



УДК 550.384

DOI: <https://doi.org/10.55389/2786-5797.2023.01.02>

Ксенія БОНДАР,

доктор геологічних наук,
старший науковий співробітник ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ, Україна),
науковий керівник проектів ГО «Фонд Великий льох» (Київ, Україна)
ks_bondar@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4946-7707>

Руслан ХОМЕНКО,

кандидат геологічних наук, асистент кафедри геофізики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
sapphireion1977@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3291-4272>

Тимур БОБРОВСЬКИЙ,

кандидат історичних наук, старший науковий співробітник, Національний заповідник «Софія Київська» (Київ, Україна)
e-mail:bobrovskij@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3221-4279

ТОМОГРАФІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ - ЕФЕКТИВНИЙ ГЕОФІЗИЧ- НИЙ МЕТОД ПОШУКІВ І КАРТУ- ВАННЯ ПЕЧЕРНИХ СПОРУД НА ТЕРИТОРІЇ ЗАПОВІДНИКА «СОФІЯ КИЇВСЬКА»

АНОТАЦІЯ. Дана робота покликана ознайомити широке коло дослідників археології Києва з можливостями геофізичного методу томографії електричного опору (ТЕО). В статті описані дослідження методом ТЕО, проведені на ділянці між Софійським собором, Братським корпусом та будівлею колишньої Бурси у зв'язку з утворенням провалу навесні 2021 р. На місці провалу на глибині 2-3 м від денної поверхні відкрилося цегляне склепіння повністю замуленого ходу XVII ст. Висота ходу перевищувала 2 м. Два профілі ТЕО були прокладені навхрест очікуваних ходів. Вони мали довжину 63 м, при цьому електроди були розташовані на відстані 1 м один від одного. Моделі розподілу питомого опору отримані за гладко-контрастною схемою інверсії (алгоритм Осат-Marquardt). У результаті наявні на картах і передбачувані підземні споруди проявилися на геоелектричних розрізах у вигляді виразних аномалій підвищеного питомого опору ($\rho > 400 \text{ Ом}^* \text{м}$). Це відкриває можливість ефективного геофізичного картування підземель у товщі еолових лесоподібних супісків на території заповідника «Софія Київська». При цьому критерієм оптимальності застосування методу ТЕО для пошуків підземних споруд виступає значна різниця електричного опору між об'єктом і лесовою породою, яка становить не менше $300 \text{ Ом}^* \text{м}$.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: томографія електричного опору, Софія Київська, лесова порода, підземна споруда, геофізика

Вступ. Метод опору в модифікаціях електричних зондувань, заснований на відмінності електричних опорів різних типів гірських порід та ґрунтів, застосовується при вирішенні різноманітних завдань інженерної геології, екології та археології. В останні десятиріччя метод розвивається шляхом створення багатоканальної електророзвідувальної апаратури з розміщенням великої кількості електродів на денній поверхні. Нові багатоелектродні системи спостережень, керовані польовим комп'ютером, дозволили перейти від одиничних електричних зондувань до щільних систем спостережень з багаторазовим використанням кожного електрода в процесі вимірювань. Описана технологія електророзвідувальних робіт отримала назву «електротомографія» або «томографія електричного опору» (ТЕО, англ. ERT – electrical resistivity tomography)¹.

Електротомографія дозволяє за короткий час отримувати як двовимірні 2D (у разі спостережень вздовж профілю), так і тривимірні 3D (у разі спостережень по системі паралельних профілів) моделі геоелектричних розрізів приповерхневої частини геологічного середовища. Для отримання таких моделей розроблені методи обробки й інтерпретації електротомографічних польових даних не тільки для випадку горизонтально-шаруватого розрізу, а й для неоднорідних середовищ.

У серпні 2021 р. нами здійснені електротомографічні дослідження на території заповідника «Софія Київська» на місці поряд з провалом, що стався навесні за 40 м на захід від північно-західного кута Софійського собору.

Ця робота є продовженням досліджень з вивчення ефективності геофізичних методів для виявлення археологічних об'єктів у товщі лесових ґрунтів. У 2015 р. нами проводилися геофізичні дослідження на цій ділянці із застосуванням георадарного методу. Тоді ми дійшли висновку, що георадар із робочою частотою 300 МГц є ефективним при пошуках давніх фундаментів в інтервалі глибин до 2 м. Виявилось, що печерні споруди, наявні біля Братського корпусу за археологічними даними, не відображені на радарограмах, оскільки залягають в інтервалі глибин 2,5–5 м від сучасної денної поверхні. Такої глибини зондування неможливо досягти на робочій частоті георадара 300 МГц у зволжених супісках та лесі через високий ступінь затухання сигналу. Отже, для пошуків більш заглиблених об'єктів, у тому числі й печерних споруд, потрібні інші технології².

Короткий екскурс до історії методів опору і, зокрема, ТЕО в археології. Першими систематичними та результативними археолого-геофізичними дослідженнями у Світі вважаються роботи Р. Аткінсона щодо вимірювання питомого електричного опору на археологічній пам'ятці у Дорчестері-на-Темзі. Використовуючи просту 4-електродну установку, він здійснив успішне знімання, в результаті якого були виявлені рови та ями за пониженими значеннями електричного опору зволоженого заповнення цих об'єктів, викопаних у кам'янистому ґрунті³.

З 50-х рр. ХХ ст. постійно зростали об'єми застосування і продовжувався методичний розвиток методів. Успіх методів опору забезпечується значною різницею питомого електричного опору між такими структурами, як стіни, дороги, будівлі, канали та ґрунтом, в якому вони поховані. Найбільш вживаними в археології стали конфігурації чотириелектродних установок Веннера та Шлюмберже⁴.

¹ Gaffney, C., & Gater, J. (2003). Revealing the buried past. *Geophysics for Archaeologists*, Stroud.

² 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.

³ Atkinson, R. J. C. (1953). *Field Archaeology*. 2nd ed., London.

⁴ Gaber S., El-Fiky A. A., Abou Shagar A., Mohamaden M. (1999). Electrical resistivity exploration of the Royal Ptolemaic Necropolis in the Royal Quarter of Ancient Alexandria, Egypt. *Archaeological Prospection*, 6, 1–10. Chouker, Aspinall F. (2001). Archaeological site investigation by geoelectrical measurements in Tel-Halawi (northern Syria). *Archaeological Prospection*, 8, 257–263. Aspinall A., Gaffney C.F. (2001). The Schlumberger array-potential and pitfalls in archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 8, 199–209.





У 90-х рр. значним кроком на шляху до підвищення археологічної інформативності електричних методів стала адаптація нової технології томографії електричного опору до археологічних потреб⁵.

Вперше метод томографії електричного опору був використаний для візуалізації археологічних споруд під час експериментальних досліджень римського міста Веруламійум у Великобританії⁶. В археологічній практиці електрична томографія слугувала переважно для доповнення та покращення інформаційного контексту, отриманого за допомогою інших геофізичних методів. ТЕО ефективно застосовується для віднайдення стін, порожнин та інших структур на різних глибинах⁷.

Розвиток технологій автоматизації та мультиплексації вимірювань за допомогою установок різної конфігурації посприяв можливості отримання великої кількості польових даних за обмежений час. Крім того, поява швидких комп'ютерів стимулювала розробку автоматизованих алгоритмів інверсії позірною 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)⁸. 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 добрим стартовим наближенням для подальшої інтерпретації. Блокову інверсію рекомендується використовувати у більшості випадків, особливо за відсутності апріорної інформації про геоелектричний розріз. У літературі описано декілька двовимірних алгоритмів гладкообмеженої інверсії даних ТЕО⁹. Крім того, оскільки багато геофізичних завдань мають тривимірний характер, було представлено декілька алгоритмів для реалізації інверсії даних ТЕО у трьох вимірах¹⁰.

Втім, 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 квазі-тривимірних (x, y, z) візуалізацій.

Для подолання основних обмежень установок з фіксованою конфігурацією були розроблені мобільні системи картування електричного опору. Зокрема, мобільні мультиполярні багатовелектродні системи дозволяють виконувати дослідження методом електропрофілювання опору в русі, що суттєво скорочує час

⁵ 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. Papadopoulos N., Yi M.Y., Kim J.H., Tsokas G.N., Tsourlos P. (2010). Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Journal of Applied Geophysics*, 70, 192–205.

⁶ Xu B., Noel M. (1993). On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, 41, 791–801.

