

DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.316542>

УДК 556.3:624.131:628.1.03:
:004.942

E-mail:

yurykubko@gmail.com

dmitri.bugay@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2404-5639>

bzanosz@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8581-4462>

id0973974627@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7083-6119>

Ключові слова: підземні води, інфільтраційне живлення, інженерні мережі, гідрогеологічне моделювання, охорона культурних пам'яток, Києво-Печерська лавра.

Keywords: groundwater, groundwater recharge rate, engineering networks, hydrogeological modeling, protection of historical and cultural monuments, Kyiv-Pechersk Lavra.

© 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/>).

ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ АВАРІЙНИХ ВИТОКІВ ІЗ МЕРЕЖ ВОДОПОСТАЧАННЯ НА ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНІ УМОВИ ОБ'ЄКТІВ АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ

MODELING PREDICTIONS OF THE IMPACT OF THE ACCIDENTAL LEAKS FROM WATER SUPPLY NETWORKS ON THE HYDROGEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL CONDITIONS OF THE ARCHITECTURAL HERITAGE SITES OF THE KYIV PECHERSK LAVRA

Ю. І. Кубко¹, Д. О. Бугай¹, Б. Ю. Заноз¹, І. А. Черевко²

Yuriy I. Kubko¹, Dmytro O. Bugai¹, Bohdan Yu. Zanoz¹, Iryna A. Cherevko²

¹ Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601

² National Reserve «Kyiv-Pechersk Lavra», Kyiv, Ukraine, 01015

Представлено аналіз за допомогою моделей фільтрації і вологоперенесення гідрогеологічних умов, що склалися на ділянці Митрополичого саду в межах Верхньої лаври внаслідок аварії на магістральній тепломережі 27 жовтня 2022 р. Виконано оцінки інфільтраційного живлення підземних вод на території Верхньої лаври, що є ключовим параметром геофільтраційних моделей. Із використанням даних лабораторних досліджень побудовано теоретичні моделі вмісту вологи і коефіцієнта вологоперенесення в залежності від капілярного тиску для лесових ґрунтів досліджуваної ділянки на основі рівнянь Ван Генухтена–Муалема (для використання в програмі HYDRUS1D). Параметризовані і відкалібровані моделі на основі HYDRUS1D та Visual Modflow дозволили спрогнозувати вплив аварійних витоків із тепломережі в Митрополичому саду в жовтні 2022 р. на гідрогеологічні умови ділянки (конфігурацію і часову динаміку зон підйому рівня ґрунтових вод під аварійною трасою; зони підтоплення просадочних лесових ґрунтів у нижній частині розрізу). Згідно з моделюванням, у зону ризику просадок попадають фортечні мури, вежі й історичні будівлі на західному і південному периметрах досліджуваної ділянки. Змодельовані гіпотетичні «песимістичні» аварійні сценарії вказують на значну потенційну небезпеку, яку можуть становити довготривалі аварійні витoki із тепломережі на зазначеній ділянці для історичної архітектурної спадщини Заповідника.

The analysis using groundwater flow and moisture transfer models of hydrogeological conditions in the Metropolitan Garden area within the Upper Lavra caused by an accident in the main heating network that occurred on October 27, 2022, is presented. The infiltration recharge to groundwater in the territory of the Upper Lavra, which is a key parameter of groundwater flow models, is estimated. Using laboratory data, theoretical models of moisture content and unsaturated hydraulic conductivity depending on capillary pressure for loess soils of the studied area were developed based on the Van Genuchten–Mualem

Цитування: Кубко Ю. І., Бугай Д. О., Заноз Б. Ю., Черевко І. А. Прогнозування впливу аварійних витоків із мереж водопостачання на інженерно-геологічні умови об'єктів архітектурної спадщини Києво-Печерської лаври. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2024. Том 17, вип. 2. С. 99–116. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.316542>.

Citation: Kubko Yu. I., Bugai D. O., Zanoz B. Yu., Cherevko I. A., 2023. Modeling predictions of the impact of the accidental leaks from water supply networks on the hydrogeological and geotechnical conditions of the architectural heritage sites of the Kyiv Pechersk Lavra. Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine, Vol. 16. Iss. 2. Pp. 99–116. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.316542>.

equations (for use in the HYDRUS1D computer code). The parameterized and calibrated groundwater models of the study site based on HYDRUS1D and Visual Modflow allowed us to predict the impact of accidental leaks from the heating main in the Metropolitan Garden in October 2022 on the hydrogeological conditions of the site (configuration and temporal dynamics of the zones of rise of the groundwater table; potential zones of flooding of subsiding loess soils comprising the unsaturated zone). According to the modeling, the zone of subsidence risk includes fortress walls, towers and historical buildings on the Western and Southern perimeter of the study site. The simulated hypothetical “pessimistic” accidental scenarios indicate a significant potential hazard the long-term emergency leak from the heating network in the study area may pose to the historical architectural heritage of the preserve.

ВСТУП

Архітектурний ансамбль Києво-Печерської лаври (КПЛ) є релігійним, історичним об'єктом культурної спадщини міжнародного значення (№ 527 Списку всесвітньої спадщини ЮНЕСКО). Територія КПЛ має складні інженерно-геологічні умови та потерпає від небезпечних природних процесів (просідання, зсуви, суфозія, ерозія), а також антропогенних небезпечних впливів (витоки з водопроводів, вібраційних навантажень від міського транспорту тощо), які впливають на пам'ятки архітектури, у тому числі підземні споруди (Рибін та ін., 2004; Старостенко та ін., 2006; Cherevko et al., 2024). Це зумовлює актуальність досліджень з моніторингу і прогнозування гідрогеологічних умов на території КПЛ з метою оперативного реагування на небезпеки, попередження негативних впливів і обґрунтування охоронних заходів (Cherevko et al., 2024).

Нижче за допомогою моделей фільтрації і вологоперенесення проаналізовано гідрогеологічні умови, що склалися на ділянці Митрополичого саду в межах Верхньої лаври внаслідок аварії на магістральній тепломережі 27 жовтня 2022 р. Зазначена аварія призвела до підтоплення Льоху Митрополита, суфозійного виносу ґрунту в цю підземну споруду та утворення кількох провалів ґрунту на території саду (Черевко, 2023; Черевко та ін., 2024). На основі інформації, отриманої від адміністрації Заповідника, аварійний виток із порушеної тепломережі тривав три доби, внаслідок чого у гідрогеологічне середовище надійшло близько 3000 м³ води.

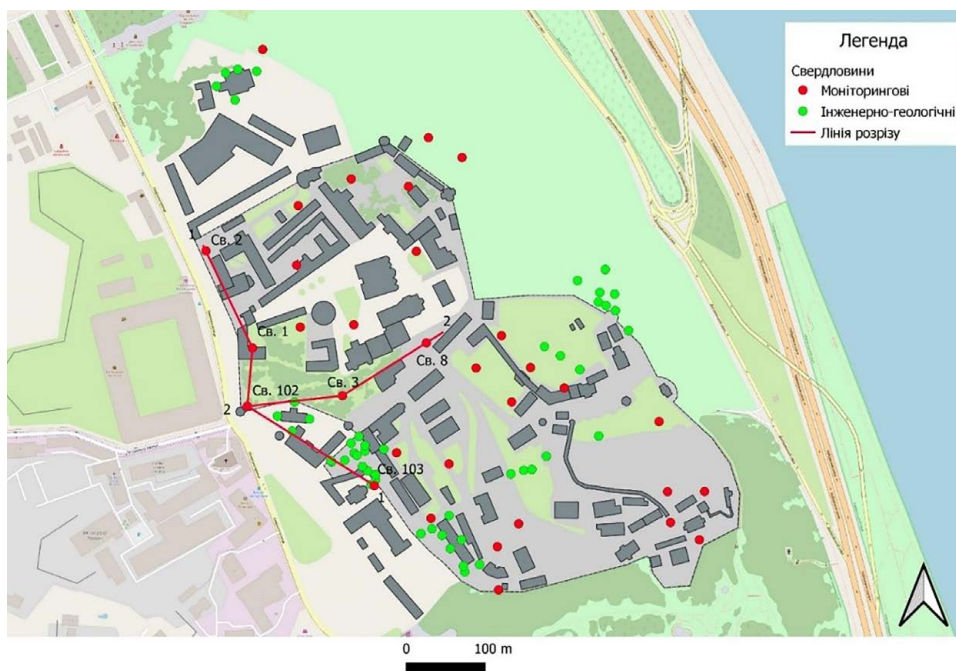
З метою вибору й обґрунтування гідрогеологічної схематизації і параметрів для досліджуваної ділянки було виконано огляд проведених раніше гідрогеологічних досліджень і підбито результати попередніх робіт з моделювання підземних вод у КПЛ. Були проведені оцінки інфільтраційного живлення підземних вод на території КПЛ, що є ключовим параметром геофільтраційної моделі, із застосуванням методу аналізу коливань рівня ґрунтових вод (РГВ) у спостережних свердловинах. Ще один підготовчий крок полягав у тому,

що із використанням даних виконаних раніше в Інституті геологічних наук (ІГН) НАН України лабораторних досліджень гідрофізичних параметрів лесових ґрунтів були побудовані залежності вмісту вологи і коефіцієнта вологоперенесення від капілярного тиску на основі теоретичних моделей Ван Генухтена–Муалема з метою подальшого їхнього використання при моделюванні вологоперенесення в ґрунтах за допомогою програми HYDRUS1D. Отримані оцінки ключових гідрофізичних і гідрогеологічних параметрів були використані для аналізу наслідків аварійних витоків води із водних комунікацій в гідрогеологічне середовище із застосуванням програм HYDRUS1D (моделювання процесів вологоперенесення в зоні аерації) та Visual Modflow (моделювання фільтрації в безнапірному водоносному горизонті в еолово-делювіальних і флювіогляціальних відкладах).

