- Smekalova, T. Bevan, B. Chudin, A. Garipov A. (2016). The Discovery of an Ancient Greek Vineyard. *Archaeological Prospection*, 23, 15–26.
- Stolz, R., Zakosarenko, V.M., Schulz, M., Chwala, A., Fritsch, L., Meyer, H.G. (2004). Magnetic full tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications. *SEG Expanded Abstracts*, 23, 786–789.
- Stümpel, H. (1995). Untersuchungen in Kusakali 1992–1995, geophysikalische Prospektion. *Mitteilungen der Deutschen Orient-Gesellschaft*, 127, 5–36.
- Tite, M.S. (1961). Alternative instruments for magnetic surveying: comparative tests at the Iron Age fill-fort at Rainsborough. *Archaeometry*, 4, 85–90.
- Trinks, I., Stümpel, H. and Lorra, S. (1999). Integrated geophysical survey for archaeological prospecting. In J.W.E. Fassbinder and W.E. Irlinger (Eds), *Archaeological prospecting. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege*, 108, 82–83.
- Trinks, I., Hinterleitner, A., Neubauer, W. et al. (2018). Large-area high-resolution ground-penetrating radar measurements for archaeological prospecting. *Archaeological Prospection*; 25, 171–195.
- Van De Vijver, E., Van Meirvenne, M., Saey, T., Delefortrie, S., De Smedt, P., De Pue, J., & Seuntjens, P. (2015). Combining multi-receiver electromagnetic induction and stepped frequency ground penetrating radar for industrial site investigation. *European journal of soil science*, 66(4), 688–698.
- Viberg, A., Trinks, I., & Lidén, K. (2011). A review of the use of geophysical archaeological prospecting in Sweden. *Archaeological Prospection*, 18(1), 43–65.
- Warren, C, Giannopoulos, A, & Giannakis, I (2016). gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, 163–170.
- Zhou, B. & Dahlin, T. (2003). Properties and Effects of Measurement Errors on 2D Resistivity Imaging Surveying. *Near Surface Geophysics*, 1(3), 105–117.
- Zöllner, H., Ulrich, B., Rolle, R. Makhortyk, S. & Orlyuk, M. (2008). Results of Geophysical Prospection in the Scythian Settlement of Belsk (Bol.oe Belskoe Gorodi.ée). Layers of Perception: *Proc. of the 35th Intern. Conf. on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*,

Berlin, Germany, April 2.6, 2007 (Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte, Vol. 10. Dr. Rudolf Habelt GmbH, Bonn, pp. 25 + CD-ROM.

References

- Aitken, M. J. (1958). Magnetic prospecting. *Archaeometry*, 1(1), 16–20.
- Antonova, I.A.; Glazunov, V.V.; Gots, I.A.; Shevnev, V.A.; Modin, I.N.; Belikov, V.V.; Urazaev, N.I.; Tarnopolskaya, N.B.; Ryzhov, S.G. (1979). Geological and geophysical investigations on the necropolis of Kherones. In: "New applications of physical and mathematical methods in archaeology". Moscow: Nadra, 10-19. [in Russian]
- Atkinson, R.J.C. (1953). *Field Archaeology*. 2nd ed., London.
- Bartington, G. and Chapman, C.E. (2004). A high-stability fluxgate magnetic gradiometer for shallow geophysical survey applications. *Archaeological Prospection*, 11 (1), 19–34.
- Becker, H. (1985). Luftbild, Magnetik und digitale Bildverarbeitung zur Prospektion archäologischer Fundstätten. *Archaeologische Informationen*, 8, 135–142.
- Becker, H. (1995). From nanotesla to picotesla – a new window for magnetic prospecting in archaeology. *Archaeological Prospection*, 2, 217–228.
- Becker, H. and Fassbinder, J.W.E. (1999). Magnetometry of a Scythian settlement in Siberia near Cicahin the Baraba steppe. In J.W.E. Fassbinder and W.E. Irlinger (Eds), *Archaeological prospection*. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, 108, 169–172.
