

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.3.307769>
УДК 624.131.1:550.34

E-mail: ira071165@yahoo.com,
<https://orcid.org/0000-0001-7083-6119>;
kotkotmag@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-4324-9231>;
manifc2@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0001-7463-7133>

*Corresponding author /
Автор для кореспонденції:
T.V. Kril, kotkotmag@gmail.com

Received / Надійшла до редакції:
07.04.2024

Received in revised form /
Надійшла у ревізованій формі:
04.07.2024

Accepted / Прийнята:
30.08.2024

Keywords: Kyiv-Pechersk Lavra; emergency leaks; electrotomography, natural electric field, architectural monuments, hydrogeological monitoring.

Ключові слова: Києво-Печерська лавра; аварійні витіки; електротомографія; природне електричне поле; архітектурні пам'ятки; гідрогеологічний моніторинг.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2024. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Неруйнівні методи встановлення причинно-наслідкового зв'язку аварій водонесучих мереж та умов збереження архітектурної спадщини

I.A. Черевко¹, Т.В. Кріль^{2*}, Д.А. Безродний³

¹ Національний заповідник «Києво-Печерська лавра», Київ, Україна; ² Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна; ³ Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ, Україна

Non-destructive methods of establishing a cause-and-effect relationship between water supply network accidents and the conditions for preserving architectural heritage

I.A. Cherevko¹, T.V. Kril^{2*}, D.S. Bezrodnyi³

¹ National Reserve "Kyiv-Pechersk Lavra", Kyiv, Ukraine; ² Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; ³ Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine

Accidents on water supply networks have the most significant negative consequences on the state of the historical and architectural heritage, which was formed over many centuries. The paper analyzes the cause-and-effect relationship between accidents of water-carrying networks and the conditions of architectural heritage preservation using the example of the Kyiv-Pechersk Lavra. The results of determining waterlogging zones and their factors by non-destructive monitoring methods on the territory of the Metropolitan Garden of the Upper Lavra are given. This area combines complex engineering and geological conditions and technogenic mastering, creating conditions for developing dangerous engineering and geological processes and emergency situations. In terms of danger, the garden's territory belongs to unstable areas for preserving historical monuments of the UNESCO world heritage. The last accident on the water supply networks occurred in October 2022. It caused sinkholes on the surface, rising groundwater levels, significant destruction of an underground structure of historical importance – the Metropolitan Cellar. The research was carried out using the methods of electrotomography and natural electric field. The results of electrotomography were interpreted using two- and three-dimensional models. The existence of an anomalous dome (soils of low resistance), which is observed in the central part of the site, is probably the focus of waterlogging of the soil mass as a result of an accident on the heating network. The analysis of the adapted 3D model based on the results of non-destructive methods of monitoring the geological environment made it possible to indirectly establish the places of unsatisfactory technical condition of engineering networks (cold water supply), where a wetted section with low values of apparent resistance was recorded. Research has confirmed the presence of an inflow of man-made waters (leaks) from main water supply networks in the western part of all profiles as a constant source and factor of waterlogging of the array of soil bases of architectural monuments – Monastyrski walls, Kushnyka tower, etc. Based on the research results, the need to develop compensatory measures to strengthen part of the fortress walls was proposed, and a safe distance for moving networks from historical objects was substantiated to preserve them.

Цитування: Черевко І.А., Кріль Т.В., Безродний Д.А. Неруйнівні методи встановлення причинно-наслідкового зв'язку аварій водонесучих мереж та умов збереження архітектурної спадщини. *Геологічний журнал*. 2024. № 3 (388). С. 11–30. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.3.307769>

Citation: Cherevko I.A., Kril T.V., Bezrodnyi D.A. 2024. Non-destructive methods of establishing a cause-and-effect relationship between water supply network accidents and the conditions for preserving architectural heritage. *Geologichnyi žurnal*, 3 (388): 11–30. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.3.307769>

Вступ

Об'єкти архітектури вагомого історичного значення, що знаходяться під захистом ЮНЕСКО, такі як Національний заповідник «Києво-Печерська лавра» (Kyiv..., 2024), мають досліджуватися спеціальними неруйнівними методами. До них відносяться такі геофізичні методи досліджень, як методи електротомографії (ЕТ), природного електричного поля (ПЕП). Вони дозволяють проводити діагностику підземних комунікацій, локальних неоднорідностей у ґрунтах, встановлювати витоки з мереж водогону, рівні ґрунтових вод (РГВ) тощо (Johnson, 1962; Burkart et al., 2007; Tsourlos, Tsokas, 2011; Nemedá, 2013; Balasco et al., 2022). Проте застосування цих методів потребує даних спостережних гідрогеологічних та розвідувальних свердловин для підвищення точності інтерпретації. Вплив техногенезу урбанізованих територій на історичні ареали та умови збереження пам'яток особливо відображаються на гідрогеологічній ситуації та інженерно-геологічних умовах (Шестопапов, 1991; Hayashi et al., 2009; Зуєвська, 2013; Hassan, Abbas, 2015; La Vigna, 2015, 2022).

Нами проводиться системний моніторинг споруд історико-архітектурного значення та інших об'єктів на території Києво-Печерської лаври (Demchyshyn, Kril, 2019; Kril, Shekhunova, 2019; Hudak et al., 2020; Комплексне..., 2023; Мацола та ін., 2023, 2023; Kril, Cherevko, 2023; Kril et al., 2023). У заповіднику з 90-х років ХХ ст. діє гідрогеологічний моніторинг, що включає 48 спостережних свердловин за змінами РГВ та три геофізичних пости по п'ять мінісвердловин кожний за ступенем зволоження ґрунтів, окремі історичні пам'ятки облаштовані геодезичними марками та реперами для контролю деформацій та розкриття тріщин, на нестабільних за розвитком інженерно-геологічних процесів та явищ ділянках періодично виконуються дослідження неруйнівними методами ЕТ та ПЕП.

Однією з нестабільних ділянок за природними та техногенними факторами для збереження об'єктів історичної спадщини є територія Митрополичого саду (Чередніченко, 2006; Архипенко, Гаврусєва, 2008; Kril, Cherevko, 2023; Kril et al., 2023). Такі фактори, як літологічний склад ґрунтів основ, високий рівень залягання ґрунтових вод, насиченість території інженерними спорудами та комунікаціями

у незадовільному технічному стані, створюють загрози розвитку небезпечних інженерно-геологічних процесів, пошкодження об'єктів історико-культурної спадщини.

Митрополичий сад знаходиться на території Верхньої лаври в межах лесового плато. Абсолютні відмітки – 182–189 м, площа ділянки становить 2,6 га. Сад оточують історичні будівлі: корпуси № 92 – Монастирські мури, № 88 – башта Кущника, № 5, 6, 31, в центральній частині розташована підземна споруда № 9 – Митрополичий льох із трьома відгалуженнями. На глибині 1,5–2 м прокладено мережі холодного та гарячого водогону (рис. 1). Корпуси № 5, 88, 92 мають III та IV категорію технічного стану – непридатні до нормальної експлуатації, аварійні відповідно до (Настасова..., 2017).

Відомо кілька аварійних випадків на мережах водогону в межах цієї території. Остання аварійна ситуація утворилась внаслідок прориву магістральної тепломережі 27.10.2022 р. (Комплексне..., 2023). Потік пульпи об'ємом близько 300 м³, сформований витоками гарячої води і перезволоженого ґрунту лесової товщі, було винесено в інтер'єри підземної споруди № 9 (рис. 2). Внаслідок цього на денній поверхні утворились провали розмірами 10 × 7 × 2 (h) м, (9–10) × 6 × 2 (h) м, 4 × 4 × 2 (h) м (див. рис. 1), а підземну споруду було фактично знищено. Один із провалів вимив ґрунти основ та розкрив фундаменти Монастирських мурів (ділянка № 1, корпус № 92). РГВ у гідрогеологічних спостережних свердловинах (ГСС) 3 та 102, розташованих на відстані близько 40–50 м від місця прориву, піднялись на 1–1,5 м (за даними моніторингових замірів від 31.10.2022 р.).

Метою даного дослідження було детальне визначення зон перезволоження та їх чинників неруйнівними методами моніторингу (ЕТ та ПЕП) на території Митрополичого саду, а також визначення площі та глибини перезволоження ґрунтового масиву і наявності / відсутності пустот та замулення існуючих підземних порожнин.

Для досягнення мети виконано такі завдання: збір та аналіз інженерно-геологічних досліджень території Митрополичого саду; проведення польових робіт геофізичними методами ЕТ та ПЕП за визначеними профілями; якісна та кількісна інтерпретація даних

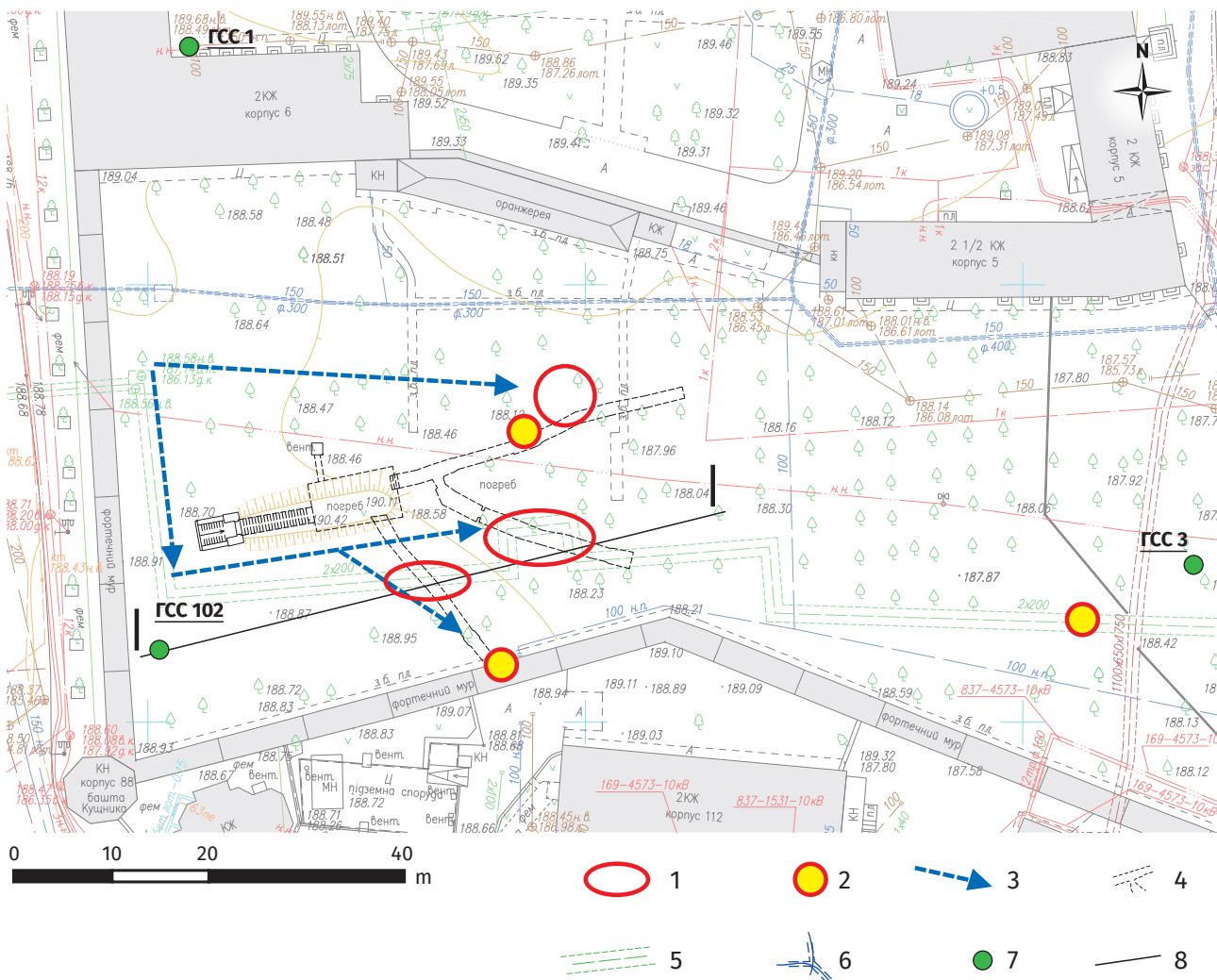


Рис. 1. Територія Метрополічного саду: 1 – провали після аварії 27.10.2022 р.; 2 – провали, проявлені через два місяці після аварії через ущільнення перезволоженого ґрунту; 3 – напрямок руху аварійних витоків; 4 – контури підземної споруди; 5 – мережа гарячого водогону (понад 60 °С); 6 – мережа холодного водогону; 7 – гідрогеологічні спостережні свердловини; 8 – лінія інженерно-геологічного розрізу

Fig. 1. The territory of the Metropolitan's Garden: 1 – sinkholes after the accident on October 27, 2022; 2 – sinkholes that appeared two months after the accident due to consolidation of waterlogged soils; 3 – direction of emergency leaks flow; 4 – contours of the underground structure; 5 – heat supply lines (hot water – 60°C); 6 – cold water supply lines; 7 – hydrogeological observation wells; 8 – line of engineering and geological section

методу ЕТ, побудова вертикальних розрізів позірних опорів – ізоом; кількісна інтерпретація аномалій природного поля, побудова карти потенціалів природного поля ΔU; адаптація результатів натурних методів ЕТ та ПЕП спостережень до техногенних умов території досліджень із використанням ГІС-технологій; встановлення зон та напрямків фільтраційних процесів через аварійні витоків; інтерпретація даних та встановлення причинно-наслідкового зв'язку аварії та умов збереження пам'яток.

Об'єктом дослідження були компоненти геологічного середовища території Метрополічного саду разом із інженерними мере-

жами водогону, підземними спорудами та іншими штучними утвореннями. **Предметом** дослідження були геофізичні поля та зміни електромагнітних властивостей компонентів техногенного та геологічного середовища – позірного електричного опору, потенціалів природного поля. Морфологічні особливості геофізичних полів закономірно залежать від розподілу фізичних властивостей речовини у ґрунтовій товщі. Геофізичні аномалії в межах території досліджень розглядаються як пошукові ознаки при інтерпретації матеріалів та встановленні причинно-наслідкових зв'язків аварій та стану компонентів геологічного середовища, наявності пустот у ньому.