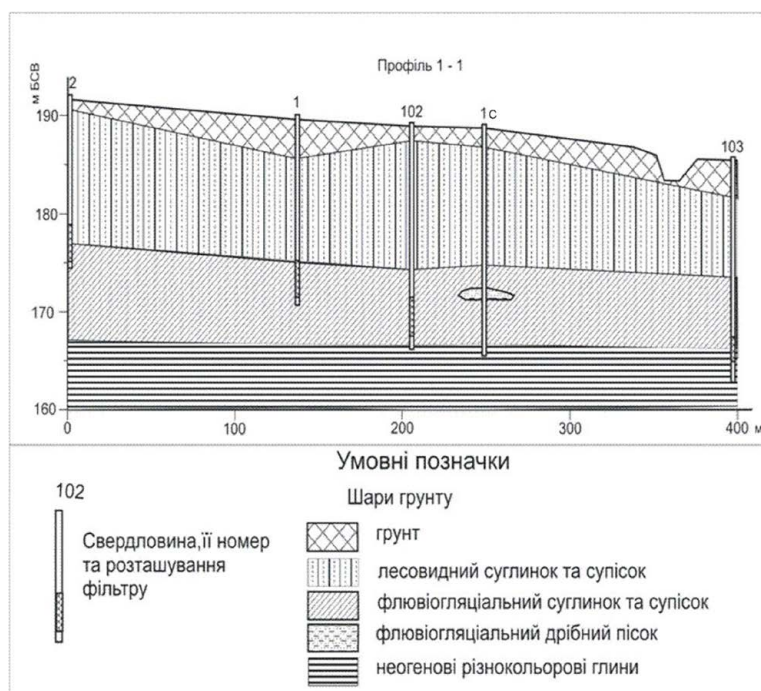
1. ГЕОЛОГІЧНА БУДОВА І ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ УМОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ДІЛЯНКИ

Для побудови геологічної моделі досліджуваної ділянки використано базу даних гідрогеологічної інформації Заповідника (ІГН, 2023). Ситуативна схема Верхньої лаври і приклад побудованого геологічного профілю наведені на рис. 1. Геологічна будова Митрополичого саду є типовою для Верхньої лаври. Верхня частина розрізу складена лесовидними супісками і суглинками. Нижче розташовані флювіогляціальні супіски і суглинки з прошарком більш проникних піщаних відкладів. Флювіогляціальні відклади підстиляються слабопроникними неогеновими строкатими глинами. Більш детально геологічна будова Верхньої лаври обговорюється в публікаціях (Черевко та ін., 2024; Cherevko et al., 2024).

На території Верхньої лаври поширений ґрунтовий водоносний горизонт у четвертинних еолово-делювіальних і озерно-льодовикових відкладах. РГВ у межах Верхньої лаври знаходяться на відмітках 169,0–181,0 м. Багаторічна амплітуда коливань у режимних свердловинах сягає близько 1,7 м, що зумовлено як природними (інфільтрація опадів), так і техногенними (витоки із комуніка-



а



б

Рис. 1. Розташування свердловин і геологічний профіль по лінії «1-1»: а — ситуативна схема; б — геологічна будова досліджуваної ділянки.

Fig. 1. Location of wells and geological profile along the “1-1” line: а — Situational scheme; б — geological structure of the study area.

цій) чинниками. Глибини до РГВ четвертинного водоносного горизонту в межах плато зазвичай коливаються від 12 до 18 м. Потужність горизонту невитримана і змінюється від 2-3 до 15-20 м. Ґрунтові води розвантажуються у дренажні си-

стеми і водоносний горизонт у делювіальних зсувних ґрунтах на схилах. Коефіцієнти фільтрації флювіогляціальних супісків і суглинків оцінюються в діапазоні 0,05-0,5 м/добу, а окремих прошарків пісків — до 2-8 м/добу. Більш детально гідро-

геологічні умови Верхньої лаври обговорюються в звіті (ІГН, 2023) і в публікаціях (Черевко та ін., 2024; Cherevko et al., 2024).

2. ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ КПЛ

Огляд джерел показав, що за попередні 20 років для території КПЛ і оточуючих ділянок міської забудови (Старий Арсенал) фахівцями ІГН НАН України (ІГН, 1995; ІГН 2001) та Київського національного університету ім. Тараса Шевченка (КНУ, 2006; ТОВ «Екожитло», 2010) було створено кілька геофільтраційних моделей. Особливий інтерес становить наведена у звіті модель (ІГН, 1995), яка охоплює майже всю територію Заповідника. В результаті калібрування фільтраційної моделі для Верхньої лаври було оцінено, що коефіцієнт фільтрації (Кф) четвертинного горизонту в середньому сягає 0,4 м/добу при середньому інфільтраційному живленні 100 мм/рік. За результатами моделювання (ІГН, 2001) в межах Верхньої лаври було виділено зони безнапірного водоносного горизонту із водопровідністю 0,4–12 м²/добу при інфільтраційному живленні (природному та техногенному) від 50 (на схилах плато), 100 мм/рік (середнє значення для Верхньої лаври) до 350 мм/рік (ділянки з техногенними витокami із комунікацій).

3. ОЦІНКИ ГІДРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГРУНТІВ

3.1. Оцінка інфільтраційного живлення підземних вод на основі аналізу гідрографів вибраних свердловин

Інфільтраційне живлення підземних вод на території КПЛ було нами оцінене із застосуванням методу аналізу коливань РГВ у спостережних свердловинах (water table fluctuation method – WTF) (Healy, Cook, 2002). Була використана модифікація методу MRC (master recession curve) (Gumiła-Kawęcka et al., 2022). Ця модифікація WTF-методу, на відміну від стандартного варіанту методу, враховує, що швидкості рецесії РГВ ($\Delta H/\Delta t$) не є константою, а залежать від значення рівня підземної води (H), зменшуючись із зниженням H. Для застосування методу вибрані спостережні свердловини, де простежуються циклічні сезонні коливання РГВ (св. 11, 15). Поблизу зазначених свердловин відсутні об'єкти інженерних мереж (дренажно-штовльові системи,

водопровід тощо), що забезпечує природний (або близький до нього) режим РГВ. Приклади моніторингових даних і аналізу швидкості рецесії для св. 15 наведено на рис. 2. Коефіцієнт водовіддачі суглинків, що складають верхню частину геологічного розрізу в зоні коливань РГВ, при розрахунках був прийнятий в середньому 0,05 при 0,02–0,08 (Lv et al., 2021). Результати оцінки інфільтраційного живлення згідно з даними аналізу РГВ для св. 11, 15 подано в табл. 1. Отримані оцінки загалом узгоджуються з даними попередніх досліджень (ІГН, 1995; ІГН 2001).

3.2 Лабораторні визначення гідрофізичних параметрів лесових ґрунтів та їхня апроксимація теоретичними моделями

При моделюванні процесів вологоперенесення у ґрунтах Митрополичого саду нами були використані результати лабораторних досліджень гідрофізичних параметрів лесових ґрунтів для території КПЛ (табл. 2).

Зазначені експериментальні дані були апроксимовані теоретичними моделями Ван Генухтена–Муалема (Van Genuchten et al., 1991) з метою подальшого використання при моделюванні вологоперенесення в ґрунтах за допомогою програми HYDRUS1D (Simunek et al., 1999, 2018).

Рівняння Ван Генухтена, яке описує залежність вмісту води в ґрунті від капілярного (всмоктуючого) тиску, має вигляд:

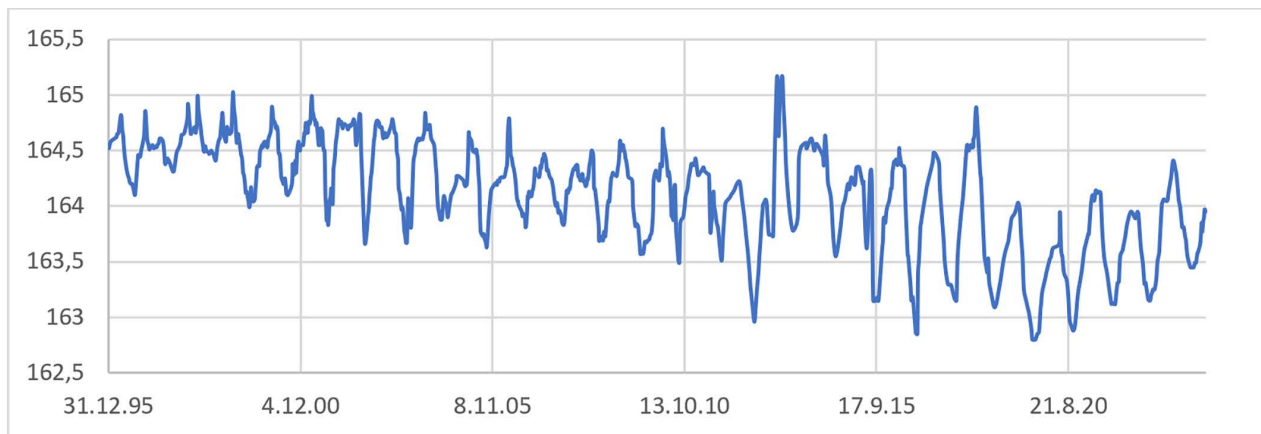
$$\Theta(h) = \Theta_r + \Theta_s - \Theta_r / (1 + (\alpha h)^n)^m,$$

де $\Theta(h)$ – об'ємна вологість ґрунту при капілярному (всмоктуючому) тиску h ; Θ_s – об'ємна вологість ґрунту при повному насиченні (максимальна вологість); Θ_r – залишкова об'ємна вологість ґрунту (мінімальна вологість); α , n , m – емпіричні параметри моделі, які залежать від текстури ґрунту. Параметр α обернено пропорційний середньому розміру пор, n визначає крутизну кривої, а m приймається рівним $(1 - 1/n)$.