- Belshé, J. C. (1957). Recent magnetic investigations at Cambridge University. *Advances in Physics*, 6(22), 192–193.
- Berge, M.A.; Drahor, M.G. (2011). Electrical Resistivity Tomography Investigations of Multilayered Archaeological Settlements: Part I – Modelling. *Archaeol. Prospect*, 18, 159–171. <https://doi.org/10.1002/arp.423>
- Bondar, K., Daragan, 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*, 3, 41, 134–152. doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172438 [in Ukrainian]
- Bondar, K., Fassbinder, J.W.E., Didenko, S.V., Hahn, S.E. (2022). Rock magnetic study of grave infill as a key to understanding magnetic anomalies on burial ground. *Archaeological Prospection*, 29(1), 139–156.
- Bondar, K.M., Iyevlev, M.M., Petrauskas, A.V., Tarabukin, O.O., Hadadova, M.V. and Tsiupa, I.V. (2018). Drevlyanians' antiquity. Archaeological investigations in Zhytomyr. Kyiv. *Antique world*. 188 p. [in Ukrainian]
- Bondar, K.M., Khomenko, R.V., Chernov, A.P., Kuksa, N.V. (2020). Results of the ground penetrating radar survey in the Church of St. Elias – Bohdan Khmelnytsky burial vault in Subotiv. *Geophysical Journal*, 42, 3, 175-194. [in Ukrainian]
- Bondar, K.M., Petrauskas, O.V., Khomenko, R.V., Popov, S.A. (2022). Magnetic prospecting and rock magnetic study of soils and archaeological objects on the Late Roman time sites near Komariv in Middle Transnistria. *Geophysical Journal*, 44, 2, 29-52. [in Ukrainian]
- Bondar, K.M., Sohatskij, M.P., Chernov, A., Popko, Ya., Petrokushyn, O., Baryshnikova, M., Khomenko, R., Boyko, M. (2021). Geophysical assessment of Verteba Cave Eneolithic site, Ukraine. *Geoarchaeology*, 36, 238-251.
- Bondar, K., Bobrovskiy, T., Tsiupa, I. (2016). Efficiency of GPR Survey for Archaeological Targets Detection in the National Conservation Area of "St. Sophia of Kyiv". *Geoinformatika*, 4 (60), 75-82. [in Ukrainian]
- Booth, A.D., Linford, N.T., Clark, R.A., & Murray, T. (2008). Three-dimensional, multi-offset ground-penetrating radar imaging of archaeological targets. *Archaeological Prospection*, 15(2), 93–112.
- Bujskih, A.V., Fomasier, J., Sheiko, I.M., Chechulina, I.O. (2020). New investigations of the Terrace Olbia polis. *Archaeological researches in Ukraine in 2018*. Kyiv, Institute of archaeology of the NASU, 130-133. [in Russian]
- Chapman J., Videko M., Gaydarska B., Burdo N., Hale D., Willis R., Swann N., Thomas N., Edwards P., Blair A., Hayes A., Nebbia M., Rud, V. (2014). The Planning of the Earliest European Proto-Towns: A New Geophysical Plan of the Trypillia Mega-Site of Nebelivka, Kirovograd Domain, Ukraine, *Antiquity Gallery*.
- Clark, A. (1990). *Seeing Beneath the Soil-Prospecting Methods in Archaeology*. B.T. Batsford: London.
- Clarke, M. Ciara, Utsi, Erica and Utsi, Vincent, (1999). Ground-penetrating radar investigations at North Ballachulish Moss, Scotland. *Archaeological Prospection*, 6, 107–121.
- Constable, S.C, Parker, R.L, Constable, C.G. (1987). Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetics sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289–300.
- Conyers, L.B. (2017). Ground-penetrating Radar. In: *Encyclopedia of Geoarchaeology*. Gilbert, A. (Ed.). Heidelberg, London, New York, 367-379.
- Conyers, L.B. Goodman, D. (1997). *Ground-penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. AltaMira Press, Walnut Creek, California.