Рис. 2. Наслідки аварії у Митрополичому саду: а – утворення провалів; б – винос ґрунту у підземну споруду № 9 внаслідок суфозійних процесів, контури пульпи показано червоним пунктиром; в – суфозійний винос ґрунту під фундаментами Монастирських мурів, фото І.А. Черевко, 7 листопада 2022 р.

Fig. 2. Consequences of the accident in the Metropolitan Garden: а – the formation of sinkholes; б – removal of soil into the underground structure No. 9 as a result of suffusion processes, the contours of the pulp are shown in red dashed lines; в – soil suffusion under the foundations of the Monastyr'sky walls, photo by I.A. Cherevko, November 7, 2022

Матеріали та методи

Геофізичні дослідження виконано у жовтні 2023 р., майже через рік після аварії (Мацола та ін., 2023). Методика польових робіт являє собою комплекс, що включає польові спостереження з технологією безпосередньої первинної обробки та інтерпретації польових даних (Moon, Spencer, 1988; Mauriello et al., 1998; Blome et al., 2009; Coscia et al., 2011; Бондар, 2021).

Розбивку профілів проведено за допомогою рулетки із заходу на схід ділянки досліджень. Винесені на місцевість пікети в межах профілів прив'язані GPS-координатами до універсальної поперечної системи координат Меркатора (UTM) (datum WGS 84, zone 36 N) за допомогою навігатора Garmin GPS Map 62s. Спостереження методом ЕТ виконано за трьома профілями: профілі I та II мережею 5 × 5 м, профіль III – мережею 5 × 10 м (рис. 3). Використано сучасне електророзвідувальне обладнання АВЕМ Terrameter LS 2 (Швеція).

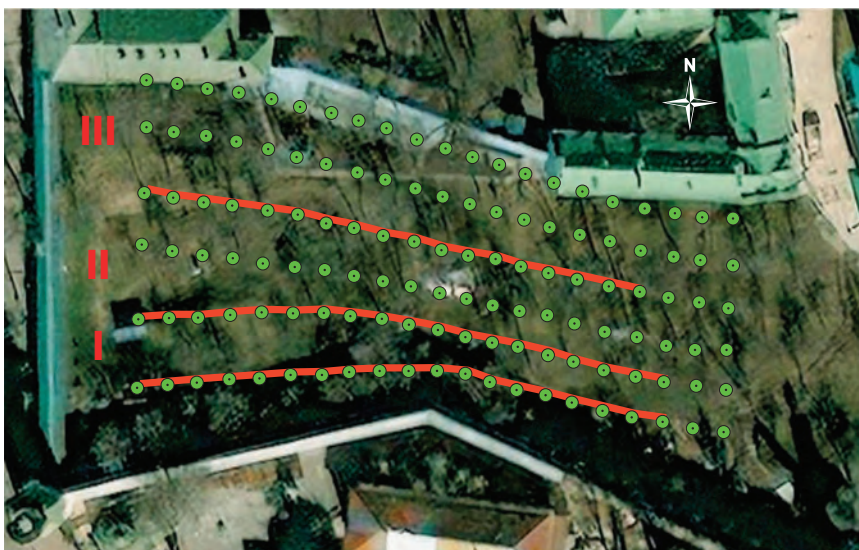


Рис. 3. Положення ЕТ профілів (червоні лінії) та фізичні точки спостережень для ПЕП профілів (зелені точки)

Fig. 3. Place of ET profiles (red lines) and physical observation points for NEF profiles (green points)

Загальний обсяг фізичних спостережних точок методом ЕТ склав 621 од. Обсяг контрольних та повторних спостережень сягнув 5 % від загальної кількості точок. Абсолютна похибка інверсії електрометричних даних становила для профілю I – 3,4 % (п'ята ітерація), профілю II – 6,6 %, профілю III – 2,9 % (четверта ітерація).

Метод ЕТ передбачає багаторазове використання в якості живильних та вимірювальних електродів одних і тих же положень, фіксованих на профілі спостережень. Це дозволяє зменшувати або збільшувати загальну кількість числа робочих положень електродів при істотній зміні щільності вимірювань у порівнянні зі звичайними вертикальними електричними зондуваннями (ВЕЗ). Рівновіддаленість електродів дає змогу отримувати значення позірною електричного опору по вертикалі як у логарифмічному масштабі (класичний варіант методом ВЕЗ), так і в лінійному (Вижва та ін., 2014).

Польові дані поетапно опрацьовано в програмному застосунку Terrameter LS Toolbox – для зчитування даних і отримання первинного псевдорозрізу з приладу Terrameter LS 2 (ABEM..., 2023).

У процесі інтерпретації при вирішенні задачі інверсії електрометричних даних (обернена задача) використано Res2dinv (двовимірна інверсія) та Res3dinv (тривимірна інверсія) – програмні комплекси обробки та інтерпретації результатів досліджень (Rapid..., 2023). «Псевдо-електричні» розрізи за профілями будували в автоматичному режимі. РГВ та границі літологічних шарів відбудовували з урахуванням даних ГСС 3 та 102.

Якісна інтерпретація даних за методом ЕТ була спрямована на визначення загальних закономірностей геологічної будови ділянки досліджень та оцінки ймовірних зон розущільнення та перезволоження. На цьому етапі були встановлені зв'язки між особливостями будови геоелектричного розрізу та параметрами кривих електричних зондувань. Виконана побудова карти типів кривих зондувань і карт ізом по виділених горизонтах, отримані вертикальні розрізи позірних опорів.

Кількісна інтерпретація кривих полягала у визначенні потужностей і питомих опорів геоелектричних горизонтів, автоматизованому підборі теоретичної кривої електричного зондування, яка найкраще збігається з експериментальною (натурним розрізом) (Огильви, 1990; Mauriello

et al., 1998; Loke et al., 1999; Coscia et al., 2011; Williams et al., 2018; Бондар, 2021). Значення позірною опору (Ом·м) обчислювали за формулою:

$$\rho_n = K \frac{\Delta U}{I},$$

де K – коефіцієнт установки, м; ΔU – різниця потенціалу на приймальних електродах, В; I – сила струму на живильних електродах, А.

За результатами робіт та проведеної якісної та кількісної інтерпретації побудовані три геоелектричні розрізи на глибину до 24 м.

Спостереження методом ПЕП виконано способом потенціалів відповідними профілями (див. рис. 3). Враховуючи високу стабільність сучасних неполяризованих електродів, спостереження проведено від єдиної базової точки з одночасною ув'язкою початкових точок профілів.

Загальний обсяг фізичних точок методом ПЕП склав 1594 од. Обсяг контрольних та повторних спостережень сягнув 15 % від загальної кількості точок. Під час виконання досліджень було здійснено згущення мережі спостережень з метою локалізації виявлених аномалій поля, згідно з поставленими завданнями використано мережу 5×5 м, після згущення в окремих місцях були проведені дослідження за мережею 1×5 м.

На етапі якісної інтерпретації проведених детальних спостережень на карті потенціалів природного поля ΔU спершу були виділені аномальні зони з інтенсивністю, яка перевищувала похибку спостережень і коливання поля нормального фону. У межах цих аномальних зон виділено та простежено від профілю до профілю окремі аномалії. Встановлені їх положення та протяжність, зроблені висновки про їх природу, враховуючи геологічну будову (ГСС 102). При цьому бралось до уваги те, що на ділянках розвитку фільтраційних процесів (підйом РГВ) від'ємними значеннями аномалій природного поля фіксуються області припливу (притоку) води, а додатними – області її розвантаження. Проведено амплітудно-морфологічний аналіз аномалій природного поля з метою картування різних за літологією ґрунтових утворень ділянки робіт відповідно до алгоритмів, представлених у роботі (Вижва та ін., 2014).

При встановленні положення і протяжності аномалій були враховані як геоморфологічні, гідрогеологічні та технічні умови ділянки (проведення ремонтних робіт після аварії), котрі суттєво вплинули на інтенсивність аномалій і стали причиною перериву аномальних зон, так

і результати спостережень іншими методами, перш за все методами електропрофілювання.

За видом кривих в аномальних областях здійснена спроба з'ясування характеру об'єкта (окреме тіло чи комплекс) та були визначені орієнтовні глибини поверхні ґрунтових вод.

За результатами кількісної інтерпретації аномалій природного поля визначено напрямок розвантаження підземних вод, а також місця фільтрації техногенних витоків, оцінено їх орієнтовне місцезнаходження з урахуванням результатів ЕТ.

Адаптація результатів та побудова 3D моделі проведені шляхом накладання у ГІС-середовищі карти ПЕП та трьох геоелектричних розрізів на топооснову з основними інженерними мережами та комунікаціями, архітектурними пам'ятками. Інтерпретація даних, встановлення причинно-наслідкового зв'язку аварії та умов збереження пам'яток виконано із залученням даних багаторічного гідрогеологічного моніторингу. Детальний аналіз отриманої моделі дозволив встановити просторове положення наявних ділянок перезволоження з урахуванням присутніх у межах ділянки комунікацій та інших штучних споруд.

У даних дослідженнях було використано: Схему інженерного захисту території, масштаб 1:1000 (Інженерний..., 2012); План сучасного стану території Заповідника, масштаб 1:500 (План..., 2012); дані інженерно-геологічних досліджень (Власенко, 1962; Николишин, 1983, 1987; Геологическая..., 1984; Демчишин, Рибін, 1998; Архипенко, Коняшин, 2018); геодезичний план (масштаб 1:500); дані інженерно-геологічних вишукувань, моніторингових гідрогеологічних спостережень; результати історичних та археологічних досліджень, технічна документація (Чередніченко, 2006; Звіряка та ін., 2012).

Результати

Гідрогеологічні умови території досліджень

На території Києво-Печерської лаври поширені три ґрунтових водоносних горизонти: у четвертинних еолово-делювіальних і озерно-льодовикових відкладах на плато (Верхня лавра, верхня частина схилів), у четвертинних делювіальних ґрунтах на схилах і повсюдно в олігоценових (харківських) пісках (Рибін та ін., 2001). Okремо слід виділити тимчасовий водоносний горизонт типу верховодки, який утворюється

на поверхні водотривких шарів (моренні суглинки, бурі та строкаті глини), що залягають на незначній глибині на території Нижньої лаври (Господарче подвір'я, Ближньопечерний пагорб, Дальньопечерний пагорб). Вода міститься у насипних та делювіальних ґрунтах (супіски, суглинки), потужність горизонту змінюється від 1,0 до 2,5 м, глибина залягання – від 0,4 до 3,0 м. Водоносний горизонт формується головним чином унаслідок інфільтрації атмосферних опадів та витоків з водонесучих мереж. При незначній потужності існування горизонту в часі досягає до 5–7 місяців.

Багаторічні режимні спостереження показали, що основні порушення природного гідрогеологічного режиму зумовлені як природними, так і техногенними факторами, а саме акумуляцією поверхневого стоку, витокami з водонесучих комунікацій, значним припливом з боку мереж загальноміського значення (рис. 4). Витоків з комунікацій неодноразово призводили до локального формування верховодки, різких підйомів РГВ, затоплення підвалів, перезволоження і деформацій конструкцій будівель, витоків у вигляді джерел у саду Ближніх печер. Коливання РГВ зазвичай мають циклічний характер, річна амплітуда становить 0,4–1,5 м, але в разі витоків із комунікацій спостерігаються різкі підйоми до 2,0–4,6 м.

РГВ у межах Верхньої лаври знаходяться на відмітках 169,0–181,0 м, за весь період спостережень (1990–2023 рр.) найвищі рівні фіксувались у 1994–1996, 2008–2009 та 2018–2019 рр. В останні роки довготривалі підйоми рівнів спостерігались у свердловинах, розташованих найближче до вул. Лаврська, де проходять міські магістралі водонесучих мереж. Багаторічна амплітуда коливань у режимних свердловинах ГСС 1 (розташована біля корпусу № 6) та ГСС 102 (біля башти Кушника, корпус № 88) сягнула близько 1,7 м.

На території Гостинного двору Нижньої лаври, де кількість свердловин обмежена, коливання РГВ зазвичай мають циклічний характер – найвищі рівні спостерігаються навесні щорічно, а найнижчі – восени. Річна амплітуда змінюється в діапазоні 0,4–1,5 м.

На схилах Лаврського яру ґрунтові води залягають на глибині від 0,9 до 3,2 м від денної поверхні (зафіксовані ГСС у саду Ближніх печер) з абсолютними позначками 147,8–161,2 м. Потужність водоносного горизонту – 1,0–5,0 м.