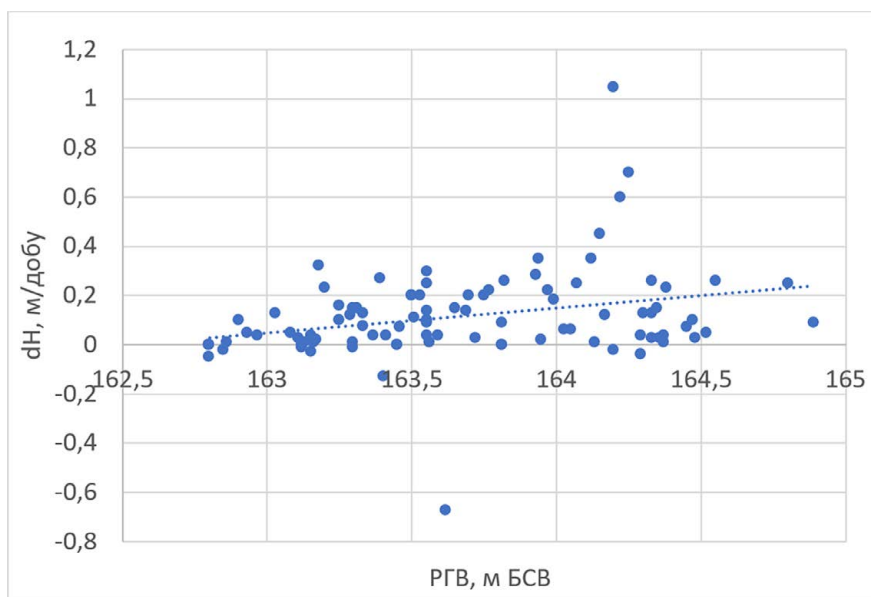
Рівняння Муалема (для коефіцієнта вологоперенесення в залежності від капілярного тиску) має вигляд:

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m_e})^m]^2,$$

де $K(h)$ – коефіцієнт вологоперенесення при значенні капілярного (всмоктуючого) тиску h ; K_s – коефіцієнт фільтрації ґрунту при повному насиченні; S_e – відносна насиченість ґрунту вологою, яка визначається як $S_e = (\Theta_h - \Theta_r) / (\Theta_s - \Theta_r)$; l – параметр пористості ґрунту, який зазвичай приймається рівним 0,5; інші параметри (тобто α , n , m) такі ж, як і в моделі Ван Генухтена.



а



б

Рис. 2. Графік коливань PGB (а) і швидкість рецесії рівня в залежності від PGB (б) для св. 15.

Fig. 2. Graph of fluctuations of the GWL (a) and the rate of level recession in dependence on the GWL (b) for well 15.

Таблиця 1. Результати оцінки інфільтраційного живлення на території КПЛ за результатами аналізу коливань PGB у св. 11 і 15 (мм/рік)

Table 1. Results of the estimation of infiltration recharge rate on the territory of the KPL based on the analysis of the fluctuations of the GWL in wells 11 and 15 (mm/year)

№ свердловини	Коефіцієнт водовіддачі		
	0,05 (вірог.)	0,02 (мін.)	0,08 (макс.)
Св. 11	143	57	229
Св. 15	151	60	241

Таблиця 2. Залежність об'ємного вмісту вологи та коефіцієнта вологоперенесення від всмоктуючого тиску за даними лабораторних досліджень ІГН НАН України (О. С. Скальський, С. П. Джепо, неопубліковані дані)

Table 2. Dependence of the volume moisture content and moisture transfer coefficient on the suction pressure according to the data of laboratory studies of IGS (O. S. Skalsky, S. P. Dzhepo, unpublished data)

Капілярний тиск, см вод. ст.	Wоб, д. о.	Кв, м/добу
0	0,48	1
50	0,46	0,49
100	0,414	0,25
150	0,319	0,071
200	0,251	0,0078
250	0,21	0,00095
300	0,184	0,00022
350	0,164	0,000129
400	0,144	0,000038
450	0,132	0,0000275
500	0,12	0,000017
550	0,116	0,000014
600	0,111	0,000011
650	0,109	0,000011
700	0,106	0,0000085
750	0,103	0,0000085
800	0,1	0,0000085

Для підбору параметрів теоретичних моделей гідрофізичних параметрів була використана програма RETC (<https://www.pc-progress.com/en/default.aspx?retc>) (Van Genuchten et al., 1991). Вхідні дані і результати застосування програми RETC до побудови теоретичних моделей гідрофізичних параметрів наведено на рис. 3 і в табл. 3.

4. МОДЕЛЮВАННЯ ІНФІЛЬТРАЦІЇ ВОДИ В ЗОНІ АЕРАЦІЇ ПРИ АВАРІЙНИХ ВИТОКАХ ІЗ КОМУНІКАЦІЙ

Для моделювання руху вологи в ґрунтах зони аерації використана програма HYDRUS1D (<https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-1d>), яка ґрунтується на чисельному розв'язанні рівняння Річардса, що описує процеси вологоперенесення в умовах неповного насичення ґрунтів (Šimůnek et al., 1999, 2018). В якості вхідних

даних прийняті параметричні моделі гідрофізичних характеристик лесових ґрунтів, побудовані в розд. 3.2. Розраховані за допомогою HYDRUS1D величини інфільтраційних потоків у зоні аерації використані в подальшому для моделювання геофільтраційних процесів на ділянці Митрополичого саду за допомогою програми Visual Modflow.

4.1. Інфільтрація фронту вологи в зоні аерації на РГВ

Нижче розглядається сценарій «Інфільтрація фронту вологи в зоні аерації на РГВ» в умовах формування внаслідок аварійного витoku стовпа води на поверхні землі. Такі умови могли реалізуватися при аварії в Митрополичому саду в жовтні 2022 р. при накопиченні води в бетонному коробі теплотраси, яка зазнала аварії. Припускається, що вода протікає через негерметичні стики коробів

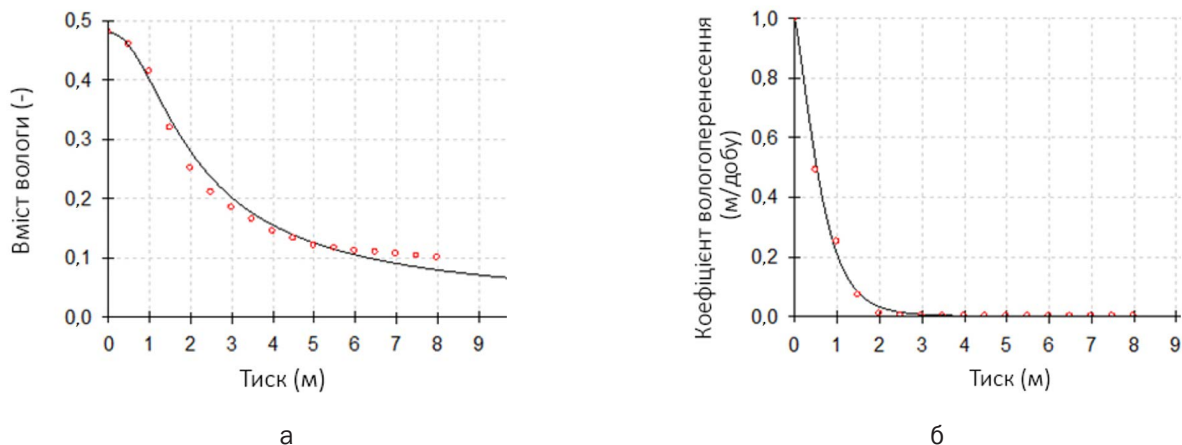


Рис. 3. Експериментальні дані про гідрофізичні параметри лесових ґрунтів (червоні маркери) та їхня апроксимація моделями Ван Генухтена–Муалема: (а) — залежність вмісту вологи в ґрунті від всмоктуючого тиску; (б) — залежність коефіцієнта вологоперенесення від всмоктуючого тиску.

Fig. 3. Experimental data on hydrophysical parameters of loess soils (red markers) and their approximation by Van Genuchten–Mualem models: (a) — dependence of soil moisture content on suction pressure; (б) — dependence of moisture transfer coefficient on suction pressure.

Таблиця 3. Параметри гідрофізичних моделей Ван Генухтена–Муалема для лесових ґрунтів КПЛ

Table 3. Parameters of Van Genuchten–Mualem hydrophysical models for loess soils of the KPL

Параметр	Значення	Похибка	Примітка
Θ_s , безр.	0,48	-	Експериментальні дані
K_s , см/добу	100	-	Те ж саме
l , безр.	0,5	-	Теоретичне значення
Θ_r , безр.	0,012	0,01	-
α , 1/см	0,0068	0,02	-
n , безр.	2,12	0,05	-

і просочується в ґрунти зони аерації, що розташовані нижче. Потужність зони аерації, складеної лесовими ґрунтами, на цій ділянці становить приблизно 12 м. Було розглянуто кілька сценаріїв, які розрізняються висотою стовпа води на поверхні (20, 50 або 100 см) і початковим зволоженням ґрунтів зони аерації.

Зокрема, були розглянуті початкові умови зволоження, які відповідають інфільтраційному живленню 150 мм/рік (природні умови), а також «техногенному інфільтраційному живленню» у 500 та 1000 мм/рік (в умовах можливих хронічних витоків із теплотраси). Для оцінки початкового ($T = 0$) розподілу вологи в ґрунтах зони аерації за

допомогою HYDRUS1D розв’язувалася стаціонарна задача вологоперенесення для відповідного значення інфільтраційного живлення.

Динаміку інфільтрації фронту вологи в ґрунтах зони аерації для умов природного початкового зволоження при рівні води на поверхні $H = 20$ см показано на рис. 4. Фронт вологи досягає РГВ за 3,2 доби, причому інфільтраційні витрати вологи досягають значення 102 см/добу. Розрахунки HYDRUS1D показали, що висота шару води на поверхні (в діапазоні 20–100 см) відносно слабо впливає на величину максимальних інфільтраційних витрат, які змінюються в межах 102–104 см/добу (табл. 4). В залежності від рівня води на по-

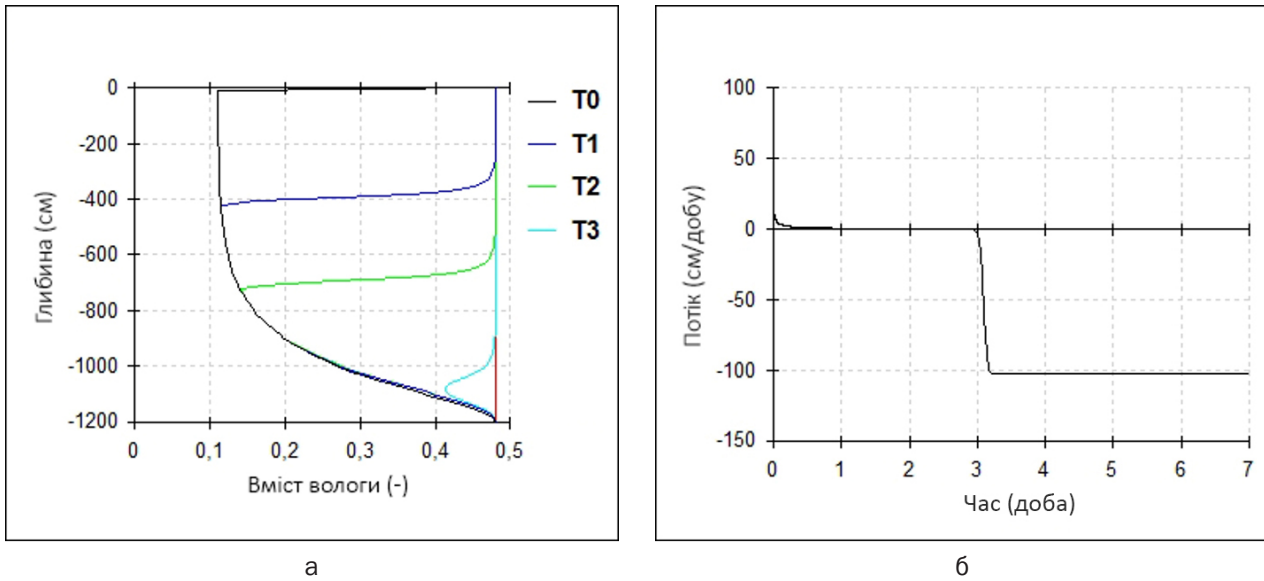


Рис. 4. Інфільтрація фронту вологи через зону аерації, складену лесовими ґрунтами, для умов природного початкового зволоження (при рівні води на поверхні $H = 20$ см): (а) — часова динаміка вмісту вологи по профілю ($T_0 = 0$, $T_4 = 3$ доби, епюри вологи з шагом 1 доба); (б) — часовий графік потоку через підшову пласта $Z = -12$ м.

Fig. 4. Infiltration of the moisture front through the vadose zone composed of loess soils for the conditions of natural initial moisture (at the water level at the surface $H = 20$ cm): (a) — time dynamics of moisture content along the profile ($T_0 = 0$, $T_4 = 3$ days, moisture eures with a step of 1 day); (b) — time plot of flow through the bottom of the layer $Z = -12$ m.

верхні й умов початкового зволоження ґрунтів час досягнення інфільтраційним фронтом з поверхні РГВ ($Z = -12$ м) для розглянутих сценаріїв варіює в діапазоні від 3,2 до 2,4 діб (табл. 5).

Аварія на теплотрасі призвела до підтоплення підземної споруди в Митрополічному саду — Льохи Митрополита. Для цієї споруди відстань від підлоги до РГВ становить близько 8 м. Розрахунок показує, що для таких умов меншої потужності зони аерації час інфільтрації вологи на РГВ зменшується до 1,4–1,9 доби (в залежності від висоти шару води).

4.2 Динаміка осушення водонасиченого профілю лесових ґрунтів внаслідок аварії

Розглянуто питання про часову динаміку стікання вологи із водонасиченого профілю лесових ґрунтів, який утворився внаслідок витоку із водонесучих комунікацій під аварійною ділянкою. Зокрема, зазначене питання цікаве з точки зору інтерпретації результатів геофізичних досліджень, проведених у Митрополічному саду в 2023 р. (Черевко та ін., 2024). Результати моделювання відповідного сценарію за допомогою програми HYDRUS1D наведено на рис. 5.

Таблиця 4. Залежність потоку вологи із зони аерації на РГВ ($Z = -12$ м) від рівня води на поверхні землі

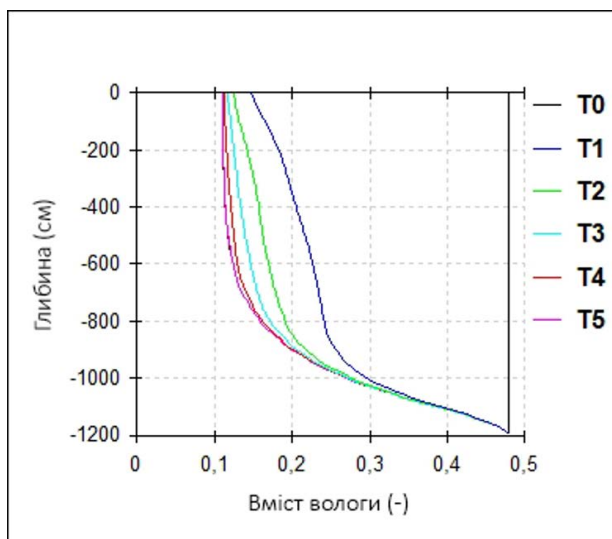
Table 4. Dependence of moisture flow from the vadose zone to the GWL ($Z = -12$ m) on the water level on the ground surface

Рівень на поверхні землі, см	Потік через підшову лесових ґрунтів ($Z = -12$ м), см/добу
20	102
50	104
100	108

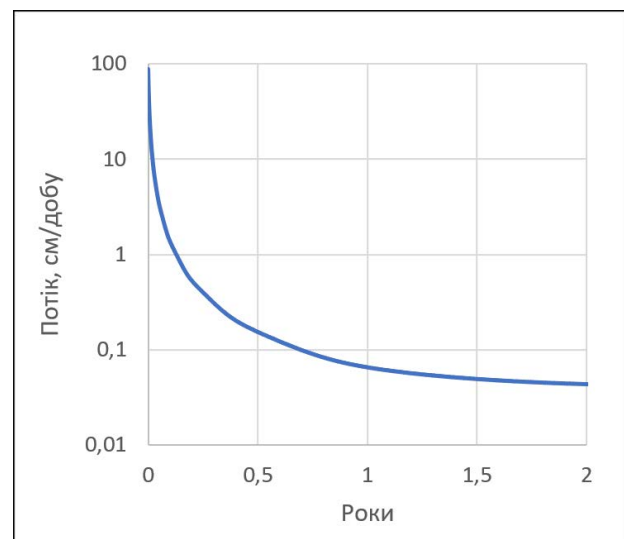
Таблиця 5. Час досягнення інфільтраційним фронтом вологи РГВ ($Z = -12$ м) у залежності від напору (стовпа води) на поверхні і ступеня зволоженості ґрунтового профілю

Table 5. The time when the infiltration front reaches the GWL ($Z = -12$ m), depending on the pressure head (water column) at the surface and the level of soil profile moisture

Величина напору на поверхні, см	Час проходження фронту на РГВ, діб
Вологість ґрунту = 0,11 (інфільтраційне живлення 150 мм/рік)	
20	3,2
50	2,9
100	2,6
Вологість ґрунту = 0,14 (техногенне інфільтраційне живлення 500 мм/рік)	
20	3
50	2,8
100	2,5
Вологість ґрунту = 0,17 (техногенне інфільтраційне живлення 1000 мм/рік)	
20	2,9
50	2,6
100	2,4



а



б

Рис. 5. (а) – Динаміка розподілу вмісту води по профілю лесового ґрунту за результатами моделювання ($T_0 = 0$, $T_1 = 1$ міс., $T_2 = 3$ міс., $T_3 = 6$ міс., $T_4 = 1$ рік, $T_5 = 3$ роки); (б) – Динаміка потоку води через зону аерації на РГВ ($Z = -12$ м).

Fig. 5. (a) – Dynamics of moisture content distribution along the loess soil profile according to the modeling results ($T_0 = 0$, $T_1 = 1$ month, $T_2 = 3$ months, $T_3 = 6$ months, $T_4 = 1$ year, $T_5 = 3$ years); (b) – Dynamics of water flow through the vadose zone to the gwL ($Z = -12$ m).

Природне інфільтраційне живлення для цього сценарію прийняте рівним 150 мм/рік. Моделювання показує, що процес гравітаційного осушення відбувається досить швидко. Вже на сьому добу інфільтраційні витрати зменшуються з початкового значення близько 90 см/добу до 10 см/добу, а на 47-му добу – до 1 см/добу. На шостий місяць розподіл вологи в ґрунтовому профілі наближається до того, що передувало аварії (див. рис. 5, б).

5. МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАНОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ В МЕЖАХ МИТРОПОЛИЧОГО САДУ ЗА АВАРІЙНИХ СЦЕНАРІЇВ

5.1 Область фільтрації і граничні умови

Для ділянки Митрополичого саду за допомогою програми Visual Modflow (<https://www.waterloohydrogeologic.com/product/visual-modflow-flex/>) була складена геофільтраційна

модель. Модель описує фільтраційні процеси в першому від поверхні безнапірному водоносному горизонті у четвертинних еолово-делювіальних і флювіогляціальних відкладах. Модель охоплює територію Верхньої лаври розміром 300 × 450 м (рис. 6). Розрахункові блоки по площині становлять 2 × 2 м. У розрізі модель у відповідності до геологічної будови ділянки враховує водопроникні шари в четвертинних відкладах та шар із слабопроникних глин неогену. Вертикальний розріз моделі складається з 10 розрахункових шарів, показаних на рис. 7. Велика кількість розрахункових шарів у глинах пов'язана з необхідністю детального відтворення на моделі системи дренажних штولень. З урахуванням досвіду попереднього моделювання КПЛ для лесових ґрунтів Кф прийнятий 1 м/добу, для флювіогляціальних відкладів – 0,4 м/добу, неогенових глин – 0,003–0,005 м/добу.

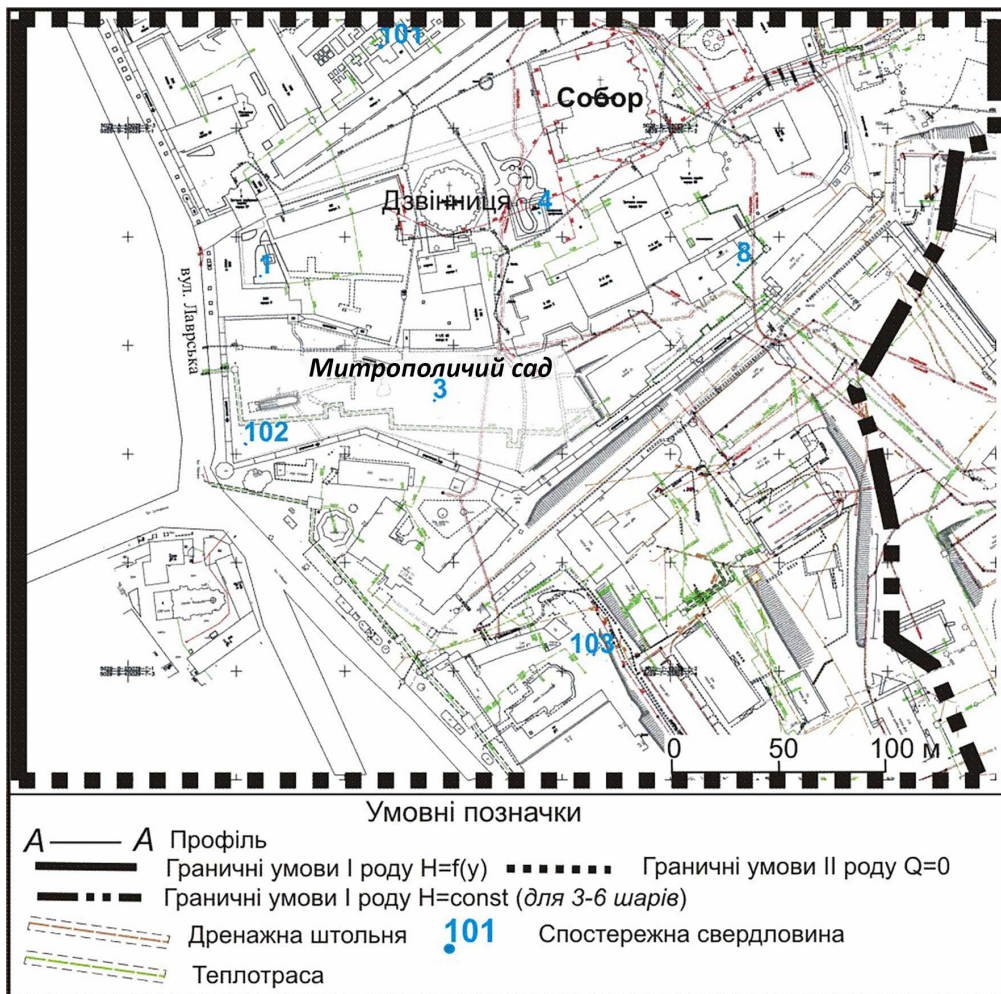


Рис. 6. Границі геофільтраційної моделі ділянки Митрополичого саду Верхньої лаври.

Fig. 6. Boundaries of the groundwater flow model of the Metropolitan Garden of the Upper Lavra.

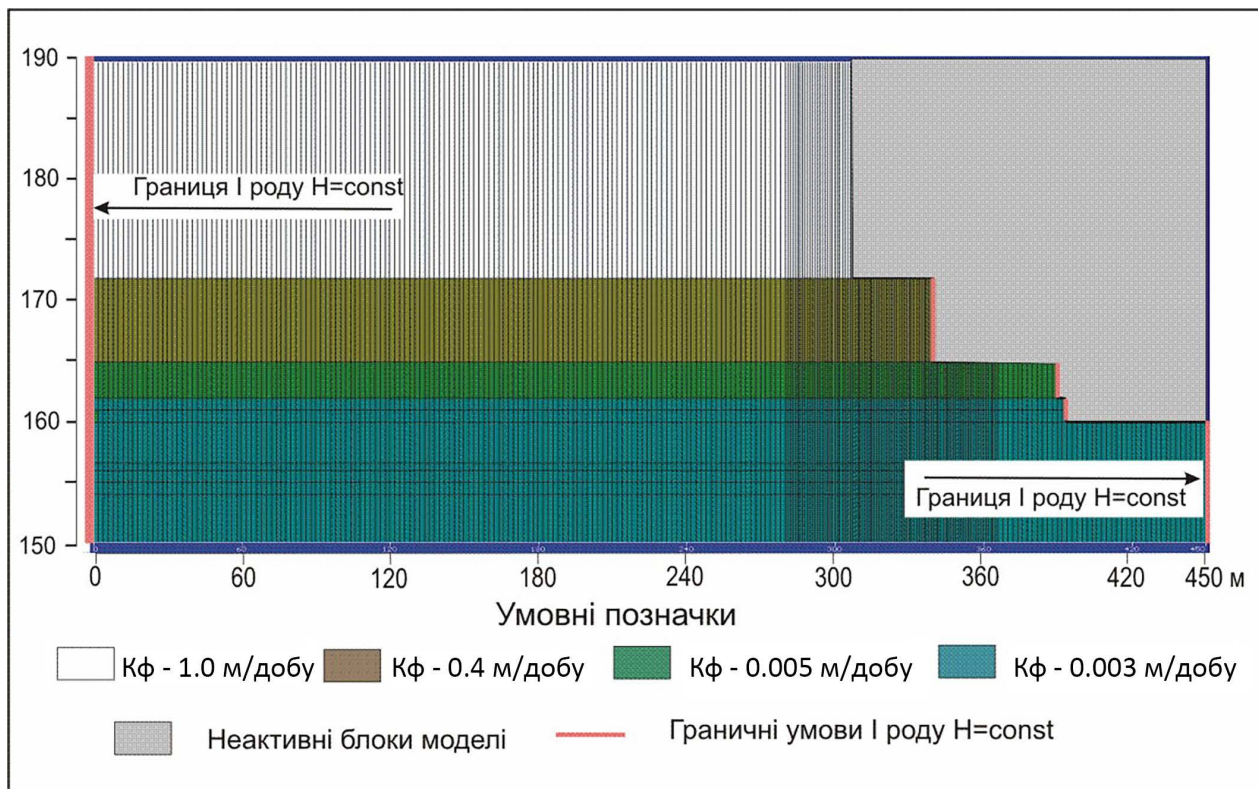


Рис. 7. Розріз геофільтраційної моделі ділянки Митрополичого саду Верхньої лаври.

Fig. 7. Cross-section of the groundwater flow model of the Metropolitan Garden of the Upper Lavra.

На моделі задано такі граничні умови. Із заходу, вздовж вул. Лаврська, задано граничну умову I роду — перемінний РГВ з відмітками від 178 до 179 м (за наявними даними моніторингу). З півночі та півдня, вздовж ліній току ґрунтових вод, задано граничну умову II роду — нульові фільтраційні витрати. Зі сходу по першому та другому шарах моделі (які знаходяться в осушених умовах) прийнято умову — непроникний контур. Для третього і нижче шарів задано граничну умову I роду — сталий рівень 163 м (за наявними даними моніторингу). В межах змодельованої ділянки розташовані траса дренажної штольні ДШС-28 (у шарі неогенових глин) та два вертикальних дренажних колодязі — № 12 (поблизу корп. 1) та № 13 (поблизу корп. 112). Зазначені дренажні колодязі були задані як гранична умова I роду $H = const$. З урахуванням досвіду попередніх досліджень і наших оцінок у межах моделі задані такі значення інфільтраційного живлення (мм/рік): у саду та на газонах — 100; під кам'яним мощенням доріжок і під спорудами — 40.

5.2. Калібрування моделі

Геофільтраційна модель була відкалібрована шляхом порівняння результатів моделювання розподілу напорів у межах області фільтрації з даними режимних спостережень за РГВ по гідрогеологічним спостережним свердловинам на листопад 2022 р. (рис. 8). Незбіг прогнозного і фактичного РГВ по свердловинах у межах ділянки не перевищив 0,5 м. За умов амплітуди сезонних та багаторічних коливань РГВ у межах 1 м зазначений результат може вважатися прийнятним. Найкращий збіг з моніторинговими даними був отриманий при рівні води в дренажних колодязях $H = 166$ м (підшва шару четвертинних відкладів).

5.3. Моделювання аварійних сценаріїв

Існуюча мережа спостережних гідрогеологічних свердловин на ділянці Митрополичого саду є досить обмеженою, що не дозволяє повною мірою оцінити вплив аварії з витокіом із тепломережі, яка відбулася в жовтні 2022 р., на гідрогеологічне середовище, зокрема, визначити зони можливого підтоплення просадочних лесових ґрунтів на цій

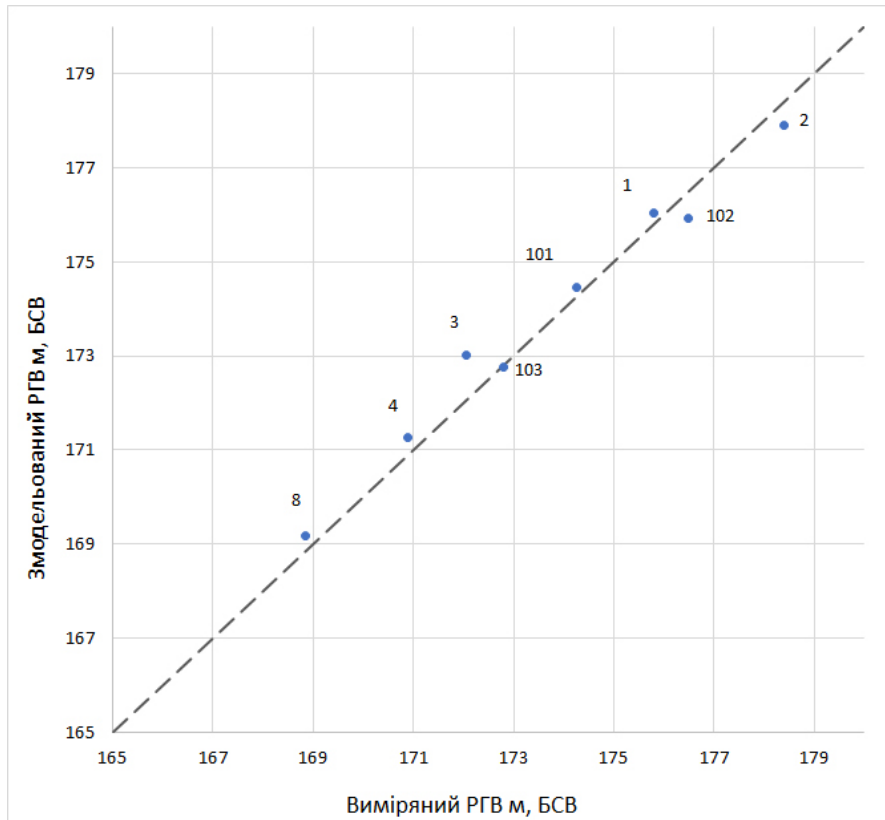


Рис. 8. Результати калібрування геофільтраційної моделі ділянки Митрополичого саду.

Fig. 8. Results of calibration of the groundwater flow model of the Metropolitan Garden area.

ділянці. Для оцінки можливих наслідків зазначеної надзвичайної ситуації було виконано моделювання наслідків аварії для кількох сценаріїв за допомогою розробленої геофільтраційної моделі (табл. 6). Припускається, що вода із зони порушеного трубопроводу розповсюджується по всій довжині бетонного коробу траси тепломережі в межах Митрополичого саду, і через негерметичні стики бетонних елементів коробу надходить у розташовані нижче ґрунти зони аерації.

Окремий варіант прогнозу передбачає, що, крім власне ділянки тепломережі, надходження аварійних витоків у гідрогеологічне середовище відбувається також і з розташованих у межах саду підтоплених підземних споруд Льоху Митрополита. Також для аналізу можливих «найгірших» наслідків подібної аварійної ситуації був оцінений гіпотетичний сценарій, який передбачає, що витік із тепломережі триває вдвічі довше (шість діб), ніж це відбулося під час аварії в жовтні 2022 р. Для оцінки інтенсивності інфільтраційних витрат аварійних витоків із траси тепломережі у водоносний горизонт були використані дані моделювання процесів вологоперенесення за допомогою HYDRUS1D.

Консервативна («песимістична») оцінка інтенсивності витоків із підтоплених споруд у зоні аварії (лінія тепломережі, підземні приміщення Льоху Митрополита) становила 110 см/(добу м²).

Приклад результатів гідрогеологічних прогнозів для сценарію 1 станом на третю добу (тобто на момент закінчення надходження аварійних витрат води з тепломережі) наведено на рис. 9, 10. Поблизу тепломережі очікується підйом РГВ з появою «язика» підвищення, який витягнутий вздовж тепломережі із заходу на схід (див. рис. 9). Прогнозні підвищення РГВ на третю добу становитимуть від 2–2,2 м поряд з тепломережею до –0,5 м на відстані 10–12 м (див. рис. 10). Загальний поперечний до лінії тепломережі розмір зони впливу аварії на РГВ на третю добу не перевищить 25 м.

Загальні прогнозовані витрати води з аварійної тепломережі в межах Митрополичого саду протягом перших трьох діб оцінюються 1560 м³. На початок четвертої доби почнеться повільне зниження РГВ і розтікання утвореного раніше «язика» ґрунтових вод. Прогнозна динаміка РГВ по спостережних свердловинах 102 та 3 в Митрополичому саду наведена на рис. 11. Найбільш інтенсивне зниження

Таблиця 6. Опис сценаріїв аварійних витоків води із магістральної тепломережі в Митрополичому саду

Table 6. Description of emergency water leakage scenarios from the main heating network in the Metropolitan Garden

№ сценарію	Опис сценарію	Тривалість витоку, діб	Примітка
1	Інфільтрація аварійних витоків по довжині коробу теплотраси в Митрополичому саду (площа зони витоку 472 м ²)	3	Відтворення аварії в жовтні 2022 р.
2	Інфільтрація аварійних витоків по довжині коробу теплотраси в Митрополичому саду (площа зони витоку 472 м ²), а також із підтоплених підземних споруд Льоху Митрополита (площа зони витоку 124 м ²)	3	Те ж саме
3	Інфільтрація аварійних витоків по довжині коробу теплотраси в Митрополичому саду (площа зони витоку 472 м ²), а також із підтоплених підземних споруд Льоху Митрополита (площа зони витоку 124 м ²)	6	Гіпотетичний «песимістичний» сценарій

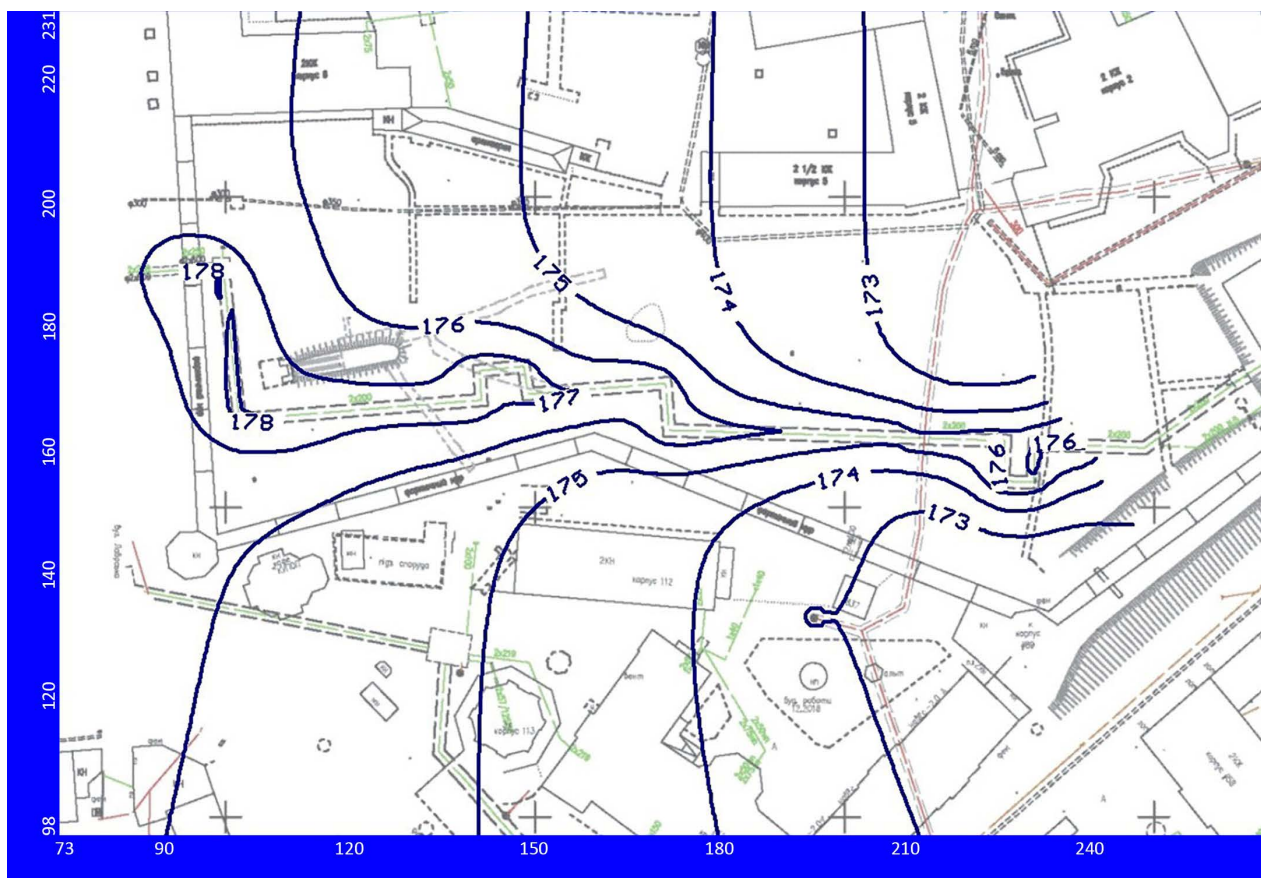


Рис. 9. Прогнозні зміни глибини до РГВ у районі Митрополичого саду для сценарію 1 на третю добу (м).

Fig. 9. Predicted changes in the depth to GWL in the Metropolitan Garden area for Scenario 1 on the third day (m).

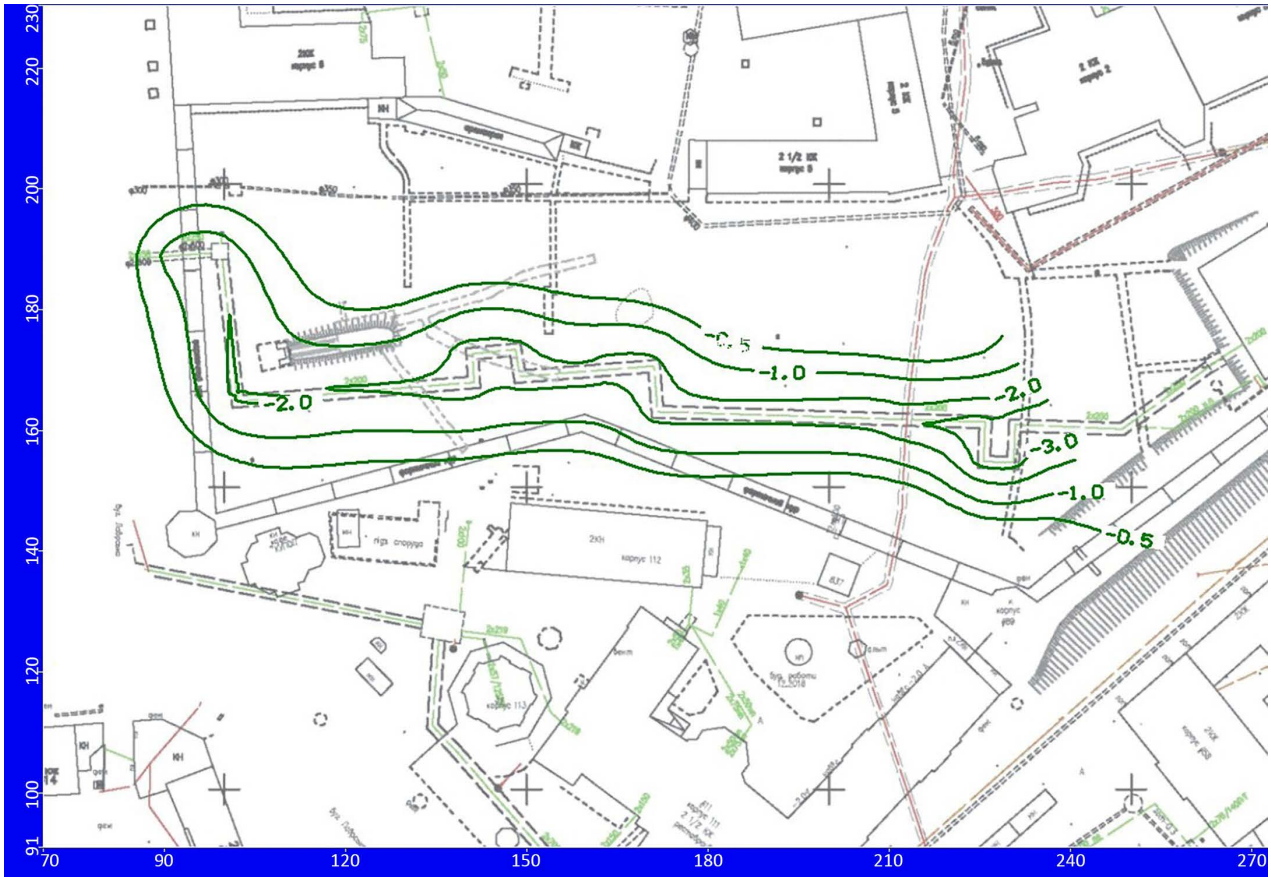


Рис. 10. Прогнозні зміни глибини до РГВ у районі Митрополичого саду для сценарію 1 на третю добу (м).

Fig. 10. Predicted changes in the depth to GWL in the Metropolitan Garden area for Scenario 1 on the third day (m).

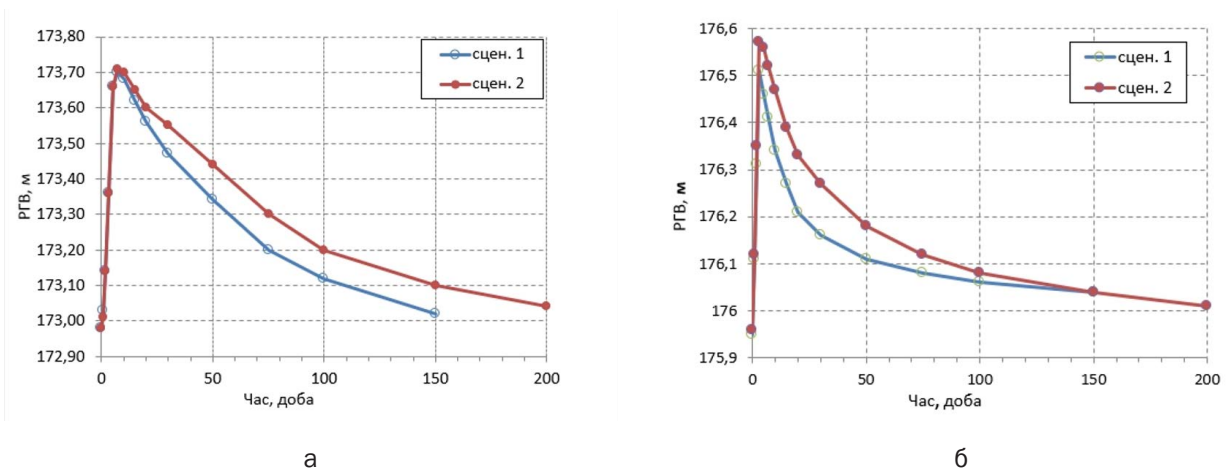


Рис. 11. Прогноз динаміки РГВ у св. 3 (а) та св. 102 (б) у Митрополичому саду для аварійних сценаріїв 1 та 2.

Fig. 11. Prediction of GWL dynamics in well 3 (a) and well 102 (б) in Metropolitan Garden for accident Scenarios 1 and 2.

РГВ відбувається протягом приблизно перших двох місяців після аварії, а за шість місяців РГВ знижуються до доаварійних позначок.

Для сценарію 2 прогнозні підвищення РГВ на третю добу коливаються від 3–3,5 м у районі теплокомпенсатора та Льоху Митрополита до 0,5 м на відстані 10–12 м уздовж східної гілки теплотраси. Загальний максимальний розмір (поперечний до лінії теплотраси перетин) зони впливу аварії на РГВ сягає близько 26 м. Прогнозна динаміка РГВ для сценарію 2 по спостережних свердловинах 102 та 3 є близькою до такої сценарію 1 (див. рис. 11). Згідно з розрахунками, загальні втрати води протягом перших трьох діб з аварійної теплотраси та підземних споруд Льоху Митрополита оцінюються майже у 2000 м³. Це досить близько до оцінки загальних витрат води з аварійної теплотраси у 3000 м³, наданої співробітниками Заповідника. При цьому варто врахувати, що частина аварійних витоків могла бути відведена по бетонному коробу теплотраси за межі досліджуваної ділянки. Зазначимо, що для сценарію 2 прогнозне підвищення РГВ у св. 3 на третю добу після аварії становить 0,4 м.

Це значення є близьким до фактичних даних моніторингу, згідно з якими підвищення РГВ у св. 3 після аварії сягнуло 0,5 м. Таким чином, дані гідрогеологічного прогнозу для сценарію 2 загалом узгоджуються з наявними даними про загальну величину витоків води із тепломережі та даними моніторингу РГВ.

Аварійний сценарій 3 є загалом подібним до сценарію 2, але передбачає, що аварійні витоків води відбуваються протягом шести діб. Для цього сценарію прогнозне підвищення РГВ у районі теплокомпенсатора на кінець шостої доби становитиме 5–5,2 м. Загальний розмір зони впливу аварії на РГВ збільшується до 38 м. Прогнозні втрати води з аварійної теплотраси та підтоплених підземних приміщень Льоху дорівнюють близько 4000 м³.

Підйом РГВ при змодельованих аварійних витоків призводить до замочування товщі просадочних (при надмірному зволоженні) лесових ґрунтів у зоні підняття РГВ. Відповідні зони підтоплення лесових ґрунтів, де підвищення РГВ становить понад 10 см, показано на рис. 12. Можна побачити, що в зону ризику просадок для сценарію 2



Рис. 12. Прогнозні ділянки підтоплення підшви лесових ґрунтів при аварійних сценаріях 1–3 ($\Delta Z > 0,1$ м).

Fig. 12. Predicted areas of flooding of the bottom of loess soils for accident scenarios 1–3 ($\Delta Z > 0.1$ m).

(що відтворює умови аварійного витоку в жовтні 2022 р.) потрапляють фортечні мури на західному і південному периметрах ділянки, а також Вежа Кущніка, Годинникова Вежа, будівля № 112. Для гіпотетичного «песимістичного» сценарію 3 зона ризику просадок лесових ґрунтів суттєво збільшується і зачіпає численні історичні споруди вздовж північного і південного периметрів Митрополичого саду, зокрема будівлі № 2, 5, 6, 31, 86 та ін.

ВИСНОВКИ

Аналіз за допомогою моделей фільтрації і вологоперенесення гідрогеологічних умов, що склалися на ділянці Митрополичого саду в межах Верхньої лаври внаслідок аварії на теплотрасі в жовтні 2022 р., дозволяє стверджувати таке.

Моделювання просочування фронту вологи через зону аерації, складену лесовими ґрунтами потужністю 12 м, із використанням даних виконаних в ІГН НАН України лабораторних досліджень гідрофізичних параметрів ґрунтів показало (це відповідає умовам Митрополитного саду), що в залежності від рівня води на поверхні і початкового зволоження ґрунтів час досягнення інфільтраційним фронтом РГВ ($Z = -12$ м) для розглянутих сценаріїв варіює від 3,2 до 2,4 діб, а максимальні інфільтраційні витрати становлять 102–104 см/добу.

Моделювання динаміки осушення водонасиченого внаслідок аварійного витоку профілю лесових ґрунтів потужністю 12 м свідчить про те, що процес гравітаційного осушення відбувається досить швидко. Вже на сьому добу інфільтраційні витрати на РГВ зменшуються з початкового значення

близько 90 см/добу до 10 см/добу, а на 47-му добу — до 1 см/добу. На шостий місяць розподіл вологи в ґрунтовому профілі наближається до того, що передував аварії.

Складена за допомогою програми Visual Modflow та відкалібрована геофільтраційна модель для ділянки Митрополичого саду, що описує фільтраційні процеси в першому від поверхні безнапірному водоносному горизонті у четвертинних еолово-делювіальних і флювіогляціальних відкладах, дозволила спрогнозувати вплив аварійних витоків із теплотраси в Митрополичому саду в жовтні 2022 р. на гідрогеологічні умови ділянки (конфігурацію і часову динаміку зон підйому РГВ під аварійною трасою; зони підтоплення просадочних лесових ґрунтів у нижній частині розрізу). Згідно з моделюванням, у зону ризику просадок попадають фортечні мури, вежі й історичні будівлі на західному і південному периметрах досліджуваної ділянки. Змодельовані гіпотетичні «песимістичні» аварійні сценарії вказують на значну потенційну небезпеку, яку можуть становити довготривалі аварійні витoki із тепломережі на зазначеній ділянці для історичної архітектурної спадщини Заповідника.

Представлені дослідження виконані за підтримки Національного фонду досліджень України при фінансуванні з державного бюджету за проектом 2022.01/0209 «Комплексне дослідження гео-екологічного 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»).

REFERENCES

IGS, 1995. Development of scientific bases and recommendations on geological protection of historical and architectural monuments of Ukraine. Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, 1995. (In Russian).

IGS, 2001. Development of methodology for monitoring of the geological environment of the historical building zones of the city of Kyiv for the purpose of protecting historical and architectural monuments. Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2001. 129 p. (In Ukrainian).

IGS, 2023. Complex research of the geo-ecological state of preservation of the historical and cultural heritage objects of the National Reserve "Kyiv-Pechersk Lavra" in the conditions of military operations. Stage 1. Analysis of engineering and geological conditions of the Reserve's territory. Scientific report on the intermediate results of the project 2022.01/0209 by contract 156/0209 from august 1 2023. Institute of

ІГН, 1995. Разработка научных основ и рекомендаций по геологической охране историко-архитектурных памятников Украины. Институт геологических наук НАН Украины, Киев, 1995.

ІГН, 2001. Розробити методику та обґрунтувати моніторинг геологічного середовища зон історичної забудови м. Києва з метою охорони історико-архітектурних пам'яток. Інститут геологічних наук НАН України, м. Київ, 2001. 129 с.

ІГН, 2023. Комплексне дослідження гео-екологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво — Печерська Лавра» в умовах воєнних дій). Етап 1. Аналіз інженерно-геологічних умов території Заповідника. Наук. звіт про проміжні результати проекту 2022.01/0209 за дог. 156/0209 від 01 серпня 2023 р. Інститут геологічних наук НАН України, Київ, 2023, 125 с.

Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2023. 125 p. (In Ukrainian).

KNU, 2006. Assessment of engineering-geological and hydrogeological conditions and forecast of the possibility of occurrence and development of negative geological processes within the construction site and the adjacent territory in connection with the strengthening of foundations and construction of a two-story underground part of the "Mystetskyi Arsenal" Cultural, Artistic and Museum Complex. Report. Taras Shevchenko National University of Kyiv, KNUBA, Kyiv, 2006. 65 p. (In Ukrainian).

Rybin, V. F., Zvol'skiy, S. T., Kutsiba, V. O., Sytnikova, V. A., 2004. Litho-monitoring of the territory of the Kyiv-Pechersk Reserve for the purpose of protecting historical and architectural monuments Reports of the NAS of Ukraine. No 2. Pp.136–142. (In Ukrainian).

Starostenko, V. I., Rybin, V. F., Zvol'skiy, S. T., Korchagin, I. N., Levashov, S. P., Cherevko, I. A., Cherny, G. I., Kutsiba, V. A., Ketov, A. Yu., 2006. Monuments of the Kyiv-Pechersk Lavra: geological and geophysical observations and the use of their results for the conservation of the reserve. *Geofizichny Zhurnal*. No. 28 (6). Pp. 3–28. (In Russian).

Ekozhitlo LLC, 2010. The retaining wall of the Upper Lavra (building 30-a) is an architectural monument of local significance of the 18th century (security number 4/59). Ekozhitlo LLC, Kyiv, 74 p. (In Ukrainian).

Cherevko I. A., 2023. Analytical note on the emergency situation on the territory of the Metropolitan Garden. Kyiv, 15 p. (In Ukrainian).

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. *Geological Journal*. No. 3 (388). Pp. 11–30. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.3.307769>.

Cherevko, I., Kril, T., Bugai, D., Shekhunova, S., 2024. Impact of hydrogeological factors on geotechnical conditions of the Kyiv-Pechersk Lavra Monastery complex: lessons from three decades of monitoring. *Acque Sotteranee – Italian Journal of Groundwater*. No. 13(3). Pp. 91–101. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.7343/as-2024-765>.

Gumuła-Kawęcka A., Jaworska-Szulc B., Szymkiewicz A., Górczewska-Langner W., Pruszkowska-Caceres M., Angulo-Jaramillo R., Šimůnek J., 2020. Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *Journal of Hydrology*. Vol. 605. P. 127283 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127283>.

Healy R. W., Cook P. G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*. Vol. 10. P. 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>.

Lv, M., Xu, Z., Yang, Z.-L., Lu, H., & Lv, M., 2021. A comprehensive review of specific yield in land surface and groundwater studies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. No. 13, e2020MS002270. <https://doi.org/10.1029/2020MS002270>.

Šimůnek, J., van Genuchten M. Th., 1999. Using the Hydrus-1D and Hydrus-2D codes for estimating unsaturated soil hydraulic and solute transport parameters, in van Genuchten, M. Th.,

КНУ, 2006. Оцінка інженерно-геологічних і гідрогеологічних умов та прогноз можливості виникнення і розвитку негативних геологічних процесів у межах будівельного майданчика і прилеглої до нього території у зв'язку з підсиленням фундаментів та будівництвом двоповерхової підземної частини Культурно-мистецького та музейного комплексу «Мистецький Арсенал» Звіт. Київський Національний університет ім. Т. Г. Шевченка, КНУБІА, Київ, 2006. 65 с.

Рибін В. Ф., Звольський С. Т., Куциба В. О., Ситнікова В. А. Літомоніторинг території Києво-Печерського заповідника з метою охорони історико-архітектурних пам'яток. Доп. НАН України, 2004, № 2, с. 136–142.

Старостенко В. И., Рыбин В. Ф., Звольский С. Т., Корчагин И. Н., Левашов С. П., Черевко И. А., Черный Г. И., Куциба В. А., Кетов Ю. А., 2006. Памятники Киево-Печерской лавры: геолого-геофизические наблюдения и использование их результатов для сохранения заповедника. *Геофиз. журнал*, т. 28, № 6, с. 3–28.

ТОВ «Екожитло», 2010. Підпірна стінка Верхньої Лаври (корпус 30-а) — пам'ятка архітектури місцевого значення XVIII ст. (охоронний № 4/59). ТОВ «Екожитло», м. Київ, 2010.

Черевко І. А. Аналітична записка щодо аварійної ситуації на території Митрополичого саду. Київ, 2023 р., 15 с.

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

Cherevko, I., Kril, T., Bugai, D., Shekhunova, S. Impact of hydrogeological factors on geotechnical conditions of the Kyiv-Pechersk Lavra Monastery complex: lessons from three decades of monitoring. *Acque Sotteranee – Italian Journal of Groundwater*. No. 13(3). P. 91–101 <https://doi.org/10.7343/as-2024-765>.

Gumuła-Kawęcka A., Jaworska-Szulc B., Szymkiewicz A., Górczewska-Langner W., Pruszkowska-Caceres M., Angulo-Jaramillo R., Šimůnek J. Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 605. P. 127283 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127283>.

Healy R. W., Cook P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*. 2002. Vol. 10. P. 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>.

Lv, M., Xu, Z., Yang, Z.-L., Lu, H., & Lv, M. A comprehensive review of specific yield in land surface and groundwater studies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2021. Vol. 13, e2020MS002270. <https://doi.org/10.1029/2020MS002270>.

Šimůnek, J., van Genuchten M. Th. Using the Hydrus-1D and Hydrus-2D codes for estimating unsaturated soil hydraulic and solute transport parameters, in van Genuchten, M. Th., F. J. Leij,

F. J. Leij, and L. Wu (eds.) Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, University of California, Riverside, CA. Pp. 1523–1536.

Šimůnek J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, van Genuchten M. Th., 2018. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Department Of Environmental Sciences University Of California Riverside Riverside, California. 310 p.

Van Genuchten M. Th., Leij F. J., Yates S. R., 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service Riverside, California. 85 p.

and L. Wu (eds.) Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, University of California, CA. Riverside. 1999. P. 1523–1536.

Šimůnek J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, van Genuchten M. Th. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Department Of Environmental Sciences University Of California Riverside Riverside, California. 2018. 310 P.

Van Genuchten M. Th., Leij F. J., Yates S. R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service Riverside, California. 1991. 85 P.

Manuscript received November 1, 2024;
revision accepted December 16, 2024.

¹Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна

²Національний заповідник
«Києво-Печерська лавра», Київ, Україна