- Dabas, M. (2008). Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP. In Seeing the Unseen. *Geophysics and Landscape Archaeology*. Campana, S., Piro, S. (Eds.) CRC Press, 105–126. <https://doi.org/10.1201/9780203889558>
- Danilenko, V.N., Dudkin, V.P., Krutz, V.A. (1967). Archaeo-magnetic prospecting in Kyiv Oblast. *Archaeological researches in Ukraine. 1965-1966*. Kiev. [in Russian]
- Drahor, M.G., Berge, M.A., Kurtulmus, T.O, Hartmann, M., Speidel, M. (2008). Magnetic and Electrical Resistivity Tomography Investigations in a Roman Legionary Camp Site (Legio IV Scythica) in Zeugma, Southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeol. Prospect*, 15, 159–186.
- Du Mesnil du Buisson, R. (1934). La technique des fouilles archéologiques: les principes généraux. Paris.
- Dudkin, V.P. (1970). On applying differential magnetometer for archaeological prospecting. *Sovetskaya arheologiya*, 1, 272-277. [in Russian]
- Dudkin, V.P. (1978). Geophysical prospecting of large Trypillian sites. In "Application of methods of natural sciences in archaeology." Kyiv: Naukova dumka, 35-45. [in Russian]
- English Heritage. (1995). Geophysical survey in archaeological field evaluation. English Heritage, *Research and Professional Services Guideline*, 1.
- Fischanger, F., Catanzariti, G., Comina, C., Sambuelli, L., Morelli, G., Barsuglia, F., Ellaihy, A., Porcelli, F. (2019). Geophysical anomalies detected by electrical resistivity tomography in the area surrounding Tutankhamun's tomb. *J. Cult. Heritage*, 36, 63–71.
- Fischer, P.M. (1980a). Geophysical prospecting at Hala Sultan Tekke, cyprus. *Journal of Field Archaeology*, 7, 479–484.
- Frantov, G.S. (1963). Application of geophysical methods in archaeology. *Abstracts of reports at the All-Union Conference on the Application of the Methods of the Natural and Technical Sciences in Archeology*. Institute of archaeology of NAS of USSR. [in Russian]
- Frantov, G.S., Pinkevich, A.A. (1966). Geophysics in archaeology. Leningrad, Nedra. [in Russian]
- Gabler, M., Trinks, I., Nau, E., Hinterleitner, A., Paasche, K., Gustavsen, L., Kristiansen, M., Tønning, C., Schneidhofer, P., Kucera, M., Neubauer, W. (2019). Archaeological Prospection with Motorised Multichannel Ground-Penetrating Radar Arrays on Snow-Covered Areas in Norway. *Remote Sens.*, 11, 2485. <https://doi.org/10.3390/rs11212485>
- Gaffney, C., & Gater, J. (2003). Revealing the buried past. *Geophysics for Archaeologists*. Stroud.
- Gaffney, C.F., Gater, J., Linford, A.P., Gaffney, V.L. and White, R. (2000). Large-scale systematic fluxgate gradiometry at the roman city of Wroxeter. *Archaeological Prospection*, 7(2), 81–99.
- Golebiewski, T. (2006). 3D GPR measurements for archaeological application with interpretation aided by numerical modelling. *Acta Geophysica*, 54, 4, 413-429. DOI 10.2478/s11600-006-0027-6
- Goodman, D. and Nishimura, Y. (1993). A groundradar view of Japanese burial mounds. *Antiquity*, 67, 349-354.
- Groshevoj, G.V., Galkin, L.L., Zayonchkovskij, M.A. (1967). Archaeological prospecting using directed magnetometer. *Sovetskaya arheologiya*, 3, 191-204. [in Russian]
- Herbich, T. (2015). Magnetic prospecting in archaeological research: a historical outline. *Archaeologia Polona*, 53, 21-68.