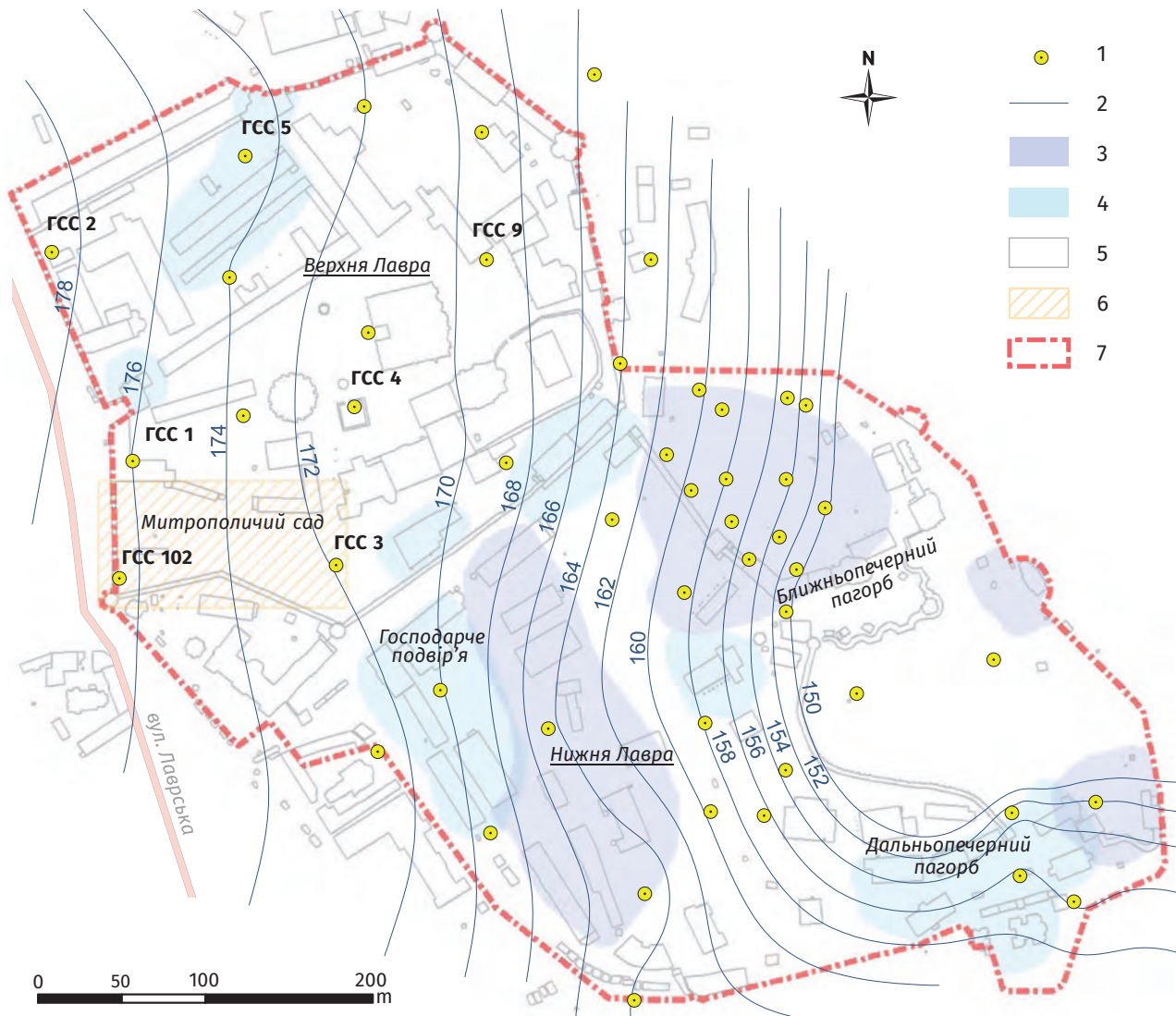


Рис. 4. Гідрогеологічні умови та система гідрогеологічного моніторингу Заповідника: 1 – гідрогеологічні спостережні свердловини; 2 – гідроізопізи (березень 2023 р.) перших від поверхні водонесних горизонтів; 3 – зони поширення процесів прихованого підтоплення (перезволоження внаслідок акумуляції й інфільтрації поверхневого стоку); 4 – зони тимчасового водонесного горизонту; 5 – будівлі та споруди, в тому числі історичного значення; 6 – територія досліджень; 7 – межі Заповідника

Fig. 4. Hydrogeological conditions and hydrogeological monitoring system of the Reserve: 1 – hydrogeological observation wells; 2 – hydroisohypses (March 2023) of the first aquifers from the surface; 3 – zones of distribution of hidden flooding processes (waterlogging due to the accumulation and infiltration of surface runoff); 4 – zones of temporary aquifer; 5 – buildings and structures, incl. historical significance; 6 – research area; 7 – boundaries of the Reserve

Амплітуда коливань становить 1,2–3,4 м. У верхній частині території водонесний горизонт має постійний характер, у нижній – тимчасовий, формується на поверхні глини під час сніготанення та довготривалого періоду опадів і тримається впродовж 6–8 місяців.

Нами проаналізовано режим ґрунтових вод з 1999 по 2024 р. У всіх свердловинах, розташованих на Верхній лаврі (рис. 5), спостерігаються слабо виражені циклічні річні коливання (підйом рівнів навесні та восени, спад влітку та взимку), зумовлені природними чинниками – сніготаненням та довготривалими дощами, та підйом РГВ через аварійні витoki на водонесучих мережах.

Чітко простежуються підвищені рівні у ГСС 1, 2, 102 через техногенне живлення внаслідок витоків з магістральних мереж, які відбуваються по 4–6 разів на рік, вздовж вул. Лаврська. РГВ у свердловинах, розташованих вздовж меж Верхньої лаври, є підвищеними у порівнянні з іншими, що відповідає техногенному типу режиму, на відміну від режиму РГВ у ГСС 4, 9, який має незначну амплітуду коливань, характерну для інфільтраційного типу. Слід відмітити, що витoki можуть бути незначні і постійні, через що не помітними на графіках, а всі піки у них пов'язані з витокami різної інтенсивності.

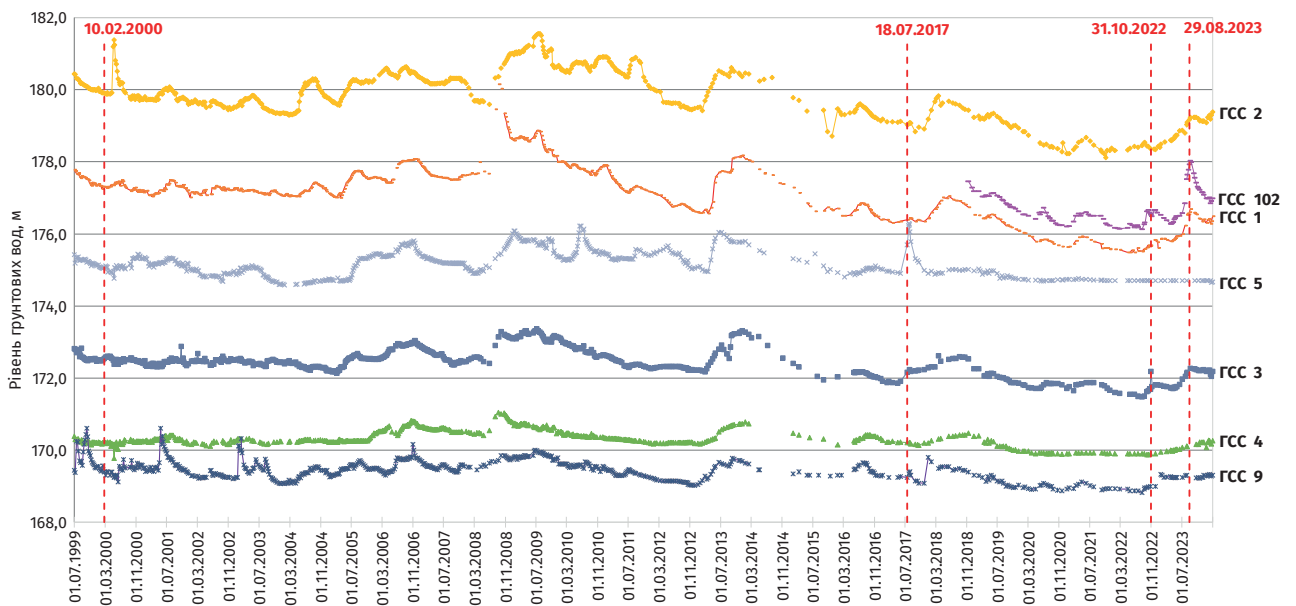


Рис. 5. Режим ґрунтових вод четвертинного водоносного горизонту за даними гідрогеологічних спостережних свердловин Верхньої лаври у період 1999–2024 рр., червоні пунктирні лінії – дати деяких масштабних аварій

Fig. 5. Groundwater regime of the Quaternary aquifer according to the data of the Verkhniy Lavra hydrogeological observation wells in the period 1999–2024, red dashed lines – dates of accidents

Різкі підйоми РГВ спричинені аваріями на водонесучих мережах. Так, наприкінці липня 2017 р. на підставі аналізу отриманих замірів за побудованими графіками виявлено значне підвищення РГВ у ГСС 5, 6, 9 та 13 (див. рис. 1, 3). Загалом, водонесучі мережі у безпосередній близькості до території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» перебувають у критичному технічному стані. Особливо загрозливою є ситуація, що склалася на розі вулиць Цитадельна та Лаврська. Декілька аварій, що сталися впродовж червня–серпня 2023 р. як на водогоні (несвоєчасно виявлені), так і на тепломережах (у зв'язку із сезонними випробуваннями), призвели до суттєвого підйому РГВ (зростання більш ніж на 0,7–1,7 м у ГСС 1, 2, 102) на ділянках території Заповідника, прилеглих до вул. Лаврська, вздовж якої прокладені міські магістральні водонесучі мережі.

Метод ЕТ

Територія саду характеризується моноклінальним заляганням шарів ґрунту (рис. 6). Перепад абсолютних відміток поверхні становить 1,4 м на відстані 123,5 м між ГСС 3 та 102. Для побудови геоелектричних розрізів використано дані інверсії методу ЕТ, електричного профілювання та інженерно-геологічні розрізи свердловин ГСС 3 та 102 на ділянці (Архипенко, Коняшин, 2018). Вони відображають всі зазначені вище структурні

та специфічні особливості, які встановлені за результатами електророзвідувальних робіт та представлені на рис. 7. За позірним електричним опором породи, що складають ґрунтовий масив території Митрополичого саду, поділяються на такі елементи (зверху вниз):

- насипний ґрунт, представлений супіском лесоподібним з незначними включеннями будівельного сміття – 50–150 Ом·м;
- супісок пилуватий лесоподібний, твердий до пластичного – 25–85 Ом·м;
- суглинок пилуватий з прожилками карбонатів, озалізнений – 13–28 Ом·м;
- суглинки пилуваті м'якопластичі, суглинки з прошарками супіску та піску – 10–19 Ом·м;
- глини легкі з включеннями карбонатів – 8–14 Ом·м.

На рис. 8 представлено 3D модель геоелектричних опорів масиву ґрунту Митрополичого саду за даними трьох геоелектричних розрізів. Встановлено існування купола порід низького опору (синій колір – обсяг перезволожений ґрунтів первісного розтікання у формі купола – далі «купол розтікання»), який спостерігається в південній та центральній частинах ділянки. Найбільш чітко купол простежується на профілі I в районі пікетів (ПК) 35–65, на профілі II – ПК 30–80 та на профілі III, менш контрастно, в межах ПК 35–75. На профілях II і III він виділяється широкою смугою ізоом понижених

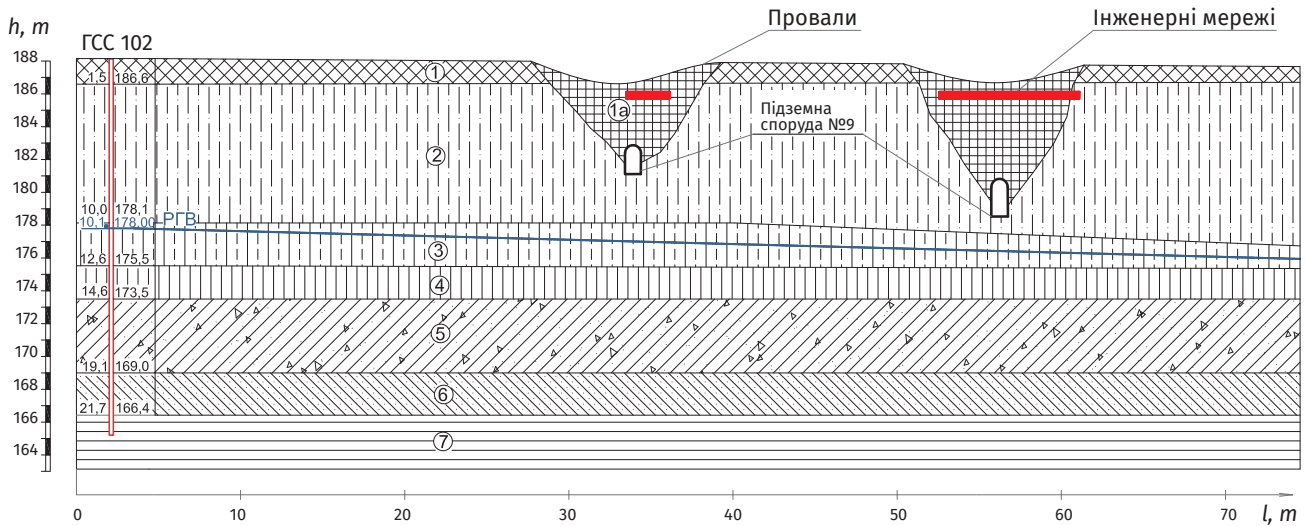


Рис. 6. Схематичний інженерно-геологічний розріз території Митрополичого саду за лінією І-І (див. рис. 1): 1 – техногенні відклади (tH) – суглинок легкий / важкий пилуватий, піщанистий темно-сірий, темно-бурий, коричнево-бурий, місцями гумусований, з включеннями до 10–50 % будівельного сміття, напівтвердий, м'якопластичний; 1a – ґрунти, що просіли через перезволоження витоками з інженерних мереж; 2 – елювіальні, еолово-делювіальні відклади (e, dvP_{III}-H) – супісок пилуватий, лесовий, палево-сірий, сіро-жовтий, твердий до пластичного; 3 – елювіальні, еолово-делювіальні відклади (e, dvP_{III}-H) – суглинок пилуватий, жовтувато-сірий, з нитевидними прожилками карбонатів, озалізнений, м'якопластичний; 4 – елювіальні, еолово-делювіальні відклади (e, dvP_{III}-H) – суглинок пилуватий, бурувато-сірий, м'якопластичний; 5 – моренні відклади (gP_{II}, dn) – суглинок червоно-бурий, з тонкими прошарками супіску та піску бурого-сірого, тугопластичний; 6 – моренні відклади (gP_{II}, dn) – суглинок світлий бурувато-сірий, з прошарками супіску та піску, м'якопластичний, тугопластичний; 7 – пліоцен-нижньочетвертинні бурі глини (N₂čb) – глина легка бурувато-сіра, тугопластична, напівтверда, з включеннями карбонатів; число праворуч від свердловини (лінії червоного кольору) – глибина залягання підшови шару, м; число ліворуч – абсолютні позначки залягання підшови шару, м; РГВ станом на 22.09.2023 р.

Fig. 6. Schematic engineering-geological section of the territory of the Metropolitan Garden along line I-I (see Fig. 1): 1 – technogenic deposits (tH) – light / heavy silty loam, sandy dark gray, dark brown, brownish brown, in places humified, with inclusions of up to 10–50% construction waste, semi-solid, soft-plastic; 1a – soils subsided due to over-moistening by leaks from utility networks; 2 – eluvial, eolian-deluvial deposits (e, dvP_{III}-H) – silty sandy loam, loess, pale gray, gray-yellow, hard to plastic; 3 – eluvial, eolian-deluvial deposits (e, dvP_{III}-H) – silty loam, yellowish-gray, with filiform veinlets of carbonates, ferruginous, soft-plastic; 4 – eluvial, eolian-deluvial deposits (e, dvP_{III}-H) – silty loam, brownish-gray, soft-plastic; 5 – moraine deposits (gP_{II}, dn) – reddish-brown loam, with thin interlayers of sandy loam and brownish-gray sand, refractory; 6 – moraine deposits (gP_{II}, dn) – light brownish-gray loam, with interlayers of sandy loam and sand, soft-plastic, refractory; 7 – Pliocene-lower quaternary brown clays (N₂čb) – light brownish-gray clay, refractory, semi-hard, with carbonate inclusions; number to the right of the borehole (red lines) – depth of the layer base, m; number to the left – absolute marks of the layer base, m; GWL as of September 22, 2023

значень позірного опору ρ (8–12 Ом·м), відносна вертикальна амплітуда зменшується в північному напрямку від 4–5 м на профілі І до 2 м на профілі ІІІ.

РГВ у межах профілю І за результатами інтерпретації даних методу ЕТ (див. рис. 8) коливається від 12–12,5 м на заході до 11–12 м в його східній частині. Найімовірніше, ґрунтові води розтікаються по обидві сторони від купола. У верхній частині розрізу профілю ІІ виділяються ділянки аномально підвищеного опору, приурочені до ПК 20–25 та ПК 82,5, максимуми яких перевищують 900 Ом·м, що, вірогідно, пояснюється утвореннями зон розущільнень, спричинених антропогенними факторами (археологічні розкопки, ремонтні роботи).

На ПК 90–95 профілю ІІ зафіксовано істотний мінімум позірного опору (8–10 Ом·м), що вказує

на вірогідну наявність зони суттєвого перезволоження ґрунтової товщі (див. рис. 8). Ця аномалія в плані збігається з наявністю в цьому місці мережі водогону. РГВ уздовж профілю за результатами інтерпретації даних ЕТ змінюється від 12 до 12,5 м на заході та від 11,0–11,5 до 12,0–12,5 м на сході.

На ПК 78–85 профілю ІІ, як і в попередньому випадку, є округла зона із діапазоном значень позірного опору 177–377 Ом·м, що відповідає тепломережі (понад 60 °С), де висока температура сприяє зниженню вологості ґрунтів навколо мережі.

Найбільш стабільним у плані розподілу електричних властивостей є профіль ІІІ, який розміщений на півночі ділянки Митрополичого саду. Розріз його є низькоомним, в основі якого залягають глини з позірним опором 9–12 Ом·м. Перший шар, який представлений

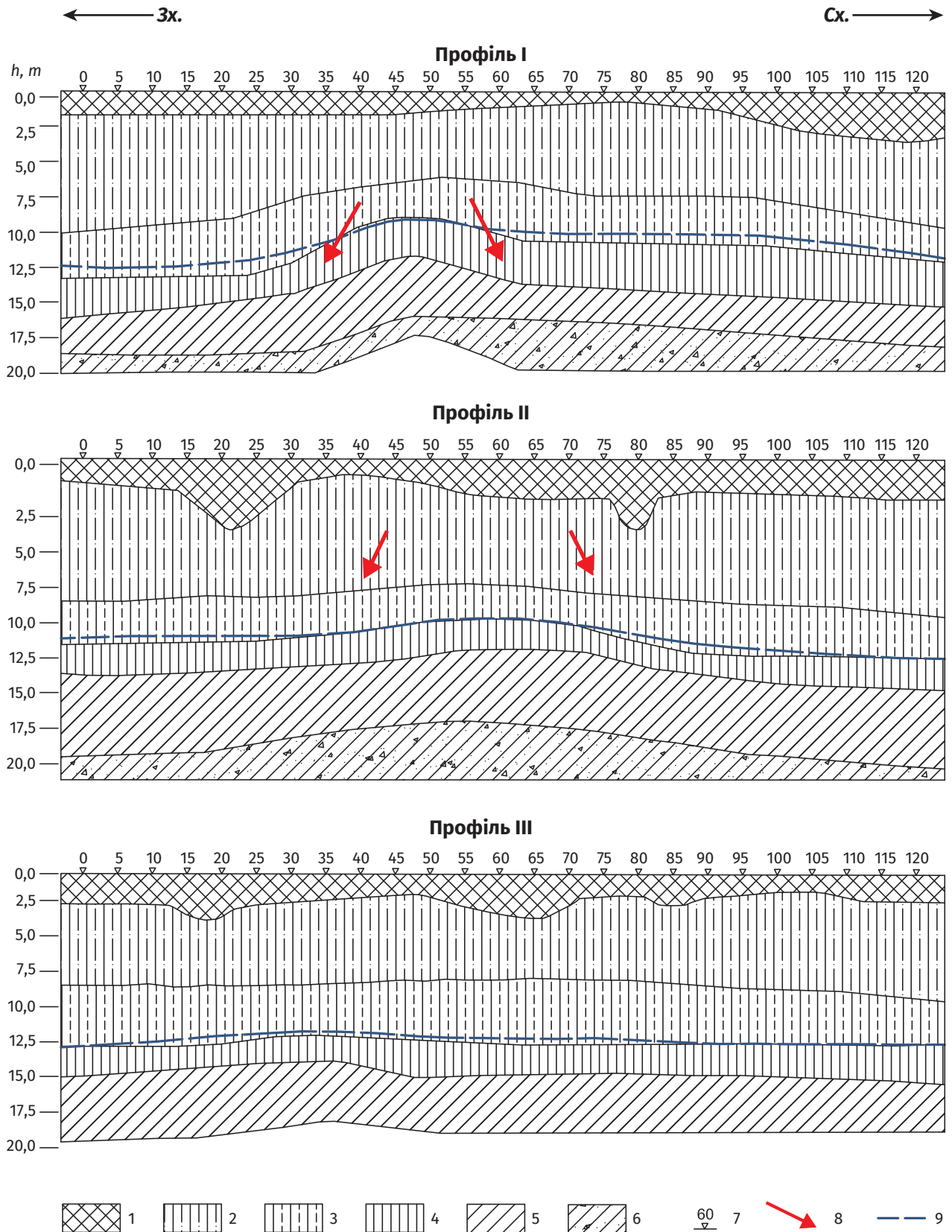


Рис. 7. Геоелектричні розрізи за трьома профілями (див. рис. 2), вертикальний масштаб 1:250, горизонтальний – 1:500: 1 – насипний ґрунт, 50–150 Ом·м; 2 – супісок лесовий твердий, напівтвердий, пластичний, 25–85 Ом·м; 3 – суглинок лесовий, м'якопластичний, 13–28 Ом·м; 4 – суглинок пілуватий, м'якопластичний, 13–28 Ом·м; 5 – суглинок, піскуватий, з тонкими прошарками супіску та піску, тугопластичний, 10–19 Ом·м; 6 – суглинок з вмістом окатишів кристалічних порід до 10 %, гніздами піриту, тугопластичний, 10–19 Ом·м; 7 – пікет (точка) фізичного спостереження; 8 – умовні межі «купола розтікання»; 9 – РГВ

Fig. 7. Geoelectric sections along three profiles (see Fig. 2), vertical scale 1:250, horizontal – 1:500: 1 – bulk soils, 50–150 Om·m; 2 – loess sand, hard, semi-hard, plastic, 25–85 Om·m; 3 – loess loam, soft-plastic, 13–28 Om·m; 4 – silty loam, soft plastic, 13–28 Om·m; 5 – loam, sandy, with thin layers of sandy loam and sand, hard-plastic, 10–19 Om·m; 6 – loam with a content of crystalline rock pellets up to 10%, nests of pyrite, highly plastic, 10–19 Om·m; 7 – picket (point) of physical observation; 8 – conditional limits of the spreading dome; 9 – groundwater level

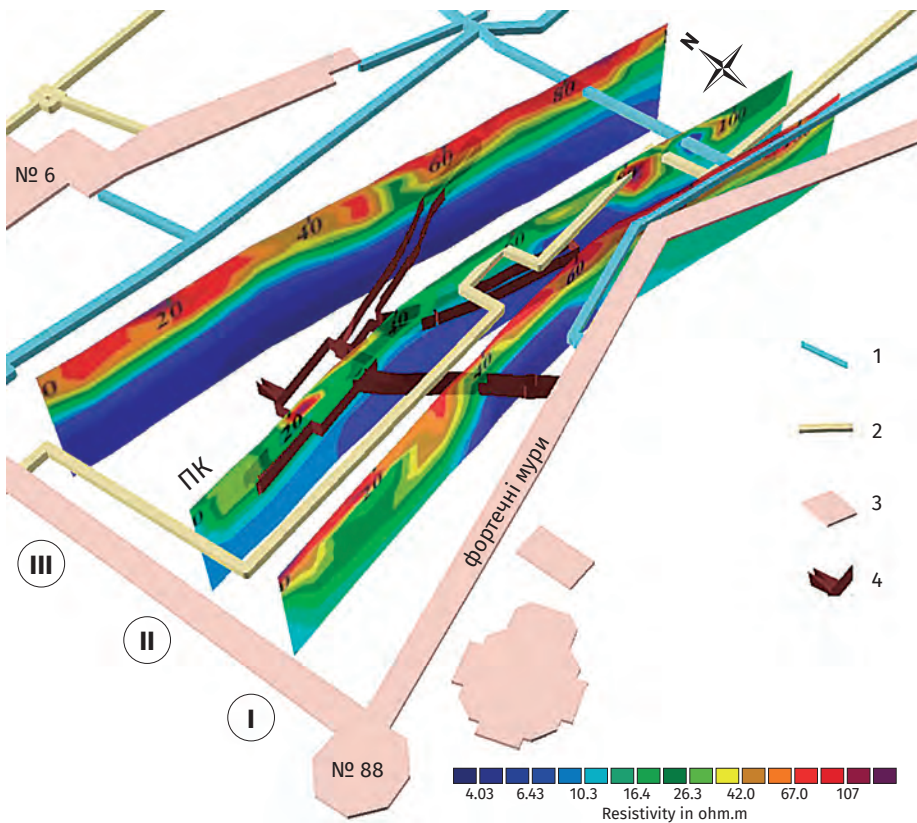


Рис. 8. 3D модель геоелектричних опорів (Ом·м) масиву ґрунту Митрополичого саду: 1 – мережі водогону холодної води; 2 – мережі водогону гарячої води; 3 – будівлі та споруди; 4 – підземна споруда

Fig. 8. 3D model of geoelectric resistance (Ohm·m) of the soil mass of the Metropolitan's Garden: 1 – cold water supply network; 2 – hot water supply networks; 3 – buildings and structures; 4 – underground structure

супісками лесоподібними з незначними включеннями будівельного сміття, має потужність до 3,5 м, що, вірогідно, пов'язане з активним господарським освоєнням території. Інші шари витримані за потужністю та позірним електричним опором. У межах ПК 50–55 зафіксовано аномалію високоомних опорів неправильної форми, розташовану на глибинах 3–8 м, що, ймовірно, є одним з відгалужень Митрополичого льоху. За результатами інтерпретації даних ЕТ поверхня РГВ змінюється вздовж профілю від 12 до 12,5 м.

Дослідженнями підтверджено наявність припливу техногенних вод (витоків) з магістральних інженерних мереж у західних частинах профілів I та II, а саме: понижені значення позірного опору від 6,43 до 10,3 Ом·м на ПК 0 видно, до глибин 2,5 м (профіль II) та 12,0 м (профіль I).

Обсяг перезволожених ґрунтів витримує форму купола впродовж року, що пов'язано із водно-фізичними та фільтраційними властивостями лесоподібних супісків (висока вологоємність, коефіцієнт фільтрації – 0,05–0,5 м/добу) та можливим продовженням існування його техногенного джерела живлення. Їх причинами можуть бути недосконалість проведених ремонтних робіт – як недостатнє ущільнення

ґрунту зворотної засипки, через що дощові або талі води швидко інфільтруються в масив, так і якість матеріалу труб, де могли з'явитись тріщини та відбувався наступний витік.

Метод ПЕП

За результатами польових спостережень методом ПЕП на ділянці Митрополичого саду побудована карта його потенціалів (рис. 9). Була проведена якісна та спрощена кількісна інтерпретація даних досліджень.

На підставі візуального аналізу та якісної інтерпретації встановлено:

- Ділянка Митрополичого саду є зоною розвитку досить помітних фільтраційних процесів, з від'ємними значеннями потенціалів ΔU майже по всій площі. Джерелами таких фільтраційних осередків є надмірний полив дерев (-25...-30 мВ), каналізаційна мережа на глибині 2 м неподалік корпусу № К-5 (менше -50 мВ), де швидкість руху ґрунтових вод буде вищою, або водогін поряд, «купол розтікання» аварійного витoku з магістральних інженерних мереж (-5...-15 мВ). Амплітуда зміни поля досягає 112 мВ, причому мінімальне значення поля становить -100 мВ, а максимальне сягає +12 мВ. Майже 90 % ділянки є зонами припливу води, що підтверджено гідрогеологічними спостереженнями за РГВ (див. рис. 5).

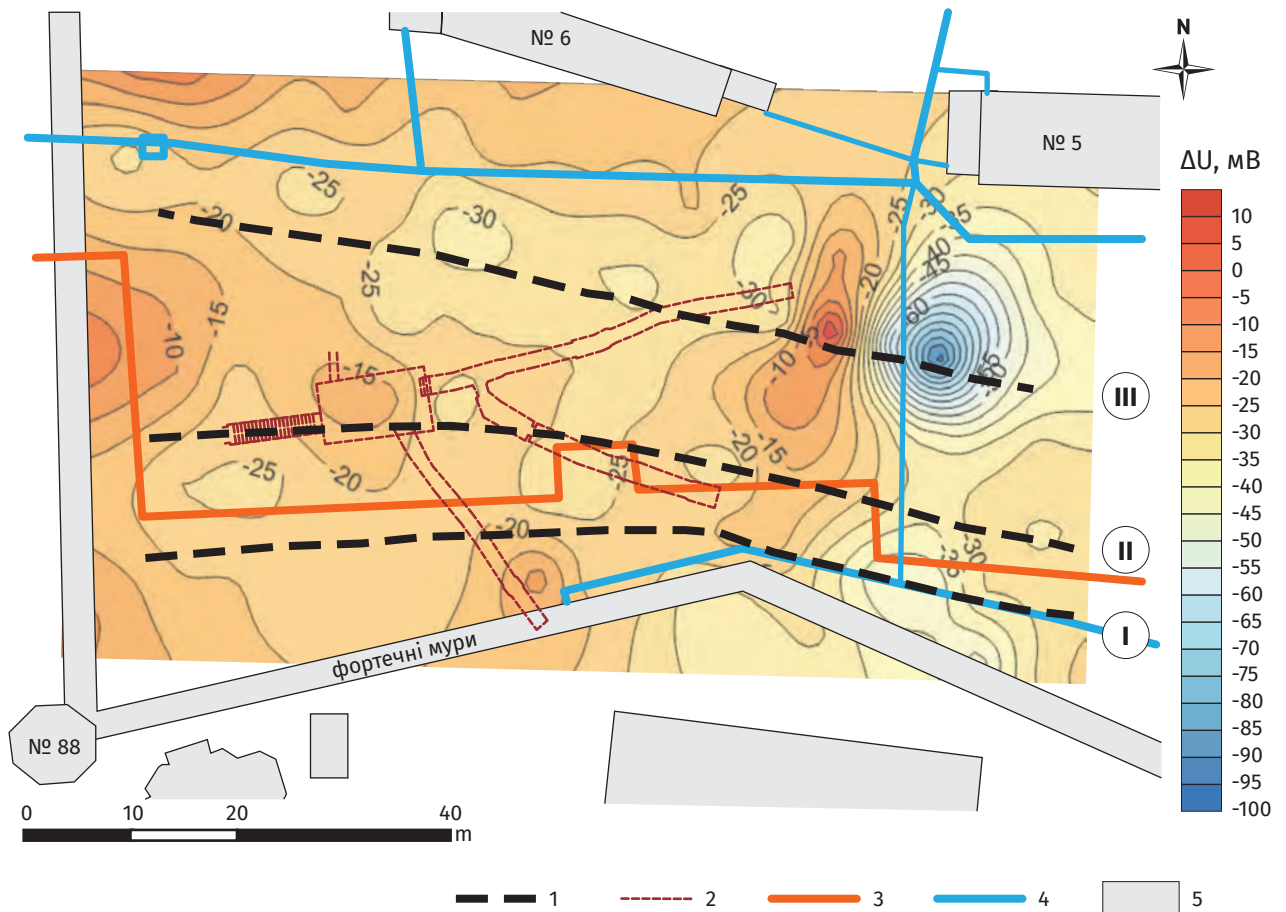


Рис. 9. Карта потенціалів для території Митрополичого саду: 1 – геоелектричні профілі (див. рис. 3, 5); 2 – контури підземної споруди; 3 – водогін гарячої води; 4 – водогін холодної води; 5 – будівлі

Fig. 9. Map of electrical potentials for the territory of the Metropolitan Garden: 1 – geoelectric profiles (see Fig. 3, 5); 2 – contours of the underground structure; 3 – hot water supply; 4 – cold water supply; 5 – buildings

- Зони помірної фільтрації (припливу води), що займають близько половини площі обстеженої ділянки, характеризуються потенціалами ΔU природного поля від -25 до -40 мВ. Аномальні зони мають різний напрямок (західний, південний, східний), серед яких найбільшими градієнтами поля представлені південний і східний. Це збігається із загальним напрямком ухилу денної поверхні та загальним напрямком ухилу дзеркала ґрунтових вод за даними багаторічних гідрогеологічних спостережень.
- Характер розвитку аномалій природного поля (зокрема, площа форми кола з величинами ΔU -60...-100 мВ) дає можливість стверджувати, що вони пов'язані з техногенними чинниками – витокami з мереж. Додатковими чинниками могли бути наслідки археологічних розкопок (зворотна засипка шурфів без доущільнення), земляні роботи з ліквідації аварії, полив саду тощо.
- Кількісна інтерпретація, яка здійснювалася за параметром q (відстань між напівмаксимумами аномалій) показала, що зміна глибини залягання РГВ у межах ділянки Митрополичого саду змінюється від 8,5 до 11 м, що дещо не узгоджується з даними багаторічних гідрогеологічних режимних спостережень, де максимальні рівні фіксуються на глибині 10,5 м. Вірогідно, значення, отримані методом ПЕП, відображають не дійсний рівень залягання дзеркала ґрунтових вод, а можливу межу зони капілярного підйому. Для лесових ґрунтів величина капілярного підняття може сягати 3,5–4,0 м (Ковалевский, 1975; Тугаєнко та ін., 2014; Li Ping et al., 2014).

Обґрунтування інженерного захисту споруд у межах Монастирського саду

Ґрунтовою основою пам'яток Верхньої лаври є лесоподібні супіски та суглинки, для яких характерний значний вміст пилуватих частинок (42–83%), значна пористість (0,3–0,48), наявність цементуючих включень карбонатів кальцію.

Лесоподібні супіски відносяться до 1-го типу за просіданням. У сухому стані вони мають високі значення кута внутрішнього тертя ($20-29^\circ$), зчеплення ($0,002-0,039$ МПа) та модуля деформації ($5-20$ МПа). Після водонасичення вони значно знижуються: $12-15^\circ$, $0,0024-0,0029$ МПа, $3-17$ МПа, відповідно (Рибін та ін., 2001; Архипенко О., Архипенко А., 2017).

Значно ускладнює гідрогеологічні та інженерно-геологічні умови території Верхньої лаври наявність підземних порожнин різного віку і призначення. Підземні ходи, порожнини, галереї, що знаходяться недалеко від будівель та безпосередньо під фундаментами на глибині $3-3,5$ м, створюють розущільнення ґрунтової товщі, не характерне для однорідного ґрунтового масиву. Це призводить до суфозійного виносу тонкодисперсних частинок та зумовлює виникнення ослаблених зон, деформацію споруд, розміщених над печерами. Крім того, основна частина насипних ґрунтів, які заповнюють підземні пустоти, характеризується вищою водопровідністю, ніж лесова товща, що у випадках тимчасових втрат із водогонів сприяє перезволоженню лесових ґрунтів на значній площі.

Рівні першого від поверхні ґрунтового водоносного горизонту залягають переважно на $0,5-4,0$ м нижче підшви лесових просідних (1-й тип) відкладів. За геотехнічними розрахунками (Рибін та ін., 2001), в разі підйому ґрунтових вод і подальшого обводнення хоча б одно-двохметрового шару лесоподібних супісків відбудеться їх просідання і нерівномірне осідання будівель, що призведе до деформацій у конструкціях (Демчишин и др., 1991; Пасько та ін., 2020). Такі ж, а можливо ще більші, деформації стануться у разі суфозії обводнених лесоподібних супісків до розміщених по всій Верхній лаврі штольневих дренажів та підземних споруд.

При витоках з мереж водогону, зокрема гарячих вод (понад 60°C), відбуваються зміни фізичного стану пористих осадових порід, що проявляються у структурних змінах характеристик породоутворюючих мінералів унаслідок теплового розширення мінералів (Зуєвська, 2012, 2013; Самедов, 2013).

Процес просідання лесоподібних ґрунтів під власною вагою починається з моменту, коли вологість буде дорівнювати вологості просідання – $W_{пр}$ або максимальній вологоємності даного ґрунту. Але при замочуванні лесоподібних ґрунтів гарячою водою процес просідання

починається значно раніше і більш інтенсивніше, ніж холодною водою. Причина цього явища полягає в тому, що при замочуванні водою з підвищеною температурою значно швидше відбувається процес розчинення солей та породоутворюючих мінералів у скелеті лесових ґрунтів, пластичні деформації починаються раніше, ніж вологість буде дорівнювати максимальній молекулярній вологоємності ґрунту (Зуєвська, 2012, 2013).

Дослідженнями підтверджено наявність припливу техногенних вод (витоків) з мереж магистрального водогону, в тому числі гарячих, у західній частині всіх профілів як постійного джерела та чинника перезволоження масиву ґрунтових основ таких архітектурних пам'яток, як Монастирські мури (корпус № 92), башта Кущника (корпус № 88) та ін. Додаткове перезволоження (техногенне замочування) може призвести до пролонгованого ущільнення лесоподібних супісків та за гіршим сценарієм – масштабності аварії або несвоєчасного припинення витоків формування мульди просідання з креном оточуючих споруд, зокрема фортечних мурів у бік саду.

На рис. 10 наведені умови формування просідань над мережею водогону гарячого водопостачання (як найгірший сценарій) та розташованими поряд пам'ятками архітектури. Коричневим кольором показано мульду просідання (1-й тип), причинами якої можуть стати недостатнє ущільнення ґрунтів зворотної засипки при закладанні водогону або після ремонтних робіт. Синій колір – контури очікуваної мульди просідання (2-й тип) при витоках з мереж. Її формування пов'язано із зміною вологості та структурними змінами через замочування та подальше перезволоження водою з температурою понад 60°C товщі лесоподібних супісків, наступним ущільненням товщі під захисним кожухом водогону та просіданням залягаючої вище товщі на величину Sw . Критичний радіус (R_k) впливу мульди просідання 1-го типу визначається за формулою (Будівлі..., 2017):

$$R_k = L + B = L + H \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right),$$

де L – половина ширини коробу з трубами, м; H – глибина закладання водогону від поверхні, м; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, град.

Розрахунок критичного радіуса (R_{kw}) мульди просідання 2-го типу виконується за тією ж формулою зі змінами у зв'язку із замочуванням товщі ґрунту нижче коробу з трубами, а саме:

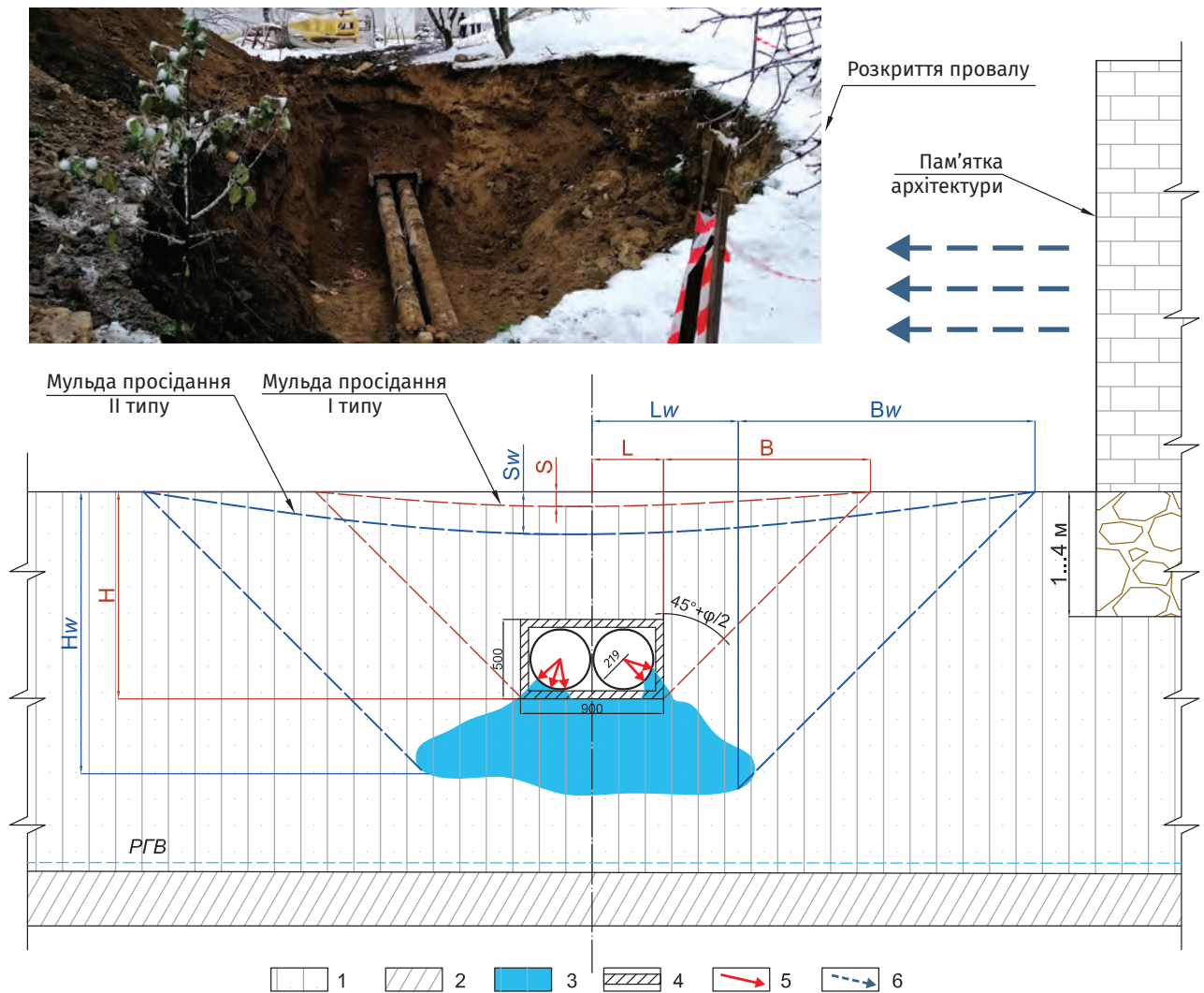


Рис. 10. Умови формування просідань над мережу водогону гарячого водопостачання: 1 – супіски лесоподібні 1-го типу просідання; 2 – суглинки; 3 – зони зволоження («купол розтікання»); 4 – захисний кожух водогону (короб); 5 – аварійні витoki; 6 – напрямок вірогідного крену будівлі; H – глибина закладання мереж водогону, м; H_w – глибина інфільтрації аварійних витоків, м; S – величина просідання, м; S_w – величина просідання через аварійні витoki, м; L – половина ширини коробу з трубами, м; L_w – ширина зони зволоження, м; B – ширина мульди, м; B_w – ширина мульди, утвореної при аварійних витокax, м; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, град; фото – розкриття провалу над мережу водогону, фото І.А. Черевко, 12 грудня 2022 р.

Fig. 10. Conditions for the formation of subsidence above the hot water supply network: 1 – sandy loess-like loess I subsidence type; 2 – loam; 3 – waterlogging zones (cupola); 4 – protective cover of the water heater (box); 5 – emergency leaks; 6 – direction of probable tilt of the building; H – the depth of laying water supply networks, m; H_w – infiltration depth of emergency leaks, m; S – subsidence, m; S_w – subsidence due to emergency leaks, m; L – half the width of the box with pipes, m; L_w – the width of the waterlogging zone, m; B – the width of the trough, m; B_w – the width of the trough formed during emergency leaks, m; φ – angle of internal friction of soil, degree; photo – opening of the failure above the water supply network, photo by I.A. Cherevko, December 12, 2022

ширина зони зволоження (L_w , м), глибина інфільтрації аварійних витоків (H_w , м), кут внутрішнього тертя зволоженого ґрунту, град.

При цьому ширину зони зволоження L_w доцільно визначати неруйнівними геофізичними методами.

За даними ЕТ та ПЕП для випадку даної аварії орієнтовні розміри купола такі: ширина – 20 м, глибина – 7,5 м. Розміри короба наведено на рис. 9. Таким чином, розраховані небезпечні радіуси впливу мульд просідання становлять $R_k = 2,4$ м та $R_{kw} = 15,7$ м у залежності від типу мульд,

що корелюється з результатами досліджень (Рибін та ін., 2001).

Збільшення величин L та B до L_w та B_w впливає на умови експлуатації архітектурних пам'яток і залежить від об'єму витоків, температури води, потужності зволоженого ґрунту та величини просідання. Для попередження вірогідного крену архітектурних пам'яток та їх попадання у радіус впливу мульди просідання до критичного радіуса необхідно додати величину, що запобігає його появі (Будівлі..., 2017; Основи..., 2009; Інженерний..., 2010; Планування..., 2019).

Ділянка № 1 Монастирських мурів вже знаходиться в межах розрахованої мульди просідання на відстані 8 м від осі мережі. Крім того, її фундаменти розкриті суфозійними процесами (див. рис. 2, в), що спричинило крен споруди в бік тепломережі (за візуальними обстеженнями). В таких випадках слід розглядати необхідність розроблення компенсуючих заходів щодо укріплення частини стіни контрфорсними елементами, розширення її фундаментів або заведення додаткових мікропаль (Дегтярев и др., 1985; Молодченко, 1993; Винников та ін., 2002; Guide..., 2010; Mohd et al., 2015; Настанова..., 2016; Bira, Koosha, 2020).

Досвід тривалого моніторингу розвитку небезпечних процесів на території Заповідника та результати представлених досліджень вказують на необхідність перенести мережі водогону на відстань, що унеможливіє вплив аварій на стан пам'яток, їх ушкодження та руйнування. Відповідно до будівельних норм (Планування..., 2019) для збереження фізичного стану нерухомих об'єктів культурної спадщини від них до мереж водопроводу, каналізації, газопостачання, теплопостачання відстань має бути не менше 15 м. Для окремих об'єктів Лаври такі вимоги не витримуються.

Обговорення

Геофізичні дослідження виконані через рік після аварії. Тому вважаємо, що первісна зона інфільтрації та розтікання, вірогідно, мала дещо менші розміри, оскільки у лесових ґрунтах фільтрація мала майже вертикальний напрям. Дане припущення доцільно встановлювати математичним моделюванням процесів фільтрації. Оскільки польові роботи методами ЕТ та ПЕП проводилися після спекотного літа 2023 р. та сухого вересня, можливо, інтенсивність виявлених аномалій могла би бути більшою.

Методи ЕТ та ПЕП показали узгодженість між «куполом розтікання» та аварійним витоком 27.10.2022 р. Так, на рис. 7 профіль I в західній його частині перетинає відгалуження Митрополичого льоху, на рис. 8 відповідає круглим ділянкам з потенціалом $-20...-10$ мВ, де також із західної сторони є відгалуження. Ці значення не такі низькі у порівнянні з аномалією в східній частині ($\Delta U < -50$ мВ), що може говорити про те, що через рік після аварійного перезволоження значення потенціалів цієї частини ґрунтів вирізняються. Зниження від'ємного значення потенціалів поля

навколо «купола розтікання» свідчить про наявність прямок – розтікання по боках купола.

Дослідженнями підтверджено наявність впливу техногенних вод (витоків) з магістральних інженерних мереж, у тому числі гарячих, у західній частині всіх профілів (ПК 0–10) за режимними гідрогеологічними спостереженнями (див. рис. 5). Дані, отримані методом ЕТ у західних частинах профілів I та II на ПК 0, свідчать про понижені значення позірною опору – $6,43-10,3$ Ом·м (див. рис. 7). Результати за методом ПЕП у західній частині саду вказують, що значення у $-5...-10$ мВ переходять в ізогіпси у $-20...-25$ мВ між профілями I та II (див. рис. 8). Виявлено ознаки «купола розтікання» аварійного витoku з магістральних інженерних мереж за методами ЕТ та ПЕП: на рис. 7 він фіксується на заході профілів, а на рис. 8 проявляється як півколо з ΔU від -5 до -15 мВ. Причому на момент геофізичної зйомки аварійний витік або щойно відбувся, або він тривав.

Дані методи ПЕП та результати робіт електричного профілювання досить добре корелюються з результатами робіт електричного профілювання та даними про техногенні впливи на цій ділянці, зокрема такі, як полив дерев, місця витоків з інженерних мереж, що дає підстави для проведення сезонних моніторингових вимірювань зазначеними методами в Митрополичому саду та на прилеглий території на її сході у напрямку р. Дніпро. При цьому доцільно виділяти ділянки з достатньою кількістю спостережних свердловин для підвищення точності інтерпретації даних. Припущення щодо інтерпретації за параметром q як рівнів капілярного підйому потребують додаткових комплексних досліджень.

Результати геофізичних вишукувань, обґрунтування та розрахунки безпечних відстаней від мереж водогону мають бути підтверджені гідрогеологічним моделюванням та геотехнічними розрахунками, що є завданням подальших досліджень. Рекомендовано використовувати дані з інженерно-геологічних вишукувань, термін дії яких відповідає вимогам норм (Інженерні..., 2008).

Висновки

Митрополичий сад знаходиться у складних інженерно-геологічних та гідрогеологічних умовах, обумовлених наявністю просідних лесоподібних супісків, техногенних витоків з мереж водогону. Детальний аналіз отриманих шляхом адаптації

результатів досліджень методами ЕТ і ПЕП, 3D моделі геоелектричного опору масиву ґрунту Митрополичого саду дозволив встановити просторове положення наявних ділянок перезволоження з урахуванням присутніх у межах ділянки комунікацій та інших штучних споруд.

На підставі аналізу існуючої ситуації, натурних обстежень території встановлено вірогідні шляхи розповсюдження потоку гарячої води у ґрунтовому масиві після аварії 27.10.2022 р., а саме: заповнення водою ізолюючого коробу тепломережі до корпусу № 31 (близько 200 м); накопичення її перед теплокамерою; переповнення коробу та його руйнування у двох місцях; перезволоження та перехід у текучий стан лесової товщі; порушення цілісності конструкцій підземної споруди через тиск розрідженого ґрунту; затоплення споруди пульпою; подальше перезволоження ґрунтового масиву та інфільтрація води на дзеркало ґрунтових вод (див. рис. 1).

Натурні обстеження неруйнівними методами не зафіксували пустот чи порожнин у відомих контурах Митрополичого льоху, що свідчить про повну руйнацію двох відгалужень підземної споруди № 9.

Методом ЕТ встановлено існування аномального купола (порід низького опору), що спостерігається в західній та центральній частинах ділянки, який, вірогідно, є «куполлом розтікання» (перезволоження ґрунтового масиву) в результаті аварії тепломережі.

Розміри зони перезволоження за результатами інтерпретації досліджень становлять: довжина – 25–70 м, ширина – 25–45 м, потужність – 1,5–13 м. Вони залежать від конфігурації підземної споруди (Митрополичий льох), по затоплених, заглиблених до 5–8 м відгалуженнях якої відбувалась подальша інфільтрація води в глиб ґрунтового масиву.

Аналіз адаптованої 3D моделі за результатами неруйнівних методів моніторингу стану геологічного середовища дозволив опосередковано встановити місця незадовільного технічного стану інженерних мереж (постачання холодної води), де зафіксовано перезволожену ділянку з орієнтовними розрізами 5 × 5 м (див. рис. 5, профіль II, ПК 90–95). На профілі II, ПК 75–85 проявляються зони розущільнення з високим позірним опором навколо компенсатора мережі тепlopостачання, що є результатом зворотної засипки котловану піском, розробленого з метою ліквідації аварії на тепломережі.

Встановлено, що основними техногенними чинниками зміни вологісного режиму є витoki з мереж, археологічні розкопки, земляні роботи з ліквідації аварій, полив саду.

Покращення умов експлуатації історичних пам'яток можна досягти поліпшенням гідрогеологічної ситуації шляхом мінімізації витоків із мереж водогону і каналізації. Це потребує оновлення зношених мереж за участю відповідних міських служб. Крім того, доцільно удосконалити систему існуючого гідрогеологічного моніторингу додатковими ГСС у місцях високої щільності інженерних мереж.

За результатами досліджень обґрунтовано потребу компенсуючих заходів щодо укріплення частини фортечних мурів та безпечну відстань для перенесення мереж від історичних об'єктів з метою їх збереження.

Фінансування. Представлені дослідження виконані за підтримки Національного фонду досліджень України при фінансуванні з державного бюджету за проектом 2022.01/0209 «Комплексне дослідження геоекологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій» (Конкурс НФДУ «Наука для відбудови України в воєнний та повоєнний періоди»).

Подяки. Автори вдячні Національному заповіднику «Києво-Печерська лавра» за надані матеріали та дирекції Інституту геологічних наук НАН України – за всебічну підтримку. Анонімним рецензентам – за слушні та змістовні зауваження і поради, що допомогли ширше розкрити зміст статті та наповнити її необхідними деталями.

Внесок авторів. І.А. Черевко – концептуалізація мети та завдань дослідження, збір інженерно-геологічних даних та матеріалів. Д.А. Безродний – проведення польових досліджень, математична обробка даних натурних спостережень. І.А. Черевко і Т.В. Кріль – постановка завдань та інтерпретація результатів, вироблення висновків. Т.В. Кріль – інтерпретація та візуалізація даних, графічні побудови, оформлення рукопису. Т.В. Кріль, І.А. Черевко – опрацювання зауважень рецензентів, редагування та доповнення рукопису.

Аварії на мережах водогону завдають найбільших негативних наслідків на стан історико-архітектурної спадщини, що формувалась впродовж багатьох віків. У роботі виконано аналіз причинно-наслідкового зв'язку аварій водонесучих мереж та умов збереження архітектурної спадщини на прикладі Києво-Печерської лаври. Наведено результати визначення зон перезволоження та їх чинників неруйнівними методами моніторингу на території Митрополичого саду Верхньої лаври. Дана ділянка є поєднанням складних інженерно-геологічних умов та техногенного освоєння, що створює умови для розвитку небезпечних інженерно-геологічних процесів та аварійних ситуацій. За небезпекою територія саду відноситься до нестабільних ділянок для збереження історичних пам'яток всесвітньої спадщини ЮНЕСКО. Останній аварійний випадок на мережах водогону відбувся у жовтні 2022 р. Він спричинив провали на поверхні, підняття рівнів ґрунтових вод, значне руйнування підземної споруди історичного значення – Митрополичого льоху. Дослідження виконано із використанням методів електротомографії, природного електричного поля. Інтерпретацію результатів електротомографії проведено за дво- та тривимірними моделями. Встановлено існування аномального купола (поряд низького опору), який спостерігається в центральній частині ділянки і є, вірогідно, осередком перезволоження ґрунтового масиву в результаті аварії на тепломережі. Аналіз адаптованої 3D моделі за результатами неруйнівних методів моніторингу геологічного середовища дозволив опосередковано встановити місця незадовільного технічного стану інженерних мереж (постачання холодної води), де зафіксовано перезволожену ділянку з низькими значеннями позірної опору. Дослідженнями підтверджено наявність припливу техногенних вод (витоків) з мереж магістрального водогону в західній частині всіх профілів як постійного джерела та чинника перезволоження масиву ґрунтових основ архітектурних пам'яток – Монастирські мури, башта Кушника тощо. За результатами досліджень обґрунтовано потребу компенсуючих заходів щодо укріплення частини фортечних мурів, безпечну відстань для перенесення мереж від історичних об'єктів з метою їх збереження.