⁷ Papadopoulos N. G., Yi M. J., Kim J. H., Tsourlos P., Tsokas G. N. (2010). Geophysical investigation of tumuli by means of surface 3D electrical resistivity tomography. *J. Appl. Geophys.* 70 (3), 192–205; Bondar K. M., Sokhatskyi M. P., Chernov A., Popko Ya., Petrokushyn O., Baryshnikova M., Khomenko R., Boyko M. (2021a). Geophysical assessment of Vertebe Cave Eneolithic site, Ukraine. *Geoarchaeology*, 36, 238–251. <https://doi.org/10.1002/gea.21827>; Sarris, R. Jones (2000). Geophysical and related techniques applied to archaeological survey in the Mediterranean: a review. *Journal of Mediterranean Archaeology*, 13, (1); 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.

⁸ 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.

⁹ Loke, M.H., Barker R.D. (1996 a). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131–152. doi:10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x; Ellis R., Oldenburg D.W. (1994). Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International*, 116, 5–11.

¹⁰ Park S.K., Van G.P. (1991). Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structures beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, 56, 951–960; Tsourlos P., Ogilvy R. (1999). An algorithm for the 3-D inversion of tomographic resistivity and induced polarization data: preliminary results. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2(2), 30–45.

на збирання польової інформації. Розробка мобільного устаткування дозволила збільшити охоплення території вимірюваннями, а також різко скоротила час, необхідний для проведення досліджень. Тобто доступними стали дослідження опору великих площ археологічних пам'яток і ландшафтів¹¹.

Метод томографії електричного опору: обґрунтування застосування і методика досліджень. Незцементовані відклади і ґрунти, які складають тіло культурного шару й материкової породи в Києві, зазвичай мають опір, що лежить у межах від 10 до 1000 Ом м. Опір залежить від пористості ґрунту, ступеня водонасиченості ґрунтів, концентрації солей у поровій воді, а також від вмісту частинок глинистої фракції, яка має знижений опір (1–25 Ом м). Відтак глинисті ґрунти характеризуються нижчими значеннями питомого опору, ніж піщані.

В цих умовах навіть невеликі за об'ємом порожнини, які зазвичай залишаються, навіть якщо підземна споруда майже повністю засипана, будуть різко збільшувати питомий електричний опір середовища, що робить їх адекватними цілями для виявлення методом ТЕО.

Для виконання досліджень ми використали авторську малоглибинну багатоелектродну одноканальну установку електротомографії, яка відповідає вимогам підвищеної детальності розчленування ґрунтового розрізу¹². Вона обладнана двома косами по 32 електроди в кожній.

Базовий принцип вимірювання полягає в реєстрації різниці потенціалів ΔU між вимірювальними електродами при пропусканні постійного електричного струму I в живильній лінії з подальшим розрахунком позірною електричного опору $\rho_n = K \cdot \Delta U / I$, де K – коефіцієнт установки. Як просту вимірювальну схему можна використовувати різні модифікації чотирьохелектродних установок.

З огляду на прийняту нами модель культурного шару як гетерогенного середовища як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках, розумним компромісом стало застосування конфігурації Веннера-Шлюмберже, яка адекватно реагує на наявність вертикальних і горизонтальних границь.

Конфігурація Веннера-Шлюмберже почала застосовуватись у зв'язку із зручністю розстановки електродів на рівних відстанях. Класична установка Шлюмберже – одна з найбільш уживаних, для неї коефіцієнт n , що є співвідношенням відстані AM (або NB) до MN , змінюється від 1 до 6. Установка Веннера є її частковим випадком, для якого $n=1$ (рис. 1).

Для симетричних установок в конфігурації Веннера і Шлюмберже ($AMNB$) коефіцієнт K й ефективна глибина досліджень H_{eff} розраховуються за відомими формулами¹³:

$$K = \pi \frac{AC \cdot AD}{CD}; \quad H_{eff} = \frac{AO}{2,63},$$

де A, B – живильні електроди; M, N – приймальні електроди; $AO = AB/2$ – напіврознос живильної лінії. Відтак, ураховуючи параметри використовуваних у зазначеній вище електротомографічній установці кіс, неважко розрахувати, що при

¹¹ Panissod C.; Dabas M.; Jolivet A.; Tabbagh A. (1997). A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0–3 m) geoelectrical investigation: the 'Vol-de-canards' array. *Geophys. Prospect*, 45, 983–1002; 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>; 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; <https://doi.org/10.3390/rs12030461>

¹² 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.

¹³ Edwards L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020–1036.





відстані між електродами 1 м її максимальна глибинність у конфігурації Веннера-Шлюмберже становить 11 м.

Така глибинність дослідження втричі перевищує глибину залягання підземної споруди, що забезпечило коректну роботу алгоритмів інверсії даних.

Під час польових вимірювань по обидва боки від центра установки розмотуються електричні коси, встановлюється апаратура і ПК. Час запису на одному пункті вимірювань при максимальній деталізації становить близько 30 хвилин (рис. 2). В результаті отримуємо матрицю позірних опорів $\rho_{\text{п}}$, на основі якої сучасний комплекс обробки даних GEO Res2dinv виконує дискретизацію моделі підземного простору (рис. 3).

Розв'язання оберненої задачі геофізики означає пошук такої моделі розподілу фізичної властивості в середовищі, яка пояснювала б відгук, отриманий від середовища у вигляді вимірних даних. Методи інверсії намагаються визначити модель, яка відповідала б отриманому відгуку за умови існування певних обмежень на просторовий розподіл модельних параметрів.

Для інверсії експериментальних даних ми обрали алгоритм Оссам-Марквардт¹⁴, який здійснює комбіновану гладко-контрастну схему інверсії, яка базується на використанні гаус-ньютонівського метода найменших квадратів: Оссам – інверсія з використанням згладжувального оператора і додатковою мінімізацією контрастності, яка дозволяє отримувати гладкий розподіл параметра (питомого опору ρ); Марквардт – алгоритм інверсії, який забезпечує отримання контрастної моделі розподілу параметра середовища. Використання гладко-контрастної схеми інверсії даних GEO дозволяє блоки простору з близькими значеннями ρ об'єднувати в один і тим самим реалізовувати також пошарову інтерпретацію результатів зондування з відповідною виразною візуалізацією розрізу.

Показником якості виконаного дослідження методом GEO, на який у рівній мірі впливають особливості як польового вимірювання, так і інверсії даних, служить величина кореневого середньоквадратичного відхилення RMS (root-mean-square) вимірних значень $\rho_{\text{п}}$ від розрахованого відгуку геоелектричної моделі, отриманої в результаті інверсії. Зазвичай хорошою апроксимацією реального розрізу вважається геоелектрична модель з RMS менше 5 %, однак у випадках складної будови розрізів або за несприятливих умов вимірювання можуть бути прийняті також моделі з більшими RMS.

Слід мати на увазі, що при зменшенні відстані між електродами не тільки зростає детальність вимірювань, а й зростає внесок похибок, пов'язаних як з розташуванням електродів на нерівній поверхні, так і з недосконалістю заземлень у середовищах з контрастними опорами, якими є, наприклад, кам'яністі ґрунти. Щоби не допустити поширення похибок на всю модель середовища, рекомендується застосовувати блокову інверсію при високій дискретизації моделі, тобто необхідно дозволити алгоритму дискретизації розбити простір на кількість комірок, яка перевищує кількість вимірних даних $\rho_{\text{п}}$.

Об'єкт дослідження. Національний заповідник «Софія Київська» розташований на підвищеній ділянці київського лесового плато з абсолютними позначками поверхні 186,4–191,6 м. За даними буріння свердловин¹⁵ встановлено, що у верхній частині лесової товщі залягають лесові супіски потужністю 7–10 м, у нижній –

¹⁴ Loke M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software.

¹⁵ Рыбин В.Ф., Скальський А.С., Молочкова Н.Н. Проблемы инженерной защиты территории Национального заповедника «София Киевская» от подтопления // VII Міжнарод. наук.-практ. конф. Софійські читання «До 90-річчя від дня народження відомого дослідника пам'яток Національного заповідника «Софія Київська», д.і.н. Сергія Олександровича Висоцького»: матеріали. Київ, 2015. Вип. 7. С. 487–494.

лесоподібні суглинки потужністю 2–3 м. За результатами спелеоархеологічних досліджень минулого століття відомо, що на території заповідника (переважно на захід та північний захід від Софійського собору) в XVII–XVIII ст. існувала ціла мережа підземних споруд – монастирських льохів, що являли собою розгалужені печерні галереї, викопані в шарі материкового лесу на глибині від 2 до 6 м від сучасної поверхні. Ці підземелля лише частково були обмуровані цеглою, а їх входи зосереджувалися на місці колишніх монастирських келій, знищених пожежею 1697 року. Також відомо, що зазначені льохи були покинуті не пізніше середини XVIII ст., входи до них – засипані, хоча час від часу впродовж XIX–XX ст. вони нагадували про себе поодинокими провалами на північний захід від собору¹⁶.

Один з таких провалів – між будівлями собору та софійської бурси – у 1916 р. був досліджений київським археологом О. Д. Ертелем, якому вдалося зафіксувати значну частину монастирського льоху з пізньосередньовічними написами на стінах. Вдруге ту ж саму споруду у 1977–1979 рр. досліджувала археологічна експедиція заповідника під керівництвом І. Ф. Тоцької. На жаль, зазначені дослідження не були завершені: частина підземелля лишилася нерозкопаною, а також не були виконані роботи з консервації підземних порожнин та їх музеєфікації, хоча результати досліджень свідчили про значну історико-культурну цінність цього об'єкта. За невідомих обставин роботи у досліджуваній споруді були згорнуті, а вхідні шахти на місцях провалів – засипані ґрунтом. Зрештою, це та інші подібні підземелля у садибі Софійського собору лишаються недосяжними та неконтрольованими вже понад 35 років, впродовж яких вони зрідка проявлялися поодинокими провалами ґрунту, зокрема, у 2003 та 2011 рр.

У квітні 2015 р. було зафіксовано поверхневі вияви руйнації цього підземелля через утворення кількох просідань ґрунту за 25 м від північно-західного кута собору. У липні 2015 р. сталося ще одне просідання ґрунту – на вимощеній камінням парковій доріжці за 10 м від північно-західного кута Софійського собору, яке засипали та заклали бруківкою. На початку вересня 2015 р. за 35 м від північно-західного кута собору стався великий провал ґрунту діаметром до 2 м та глибиною до 3 м від сучасної поверхні. Було виконано обстеження цього провалу, під час якого з'ясовано, що провал утворився на місці руйнації склепіння підземної галереї, що проходить на глибині понад 3 м у напрямку, ідентичному трасі дослідженого у XX ст. підземелля. Причиною провалу можна вважати тривале підмивання стін підземної галереї з поступовим утворенням вивального куполу склепіння у місці підмиву. Згодом провал було засипано, при цьому значні обсяги насиченого водою намулу виявилися законсервованими у замкненому просторі підземелля, призводячи до його подальшого перезволоження.

Подальший моніторинг ділянки, де були зафіксовані провали 2015 р., фіксував утворення нових просідань ґрунту біля собору, а отже – зростаючу загрозу масштабного обвалу підземних споруд. На початку лютого 2016 р. за 30 м від північно-західного кута Софійського собору та за 1,5–2 м на південь від засипаного провалу 2015 р. на місці раніше зафіксованого просідання ґрунту утворився новий провал глибиною близько 1 м. Над провалом було влаштоване тимчасове покриття, а саме місце провалу огорожене, однак подальші дослідження та укріплення підземної споруди не були здійснені. Згодом і цей провал було засипано піском. Втім, ситуація продовжувала погіршуватися: після танення снігу навесні 2016 р. утворилося нове просідання поверхні клінкерного покриття паркової доріжки за 35–40 м від собору, а інші просідання суттєво збільшилися у розмірах. На початку



¹⁶ Бобровський Т. 2007. Підземні споруди Києва від найдавніших часів до середини XIX ст. (спелео-археологічний нарис). Київ: АртЕк. с. 35, 130, рис. 10: 1.



червня 2016 р. було зафіксовано ще чотири нових просідання ґрунту на тій самій території, два з яких розташовувалися поруч з північно-західним кутом собору.

Нарешті в квітні 2018 р. на зазначеній ділянці стався черговий провал на місці великого просідання ґрунту, яке фіксувалося ще з 2015 р. Провал являв собою значну (понад 0,5 м глибиною) западину з вузьким отвором, який прямував углиб землі. Закладеним на місці цього провалу розкопом в 2018–2019 рр. було досліджено великий вивальний купол підземної галереї, що розташовувалася на глибині близько 6 м від сучасної поверхні. І хоча дослідження цього провалу через технічні труднощі лишаються не завершеними дотепер, облаштування в ньому дерев'яних кріплень та накриття дозволило на кілька років призупинити руйнівні процеси у підземних спорудах.

Втім, у 2021 р. на ділянці між Софійським собором, Братським корпусом та будівлею колишньої Бурси утворився провал діаметром близько 1 м (на місці вищезгаданого просідання 2015 р. пішохідної доріжки з кlinkерним покриттям) (рис. 4а). На місці провалу було закладено шурф розмірами 2×2 м, доведений до глибини 5 м від сучасної поверхні, де зафіксовано підлогу зруйнованої ділянки підземної галереї (рис. 4б). Залишки цегляного склепіння цієї споруди були зафіксовані на глибині 2–3 м від сучасної поверхні (рис. 4в). Галерея, висота якої складала 2–2,5 м, прямувала із нахилом у південно-східному напрямку, а її продовження в обидва боки на відстані 4–5 м були замулені та перекриті обвальним ґрунтом (рис. 4г). На підставі співставлення матеріалів попередніх досліджень вдалося встановити, що зазначене підземелля є ділянкою вищезгаданого монастирського льоху XVII ст., який частково досліджувався О. Ертелем у 1916 р. та І. Тоцькою у 1970-х рр.

Результати. Як видно на рис. 4а, профілі ТЕО були прокладені навхрест очікуваних ходів.

Просторовий розподіл питомого електричного опору, отриманий за результатами ТЕО, слід інтерпретувати не тільки з точки зору наявності аномалій, а й зважаючи на літологію та водонасиченість ґрунту. Візьмемо до уваги, що ρ зростає із збільшенням розміру зерен, зцементованості ґрунтових агрегатів та зменшенням зволоженості.

Базовий геоелектричний розріз середовища є виразно двошаровим. Верхній шар має товщину до 2,0 м на профілі 21-1 і до 1,2 м на профілі 21-2 і містить велику кількість дрібних високоомних включень – ймовірно каміння, щебеню і інших будівельних решток. Під ним залягає низькоомна ($\rho = 10\text{--}30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) товща зволених лесоподібних супісків і суглинків.

У цій нижній товщі яскраво виділяються п'ять аномалій підвищеного опору: три – на профілі 21-1, дві – на профілі 21-2. Найбільш яскраво відображена підземна споруда, що провалилася у 2021 р. Її планове положення показано білою зіркою на рис. 5а та б. В її епіцентральної частині опір перевищує $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Ймовірно це пов'язано з тим, що на час виконання вимірювань порожнина була частково розчищена від заповнювача. Зауважимо, що геометричні розміри аномалії значно перевищують розміри порожнини. Це відбувається через невідповідності 2D інверсійних зображень реаліям тривимірно неоднорідного середовища.

Інші аномалії підвищеного опору мають менші геометричні розміри і інтенсивність $400\text{--}600 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Дві з них, зафіксовані на профілі 21-2, відповідають відомим підземеллям за археологічними даними¹⁷. Ще дві аномалії фіксуємо на профілі 21-2. В їх епіцентральної частинах ми прогнозуємо інші порожнини, подібні до тієї, що розкрита.

¹⁷ Бобровський Т. 2007. Підземні споруди Києва від найдавніших часів до середини XIX ст....

Висновки. На території заповідника «Софія Київська» в результаті досліджень методом томографії електричного опору виявлені аномалії, які відповідають підземним спорудам – як наявним на картах археологічної вивченості, так і невідомим, передбачуваним.

Підземелля визначаються на геоелектричних розрізах за підвищеннями питомого опору ($\rho > 400 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), що відкриває можливість їх ефективного картування методом ТЕО.

Геофізичні методи опору, зокрема в модифікаціях вертикальних електричних зондувань і ТЕО, слід рекомендувати для пошуків київських підземних споруд, закладених у лесовій породі.

Kseniia M. BONDAR,

Dr. Sci. (Geol),
Senior Researcher, Institute of Geology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)
Principal Investigator, NGO «Fond Velykyi Liokh» (Kyiv, Ukraine)
ks_bondar@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4946-7707>

Ruslan V. KHOMENKO,

Ph.D., assist. Prof. in the Department of Geophysics, Institute of Geology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)
sapphirelion1977@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3291-4272>

Tymur A. BOBROVSKYY,

Ph. D., Senior Researcher,
National Reserve «Sophia Kyivska» (Kyiv, Ukraine).
e-mail:bobrovskij@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3221-4279

ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY – EFFICIENT GEOPHYSICAL METHOD TO INVESTIGATE UNDERGROUND CAVITIES IN THE NATIONAL RESERVE «SOPHIA KYIVSKA»

ABSTRACT. *This work aims to acquaint a wide range of researchers dealing with archaeology in Kyiv with the advantages of the geophysical method of electrical resistivity tomography (ERT). The article describes ERT measurements conducted on the area between the Saint Sophia Cathedral, the Fraternity Building and the building of the former Bursa in connection with the formation of a sinkhole in the spring of 2021. At the site of the sinkhole, at a depth of 2-3 m from the surface, a brick vault of the completely silted up underground passage dated to the XVIIth century, was discovered. The height of the passage exceeded 2 m. Two ERT profiles were laid across the direction of expected caverns. The profiles were 63 m long, while the electrodes were located at a distance of 1 m from each other. The resistivity distribution models were obtained by the smooth constrained least-squares inversion scheme (Occam-Marquardt algorithm). As a result, the underground structures known and predicted appeared on the geoelectric sections as distinct anomalies of increased resistivity ($\rho > 400 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$). This opens up the possibility of effective geophysical mapping of underground cavities in the eolian loess-like rocks on the territory of the reserve «Sophia Kyivska». At the same time, a significant difference in electrical resistivity between the object and the loess rock, which is at least $300 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, is a reliable reason to apply the ERT method for searching for underground structures.*

KEYWORDS: *electrical resistivity tomography, Sophia Kyivska, loess rock, underground structure, geophysics*



REFERENCES

1. Aspinall, A., Gaffney, C.F. (2001). The Schlumberger array-potential and pitfalls in archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 8, 199–209.
2. Atkinson, R.J.C. (1953). *Field Archaeology*. 2nd ed., London.
3. Bondar, K. M., Sokhatskyi, 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. <https://doi.org/10.1002/gea.21827>
4. Chouker, Aspinall F. (2001). Archaeological site investigation by geoelectrical measurements in Tel-Halawi (northern Syria). *Archaeological Prospection*, 8, 257–263.
5. 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.
6. 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>.
7. 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.
8. Edwards, L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020–1036.
9. Ellis, R., Oldenburg, D.W. (1994). Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International*, 116, 5–11.
10. Gaber, S., El-Fiky, A.A., Abou Shagar, A., Mohamaden, M. (1999). Electrical resistivity exploration of the Royal Ptolemaic Necropolis in the Royal Quarter of Ancient Alexandria, Egypt. *Archaeological Prospection*, 6, 1–10.
11. Gaffney, C., & Gater, J. (2003). Revealing the buried past. *Geophysics for Archaeologists*, Stroud.
12. Loke, M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. *Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software*.
13. Loke, M.H., Barker, R.D. (1996 a). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131–152. doi:10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x.
14. 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.
15. Panissod, C.; Dabas, M.; Jolivet, A.; Tabbagh, A. (1997). A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3 m) geoelectrical investigation: the 'Vol-de-canards' array. *Geophys. Prospect*, 45, 983–1002.
16. Papadopoulos, N. G., Yi, M. J., Kim, J. H., Tsourlos, P., Tsokas, G. N. (2010). Geophysical investigation of tumuli by means of surface 3D electrical resistivity tomography. *J. Appl. Geophys.* 70 (3), 192–205.
17. Park, S.K, Van, G.P. (1991). Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structures beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, 56, 951–960.
18. 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; <https://doi.org/10.3390/rs12030461>
19. Sarris, R. Jones, (2000). Geophysical and related techniques applied to archaeological survey in the Mediterranean: a review. *Journal of Mediterranean Archaeology*, 13, (1)
20. Tsourlos, P, Ogilvy, R. (1999). An algorithm for the 3-D inversion of tomographic resistivity and induced polarization data: preliminary results. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2(2), 30–45.
21. Xu, B, Noel, M. (1993). On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, 41, 791–801.
22. Bobrovskiy T. (2007). Pidzemni sporudy Kyieva vid naidavnishykh chasiv do seredyny XIX st. (speleo-arkheolohichnyi narys). Kyiv: ArtEk.
23. Bondar, K., Bobrovskiy, T., Tsiupa, I. (2016). Vychennia efektyvnosti heoradarnykh doslidzhen na terytorii Natsionalnoho zapovidnyka "Sofiia Kyivska" dlia vyrishennia arkheolohichnykh zavdan. *Heoinformatyka*, 4 (60), 75–82.
24. Rybyn V.F. (2015). Problemy ynzhenernoi zashchyty terrytoriy Natsionalnoho zapovidnyka "Sofiia Kyivskaia" ot podtopleniya / V.F. Rybyn, A.S. Skalskyi, N.N. Molochkova. VII Mizhnarod. nauk.-prakt. konf. Sofiiski chytannia "Do 90-richchia vid dnia narodzhennia vidomoho doslidnyka pamiatok Natsionalnoho zapovidnyka "Sofiia Kyivska", d.i.n. Serhiia Oleksandrovycha Vysotskoho": materialy, 7, 487–494.
25. Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). Nova malohlybynna bahatoelektrodna ustanovka vymyruvannia elektrychnoho oporu. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universtetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiia*, 2(61), 36–40.

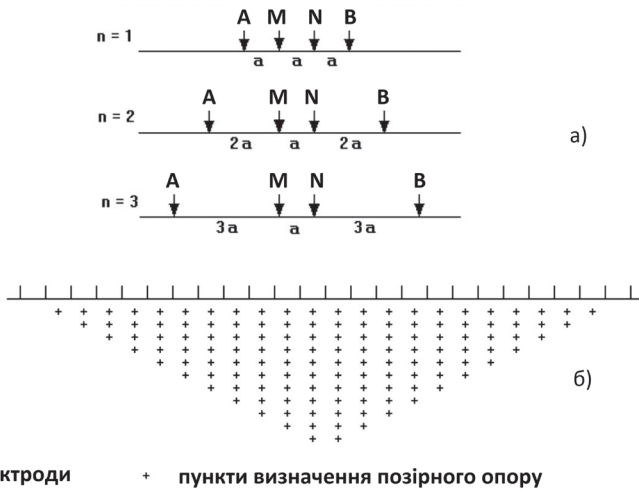


Рис. 1. Схема розташування живильних (А,В) та приймальних (М, N) електродів при роботі установкою Веннера-Шлюмберже (а) та структура вимірів позірнього опору по розрізу (б).



Рис. 2. Виконання вимірювань методом томографії електричного опору по профілю 21-2 біля Братського корпусу на території заповідника «Софія Київська».

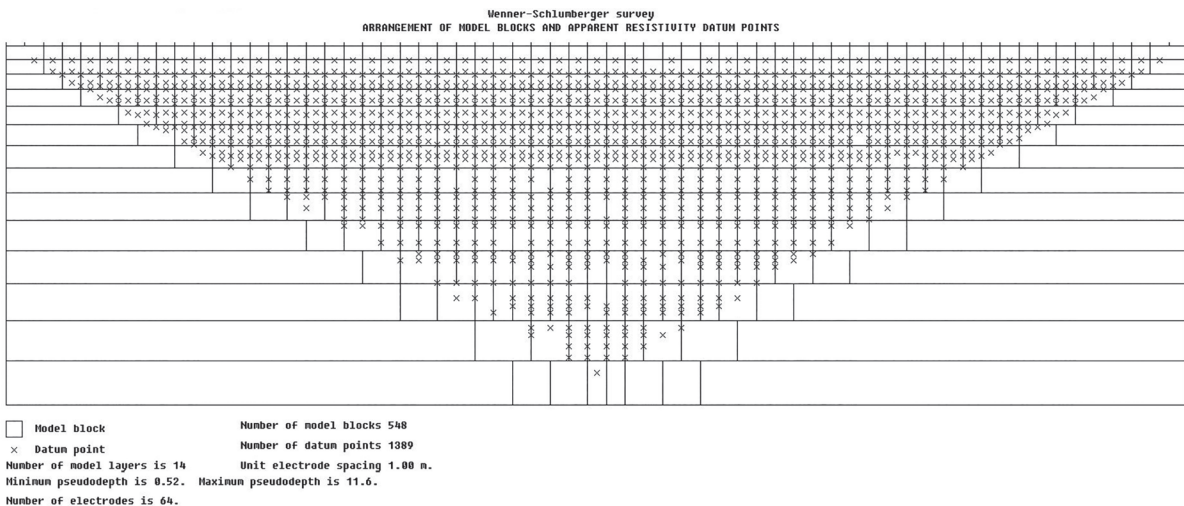


Рис. 3. Приклад розділення на блоки (прямокутні призми) матриці вимірів ρ_p при опитуванні симетричною чотирьохелектродною установкою Веннера-Шлюмберже.





Рис. 4. Фотографії провалу 2021 р. (а), розкопу на його місці (б) і фрагменту підземної споруди, що відкрилася (в,г).