- Ivakin, G.Yu., Daragan, M.N., Orliuk, M.I., Kravchenko, E.A., Kuprij, S.A. (2005). Geophysical and archaeological investigations on Hotiv hillfort of Scythian time. *Archaeological researches in Ukraine in 2004*, 400-406. [in Russian]
- Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). New high-resolution shallow-depth multi-electrode equipment for electrical resistivity tomography). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(61), 36-40. [in Ukrainian]
- Koshelev, I.N. (2005a) Magnetic prospecting of archaeological sites. Kiev. [in Russian]
- Koshelev, I.N. (2005b). Trypillian culture sites (by magnetometer survey results). Kiev. [in Russian]
- Leckebusch, J. (2003). Ground-penetrating Radar: A modern three-dimensional prospecting method. *Archaeological Prospection*, 10, 213–240.
- Linzen S., Schultze V., Chwala A., Schüller T., Schulz M., Stolz R. and Meyer H. (2009). Quantum Detection Meets Archaeology–Magnetic Prospection with SQUIDS, Highly Sensitive and Fast. In: M. Reindel, G.A. Wagner (Eds.) *New Technologies for Archaeology, Natural Science in Archaeology, Multidisciplinary Investigations in Palpa and Nasca, Peru*.
- Loke, M.H, Barker, R.D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60(6), 1682–1690.
- Loke, M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. *Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software*.
- McCann, W.A. (1995). GPR and archaeology in central London. *Archaeological Prospection*, 2, 155-166.
- Meats, C. and Tite, M. (1995). A ground-penetrating radar survey at Rowbury Copse Banjo enclosure Wiltshire. *Archaeological Prospection*, 2, 229-236.
- Mol, L., Preston, P. (2010). The writing's in the wall: A review of new preliminary applications of electrical resistivity tomography within archaeology. *Archaeometry*, 52(6), 1079–1095.
- Neubauer, W. and Eder-Hinterleitner, A. (1997). Resistivity and magnetics in the Roman town Carnuntum, Austria: an example of combined interpretation of prospecting data. *Archaeological Prospection*, 4, 179–189.
- Neubauer, W. and Melichar, P. (Eds) (2010). *Mittelneolithische Kreisgrabenanlagen in Niederösterreich. Mitteilungen der Prähistorischen Kommission*, 71, Wien.
- 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, 135–156.
- Neubauer, W., Melichar, P. and Eder-Hinterleitner, A. (1995). Magnetische Prospektion der frühneolithischen Kreisgrabenanlage von Strögen, Niederösterreich. *Archaeologia Austriaca*, 79, 179–186.
- Noel, M. and Xu, B. (1991). Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, 107, 95–102.

- Orlyuk, M., Rolle, R., Romenets, A., Ullrich, B., Zollner, H. (2016). Micromagnetic survey of the Big Belsky site of ancient settlement of the Scythian time in Poltava oblast. *Geophysical journal*, 5(38), 25-39. [in Russian]
- Packard, M. and Varian, R. (1954). Free nuclear induction in the Earth's magnetic field. *Phys. Rev.*, 93, 941.
- Panissod, C.; Dabas, M.; Hesse, A.; Jolivet, A.; Tabbagh, J.; Tabbagh, A. (2018). Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics*, 63, 1542–1550.
- Papadopoulos, N.G., Tsourlos, P., Tsokas, G.N. and Sarris, A. (2006). Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeol. Prospect.*, 13, 163-181. <https://doi.org/10.1002/arp.276>
- Papadopoulos, N.G.; Tsokas, G.N.; Dabas, M.; Yi, M.-J.; Kim, J.-H.; Tsourlos, P. (2009). Three-dimensional inversion of automatic resistivity profiling data. *Archaeol. Prospect.*, 16, 267–278.
- Patzelt, A., Fornasier, J., Buyskikh, A., Ivchtentko, A., Kuzmischev, A. (2016). Geomagnetic prospections in the suburb of Olbia Pontike – an ancient Greek Colony in the northern Black Sea area, Ukraine. *ISAP News*, 45, 3-6.
- Patzelt, A., Waldhör, M. (2021). Geomagnetische Prospektionen in der sogenannten Vorstadt Olbia Pontikes. In: Fornasier J., Bujskikh A.V. *An den Ufern des Bug. Deutsch-ukrainische Ausgrabungen in Olbia Pontike im Kontext internationaler Forschungen zu antiken Migrationsprozessen*. Bonn: Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH, *Frankfurt Archaeological Studies*, 42, 137-154.