Список літератури

- Архипенко О.А., Архипенко А.О. Пам'ятка архітектури національного значення «Церква Спаса на Берестові». Т. 2. Комплексні наукові дослідження. Кн. 2.7. Технічний звіт про проведення інженерно-геологічних вишукувань на майданчику реставрації. Київ, 2017. 76 с.
- Архипенко О.А., Коняшин В.В. Роботи по облаштуванню спостережної мережі гідрогеологічних свердловин на території Національного Києво-Печерського історико-культурного заповідника. Технічний звіт (ТЗ) за договором № 154/2-ІГ-ТЗ від 03.09.2018 р. Київ: ТОВ «КБ ПРАЙД», 2018. 71 с.
- Бондар К.М. Геофізичні методи в археології: теорія, методологія, практика: автореф. дис. ... д-ра геол. наук : 04.00.22 / Бондар Ксенія Михайлівна ; Київ: нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ, 2021. 46 с.
- Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення: ДБН В.1.1-45:2017. [Чинний від 2017-10-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 35 с. (Державні будівельні норми України).
- Вижва С.А., Рева М.В., Онищук І.І., Онищук В.І. Електрометрія: посібник із навч. геофіз. практики. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2014. 303 с.
- Винников Ю.Л., Муха В.А., Яковлев А.В., Андрієвська О.В., Біда С.В. Фундаменти будівель та споруд. Довідн. посібник. Київ: Урожай, 2002, 432 с.
- Власенко А.И. Отчет об инженерно-геологических исследованиях площадки главной колокольни музея Киево-Печерской Лавры: Отчет о НИР. Гос. ин-т Киевпроект; инв. № 2881. Киев, 1962. 23 с.
- Демчишин М.Г., Краев В.Ф., Саенко Т.С., Сергеева Л.Г. Лесовый покров территории Украины в сфере техногенеза. Киев, 1991. 55 с. (Препр. / АН Украины. Ин-т геол. наук; 91 - 9).
- Демчишин М.Г., Рибін В.Ф. Інженерно-геологічні дослідження на території Києво-Печерського державного заповідника для проекту відтворення Успенського собору та інженерного захисту території Верхньої Лаври: Звіт про НДР / Ін-т геол. наук НАН України. Київ, 1998. 89 с.
- Дегтярев Б.М., Дзекцер Е.С., Муфтахов А.Ж. Защита оснований зданий и сооружений от воздействия подземных вод. М.: Стройиздат, 1985. 264 с.
- Геологическая карта Украинской ССР масштаба 1:50 000. Киевский промышленный район. Объяснительная записка в 2 ч. Колот Э.И., Кузишина Л.П., Кутовой В.И., Лаврик В.Ф., Мароховская И.И., Селин Ю.И., Соловицкий В.Н., Шестопалова Е.В. Киев, 1984. 142 с.
- Звіряка А.М., Бобровський Т.А., Балакін С.А., Головатенко Ю.Г. Льох винний у саду Митрополита (Підземна споруда № 9). Паспорт об'єкта культурної спадщини. НДІ пам'яткоохоронних досліджень. Київ, 2012. 46 с. та додатки (історичні плани та зображення, карти, розрізи, фотофіксація).
- Зуєвська Н.В. Аварійні явища на міських об'єктах в умовах лесових просадних ґрунтів в присутності температурного чинника. *Вісн. Дон. гірн. ін-ту*. 2013. № 1 (32). С. 11–115.
- Зуєвська Н.В. Інтенсифікація процесу просідання лесових ґрунтів з урахуванням гідротермального фактора. *Вісн. Дон. гірн. ін-ту*. 2012. № 1 (30)–2 (31). С. 469–474.
- Інженерні вишукування для будівництва: ДБН А.2.1-1-2008. [Чинний від 2008-07-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 74 с. (Державні будівельні норми України).
- Інженерний захист території Заповідника. Сучасний стан. М 1:1000. План організації території Національного Києво-Печерського історико-культурного заповідника. Розроб. Соковніна Н.Х., Вдовиченко С.В., Пашолок С.П. 1 аркуш, інв. ном. 2012-49-ГП. Київ: Державне підприємство «НДП містобудування», 2012.
- Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення : ДБН В.1.1-25-2009. [Чинний від 2011-01-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 52 с. (Державні будівельні норми України).
- Ковалевский А.Л. Особенности формирования рудных биогеохимических ореолов. Новосибирск: Наука, 1975. 115 с.
- Комплексне дослідження геоекологічного стану збережених об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій. Бугай Д.О. Науковий звіт. Київ, 2023. 125 с.
- Мацола О.І., Корбутяк О.М., Лопата О.В. Звіт про надання послуг з геологічного, геофізичного та інших видів наукової розвідки «Спеціальні інженерно-геофізичні вишукування на території національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в межах зон обводнення, підземних пустот та розвитку провальних процесів методом вертикального електричного зондування та природного електричного поля, площа – 0,6 га». Київ, 2023. 33 с.
- Молодченко Г.А., Гринь В.И. Реконструкция и усиление здания и сооружений. Киев: ИСИО, 1993, 173 с.
- Настанова щодо виконання ремонтно-реставраційних робіт на пам'ятках архітектури та містобудування : ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 [Чинний від 2017-01-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. 50 с. (Державний стандарт України).
- Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:1016. [чинний від 2017-04-01]. Київ, 2017. 44 с.
- Николишин В.П. Отчет о результатах обобщения материалов инженерно-геологических изысканий прошлых лет на территории Киево-Печерского государственного заповедника «Лавра» : Отчет о НИР. Гос. ин-т Киевпроект; инв. № 7833. Киев, 1983. 12 с.
- Николишин В.П. Отчет о результатах обобщения материалов инженерно-геологических изысканий прошлых лет по Верхней Лавре: Отчет о НИР. Гос. ин-т Киевпроект; инв. № 8739. Киев, 1987. 13 с.

- Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. Москва: Недра, 1990. 501 с.
- Основи та фундаменти споруд : ДБН В.2.1-10-2009 [Чинний від 2009-10-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 161 с. (Державні будівельні норми України).
- План сучасного стану території Заповідника. М 1:500. План організації території Національного Києво-Печерського історико-культурного заповідника. Розроб. Сюр М.Г., Онищенко В.М., Соковніна Н.Х. 1 аркуш, інв. ном. 2012-49-ГП. Київ: Державне підприємство «НДПІ містобудування», 2012.
- Пасько Р.М., Теренчук С.А., Агхеззаф Амін. Аналіз причин погіршення технічного стану об'єктів, побудованих на просідаючих лесових ґрунтах. *Управління розвитком складних систем*. 2020. № 43. С. 116–122. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.116-122>
- Планування та забудова територій : ДБН Б.2.2-12-20019. [Чинний від 2019-10-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2019. 185 с. (Державні будівельні норми України).
- Рибін В.Ф., Демчишин М.Г., Черевко І.А., Куциба В.О., Чорний Г.І., Канарьова О.С., Сахно А.П. Розробити методуку та обґрунтувати моніторинг геологічного середовища зон історичної забудови м. Києва з метою охорони історико-архітектурних пам'яток. Звіт про НДР. № держреєстр. 15-2001. Київ: ІГН НАН України, 2001. 197 с.
- Самедов А.М. Расчет и проектирование геотехнических инженерных сооружений. Киев: НТУУ «КПИ», 2013. 908 с.
- Туғаєнко Ю.Ф., Марченко М.В., Логинова Л.А. Вплив вологості лесових ґрунтів на процеси їх ущільнення ударним навантаженням. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2014. Т. 2. С. 47–52. URL: <http://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/357>
- Череди́нченко Є.Ф. Архітектура та функціональне призначення підземних споруд Верхньої Лаври. Могилянські читання. 2006. С. 550–556.
- Шестопалов В.М. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины: Водообмен в нарушенных условиях. Шестопалов В.М. (ред.). Киев: Наукова думка, 1991. 528 с.
- ABEM Terrameter LS Toolbox User Manual. Sundbyberg, Sweden, 47 p. URL: <https://www.guidelinegeoc.cdn.triggerfish.cloud/uploads/2016/03/ABEM-Terrameter-LS-Toolbox-v2.0.1-User-Manual-1.pdf> (accessed 28 September 2023).
- Balasco M., Lapenna V., Rizzo E., Telesca L. Deep Electrical Resistivity Tomography for Geophysical Investigations: The State of the Art and Future Directions. *Geosciences*. 2022. Vol.12, No. 12. P. 438. <https://doi.org/10.3390/geosciences12120438>
- Bira Wafaei Baneh, Koosha Wafaei Baneh. Review of the Methods for Strengthening and Retrofitting Cultural Heritage Structures. *Journal of Science and Engineering*. 2020. Vol. 4, No. 6. P. 45–56. DOI: 10.25079/ukhjs.v4n1y2020.pp45-56
- Blome M., Maurer H. and Schmidt K., Advances in three-dimensional geoelectric forward solver techniques. *Geophys. J. Int.* 2009. Vol. 176. P. 740–752. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.04006.x>
- Burkart Ullrich, Thomas Günther, Carsten Rücker. Electrical resistivity tomography methods for archaeological prospection. *Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*, Berlin, April 2–6, 2007. URL: https://archiv.ub.uni-heidelberg.de/propylaeumdok/488/1/02_05_ullrich_et_al_resistivity.pdf
- Coscia I., Greenhalgh S., Linde N., Doetsch J., Marescot L., Günther T., Vogt T. and Green A. 3D crosshole ERT for aquifer characterization and monitoring of infiltrating river water. *Geophysics*. 2011. Vol. 76, No. 2. G49–G59. <https://doi.org/10.1190/1.3553003>
- Demchyshyn M.G., Kril T.V. Improvement of the Engineering Protection Systems of the Kyiv-Pechersk Lavra Reserve Territory. *Nauka i innovacii*. 2019. Vol. 15, No. 3. P. 37–51. <https://doi.org/10.15407/scin15.03.037>
- Guide for the Structural Rehabilitation of Heritage Buildings. Pompeu Santos, S. (coord). CIB W023 Commission. June, 2010, 53 p. URL: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB18446.pdf>
- Hassan Saghi, Abbas Ansariaval. Effective Factors in Causing Leakage in Water Supply Systems and Urban Water Distribution Networks. *American Journal of Civil Engineering*. 2015. Vol. 3, No. 2-2. P. 60–63. DOI: 10.11648/j.ajce.s.2015030202.22
- Hayashi T., Tokunaga T., Aichi M., Shimad J., Taniguchi M. Effects of human activities and urbanization on groundwater environments: An example from the aquifer system of Tokyo and the surrounding area. *Science of the Total Environment*. 2009. Vol. 407, No. 9. P. 3165–3172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.012>
- Hemeda S. Electrical Resistance Tomography (ERT) Subsurface Imaging for Non-destructive Testing and Survey in Historical Buildings Preservation. *Australian Journal of Basic And Applied Sciences*. 2013. Vol. 7, No. 1. P. 344–357. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:51769244>
- Hudak V.M., Cherevko I.A., Zatserkovnyi V.I., Ostroukh V.I., Ilchenko A.V. Determining of the effects of groundwater regime on the status of architectural monuments of Kyiv-Pechersk Lavra. *Geoinformatics 2020 – XIXth International Conference “Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects”*, Kyiv, Ukraine, May 2020. Kyiv, 2020. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo009>
- Johnson A.I. Methods of measuring soil moisture in the field. *Geological Survey Water-Supply. Paper 1619-U (U-2-2-14)*. United States Government Printing Office, Washington, 1962. <https://doi.org/10.3133/wsp1619U>
- Kril T., Shekhunova S. Terrain elevation changes by radar satellite images interpretation as a component of geo-environmental monitoring. *3th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring*, Kyiv, Ukraine, Nov. 2019. Kyiv, 2019. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903176>
- Kril T., Shekhunova S., Cherevko I. Identification of Potentially Unstable Areas by Engineering and Geological Processes Monitoring and Heritage Building Deformations. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, Ukraine, Nov. 2023. Kyiv, 2023. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520203>
- Kril T., Cherevko I. Identification on Unstable (Landslide Hazard) Areas on Lavra Far-Caves Hill. *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*, Lviv, Ukraine, Sep. 2023. Lviv, 2023. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500017>
- Kyiv: Saint-Sophia Cathedral and Related Monastic Buildings, Kyiv-Pechersk Lavra. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/527/maps/> (accessed 05 May 2024).
- La Vigna F., Bonfà I., Coppola A.G., Corazza A., Di Filippo C., Ferri G., Martelli S., Rosa C., Succhiarelli C. The City of Rome and its groundwater: from critical issues, to urban resilience opportunities. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*. 2015. Vol. 4, No. 4. P. 59–70. <https://doi.org/10.7343/as-132-15-0159>
- La Vigna F. Review: Urban groundwater issues and resource management, and their roles in the resilience of cities. *Hydrogeology Journal*. 2022. Vol. 30. P. 1657–1683. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02517-1>
- Li Ping, Li Tonglu, Hou Xiaokun, Niu Shuxuan, Fu Yukai, Zhao Quanli. Field experiment on rate of capillary rise in loess. *Journal of Hohai University*. 2014. Vol. 42, No. 6. P. 503–507. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.007
- Loke M.H. Time-lapse resistivity imaging inversion. *5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section Proceedings*. Budapest, Hungary, 1999.
- Mauriello P, Monna D, Patella D. 3D geoelectric tomography and archaeological applications. *Geophysical Prospecting*. 1998. Vol. 46, iss. 5. P. 543–570. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1998.00102.x>
- Mohd Umzarulazijo Umar, Mohd Hanizun Hanafi, Normah Abdul Latip, A. Ghafar Ahmad. Strengthening of Historic Buildings through Structural Repair Works: Review of the Methods and Process. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. April 2015. Vol. 97, No. 7. P. 358–362. URL: <https://www.ajbas-web.com/old/ajbas/2015/April/358-362.pdf>

Moon P., Spencer D.E. *Field Theory Handbook: Including Coordinate Systems, Differential Equations and Their Solutions*. 2nd ed. Springer, Berlin, 1988. 236 p.

Rapid geophysical inversion with Res2DInv and Res3DInv. URL: <https://www.seequent.com/ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B-%D0%B8-%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F/res2d-inv-%D0%B8-res3dinv/> (accessed 05 September 2023).

Tsourlos P.I., Tsokas G.N. Non-destructive Electrical Resistivity Tomography Survey at the South Walls of the Acropolis of Athens. *Archaeological Prospection*. 2011. Vol. 18, No. 3. P. 173–186. DOI: [10.1002/arp.416](https://doi.org/10.1002/arp.416)

Williams E., Ahenkorah I., Baffoe E., Awotoye T.F., Ephraim G.L., Asebiah D.C. Application of Geoelectric Resistivity to Determine Soil Moisture Distribution. *American Journal of Engineering Research*. 2018. Vol. 7, iss. 5. P. 113–124. URL: <https://www.ajer.org/papers/Vol-7-issue-5/M0705113124.pdf>

References

ABEM Terrameter LS Toolbox User Manual. Sundbyberg, Sweden, 47 p. URL: <https://www.guidelinegeoc.cdn.triggerfish.cloud/uploads/2016/03/ABEM-Terrameter-LS-Toolbox-v2.0.1-User-Manual-1.pdf> (accessed 28 September 2023).

Arkhipenko O.A., Arkhipenko A.O. 2017. Architectural monument of national significance “Church of the Savior on Berestov”. 2. Complex scientific studies. Book 2.7. Technical report on engineering and geological investigations at the restoration site. Kyiv (in Ukrainian).

Arkhipenko O.A., Konyushin V.V. 2018. Works on the construction of a network of hydrogeological wells on the territory of the National Kyiv-Pechersk Historical and Cultural Reserve. LLC KB PRIDE, code 154/2-IG-TZ. Kyiv (in Ukrainian).

Balasco M., Lapenna V., Rizzo E., Telesca L. 2022. Deep Electrical Resistivity Tomography for Geophysical Investigations: The State of the Art and Future Directions. *Geosciences*, 12 (12): 438. <https://doi.org/10.3390/geosciences12120438>

Bases and foundations of buildings: DBN V.2.1-10-2009 [Effective from 2009-10-01]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009. (State building regulations of Ukraine) (in Ukrainian).

Bira Wafaei Baneh, Koosha Wafaei Baneh. 2020. Review of the Methods for Strengthening and Retrofitting Cultural Heritage Structures. *Journal of Science and Engineering*. 4 (6): 45–56. DOI: [10.25079/ukhjs.v4n1y2020.pp45-56](https://doi.org/10.25079/ukhjs.v4n1y2020.pp45-56)

Blome M., Maurer H. and Schmidt K. 2009. Advances in three-dimensional geoelectric forward solver techniques. *Geophysics*. J. Int. 176: 740–752. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.04006.x>

Bondar K.M. 2021. Geophysical methods in archeology: theory, methodology, practice: autoref. thesis ... Dr. Geol. Sciences: 04.00.22 / Bondar Ksenia Mykhailivna; Kyiv National University named after Taras Shevchenko. Kyiv (in Ukrainian).

Buildings and structures in difficult engineering and geological conditions. General provisions: DBN V.1.1-45:2017. [Effective from 2017-10-01]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2017. 35 p. (State building regulations of Ukraine) (in Ukrainian).

Burkart Ullrich, Thomas Günther, Carsten Rücker. 2007. Electrical resistivity tomography methods for archaeological prospection. Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, April 2–6, 2007. URL: https://archiv.ub.uni-heidelberg.de/propylaeumdok/488/1/02_05_ullrich_et_al_resistivity.pdf

Cherednichenko E.F. 2006. Architecture and functional purpose of the underground structures of the Upper Lavra. Mohyla readings, pp. 550–556 (in Ukrainian).

Complex research of the geoeological state of preservation of the historical and cultural heritage objects of the National Reserve “Kyiv-Pechersk Lavra” in the conditions of military operations. Bugai D.O. Scientific report. 2023. Kyiv (in Ukrainian).

Coscia I., Greenhalgh S., Linde N., Doetsch J., Marescot L., Günther T., Vogt T. and Green A. 2011. 3D crosshole ERT for aquifer characterization and monitoring of infiltrating river water. *Geophysics*, 76 (2): G49–G59. <https://doi.org/10.1190/1.3553003>

Demchishin M.G., Kraev V.F., Saenko T.S., Sergeeva L.G. 1991. Loess cover of the territory of Ukraine in the sphere of technogenesis. Kyiv. 55 p. (Preprint / Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Geological Sciences; 91-9) (in Ukrainian).

Demchyshyn M.G., Kril T.V. 2019. Improvement of the Engineering Protection Systems of the Kyiv-Pechersk Lavra Reserve Territory. *Nauka i innovacii*, 15 (3): 37–51. <https://doi.org/10.15407/scin15.03.037>

Demchyshyn M.G., Rybin V.F. 1998. Engineering-geological studies on the territory of the Kyiv-Pechersk State Reserve for the project of reproduction of the Assumption Cathedral and engineering protection of the territory of the Upper Lavra: Scientific report. Institute of Geol. of Sciences of NAS of Ukraine. Kyiv. 89 p. (in Ukrainian).

Degtyarev B.M., Dzehtser E.S., Muftakhov A.Zh. 1985. Protection of foundations of buildings and structures from the effects of groundwater. Moscow: Stroyizdat. 264 p. (in Russian).

Engineering protection of territories and structures against flooding and inundation: DBN V.1.1-25-2009. [Effective from 2011-01-01]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 52 p. (State building regulations of Ukraine) (in Ukrainian).

Engineering protection of the territory of the Reserve. Current state. M 1:1000. Organization plan of the territory of the National Kyiv-Pechersk Historical and Cultural Reserve. Development by Sur M.G., Onishchenko V.M., Sokovnina N.Kh. 1 sheet, inv. no. 2012-45-GP. State enterprise “NDPI urban development”, 2012 (in Ukrainian).

Engineering searches for construction: DBN A.2.1-1-2008. [Effective from 2008-07-01]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2008. 74 p. (State building regulations of Ukraine) (in Ukrainian).

Geological map of Ukrainian USSR of scale 1:50 000. Kyiv industrial area (1984). Explanatory note in 2 parts. Kolot Ye.I., Kuzyshyna L.P., Kutovoi V.Y., Lavryk V.F., Marakhovskaia Y.Y., Selyn Yu.Y., Solovytskyi V.N., Shestopalova E.V. Kyiv (in Russian).

Guidelines for the inspection of buildings and structures to determine and assess their technical condition. DSTU-N B V.1.2-18:1016. [Effective from 2017-04-01]. Kyiv, 2017. 44 p. (in Ukrainian).

Guide for the Structural Rehabilitation of Heritage Buildings. Pompeu Santos, S. (coord). CIB W023 Commission. June, 2010, 53 p. URL: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB18446.pdf>

Guidelines for performing repair and restoration works on monuments of architecture and urban planning: DSTU-NB V.3.2-4:2016 [Effective from 2017-01-01]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2016. 50 p. (State Standard of Ukraine) (in Ukrainian).

Hassan Saghi, Abbas Ansari Aval. 2015. Effective Factors in Causing Leakage in Water Supply Systems and Urban Water Distribution Networks. *American Journal of Civil Engineering*, 3 (2-2): 60–63. DOI: [10.11648/j.ajce.s.2015030202.22](https://doi.org/10.11648/j.ajce.s.2015030202.22)

Hayashi T., Tokunaga T., Aichi M., Shimada J., Taniguchi M. 2009. Effects of human activities and urbanization on groundwater environments: An example from the aquifer system of Tokyo and the surrounding area. *Science of the Total Environment*, 407 (9): 3165–3172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.012>

Hemeda S. 2013. Electrical Resistance Tomography (ERT) Sub-surface Imaging for Non-destructive Testing and Survey in Historical Buildings Preservation. *Australian Journal Of Basic And Applied Sciences*. 7 (1): 344–357. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:51769244>

Hudak V.M., Cherevko I.A., Zatserkovnyi V.I., Ostroukh V.I., Ilchenko A.V. 2020. Determining of the effects of groundwater regime on the status of architectural monuments of Kyiv-Pechersk Lavra. *Geoinformatics 2020 – XIXth International Conference “Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects”*, Kyiv, Ukraine, May 2020. Kyiv, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo009>

- Johnson A.I. Methods of measuring soil moisture in the field. Geological Survey Water-Supply. Paper 1619-U (U-2-2-14). United States Government Printing Office, Washington, 1962. <https://doi.org/10.3133/wsp1619U>
- Kovalevsky A.L. 1975. Features of the formation of ore biogeochemical halos. Novosibirsk: Nauka. 115 p. (in Russian).
- Kril T., Shekhunova S. 2019. Terrain elevation changes by radar satellite images interpretation as a component of geo-environmental monitoring. *3th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Monitoring, Kyiv, Ukraine, Nov. 2019. Kyiv, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903176>
- Kril T., Shekhunova S., Cherevko I. 2023. Identification of Potentially Unstable Areas by Engineering and Geological Processes Monitoring and Heritage Building Deformations. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, Ukraine, Nov. 2023. Kyiv, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520203>
- Kril T., Cherevko I. 2023. Identification on Unstable (Landslide Hazard) Areas on Lavra Far-Caves Hill. *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*, Lviv, Ukraine, Sep. 2023. Lviv, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500017>
- Kyiv: Saint-Sophia Cathedral and Related Monastic Buildings, Kyiv-Pechersk Lavra. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/527/maps/> (accessed 05 May 2024).
- La Vigna F., Bonfà I., Coppola A.G., Corazza A., Di Filippo C., Ferri G., Martelli S., Rosa C., Succiarelli C. 2015. The City of Rome and its groundwater: from critical issues, to urban resilience opportunities. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*, 4 (4): 59–70. <https://doi.org/10.7343/as-132-15-0159>
- La Vigna F. 2022. Review: Urban groundwater issues and resource management, and their roles in the resilience of cities. *Hydrogeology Journal*, 30: 1657–1683. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02517-1>
- Li Ping, Li Tonglu, Hou Xiaokun, Niu Shuxuan, Fu Yukai, Zhao Quanli. 2014. Field experiment on rate of capillary rise in loess. *Journal of Hohai University*, 42 (6): 503–507. DOI: [10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.007](https://doi.org/10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.007)
- Loke M.H. 1999. Time-lapse resistivity imaging inversion. *5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section Proceedings*. Budapest, Hungary,
- Matsola O.I., Korbutyak O.M., Lopata O.V. 2023. Report on the provision of services in geological, geophysical and other types of scientific exploration “Special engineering and geophysical searches on the territory of the national reserve “Kyiv-Pechersk Lavra” within the boundaries of flooding zones, underground voids and the development of failure processes by the method of vertical electric sounding and natural electric field, area – 0.6 ha”. Kyiv (in Ukrainian).
- Mauriello P., Monna D., Patella D. 1998. 3D geoelectric tomography and archaeological applications. *Geophysical Prospecting*, 46, 5: 543–570. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1998.00102.x>
- Mohd Umzarulazijo Umar, Mohd Hanizun Hanafi, Normah Abdul Latip, A. Ghafar Ahmad. Strengthening of Historic Buildings through Structural Repair Works: Review of the Methods and Process. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(7) April 2015, Pages: 358–362. URL: <https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2015/April/358-362.pdf>
- Molodchenko G.A., Gryn V.I. 1993. Reconstruction and strengthening completed and constructed. Kyiv: ISIO. 173 p. (in Russian).
- Moon P., Spencer D.E. 1988. *Field Theory Handbook: Including Coordinate Systems, Differential Equations and Their Solutions*. 2nd ed. Springer, Berlin.
- Nikolishin V.P. 1983. Report on the results of summarizing materials from engineering-geological surveys of past years on the territory of the Kiev-Pechersk State Nature Reserve “Lavra”: Research report. State institute Kievproekt; inv. No. 7833. Kyiv (in Russian).
- Nikolishin V.P. 1987. Report on the results of summarizing materials from engineering-geological surveys of past years in the Upper Lavra: Research report. State institute Kievproekt; ynv. No. 8739. Kyiv (in Russian).
- Ogilvy A.A. 1990. *Fundamentals of Engineering Geophysics*. Moscow: Nedra. 501 p. (in Russian).
- Pasko Roman, Terenchuk Svitlana, Aghezzaf Amine, 2020. Analysis of deterioration causes to the technical condition of buildings constructed on subsidence loess soils. *Management of Development of Complex Systems*. 43: 116–122. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.116-122> (in Ukrainian).
- Plan of the current state of the territory of the Reserve. M 1:500. Organization plan of the territory of the National Kyiv-Pechersk Historical and Cultural Reserve. Development by Sokovnina N. Kh., Vdovichenko S.V., Pasholok S.P. 1 sheet, inv. no. 2012-49-GP. State enterprise “NDPI urban development”, 2012 (in Ukrainian).
- Planning and development of territories: DBN B.2.2–12–20019. 2019. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine (State building regulations of Ukraine) (in Ukrainian).
- Rapid geophysical inversion with Res2DInv and Res3DInv. URL: <https://www.seequent.com/ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B-%D0%B8-%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F/res2d-inv-%D0%B8-res3dinv/> (accessed 05 September 2023).
- Rybin V.F., Demchyshyn M.G., Cherevko I.A., Kutsiba V.O., Chornyi H.I., Kanarova O.S., Sakhno A.P. 2001. Develop a methodology and substantiate the monitoring of the geological environment of the historical building zones of the city of Kyiv for the purpose of protecting historical and architectural monuments. Scientific Report No. state register. 15-2001. Kyiv: IGN NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Samedov A.M. 2013. Calculation and design of geotechnical engineering structures. Kyiv: NTUU “KPI” (in Russian).
- Shestopalov V.M. (Ed.), 1991. Water exchange in hydrogeological structures of Ukraine: Water exchange in disturbed conditions. Kiev: Naukova Dumka. 528 p. (in Russian).
- Tsourlos P.I., Tsokas G.N. 2011. Non-destructive Electrical Resistivity Tomography Survey at the South Walls of the Acropolis of Athens. *Archaeological Prospection*, 18 (3): 173–186. DOI: [10.1002/arp.416](https://doi.org/10.1002/arp.416)
- Tugaenko Y., Marchenko M., Loginova L. 2014. Influence of moisture content of loess soils processes of their seals shock load. *Modern technologies, materials and structures in construction*. 2: 47–52. (in Ukrainian).
- Vlasenko A.I. 1962. Report on engineering-geological research of the site of the main bell tower of the Kiev-Pechersk Lavra Museum: Research report. State institute Kievproekt; inv. No. 2881. Kyiv (in Russian).
- Vyzhva S.A., Reva M.V., Onyshchuk I.I., Onyshchuk V.I. 2014. *Electrometry. Guide to educational geophysical practice*. Kyiv: VOC “Kyiv University” (in Ukrainian).
- Vinnikov Yu.L., Mukha V.A., Yakovlev A.V., Andrievska O.V., Bida S.V. 2002. *Foundations of buildings and structures. Reference guide*. Kyiv: Urozhai. 432 p. (in Ukrainian).
- Zviryaka A.M., Bobrovskiy T.A., Balakin S.A., Golovatenko Yu.G. Wine cellar in the garden of the Metropolitan (Underground structure #9). Passport of the object of cultural heritage. Research Institute of Monument Protection Studies, Kyiv. 2012, 46 p. and appendices (historical plans and images, maps, sections, photofixation) (in Ukrainian).
- Zuevska N.V. 2013. Emergency phenomena at urban facilities in the conditions of loess subsidence soils in the presence of a temperature factor. *Bulletin of the Donetsk Mining Institute*, 1 (32): 11–115 (in Ukrainian).
- Zuevska N.V. 2012. Intensification of the process of subsidence of loess soils taking into account the hydrothermal factor. *Bulletin of the Donetsk Mining Institute*, 1 (30)–2 (31): 469–474 (in Ukrainian).
- Williams E., Ahenkorah I., Baffoe E., Awotoye T.F., Ephraim G.L., Asebiah D.C. 2018. Application of Geoelectric Resistivity to Determine Soil Moisture Distribution. *American Journal of Engineering Research*, 7, 5, pp. 113–124. URL: <https://www.ajer.org/papers/Vol-7-issue-5/M0705113124.pdf>