- Piroddi, L., Calcina, S.V., Trogu, A., and Ranieri, G. (2020). Automated Resistivity Profiling (ARP) to Explore Wide Archaeological Areas: The Prehistoric Site of Monte Prama, Sardinia, Italy. *Remote Sens*, 12(3), 461. <https://doi.org/10.3390/rs12030461>
- Polin, S., Daragan, M., Bondar, K. (2020). New investigations on Scythian kurgans in Ukraine: non-invasive studies and excavations. In: St.J. Simpson and S. Pankova (Eds) *Masters of the Steppe: the Impact of the Scythians and Later Nomad Societies of Eurasia*. London: Archaeopress, 472-482.
- Ralph, E.K. (1964). Comparison of a Proton and a Rubidium Magnetometer for Archaeological prospecting. *Archaeometry*, 7, 20-27.
- Rassmann, K. & Ohlrau, R., Hoffmann, R., Mischka, C., Burdo, N., Videiko, M. & Müller, J. (2014). High precision Tripolye settlement plans, demographic estimations and settlement organization. *Journal of Neolithic Archaeology*, 16, 63–95.
- Rud', V., Ulrauh, R., Manigda, O. (2016). Geomagnetic survey and geographical modeling on Trypillian culture settlement Trostyanchyk. *Visnyk ryatynnoji arheologii (Acta archaeologicae conservativae)*, 2, 55-76. [in Ukrainian]
- Sala, J., Linford, N. (2012). Processing stepped frequency continuous wave GPR systems to obtain maximum value from archaeological data sets. *Near Surface Geophysics*, 10 (1819), 3–10.
- Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453–464.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., & Herzog, I. (1990). *Archaeological prospecting and remote sensing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shmaglii, M.M., Dudkin, V.P., Zinkovsky, K.V. (1973). On the comprehensive study of Trypillia settlements. *Archeology*, 10, 23-31. [in Russian]
- Shmaglii, M.M., Videyko, M.Yu. (1992). Trypillia settlements in Cherkasy region. *Archeology*, 3, 124 – 130. [in Russian]
- Shyliik, K.K. (1965). Experience in the use of magnetic prospecting in the Ancient Rus settlement. *Archeology and natural sciences*, Moscow, 252-256. [in Russian]
- Shyliik, K.K. (1968). The use of magnetic prospecting in the study of medieval monuments in the Crimea. Medieval monuments of Eastern Europe. *Brief Communications of the Institute of Archeology*, Moscow, Nauka, 113, 123-130. [in Russian]
- Shyliik, K.K. (1974). On the magnetic prospecting of pottery kilns near Chaban-Kul. Eastern Europe in the I-II millennium AD. *Brief Communications of the Institute of Archeology*, Moscow: Nauka, 140, 115-120. [in Russian]
- Smekalova, T., Voss, O., Smekalov, S., Myts, V and Koltukhov, S (2005). Magnetometric Investigations of Stone Constructions within Large Ancient Barrows of Denmark and Crimea. *Geoarchaeology*, 20, 5, 461-482.
- Smekalova, T. Bevan, B. Chudin, A. Garipov A. (2016). The Discovery of an Ancient Greek Vineyard. *Archaeological Prospecting*, 23, 15–26. <https://doi.org/10.1002/arp.1517>.
- Stolz, R., Zakosarenko, V.M., Schulz, M., Chwala, A., Fritsch, L., Meyer, H.G. (2004). Magnetic full tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications. *SEG Expanded Abstracts*, 23, 786–789.
- Stümpel, H. (1995). Untersuchungen in Kusakali 1992–1995, geophysikalische Prospektion. *Mitteilungen der Deutschen Orient-Gesellschaft*, 127, 5–36.
- Tite, M.S. (1961). Alternative instruments for magnetic surveying: comparative tests at the Iron Age fill-fort at Rainsborough. *Archaeometry*, 4, 85–90.
- Trinks, I., Stümpel, H. and Lorra, S. (1999). Integrated geophysical survey for archaeological prospecting. In J.W.E. Fassbinder and W.E. Irlinger (Eds) *Archaeological prospecting*. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, 108, 82–83.
- Trinks, I., Hinterleitner, A., Neubauer, W. et al. (2018). Large-area high-resolution ground-penetrating radar measurements for archaeological prospecting. *Archaeological Prospection*; 25, 171–195.
- Van De Vijver, E., Van Meirvenne, M., Saey, T., Delefortrie, S., De Smedt, P., De Pue, J., & Seuntjens, P. (2015). Combining multi-receiver electromagnetic induction and stepped frequency ground penetrating radar for industrial site investigation. *European journal of soil science*, 66(4), 688–698.
- Viberg, A., Trinks, I., & Lidén, K. (2011). A review of the use of geophysical archaeological prospecting in Sweden. *Archaeological Prospection*, 18(1), 43–65.
- Vladov, M.P., Starovojtov, A.V. (2004). An introduction to ground penetrating radar. Moscow, published by MSU, 153 p. [in Russian]
- Warren, C, Giannopoulos, A, & Giannakis, I (2016). gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, 163–170.
- Zagnij, G.F., Krutz, V.A., Rusakov, O.M. (1971). Experience in the use of a proton magnetometer in archeology. *Sovetskaya arheologiya*, 3, 203-207. [in Russian]
- Zhou, B. & Dahlin, T. (2003). Properties and Effects of Measurement Errors on 2D Resistivity Imaging Surveying. *Near Surface Geophysics*, 1(3), 105-117.
- Zöllner, H., Ulrich, B., Rolle, R. Makhortkykh, S. & Orlyuk, M. (2008). Results of Geophysical Prospection in the Scythian Settlement of Belsk (Bol.oe Belskoe Gorodi.èe). Layers of Perception: *Proc. of the 35th Intern. Conf. on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*, Berlin, Germany, April 2.6, 2007 (Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte, Vol. 10. Dr. Rudolf Habelt GmbH, Bonn, pp. 25 + CD-ROM.

Надійшла до редколегії 07.06.22

K. Bondar, Dr. Sci. (Geol.),
E-mail: ks_bondar@ukr.net;
S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhvas@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
I. Sheiko, PhD (Hist.),
E-mail: ira.sheiko@gmail.com,
Institute of Archeology of the National Academy of Sciences of Ukraine,
12 Heroiv Stalingrad Ave., Kyiv, 04210, Ukraine;
R. Kozlenko, PhD (Hist.),
E-mail: rknoel@ukr.net,
National Historical and Archaeological Reserve "Olbia" of the National Academy of Sciences of Ukraine,
47 Olviyska Str., p. Parutyne, Mykolaiv region, 57540, Ukraine

ARCHAEOLOGICAL GEOPHYSICS IN THE WORLD AND IN UKRAINE: BEGINNING, DEVELOPMENT, PRESENT

The article describes the history of the development of geophysical methods in archaeological studies in Europe, the USA, the former USSR and Ukraine. In the 1950s the researchers quickly proceeded from the first sampling to the mass magnetic and electric measurements. In the 1980s there was a transition to digital registration during field studies, as well as rapid development of data processing. This led to the introduction of some geophysical methods in archaeology, which require complex calculations when processing the signal and inversion of data, such as georadar method, electrical resistivity tomography, induction method, etc. At the current stage, there is a need to interpret these more and more detailed and large-scale geophysical data in the context of the differentiation of more and more weak in contrast physical properties, and small-scale inhomogeneities in the soil cover. Confirmation of the anthropogenic and technogenic occurrence of geophysical anomalies is searched for using direct measurement and modeling of physical parameters of soil and archaeological materials. The work also presents the achievements of domestic geophysicists, as they became the basis for the great modern archeological projects and made the archeological geophysics the fundamental part of the cultural heritage research in Ukraine.

Keywords: geophysical methods, archeological site, review, Ukraine, magnetometry, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar.