

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.345841>

УДК 624.131.1:550.34

Геоінженерний моніторинг і стратегія збереження унікальних підземних споруд на прикладі Антонієвих печер, м. Чернігів

Т.В. Криль^{1*}, І.А. Черевко²

¹Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна; ²Національний заповідник «Києво-Печерська лавра», Київ, Україна

Geoengineering monitoring and preservation strategy for unique underground structures: the case of the St. Anthony's Caves, Chernihiv

T.V. Kril^{1*}, I.A. Cherevko²

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

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

Received / Надійшла до редакції:
09.08.2025

Received in revised form /
Надійшла у ревізованій формі:
05.10.2025

Accepted / Прийнята:
10.11.2025

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

Keywords: geoengineering monitoring, cultural heritage preservation, St. Anthony's Caves, Chernihiv, loess soils, microclimate, sustainable geological environment.

Ключові слова: геоінженерний моніторинг, охорона культурної спадщини, Антонієві печери, Чернігів, лесові ґрунти, мікроклімат, сталий розвиток.

This paper presents the results of engineering-geological, microclimatic, and geotechnical investigations of the St. Anthony's Caves complex, located within the landslide-prone slope of Boldyna Hill in Chernihiv, Ukraine. Together with St. Elijah Church, the St. Anthony's Caves represent a key monument of the National Architectural and Historical Reserve "Ancient Chernihiv" and are highly vulnerable to natural and anthropogenic impacts. Field surveys conducted on 9 July 2025 revealed active geohazards: soil collapses, delamination and spalling, condensation-induced wetting, and extensive mold growth. These processes are caused primarily by precipitation infiltration and insufficient ventilation. Instrumental measurements (SM150T – soil volumetric moisture, TESTO 606-2 – plaster moisture, MV-4M – psychrometer) recorded relative air humidity up to 96.7 % and soil volumetric moisture up to 27.8 %, significantly exceeding background values and indicating a high degree of water saturation. Spatial analysis performed in ArcGIS confirmed the influence of geomorphological conditions and the properties of loess-like deposits with high filtration capacity on the formation of unstable zones. Analysis of the seasonal dynamics of dew-point temperature and condensation conditions on the cave walls made it possible, for the first time, to identify risk levels for additional moisture accumulation on soil walls and to assess potential consequences for the technical condition of the complex. Numerical modelling of the stress-strain state of soils in the near-cave space showed a potential decrease in their structural strength and an increased risk of local rock falls during periods of active condensation on the cave walls. Based on the obtained data, a comprehensive set of measures is proposed: systematic monitoring, microclimate normalization, waterproofing protection, and slope stabilization. The research results provide a scientifically grounded basis for developing a comprehensive roadmap for the long-term preservation strategy of this underground historical and architectural complex. The integrated approach presented in the paper ensures an improved level of preservation of this unique hypogean monument and can be applied to other underground cultural heritage sites situated in similar geological settings.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2025. 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, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Цитування: Криль Т.В., Черевко І.А. Геоінженерний моніторинг і стратегія збереження унікальних підземних споруд на прикладі Антонієвих печер, м. Чернігів. *Геологічний журнал*. 2025. № 4 (393). С. 43–63. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.345841>

Citation: Kril T.V., Cherevko I.A. 2025. Geoengineering monitoring and preservation strategy for unique underground structures: the case of the St. Anthony's Caves, Chernihiv. *Geologichnij zhurnal*, 4 (393), 43–63. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.345841>

Вступ

Підземні споруди, зокрема печерні комплекси, відіграють визначальну роль у формуванні геокультурного ландшафту України, поєднуючи природні геологічні процеси з багатовіковою діяльністю людини. Збереження геокультурної спадщини України є складовою сталого розвитку, оскільки складає природний, історико-культурний та соціальний потенціал територій. Печерні комплекси, в тому числі Антонієві печери в Чернігові, являють собою унікальні об'єкти, що потребують інтегрованого підходу до охорони з урахуванням як культурної, так й інженерно-геологічної складової. Зростання урбанізаційного тиску та воєнних впливів, погіршення стану геологічного середовища, зсувні процеси, підвищена вологість і кліматичні зміни створюють загрозу їх стабільності. У сучасних умовах важливо застосовувати новітні методи моніторингу, моделювання та прогнозування для збереження таких об'єктів. Це відповідає принципам ЮНЕСКО та Цілям сталого розвитку ООН (SDG 11 – «Сталий розвиток міст і громад») і сприяє формуванню екологічно безпечного середовища. Таким чином, дослідження геокультурних об'єктів як елементів геологічного середовища має не лише наукове, але й соціально-економічне значення для України.

Станом на 2025 р. в Україні налічується близько 20 історико-культурних заповідників із статусом національних. Серед них безпосередньо охороняють штучно створені печерні комплекси, що мають архітектурно-історичне значення: Дальні та Ближні печери Національного заповідника «Києво-Печерська лавра», Антонієві печери Національного архітектурно-історичного заповідника «Чернігів стародавній», археологічні печерні комплекси Трипільської культури Музею-заповідника «Берестець», підземні ходи та крипти під спорудами Національного заповідника «Софія Київська».

В умовах відсутності чітко визначених на державному рівні методик і вимог до аналізу стану таких об'єктів найбільш повно та на засадах комплексного підходу виконується моніторинг стану підземних споруд Києво-Печерської лаври. Організовано не тільки геодезичні, гідрогеологічні режимні спостереження, а й віброметричний моніторинг, аналіз стану зволоження геофізичними методами тощо (Krill et al., 2023, 2024; Черевко та ін., 2024; Cherevko et al., 2024). Вперше впроваджено цифрову геодезичну ме-

режу та 3D-лазерне сканування, що дозволило простежити деформації підземних ходів (Shults et al., 2019). Накопичений значний практичний досвід з реставраційних робіт кінця 1970-х – початку 1980-х років на Ближніх і Дальніх печерах Києво-Печерської лаври й Антонієвих печер у м. Чернігів, проведених у 1990-х роках, що враховують упорядкування температурно-вологісного режиму підземних споруд та улаштування вентиляційних систем.

Аналіз світового досвіду збереження підземних культурних і релігійних об'єктів у складних геологічних умовах показує, що у складі досліджень їх стану виконуються 3D-лазерне сканування для геометричного моніторингу деформацій; георадарні обстеження й електророзвідка (ERT) для оцінки зволоження та пустот у ґрунтах; мікрокліматичні сенсори для контролю внутрішнього середовища; сейсмічні датчики для контролю коливань ґрунту; фотограмметрія та цифрові зйомки для документації стану та планування реставрацій (Toomey, 2009; Chiarini et al., 2022; Bonini et al., 2023).

Заходи щодо стабілізації мікроклімату, біологічного контролю плісняви, обмеження відвідувань або віртуальні тури є найвідомішими та практичними заходами, що застосовуються, зокрема, у Prehistoric Sites and Decorated Caves of the Vézère Valley (Франція), Ajanta and Ellora Caves (Індія), Caves of Aggtelek Karst and Slovak Karst (Угорщина, Словаччина), El Castillo and Covalanas (Іспанія) (Singh et al., 2019; Caves..., 2020; Prehistoric..., 2021; Lange-Enyedi et al., 2023; Fernandez-Cortes et al., 2025).

Для печер з підвищеною вологістю або впливом інфільтрації вод, наприклад, Scaloria Cave в Італії, доцільним виявився геофізичний моніторинг (ERT, GPR) у поєднанні з цифровою реконструкцією підземного простору (Maerker et al., 2023). У випадках з високим ризиком осипання та зсувів, таких як Maltravieso Cave (Іспанія) та Longmen Grottoes (Китай), ключову роль відіграє інтеграція фотограмметрії, мікросейсмічного та кліматичного моніторингу (Sun et al., 2023; Zhang et al., 2023; Benrabah et al., 2024).

Печерні комплекси, що мають релігійний аспект, – Vardzia (Грузія) та Göreme (Туреччина), зазнають дії природних процесів – сейсмічні впливи, осідання та руйнування схилів. Для їх збереження застосовано геодезичний моніторинг, використання інклінометрів, геомеханічне моделювання розвитку тріщин і лазерне

3D-сканування, що дозволило оцінити об'єми потенційно нестабільних блоків і розробити рекомендації щодо укріплення; стабілізація схилів здійснюється закладанням анкерних систем і дренажу (Aydan, Ulusay, 2003; Margottini et al., 2015).

У цілому, деградація геологічного середовища історичних ареалів урбанізованих територій є однією з найгостріших проблем сучасного урбогеологічного менеджменту, що поєднує природні геодинамічні процеси з антропогенним впливом і кліматичними змінами. Антонієві печери та Іллінська церква – модельний приклад підземного комплексу XI–XII ст., прорізаний у лесоподібних суглинках і моренних супісках зсувонебезпечного схилу, зазнає комплексної деградації внаслідок інфільтрації атмосферних опадів, суфозії, зниження міцності ґрунтів при зволоженні та порушення мікроклімату при неконтрольованому відвідуванні.

Метою нашого дослідження була детальна оцінка сучасного інженерно-геологічного стану Антонієвих печер та Іллінської церкви, виявлення чинників руйнування та деградації геологічного середовища, розробка рекомендацій щодо моніторингу та стабілізації схилів і підземних систем у контексті сталого розвитку території.

Для досягнення мети виконано такі завдання: збір та аналіз інженерно-геологічних досліджень території Болдиної гори, у тому числі архівних матеріалів; проведення польових робіт: візуальне обстеження об'єктів, інструментальні заміри температури, вологості та рівнів ґрунтових вод; просторове моделювання положення печер із використанням геоінформаційних технологій для уточнення взаємозв'язку між інженерно-геологічними елементами (ІГЕ) та зонами ризику; оцінка мікрокліматичних умов печерного простору (температура, вологість, повітрообмін) та їх вплив на стабільність порід і збереження архітектурних елементів; математичне моделювання зміни напружено-деформованого стану ґрунтів печер у залежності від зміни вологості; узагальнення результатів у вигляді схем полів температури, вологості повітря та ґрунту, епюри вертикального розподілу вологості; формулювання висновків щодо механізмів руйнування та розроблення диференційованих рекомендацій щодо інженерного захисту схилу, нормалізації мікроклімату, реставрації та постійного моніторингу.

Об'єктом дослідження були компоненти геологічного середовища схилу Болдиної гори разом із підземними спорудами – Антонієвими печерами та іншими штучними культурними об'єктами. Предмет дослідження – інженерно-геологічні, мікрокліматичні та гідрогеологічні процеси, що визначають стійкість і збереження підземних споруд Антонієвих печер і надземних конструкцій Іллінської церкви, а також методологічні підходи до їх моніторингу та збереження.

Матеріали та методи

Візуальні обстеження проведено на всіх об'єктах у межах схилу Болдиної гори. Увагу приділено ознакам зсувної небезпеки, ширині розкриття зафіксованих тріщин, появі «свіжих» деформацій, конденсації на стінах печер, біологічному ураженню тощо. Фотофіксацію здійснено з доступних ракурсів, у природних кольорах, у печерах із спалахом або при додатковому підсвічуванні.

Інструментальні обстеження виконано для визначення таких характеристик:

- температура та відносна вологість повітря у печерах – аспіраційний психрометр МВ-4М;
- об'ємна вологість ґрунту стін печер – прилад SM150T (вісім точок);
- вагова вологість штукатурки у підземних церквах і галереях – вимірювач вологості TESTO 606-2;
- рівні ґрунтових вод – у свердловинах глибиною 4,4–6,0 м – акустичний рівнемір хлопавка.

Геопросторову прив'язку топографічних планів, план-схем печер та архівних матеріалів, побудову тривимірної моделі схилу з основними об'єктами виконано у застосунку Surfer. Просторовий аналіз полів температури та вологості повітря проведено засобами ArcGIS. Інженерно-геологічні розрізи та моделі для математичного моделювання напружено-деформованого стану масиву створено в системі автоматизованого проєктування AutoCAD.

Узагальнення результатів у вигляді схем розподілу температури, відносної вологості повітря та об'ємної вологості ґрунту здійснено методом інтерполяції зворотних зважених відстаней.

Графік граничних умов конденсації вологи від температури та відносної вологості повітря печер побудовано на основі розрахунку температури точки роси T_d за удосконаленою апроксимацією Мангуса–Тетенса, що має найменшу похибку ($< 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) у діапазоні температур $0...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Alduchov, Eskridge, 1996).

Аналіз змін напружено-деформованого стану ґрунтів навколо перерізу печери при конденсації вологи та визначення зон пластичних деформацій проведено чисельним методом з використанням пакета кінцево-елементного аналізу PLAXIS (PLAXIS 2D..., 2025; Manuals..., 2025). При побудові моделі використано ґрунтові класери для задання основних ІГЕ розрізу, тунель – для створення печерного перерізу. Для всіх ІГЕ застосовано модель Мора-Кулона. Геометричну модель ґрунтових кластерів імпортовано у форматі *.DXF.

Розв'язувалась плоска задача. Методом кінцевих елементів розрахункову область було дискретизовано на 4020 15-вузлових трикутних елементів дрібної та середньої крупності. Моделювання процесу нелінійного деформування здійснено ітераційним покроковим методом. Розрахунок проведено за етапами, що відображають послідовність подій від природного напруженого стану, утворення виробки, замочення ґрунтів від поверхні стіни у глиб ґрунтового середовища за рахунок конденсації вологи впродовж 60 та 120 діб. На відповідних етапах для зон замочення, розміри яких визначено аналітично, застосовували знижені на 25–30 % значення фізико-механічних характеристик відповідно до результатів лабораторних досліджень впливу водонасичення на міцність та деформаційні властивості ґрунтів монолітів, відібраних безпосередньо в Антонієвих печерах (Рыбин и др., 1995).

Порівняльний аналіз геологічної будови території Болдиної гори у м. Чернігів та інженерно-геологічних умов території Києво-Печерської лаври й урочища Церковщина у м. Київ показав їх високу схожість, що дало змогу застосувати метод аналогій та використати для чисельного моделювання параметри вологоперенесення, раніше встановлені для умов Києво-Печерської лаври. Глибину проникнення конденсованої вологи в ґрунтову стінку печер визначено за графічними залежностями характеристик вологоперенесення у супіщаних і суглинистих ґрунтах – між об'ємною вологістю та тиском всмоктування, а також між тиском всмоктування та коефіцієнтом вологопровідності, наведеними в роботах (Комплексные..., 1991; Рыбин и др., 1999; Ситников, 2010; Селівачова, Стадніченко, 2012).

Для виконання досліджень було використано такі матеріали: план території Національного архітектурно-історичного заповідника

«Чернігів стародавній»; карти геологічної будови території масштабу 1:200 000 (Геологическая..., 1973; Державна..., 2004); дані інженерно-геологічних вишукувань масштабів 1:100, 1:500 (Грыва и др., 1973; Каубов, Богданов, 1974; Файвишенко и др., 1990; Рыбин и др., 1995); матеріали моніторингових спостережень за мікрокліматом у печерному комплексі (Файвишенко и др., 1990; Рыбин и др., 1995); результати історичних та археологічних досліджень, технічна документація (Файвишенко и др., 1995).

Результати

Інженерно-геологічні умови південного схилу Болдиної гори

Об'єкт історичної спадщини – комплекс Антонієвих печер та Іллінська церква – знаходиться у південно-західній частині м. Чернігів, на схилах Болдиної гори. У геоструктурному відношенні територія досліджень розташована в північній частині Центрального грабена Дніпровсько-Донецької западини. Кристалічний фундамент залягає на глибині 3,5–4,0 км і перекривається потужною товщею осадових порід палеозою, мезозою та кайнозою (Геологическая..., 1973; Державна..., 2004). У верхній частині геологічної будови представлені відклади четвертинної, неогенової та палеогенової систем.

Болдина гора знаходиться в правобережній частині долини р. Десна (рис. 1), яка утворює тут широкі вигини та заводи. У геоморфологічному відношенні на прилеглій до підземного комплексу території виділяються моренно-зандрова рівнина (плато), I та II надзаплавні тераси, а також заплава р. Десна. Абсолютні позначки поверхні цих геоморфологічних елементів становлять відповідно 140–150, 113–135, 110–125 та 105–110 м. Висота плато над рівнем заплави на ділянці сягає 23–25 м. Ділянка терасована, з двох боків обмежена ярами. Із заходу яр має глибину врізу близько 20 м, ширина по тальвегу – 10–30 м, по ньому відбувається основний поверхневий стік. На схід від церкви розташовані два невеликих яри, що активно ростуть та огинають з обох боків останець плато з могилою письменника М.М. Коцюбинського. Ерозійна діяльність поверхневих вод проявляється в поступовому заглибленні ярів, зростанні їх вершин і формуванні конусів виносу на гирлових ділянках.

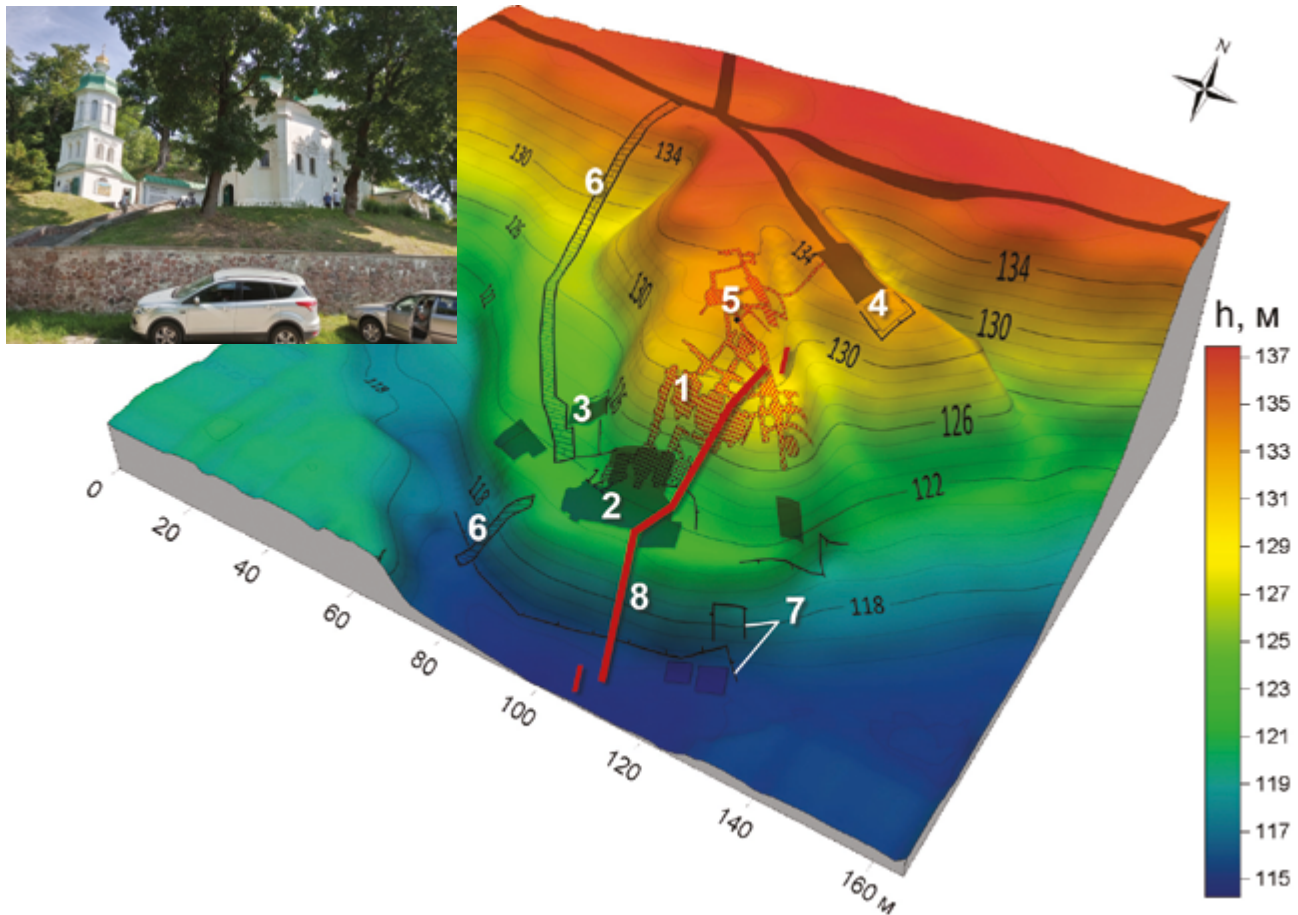


Рис. 1. Схил Болдиної гори: 1 – комплекс Антонієвих печер; 2 – Іллінська церква; 3 – дзвіниця; 4 – могила М.М. Коцюбинського; 5 – вихід вентиляційної труби з печер на поверхню; 6 – сходи; 7 – підпірні стінки; 8 – лінія інженерно-геологічного розрізу I-I. Вверху ліворуч – вид на дзвіницю та Іллінську церкву, фото Т.В. Кріль, липень 2025 р.

Fig. 1. The slope of Boldyna Hill: 1 – the St. Anthony's Caves complex; 2 – the St. Elijah Church; 3 – the Bell Tower; 4 – the M.M. Kostyubynskyi memorial chapel; 5 – the surface outlet of the ventilation pipe from the caves; 6 – stairs; 7 – retaining walls; 8 – the line of engineering-geological cross-section I-I. Top left – view of the Bell Tower and the St. Elijah Church, photo by T.V. Kril, July 2025

Схил задернований, зайнятий поодинокими деревами та кущами. Кути нахилу, що мають значення для стабільного стану схилу, варіюються в діапазоні до 30–40°. Найнебезпечніші діапазони крутизни схилу із значеннями понад 20° поширені на 16 % території досліджень, кути 11–20° – 26 %, 5–11° – 30 %, менше ніж 5° – 28 %.

На крутому схилі Болдиної гори між вулицями О. Довженка й Іллінською розташовані Іллінська церква та її дзвіниця, Антонієві печери, могила М.М. Коцюбинського, нижче церкви – приватні садиби з городами. Територія досліджень повністю знаходиться в межах Національного архітектурно-історичного заповідника «Чернігів стародавній». Схил Болдиної гори укріплений низкою підпірних споруд – підпірними стінами висотою 1–2 м, у нижній частині схилу – на буронабивних палях (див. рис. 1).

Для ділянки досліджень характерна активна зсувна діяльність в цілому. На схід від церкви, на

межі між присадибною ділянкою у 1990 р. було виявлено ерозійний уступ висотою 0,5–1,0 м, а також зсув-опливіну довжиною понад 20 м і шириною близько 6 м (Файвишенко и др., 1990). Нижче стінки відриву утворилася тріщина глибиною до 1,0 м, куди потрапляли поверхневі води, значно прискорюючи зсувний процес. При подальшому розвитку цей зсув може оголити найближчі печери. Під східною частиною церкви також розвивається зсув-опливіна площею близько 300 м²: один – спрямований на південний схід уздовж лінії стику I та II надзаплавних терас, другий – на південний захід, уздовж сходів, що ведуть до церкви. Основною причиною зсувів автори роботи (Файвишенко и др., 1990) вважають утворення верховодки на водотривкому шарі моренних суглинків.

На території досліджень наявні ознаки активної зсувної діяльності, що на момент огляду мають застабілізований характер у цілому. Вони проявляються в деформаціях ґрунтів, потужні

доріжок, простору біля фундаментів споруд, утворенні тріщин у стінах Іллінської церкви тощо. Спостерігається також водна ерозія прилеглих ярів, яка сприяє активізації зсувного процесу, загрожує збереженню Антонієвих печер та могили М.М. Коцюбинського.

Замощення біля фундаменту Іллінської церкви порушене тріщинами зсувного характеру. У 1970-х роках прилегла територія була оснащена глибинними та поверхневими реперами за зміщенням ґрунтового масиву. На сьогодні реperi потребують відновлення. На розвиток зсувних процесів вказує наявність похилих дерев (так званий «п'яний ліс») (рис. 2, а). Деформація пішохідних доріжок у парку на брівці яру та подальша лінійна ерозія на схилах призводять до розвитку суфозійних процесів, що проявились у вигляді порожнин під замощенням (рис. 2, б). Про активацію зсувних процесів у останні роки також свідчать тріщини, періодичні вивали каменів із підпірної стінки нижче церкви. Розвитку зсувів також сприяє таке: штучне терасування території, виконане до покрівлі моренних суглинків; розпушування ґрунтів і подальший площовий змив на присадибних ділянках.

Геологічна будова схилу на розвідану глибину 13–15 м представлена зверху вниз такими ІГЕ: сучасні та поховані ґрунти; лесоподібні супіски та суглинки; моренні та флювіогляціальні суглинки, супіски та піски; неогенові полтавські та палеогенові харківські піски (рис. 3). Заплавні тераси та заплава складені делювіально-пролювіальними й алювіальними відкладами, що підстеляються полтавськими пісками.

Еолово-делювіальні лесоподібні ґрунти складають верхню частину розрізу II надзапавної тераси. В їх товщі виділяють піски, супіски, суглинки та поховані ґрунти (ІГЕ 7, 8, 9) (див. рис. 3). Загальна потужність лесоподібних відкладів становить 2,9–4,6 м. Супісок ІГЕ 7 має просідні властивості, з коефіцієнтом просідання 0,001–0,036 в інтервалі навантажень 0,5–4,0 кг/см².

У розрізі лесоподібні ґрунти підстилаються моренними суглинками (ІГЕ 10), що поширені повсюдно та формують II надзапавну терасу. Моренні відклади жовтуваті та червоно-бурі із включеннями гальки та гравію кристалічних порід. Їх потужність досягає 5,0–5,8 м. Товща розбита системою заповнених карбонатним матеріалом вертикальних тріщин, ширина яких може сягати 4–5 мм. За об'ємною вагою суглинків відноситься до щільного.

Під мореною залягають флювіогляціальні супіски (ІГЕ 11) голубувато- та зеленувато-сірі, з прошарками пилюватого піску. Потужність шару змінюється від 1,3 до 4,65 м. Супіски мають високу швидкість розмокання.

У табл. 1 наведено основні фізико-механічні характеристики ґрунтових шарів, які формують геологічне середовище підземного печерного комплексу, ІГЕ відповідають нумерації на рис. 3.

Характерними особливостями перешарування ґрунтів схилу є наявність розпушених насипних відкладів, що легко передають вологу у ґрунтові шари нижче. Лесоподібні та моренні відклади, маючи високу вертикальну фільтраційну здатність, формують умови просочення поверхневих вод на значні глибини та додаткового зволоження



Рис. 2. Руйнування мощення та ознаки «п'яного лісу» біля Іллінської церкви (а); ознаки суфозійних процесів на схилах Болдиної гори поряд із сходами (б). Фото Т.В. Кріль, липень 2025 р.



Fig. 2. Damage to the pavement and signs of a “drunken forest” near the St. Elijah Church (a); indications of suffusion processes on the slopes of Boldyna Hill next to the stairs (b). Photo by T.V. Kril, July 2025

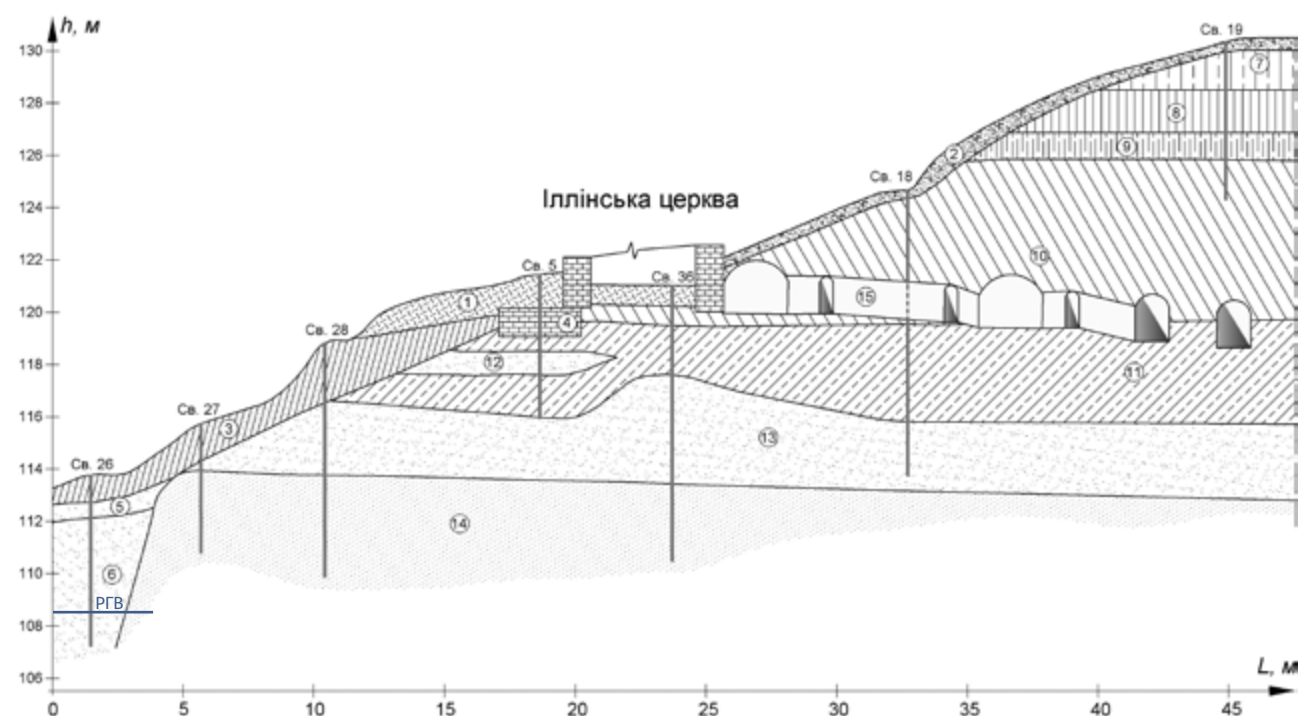


Рис. 3. Інженерно-геологічний розріз Болдиної гори по лінії I-I: 1 – сучасний насипний ґрунт – будівельні відходи (уламки цегли, штукатурки) із супіщаним заповнювачем (tH); 2 – ґрунтово-рослинний шар – супісок гумусований, з корінням рослин (eH); 3 – насипний ґрунт – супісок легкий, гумусований (tH); 4 – цегляна кладка; 5 – пісок різнозернистий (dP_{III}-H); 6 – пісок дрібний до пилуватого (a¹P_{III}); 7 – супісок лесоподібний, пилуватий, макропористий, карбонатний (e,vdP_{III}bg); 8 – суглинок лесоподібний, пилуватий, макропористий, карбонатний (evdP_{III}bg); 9 – похований ґрунт – супісок гумусований (e,vdP_{III}); 10 – суглинок моренний, щільний (gP_{II}dn); 11 – супісок пилуватий (fglP_{II}dn); 12 – пісок пилуватий (fglP_Idn); 13 – пісок різнозернистий (fglP_Idn); 14 – пісок дрібний до пилуватого (N_Inp); 15 – печери, нижній ярус

Fig. 3. Engineering-geological cross-section of Boldyna Hill along line I-I: 1 – technogenic deposits (tH); 2 – humus-rich sandy loam with plant roots (eH); 3 – fill soil of light, humus-rich sandy loam (tH); 4 – brick masonry; 5 – medium- to coarse-grained sand (dP_{III}-H); 6 – fine to silty sand (a¹P_{III}); 7 – loess-like sandy loam, macroporous, calcareous (e,vdP_{III}bg); 8 – loess-like loam, macroporous, calcareous (evdP_{III}bg); 9 – buried soil of humus-rich sandy loam (e,vdP_{III}); 10 – dense moraine loam (gP_{II}dn); 11 – sandy loam (fglP_{II}dn); 12 – silty sand (fglP_Idn); 13 – medium- to coarse-grained sand (fglP_Idn); 14 – fine to silty sand (N_Inp); 15 – lower tier of the caves

ґрунтів, в яких пройдені печери при аномальних синоптичних ситуаціях (зливи, танення снігового покриву). За даними попередніх досліджень (Рыбин и др., 1995) було встановлено суттєве зниження міцнісних властивостей моренних і флювіогляціальних ґрунтів при зволоженні. Так, при зволоженні моренного суглинку модуль його осідання зріс з 2–12 до 78 кг/см². Кут внутрішнього тертя флювіогляціальних супісків зменшився з 30° до 21°, а зчеплення – з 15 до 6 кПа.

Перший від поверхні безнапірний водонесний горизонт приурочений у верхній та середній частинах схилу до полтавських і харківських пісків, у нижній частині схилу – до сучасних алювіальних пісків. Рівень ґрунтових вод залягає на позначках 108–111 м, що на 9–12 м нижче фундаментів церкви та на 10–15 м нижче підлоги печер. Сезонні коливання становлять 0,14–0,5 м. Поблизу церкви на відмітці 119,54 м була зафіксована верховодка (Файвишенко и др., 1990), її утворення характерно для періодів дощів і весняного сніготанення.

Таблиця 1. Основні фізико-механічні характеристики окремих ІГЕ схилу Болдиної гори

Table 1. Main physical and mechanical properties of selected engineering-geological elements of the Boldyna Hill slope

№ з/п	№ ІГЕ	Питома вага γ_{unsat} , кН/м ³ *	Питома вага γ_{sat} , кН/м ³	Модуль деформації при природній вологості, кН/м ²	Коефіцієнт Пуассона	Зчеплення, кН/м ²	Кут внутрішнього тертя, °	Коефіцієнт фільтрації, м/добу
1	ІГЕ-7	17,7	18,6	9000	0,4	6	24	0,01
2	ІГЕ-8	16,9	19,7	18 000	0,4	20	21	0,05
3	ІГЕ-9	16,8	19,4	13 000	0,35	18	22	0,01
4	ІГЕ-10	18,7	19,5	10 300	0,3	18	30	0,02
5	ІГЕ-11	18,1	19,4	14 000	0,3	10	22	0,01
6	ІГЕ-13	17,5	21	12 000	0,3	–	28	2

* Величини наведено в одиницях виміру програмного застосунку PLAXIS.

Виконані нами заміри рівнів ґрунтових вод у свердловинах у приміщенні Іллінської церкви, з правого боку на вулиці та біля входу у печери показали відсутність ґрунтових вод, глибина свердловин сягає 4,4–6,0 м.

Загрозу збереженню Антонієвих печер становить акумуляція поверхневих вод у знижених ділянках схилу з подальшою їх інфільтрацією. Найімовірніше, верховодка формується по покрівлі похованого ґрунту, моренних суглинків і супісків у межах нижньої частини схилу, де ці відклади перекриті малопотужним шаром сучасного ґрунту, насипних або лесоподібних відкладів.

Стан комплексу Антонієвих печер, мікрокліматичні та геотехнічні дослідження

Антонієві печери являють собою складний підземний архітектурний комплекс із високими підземними церквами Антонія, Феодосія та Миколи Святоші, коридорами, нішами та келіями. Всі вони відрізняються за величиною та формою. Середня площа – 10–20 м². Пройдені в ґрунті невеликі приміщення не мають кріплення, а великі галереї укріплені цеглою. Ширина галерей – 0,5–0,8 м, камер – 2,1–2,8 м, висота галерей – 1,73–2,0 м, висота приміщень церков (притвори, нефи, вівтарі) – 3–5 м. Покрівля ходів і камер склепінчаста. Об'єм печер становить близько 4000 м³. У XVIII–XIX ст. печери неодноразово реконструювали. У печерах не зберігаються «святі» мощі – муміфіковані останки релігійних і культурних діячів минулого, у верхньому ярусі є кістниця.

Антонієві печери прорізані в товщі моренних і флювіогляціальних супісків і суглинків, а також лесоподібних супісків і суглинків; у ґрунтах нижніх ярусів трапляються флювіогляціальні піски. Глибина печерного комплексу становить 1,0–12,0 м від денної поверхні. В цілому його розділяють на верхній та нижній яруси. При детальному поділі можна виділити 3–4 яруси за глибиною з різницею у рівнях до 5 м. Перший нижній ярус – безпосередньо вхід і притвор церкви Антонія, у другому ярусі розміщені церкви Феодосія й Антонія, у третьому – каплиця, галереї, а в четвертому верхньому – церква Миколая Святоші, келія, камери та галереї.

Для Антонієвих печер характерний комплекс несприятливих явищ, що призводять до руйнування печер (рис. 4). При обстеженнях було зафіксовано таке: тріщини заколу (відколу) у масиві ґрунту, відшарування приповерхневих шарів ґрунту, локальні осередки вивалів на стінах

і склепіннях, вивал ґрунту та мікропереміщення, суфозійне винесення глинистого матеріалу по тріщинах і формування «вимивних» ґрунтів, утворення конденсату на металевих елементах конструкцій (на вході до нижнього ярусу), наявність плям перезволоження на цегляних поштукатурених склепіннях і стінах підземних церков, розвиток кореневої системи рослин неясного генезису, що сприяють руйнуванню печер, поява плісняви та грибів на ґрунтових стінах і дерев'яних елементах (декоративних, конструктивних тощо) нижнього ярусу та навпроти ламп освітлення.

Аналіз попередніх досліджень та польові обстеження дозволили простежити такі причинно-наслідкові зв'язки між небезпечними інженерно-геологічними процесами та зволоженням. Обрушення та вивали ґрунтових стін у нижньому ярусі зумовлені перезволоженням будівельних конструкцій (ґрунтів) унаслідок всмоктування вологи з повітряного простору печер, інфільтрації атмосферних опадів, зумовлених фільтраційними характеристиками вміщувачої ґрунтової товщі та геоморфологічними особливостями місцевості (а саме близьким розташуванням нижнього ярусу до схилу яру, а також можливим вертикальним привантаженням перезвожених вищеяляючих шарів ґрунту). Утворення тріщин заколу (відколу) у масиві ґрунту стін нижнього ярусу зумовлене, вірогідно, геоморфологічними особливостями місцевості (близьким розташуванням нижнього ярусу до схилу яру), а також розвитком зсувних зрушень.

Відшарування приповерхневих шарів і локальні осипання ґрунту зі стін і склепінь зумовлені перезволоженням ґрунтів унаслідок всмоктування вологи з повітряного простору печер.

Утворення конденсату на металевих елементах кріплення, плям перезволоження на цегляних поштукатурених склепіннях і стінах підземних церков, грибів і плісняви на стінах і склепіннях зумовлено підвищеною вологістю повітря та властивостями поверхонь, на яких є зазначені прояви.

На окремих ділянках зафіксовано порушення поверхневого шару штукатурки, що може бути пов'язано з недотриманням технології нанесення розчину, низькою якістю матеріалів, змінами температурно-вологісного режиму тощо.

Антонієві печери характеризуються такими складними інженерно-геологічними умовами:



Рис. 4. Вивали ґрунту на спостережній точці 14 (а), між точками 11 та 12 (б); тріщини заколу (відколу) у масиві ґрунту галерей (в, г); біоураження на стінах (д); проростання коріння рослин на склепінні (е). Фото Т.В. Кріль та І.А. Черевко, липень 2025

Fig. 4. Soil collapses at observation point 14 (a), and between points 11 and 12 (b); fracture cracks in the soil mass of the galleries (в, г); biological damage on the walls (д); plant root growth on the vault (e). Photos by T.V. Kril and I.A. Cherevko, July 2025

розташуванням у зсувонебезпечному схилі, особливими деформаційними та фільтраційними характеристиками ґрунтів, високою відносною вологістю повітря (до 97 %) та уповільненим повітрообміном, що створює умови для поступового руйнування склепінь і стін.

Геотехнічними особливостями печерного комплексу є розташування галерей у схилі Болдиної гори з перепадом висот до 20 м між яружними системами, наявність двох ярусів галерей, різні характерні літологічні та фізико-механічні властивості ґрунтів (ІГЕ), в яких вони розміщені. Це необхідно враховувати при проектуванні заходів інженерного захисту підземних об'єктів.

Метеоумови на денній поверхні, зокрема опади, температурні коливання й ерозійні процеси

в яружній системі гори, значно впливають на стабільність ґрунтів і прискорюють деградацію підземного простору. Підвищена вологість та утруднений повітрообмін сприяють утворенню конденсату, розвитку грибів, плісняви та кореневих систем рослин, що загрожують структурній цілісності печерних галерей. Корені мають чорний, іноді білястий колір, їх видима довжина становить від кількох міліметрів до 20–30 см, товщина – 0,1–0,5 см. Розроблення та впровадження будь-яких заходів у комплексі печер має проводитись з урахуванням стану та змін мікроклімату в галереях, метеорологічних умов на денній поверхні та режиму відвідування.

Особливості мікроклімату характеризуються параметрами температури (Т) та відносної

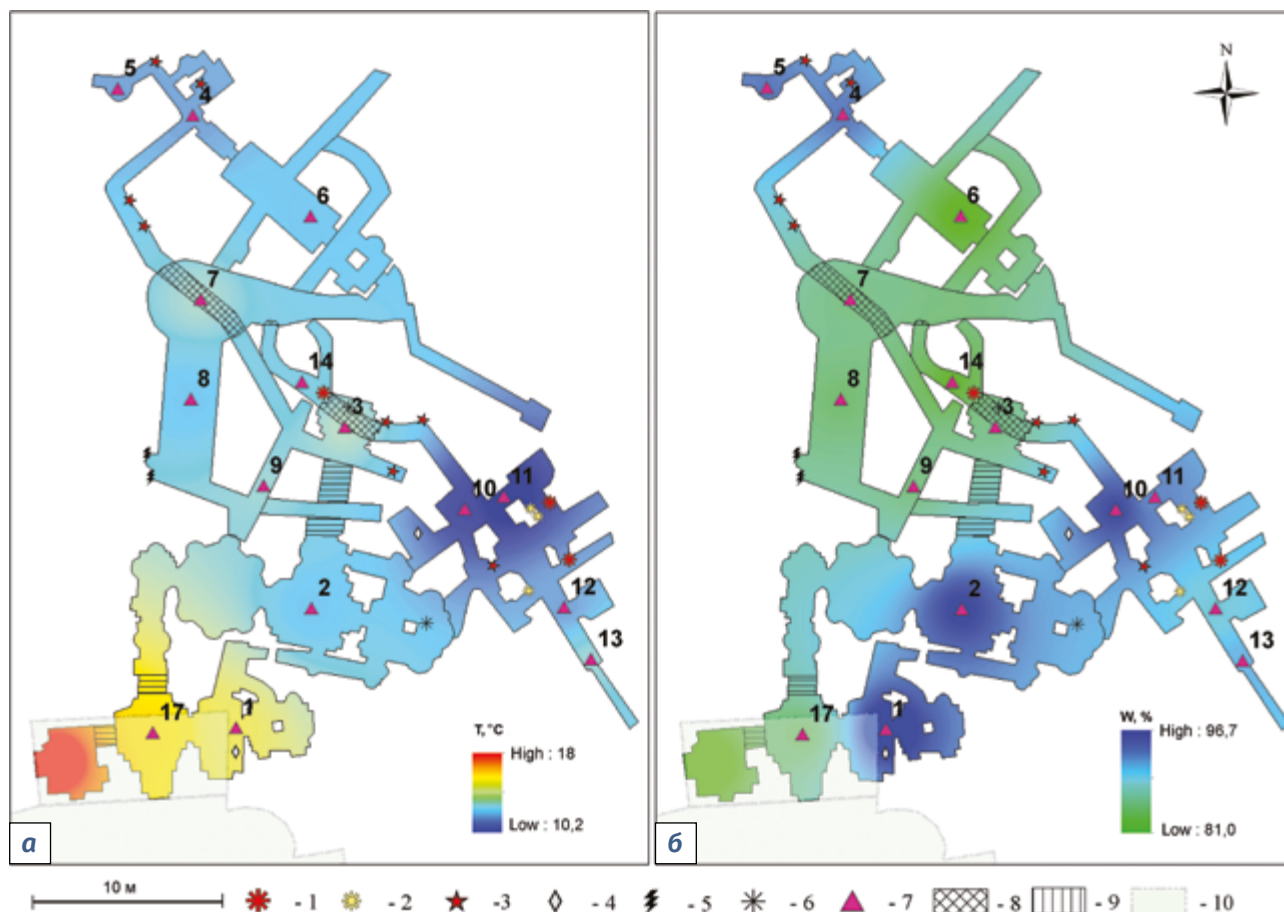


Рис. 5. Температурне поле, °C (a) та поле відносної вологості повітря, % (б), станом на 09.07.2025: 1 – вивали ґрунту; 2 – відшарування ґрунту, тріщини заколу; 3 – біоураження; 4 – конденсація вологи; 5 – проростання коріння рослин; 6 – тріщини на склепінні; 7 – точки фіксації температури (Т) та вологості (W) повітря; 8 – місця накладання верхнього та нижнього ярусів; 9 – сходи; 10 – Іллінська церква

Fig. 5. Temperature field, °C (a) and relative air humidity field, % (b), as of 9 July 2025: 1 – soil collapses; 2 – soil delamination, fracture cracks; 3 – biological damage; 4 – moisture condensation; 5 – plant root growth; 6 – vault cracks; 7 – points of temperature (T) and moisture (W) measurements; 8 – locations of overlap between the upper and lower tiers; 9 – stairs; 10 – St. Elijah Church

вологості повітря (W). За результатами виконаних замірів температура повітря змінюється від 10,2 °C на нижньому ярусі до 15,8 °C біля виходів (рис. 5). Відстань між суміжними пунктами спостережень – 2–12 м. За даними попередніх спостережень сезонні коливання температури на нижньому ярусі становлять 0,6–1,9 °C, на верхньому – 1,2–2,8 °C. Висока відносна вологість повітря 81,0–96,7 % характерна для всього року.

Комплексні дослідження, проведені в Ближніх печерах Києво-Печерської лаври, показують, що за відносної вологості повітря близько 100 % відбувається перехід пароподібної вологи з повітря в ґрунт, що призводить до зниження його деформаційних властивостей та спричиняє локальні обвалення зі склепін та стін печер (Рыбин и др., 1995). Також відмічено уповільнений повітрообмін у Антонієвих печерах. Він є чинником зниження температури та підвищення вологості

повітря в підземних галереях, посилення несприятливих явищ і прискореного руйнування печер.

На основі аналізу моніторингових даних (Рыбин и др., 1995) за параметрами мікроклімату печер побудовано графік граничних умов конденсації вологи від температури та відносної вологості повітря печер (рис. 6). Для порівняння проаналізовано умови, при яких відбувається вплив антропогенного навантаження та метеорологічних умов, що характерно для нижніх ярусів печер біля входу ($T_{\text{стіни}} \approx 8,5$ °C), та у природних умовах, на значній відстані від входу, де нема екскурсійного маршруту, у приміщеннях верхнього ярусу ($T_{\text{стіни}} \approx 10,5$ °C). Проведений порівняльний аналіз показав, що в зонах інтенсивного антропогенного навантаження та метеорологічного впливу (нижній ярус біля входів) температура точки роси протягом 7–8 місяців на рік перевищує температуру стін

на 1,5–3,5 °С, що зумовлює стійке утворення конденсату й інтенсивне зволоження ґрунтів. Натомість у віддалених ділянках верхнього ярусу (природний режим) розрахована температура точки роси T_d перевищує $T_{\text{стіни}}$ лише епізодично і не більше ніж на 0,5 °С, тому конденсаційна вологість тут практично відсутня.

У ближчих до входу ділянках постійно спостерігаються інтенсивне зволоження стін, капіж, активне зростання плісняви та біологічна деструкція ґрунтів, тоді як у віддалених ділянках конденсат утворюється лише епізодично в найтепліші літні місяці. Як показує аналіз, зі збільшенням відстані від входу до печери ризик утворення конденсату суттєво зменшується. Встановлено, що антропогенний фактор збільшує тривалість періоду ризику конденсації в 7,85 раза порівняно з умовами природного режиму.

Крім того, встановлено, що через нижчу температуру стін і сильніший метеорологічний та антропогенний вплив у нижньому ярусі в період стійкої конденсації ($T_d > T_{\text{стіни}}$) становить 7–8 місяців на рік, тоді як у верхньому ярусі в природних

умовах конденсат практично відсутній або триває не більше 3–6 тижнів у найспекотніші роки.

На схемі (див. рис. 6) виділено зони з різним рівнем ризику появи додаткового зволоження ґрунтових стін печер, характеристики яких подано у табл. 2. Конденсація змінює властивості ґрунтів через збільшення вологості, що знижує міцність на зсув, підвищує розчинність мінералів і сприяє ерозії. Графік дає можливість визначити тривалість періоду конденсації для визначення глибини дифузного проникнення вологи у ґрунти.

Вологість ґрунту у підземних галереях визначено приладом SM150T на восьми спостережних точках. Вона змінюється від 18,8 до 27,8 %, що перевищує природні показники. Перевищення є результатом пролонгованого впливу інфільтрації атмосферних опадів і всмоктування конденсату з ґрунтових поверхонь та зайвої вологи повітря. Поле вологості ґрунту відповідає полю вологості повітря. Найвищі значення вологості спостерігались у нижньому ярусі (точки 3, 4) та у віддалених відгалуженнях верхнього ярусу (точка 5).

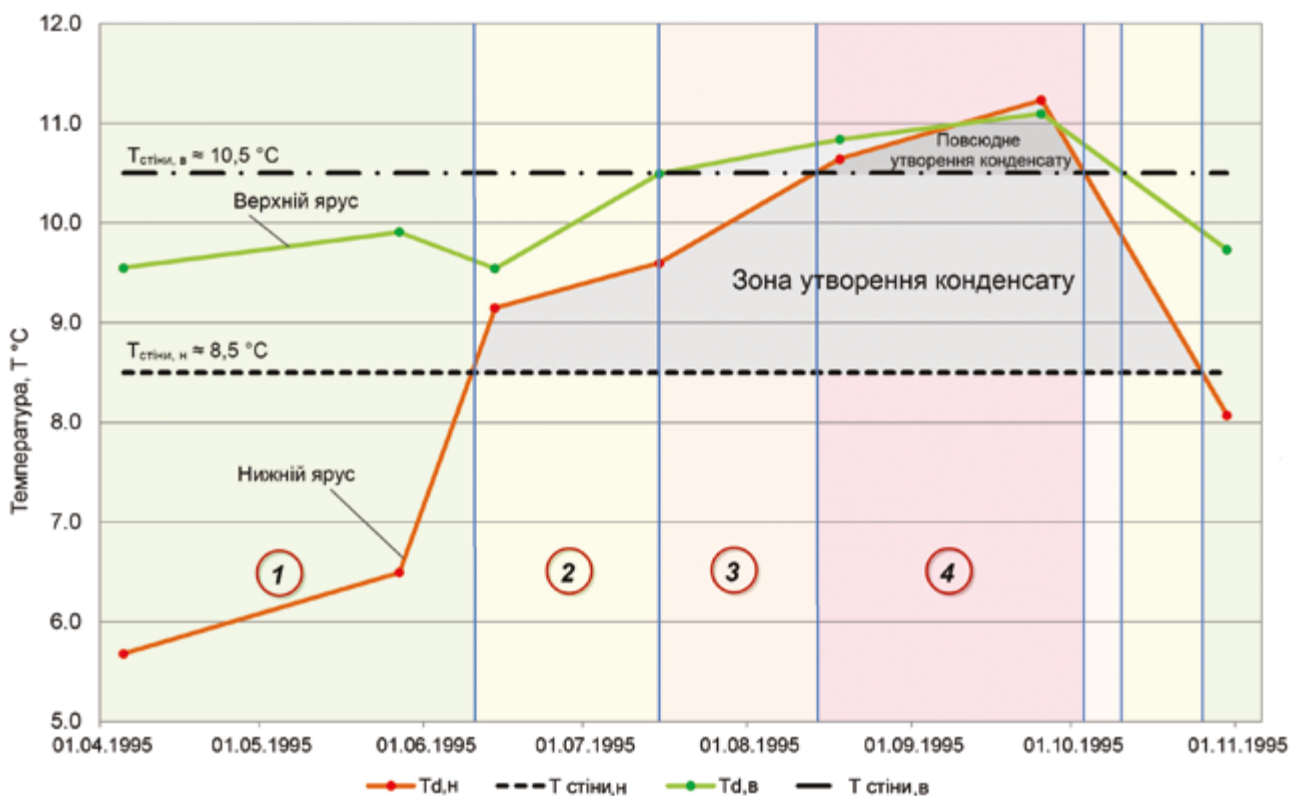


Рис. 6. Сезонна динаміка температури точки роси (T_d) та умов утворення конденсату на стінах комплексу Антонієвих печер: $T_{d,n}$ – температура точки роси нижнього ярусу (притвор церкви Феодосія Печерського), із сильним антропогенним і метеорологічним впливом; $T_{d,v}$ – температура точки роси верхнього ярусу (келія Антонія Печерського), природний режим без помітного антропогенного впливу; 1–4 – рівні ризику процесів конденсації (див. табл. 2)

Fig. 6. Seasonal dynamics of dew point temperature (T_d) and conditions for condensation formation on the walls of the St. Anthony's Caves complex: $T_{d,n}$ – dew point temperature of the lower tier (the vestibule of the St. Theodosius Pechersky Church), under strong anthropogenic and meteorological influence; $T_{d,v}$ – dew point temperature of the upper tier (the cell of St. Anthony Pechersky), natural regime without significant anthropogenic impact; 1–4 – risk levels of condensation processes (see Table 2)

Таблиця 2. Рівні ризику появи додаткового зволоження ґрунтових стін печер і вірогідні наслідки для технічного стану комплексу
Table 2. Risk levels of additional moisture formation on the cave soil walls and the likely consequences for the technical condition of the complex

№ з/п	Рівень ризику, зона	Період	Характеристика умов	Прояви процесів конденсації, наслідки
1	Зона стабільного мікроклімату	Весна – початок літа (квітень–початок червня); кінець жовтня	T_d нижнього та верхнього ярусів $< T_{\text{стін}}$ ($\Delta T=1,5-4,5$ °C)	Конденсат відсутній у всіх печерах. Стіни сухі, мінімальна біологічна активність. В осінній період відбувається припинення конденсації. Поступове висихання стін у нижньому ярусі, у верхньому – стіни сухі весь період
2	Зона контрольованого зволоження	Кінець весни – середина літа (червень–середина липня); друга половина жовтня	T_d нижнього ярусу перевищує $T_{\text{стін}}$ на $0,5-1,5$ °C; T_d верхнього ярусу нижче $T_{\text{стін}}$	Початок конденсації тільки в нижньому ярусі, біля входів. Поява перших вологих плям
3	Зона небезпечного зволоження	Літо (середина липня–середина серпня); перша половина жовтня	T_d нижнього ярусу продовжує зростати та перевищує $T_{\text{стін}}$ на $2,5-3,2$ °C; T_d верхнього ярусу зростає на $0,2-0,5$ °C над $T_{\text{стін}}$	Активний ризик: інтенсивний конденсат, капіж, постійне зволоження стін і підлоги в нижньому ярусі; у верхньому – слабкий або епізодичний конденсат лише в найтепліші тижні. Перезволоження починає суттєво впливати на матеріали стін і мікроклімат виробки
4	Зона критичного зволоження	Кінець літа – перша половина осені (серпень–вересень)	T_d нижнього ярусу швидко падає нижче $T_{\text{стін}}$; T_d верхнього ярусу завжди нижче $T_{\text{стін}}$	Найвищий ризик, пік: інтенсивний стабільний конденсат, капіж, постійне зволоження стін і підлоги в нижньому та верхньому ярусах. Найнебезпечніша фаза для стійкості суглинків, збереження підземного комплексу

У районі Чернігова середньорічна кількість опадів становить 639 мм, із них 247 мм – у холодний період і 392 мм – у теплий період року. Річні суми опадів коливаються в широких межах – від 326 до 783 мм (Climate..., 2025). Сніговий покрив у середньому тримається 102 дні на рік, причому 10 % зим не мають стійкого снігового покриву. Його середня висота – 23 см, найбільша – 56 см. Сумарне випаровування з водної поверхні становить 579 мм, а з поверхні суші – 540 мм.

Відповідно до інженерно-геологічного розрізу (див. рис. 2) шар пухкого насипного ґрунту, багаторазово порушеного численними похованнями впродовж останніх століть, створює сприятливі умови для швидкого транспортування вологи у нижчезалягаючі шари. Завдяки високим фільтраційним властивостям лесоподібних і моренних ґрунтів у вертикальному напрямку поверхневі та дощові води легко проникають на значну глибину, що призводить до додаткового загального зволоження масиву, в якому прокладено печери. У певні періоди, особливо під час інтенсивних опадів або танення снігу, спостерігається струминне витікання води по тріщинах із суфозійним винесенням глинистого матеріалу. Такі явища та процеси було зафіксовано в куполі однієї з підземних церков (Файвишенко и др., 1990).

Як правило, саме наведеними явищами та процесами зумовлені зміни природного температурно-вологісного режиму повітряного середовища та ґрунтів у склепіннях і стінах печер, а також в основах фундаментів наземних споруд.

Розподіл об'ємної вологості ґрунту (W , %) по перерізу печерної галереї знижується від склепіння, середини стіни і до підлоги відповідно 26,3 %, 22,0 %, 19,6 %, що вказує на наявність інфільтрації атмосферних опадів.

Відповідно до сезонної динаміки температури точки роси (див. рис. 6) тривалість процесів конденсації вологи на стінах печер змінюється від 2,5 до 4,5 місяців. У цей період режим вологоперенесення у ґрунтовому середовищі печер залежить не тільки від кількості перенесення атмосферної вологи, а також від вологоперенесення із поверхні стін на контакт з повітряним простором печер. Математичні та графоаналітичні залежності для різних типів ґрунтів дозволяють оцінити величину просочення вологи в глиб ґрунтового простору з поверхні стін печер за значеннями об'ємної вологості ґрунту (W , %), тисків всмоктування ($P_{\text{вс}}$, кПа), коефіцієнтом вологоперенесення ($K_{\text{вп}}$, м/добу) (Комплексные..., 1991; Рыбин и др., 1999; Ситников, 2010). Користуючись положеннями теорії подібності, було отримано глибини проникнення вологи у

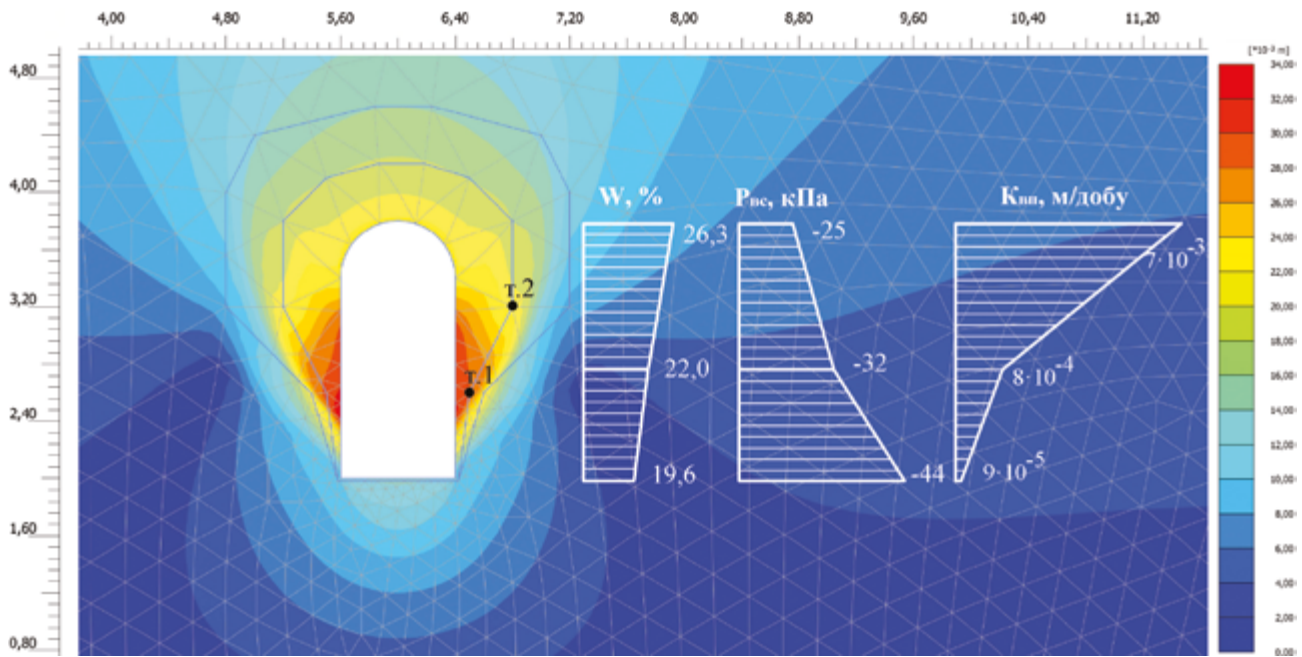


Рис. 7. Епюри загальних переміщень на останньому етапі розрахунку (120 днів конденсації вологи) та епюри об'ємної вологості ґрунту (W , %), тисків всмоктування ($P_{\text{с}}$, кПа), коефіцієнтів вологоперенесення ($K_{\text{м}}$, м/добу)

Fig. 7. Diagrams of total displacements at the final stage of calculation (120 days of moisture condensation) and diagrams of soil volumetric moisture content (W , %), suction pressures (P_{suc} , kPa), and moisture transfer coefficients (K_{m} , m/day)

ґрунтові стіни печер у залежності від об'ємної вологості впродовж 60 та 120 днів: для підлоги ($W = 19,6$ %) – відповідно 0,008 та 0,012 м; для середини стіни ($W = 22$ %) – 0,07 та 0,1 м; для склепінчастої частини ($W = 26,3$ %) – 0,6 та 0,92 м.

Аналіз зміни напружено-деформованого стану показав, що через 60 діб активного утворення конденсату та просочення вологи у ґрунти загальні деформації зростають на 6 %, через 120 діб – на 44 % (рис. 7). За розміщенням пластичних точок формування поверхні відколу та вивалу ґрунту формується довжиною в 0,86–1,4 м і починається на висоті 30 см від підлоги виробки. Найбільші зміни напружень встановлені на відстані 0,098–0,226 м у глиб стіни. Мінімальний об'єм вивалу ґрунту з 1 м² стіни може становити 0,046–0,113 м³, при цьому найнебезпечнішими є ділянки поворотів між галереями та камерами (церквами), що і було зафіксовано у точці 14 (див. рис. 4, а; 5).

Порівняння двох контрольних точок показало, що в приконтурній зоні точки 1 (0,1 м) ефективні напруження σ' реагують різко та нелінійно. Початково σ' мав слабо від'ємне значення ($\sigma' \approx -0,17$ кН/м²). Перше замочення збільшило абсолютне значення σ' на 19 %, тоді як подальше замочення знизило їх приблизно на 88 %, що свідчить про втрату контактної міцності з подальшим перерозподілом порового тиску

та частковою його дисипацією. У глибині масиву точки 2 (0,4 м) напружений стан змінюється більш стабільно: σ' зростають на ≈ 43 % після першого замочення та зменшуються лише на ≈ 10 % після другого. Це означає, що головні водно-міцнісні трансформації концентруються переважно у приповерхневій зоні стінок виробки, тоді як глибші горизонти зберігають відносно рівномірний характер деформацій. Загалом отримані результати вказують на високу чутливість контурів виробки до змін вологості: короточасне змочення може спричинити різке погіршення σ' , тоді як тривала інфільтрація призводить до складного перерозподілу тисків, що не усуває, однак, ризику локальних вивалів.

Для склепін та стін печерних галерей, ослаблених тривалою інфільтрацією та всмоктуванням конденсату, небезпечними є додаткові динамічні впливи, зокрема воєнного характеру. Влучання БПЛА, збиття ракет у межах схилів Болдиної гори можуть спричинити зміну інтенсивності деформацій та вивалів.

Аналіз стану конструктивних елементів Іллінської церкви

В основі стрічкового фундаменту церкви залягають насипні гумусовані супіски з фрагментами цегли, кераміки, деревини, що підстиляються алювіальними пісками.



Рис. 8. Тріщини на внутрішніх стінах Іллінської церкви із прибудовою XVIII ст. у місцях деформаційних швів: північна сторона (а), південна сторона (б). Фото Т.В. Кріль, липень 2025 р.



Fig. 8. Cracks on the interior walls of the St. Elijah Church with the 18th-century annex at the locations of deformation joints: north side (a), south side (b). Photo by T.V. Kril, July 2025

Зафіксовано тріщини у стінах Іллінської церкви від волосяних до тріщин із розкриттям у 2–6 мм. У місцях примикання об'єму XII ст. із прибудовою XVII–XVIII ст. як з північного, так і з південного боків наявні конструктивні тріщини, що простягаються до склепіння та віконних отворів. Розвиток цих тріщин є результатом нерівномірних осідань фундаментів прибудови на техногенних насипних відкладах. Наявні відмінності в інтенсивності розвитку тріщин у північній та південній стінах церкви (рис. 8). На південній стіні розкриття візуально більше, тріщини поширюються на інші елементи конструкції – підвіконня, склепіння. Тріщини на стіні над входом (південно-західна сторона споруди) є ознаками уповільненого перебігу зрушень ґрунтів на схилах. Маяки у вигляді наліпок не порушені, тріщини «оминають» їх, що, вірогідно, зумовлено відшаруванням штукатурки вздовж тріщин і недотриманням технології встановлення маяків.

Тріщини в цих місцях є результатом впливу інженерно-геологічних умов, а саме наявності лінзи піщаних ґрунтів під фундаментами церкви, про що свідчать руйнування кладки та тріщини, зафіксовані ще у 1970-х роках (Файвишенко и др., 1990).

Комплексна дорожня карта стратегії збереження підземного історико-архітектурного комплексу

Комплексна дорожня карта стратегії збереження Антонієвих печер ґрунтується на інтеграції інженерно-геологічних, геотехнічних, мікрокліматичних та архітектурно-консерваційних підходів відповідно до національних нормативів (Настанова щодо виконання..., 2016; Склад..., 2016; Настанова щодо обстеження..., 2017), а також з урахуванням міжнародних принципів, викладених у Венеціанській хартії та Конвенції ЮНЕСКО про світову спадщину (International..., 1964; Convention..., 1972; IUCN..., 2008; ICOMOS..., 2024). Мета комплексної дорожньої карти стратегії – сформувати системну модель моніторингу, превентивного захисту та стабілізації елементів території, схилу, підземних галерей і наземних споруд. На рис. 9 представлено загальні складові системи стратегії, її компоненти та ланцюг взаємодії.

Запропоновані заходи охоплюють широкий спектр робіт – від геодезичного контролю й інженерних досліджень до регулювання мікроклімату й оптимізації режиму відвідування, що дозволяє забезпечити мінімізацію втручання,

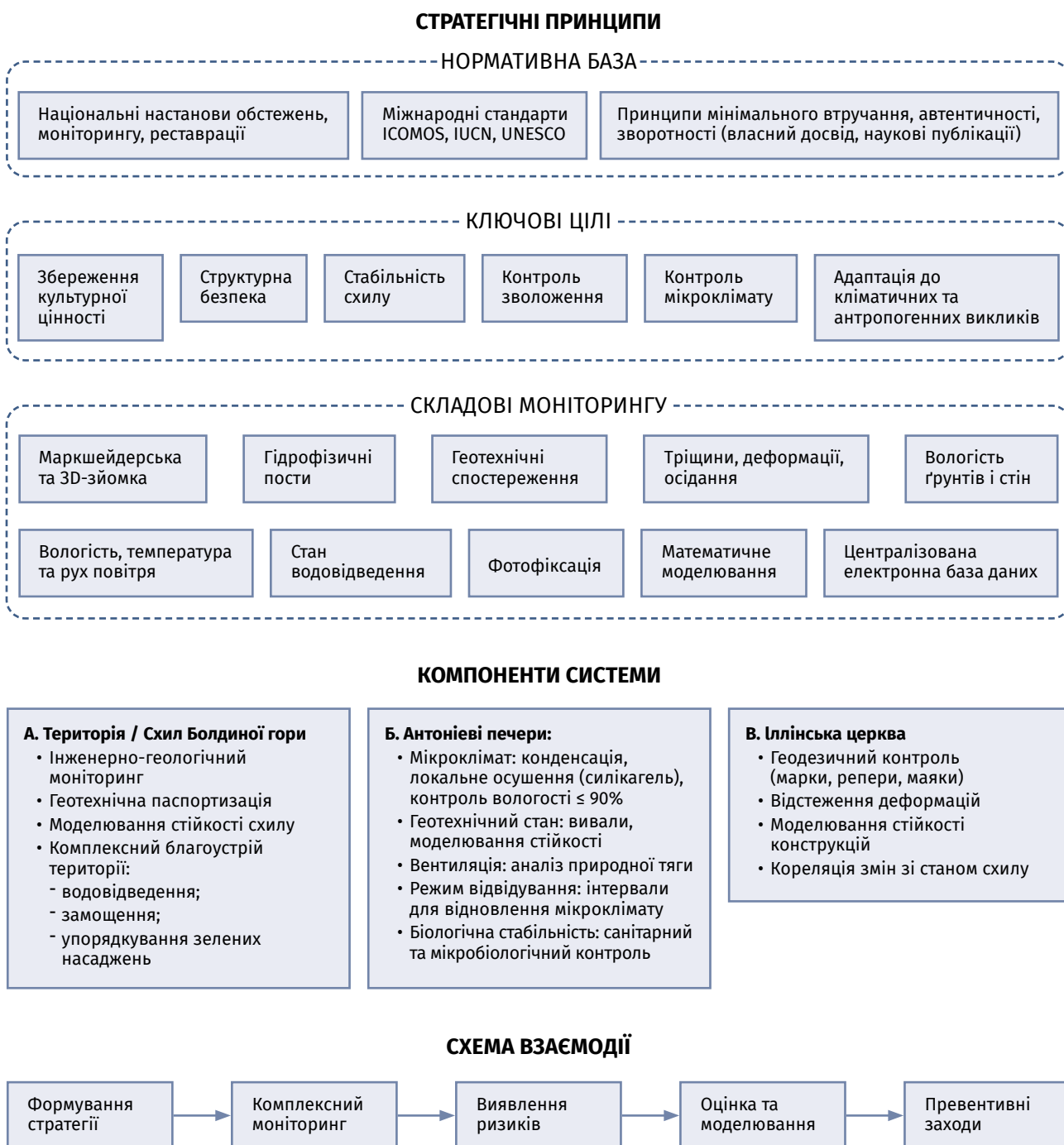


Рис. 9. Інтегрована система управління збереженням Антонієвих печер

Fig. 9. Integrated management system for the preservation of the St. Anthony's Caves

довготривалу структурну стійкість, збереження автентичності об'єктів і мінімізацію техногенних і природних ризиків. Дорожня карта враховує специфіку монастиря XI–XII ст., розташованого в деформаційно-активному схилі Болдиної гори, складеному лесоподібними відкладами, а також сучасні виклики: зміну клімату, антропогенне навантаження та прогресуючі геотехнічні процеси. Вона формує динамічну, адаптивну

систему, в якій кожен захід пов'язаний з безперервним моніторингом і можливістю оперативного коригування, забезпечуючи довгострокове збереження пам'ятки національного значення для наступних поколінь. Нижче представлено систематизований перелік ключових напрямів за компонентами системи збереження, що складають основу ефективної стратегії охорони та розвитку підземного комплексу:

1. Територія (схил Болдиної гори та прилегла зона)

Благоустрій території:

- Ремонт дорожнього покриття з ліквідацією деформацій замощення та порожнин.
- Організація ефективного відведення поверхневих вод у верхній частині схилу для запобігання інфільтрації води в ґрунт, яка може викликати зволоження порід і погіршення стійкості схилу.
- Упорядкування зелених насаджень: прорідження, санітарна обрізка дерев, насадження нових рослин, які зміцнюють ґрунт і не мають агресивної кореневої системи.

Гідроізоляційні заходи:

- Влаштування гідроізоляційного бар'єру на поверхні над печерами (обов'язково над вівтарними частинами церков Антонія та Феодосія) – геомембрани, глиняні екрани, водовідвідні лотки.
- Контроль за системами водовідведення та забезпечення їх справності після інтенсивних дощів.

Моніторинг схилу:

- Комплексні інженерно-геологічні дослідження для аналізу стану порід.
- Регулярні геотехнічні дослідження стану схилу, включаючи деформації, зсувні зрушення, осідання.
- Створення геотехнічного паспорту схилу із зазначенням зон підвищеного зсувного ризику.
- Організація постів гідрофізичних спостережень (вологості ґрунту зони аерації, температури, тиску та рівня підземних вод) на денній поверхні, безпосередньо над печерним комплексом.
- Забезпечення регулярної фотофіксації стану поверхні для виявлення тріщин, деформацій або ерозійних процесів.

Математичне моделювання стійкості схилу з урахуванням:

- наявності печер і пустот;
- ступеня зволоження ґрунтів;
- додаткових навантажень (динамічні навантаження, в тому числі воєнного характеру);
- сейсмічних і кліматичних факторів.

2. Іллінська церква

Геодезичні спостереження:

- Відновлення циклічних геодезичних вимірювань за встановленими марками та реперами для виявлення зсувів ґрунту або деформацій фундаменту церкви.

- Фіксація даних із періодичністю не менше 2 разів на рік.
- Аналіз змін положення в прив'язці до коливань вологості, опадів і рухів схилу.
- За потреби – встановлення нових марок у критичних точках.

Маяки та контроль тріщин:

- Перевірка наявних маяків, демонтаж тих, що не відповідають вимогам.
- Встановлення нових стандартних маяків безпосередньо на кладку, очищену від штукатурки.

3. Антонієві печери

- Нормалізація мікроклімату на локальних тимчасових ділянках прояву конденсування вологи, збору конденсату на склепіннях і стінах:
- Використання ємностей із силікагелем для абсорбції вологи:
 - 200–250 г силікагелю на кожен 1 м² площі, рівномірно розміщених через кожні 2–3 м;
 - регулярна регенерація (просушування осушувачів);
 - естетичне маскування ємностей.
- Контроль вологості: вологість у печерах не повинна перевищувати 90 % з урахуванням деформаційних властивостей ґрунтів печер і впливу режиму відвідування.

Ремонтно-реставраційні роботи:

- Проведення детального огляду ділянок вивалів для оцінки їх масштабів, причин (наприклад, зволоження ґрунтів, тріщини, вібрації) та потенційних ризиків подальших обвалів.
- Забезпечення стабілізації ділянок вивалів у печерах, мінімізування ризиків подальших обвалів, забезпечення безпеки для відвідувачів.

Маркшейдерська зйомка:

- Проведення маркшейдерської зйомки всіх галерей (верхнього та нижнього ярусів).
- Прив'язка маркшейдерської зйомки до топографічного плану поверхні.
- Використання лазерного сканування (детальної 3D-зйомки), фотограмметрії, GNSS для створення детальної цифрової моделі.

Комплексні інженерно-геологічні дослідження:

- Геологічне зондування та буріння для аналізу стану порід.
- Визначення зони підвищеного ризику обвалів або деформацій.
- Математичне моделювання деформацій ґрунтового масиву в окремих перерізах печер.

Вентиляція:

- Аналіз існуючої системи вентиляції з урахуванням природної циркуляції повітря та змін температури.
- Розроблення системи вентиляції з природною або примусовою тягою для стабілізації вологості та температури всередині печер.
- Режим вентиляції має враховувати добові, сезонні, річні зміни температурно-вологісного режиму та туристичні навантаження.

Режим відвідування:

- Впровадження регламентованого графіка екскурсій з урахуванням:
 - тривалості перебування;
 - кількості осіб одночасно;
 - потреби в «перерві» для мікроклімату (регенерація повітря).
- Рекомендоване обмеження: не більше 10–15 осіб одночасно, з інтервалами між групами.

Санітарія та біологічна стабільність:

- Забезпечення біологічного контролю та санітарної обробки для запобігання розвитку мікрофлори фахівцями відповідного профілю.

4. Загальні рекомендації щодо постійного моніторингу:

- Всі моніторингові заходи (геотехнічні спостереження, фотофіксація, вимірювання маяків) варто проводити за чітким графіком (щотижня, щомісяця або щокварталу залежно від типу спостережень).
- Створення централізованої електронної бази даних для зберігання результатів моніторингу й аналізу динаміки змін.

Висновки

Проведені інженерно-геологічні, мікрокліматичні та геотехнічні дослідження комплексу Антонієвих печер та Іллінської церкви (м. Чернігів) виявили комплексне погіршення стану геологічного середовища зсувонебезпечного схилу Болдиної гори. Активні зсувні процеси, висока фільтраційна здатність лесоподібних і моренних відкладів, інфільтрація атмосферних вод і підвищена конденсація у печерах створюють умови для прискореної деградації підземних галерей та наземних конструкцій.

Виділено такі основні чинники руйнування: висока фільтраційна здатність лесоподібних суглинків і моренних супісків, що сприяє швидкій інфільтрації атмосферних опадів і формуванню верховодки; перезволоження ґрунтів (об'ємна

вологість до 27,8 %) та штукатурки, зниження міцності порід при зволоженні; недостатній повітрообмін і стабільно висока відносна вологість повітря в печерах (81,0–96,7 %, локально – до 96,7 %), що призводить до конденсації, розвитку плісняви та проростання кореневої системи рослин; активізація зсувних процесів, суфозії, локальних обвалень і відшарувань ґрунту в галереях нижнього ярусу.

Доведено, що основними чинниками порушення стійкості є поєднання природних процесів (зсувна активність, суфозія, ерозія ярів, зволоження ґрунтів, що формують геологічне середовище печер) та антропогенних впливів – зміни мікроклімату через режим відвідування. Мікрокліматичні умови печер характеризуються уповільненим повітрообміном, що підсилює процеси деградації.

Просторовий аналіз у середовищі ArcGIS та інструментальні заміри підтвердили тісний взаємозв'язок між станом схилу, мікрокліматом печер і режимом антропогенного навантаження. Найвищі значення вологості повітря та ґрунту зафіксовано у галереях верхнього ярусу та в зонах, близьких до поверхні схилу, що свідчить про вертикальне просочування атмосферних вод через лесові відклади.

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану підтвердило високу чутливість масиву до замочення. Встановлено, що через 60 діб активного утворення конденсату та просочення води у ґрунти загальні деформації зростають на 6 %, через 120 діб – на 44 %. Аналіз ефективних напружень свідчить про потенційне зниження структурної міцності ґрунтів стінового простору печер, підвищення ризику локальних вивалів і формування деформаційних осередків у склепінні галерей. Положення цих зон узгоджується з фактичними місцями дефектів, зафіксованих під час візуального й інструментального обстеження.

Розроблена комплексна дорожня карта стратегії збереження передбачає таке: інженерний захист схилу (гідроізоляційні бар'єри, дренаж, укріплення зеленими насадженнями); організацію постійного геоінженерного моніторингу (геодезичні спостереження, маркшейдерська 3D-зйомка, пости гідрофізичних спостережень, математичне моделювання стійкості схилу); нормалізацію мікроклімату (локальне осушення силікагелем до ≤ 90 %, вдосконалення вентиляції); регламентацію туристичного навантаження (не більше 10–15 осіб одночасно з «перервами» для регенерації повітря).

Отримані результати мають практичне значення для аналогічних підземних об'єктів (Києво-Печерська лавра, Софія Київська та ін.) і можуть слугувати основою для розроблення державних методик моніторингу геокультурних пам'яток, розташованих у складних інженерно-геологічних умовах.

Запропонована інтегрована система моніторингу та превентивного захисту дозволяє забезпечити довготривале збереження Антонієвих печер у контексті сталого розвитку та відновлення геологічного середовища України, адаптації до сучасних кліматичних та антропогенних викликів.

Фінансування. Представлені дослідження виконано в рамках проєкту «Розробка та впровадження сучасних методологій моніторингу та стратегій відновлення геологічного середовища для розвитку економіки України» за бюджетною програмою НАН України «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

Подяки. Автори вдячні Національному архітектурно-історичному заповіднику «Чернігів стародавній» за надані матеріали та дирекції Інституту геологічних наук НАН України за всебічну підтримку.

Внесок авторів. Т.В. Кріль та І.А. Черевко – концептуалізація мети та завдань дослідження, збір інженерно-геологічних даних і матеріалів, проведення польових досліджень. Т.В. Кріль – математична обробка даних натурних спостережень, математичне моделювання напружено-деформованого стану геологічного середовища. І.А. Черевко та Т.В. Кріль – інтерпретація результатів, вироблення висновків. Т.В. Кріль – графічні побудови інтерпретацій, оформлення рукопису. Т.В. Кріль та І.А. Черевко – рецензування, редагування, внесення змін і доповнень.

У роботі представлено результати інженерно-геологічних, мікрокліматичних і геотехнічних досліджень комплексу Антонієвих печер, розташованих у межах зсувонебезпечного схилу Болдиної гори в м. Чернігів. Антонієві печери разом з Іллінською церквою є ключовою пам'яткою Національного архітектурно-історичного заповідника «Чернігів стародавній» та характеризуються підвищеною вразливістю до впливу природних і техногенних чинників. За результатами обстеження 9 липня 2025 р. виявлено активні геонебезпеки: обвалення ґрунту, відшарування, конденсаційне зволоження, розвиток плісняви, зумовлені інфільтрацією опадів і недостатньою вентиляцією. Інструментальні заміри (SM150T – об'ємна вологість ґрунту, TESTO 606-2 – вологість штукатурки, MB-4M – психрометр) зафіксували відносну вологість повітря до 96,7 % та об'ємну вологість ґрунту до 27,8 %, що перевищує природні значення та свідчить про високий рівень водонасичення. Просторовий аналіз у середовищі ArcGIS підтвердив вплив геоморфологічних умов і властивостей лесоподібних відкладів з високою фільтраційною здатністю на формування нестійких зон. Аналіз сезонної динаміки температури точки роси та умов утворення конденсату на стінах комплексу Антонієвих печер дозволив вперше виділити рівні ризику появи додаткового зволоження ґрунтових стін печер і визначити потенційні наслідки для технічного стану комплексу. Математичне моделювання напружено-деформованого стану ґрунтів у навколочерному просторі показало потенційне зниження їх структурної міцності, підвищення ризику локальних вивалів у періоди активного розвитку конденсату на стінах печер. На підставі отриманих даних запропоновано комплекс таких заходів: системний моніторинг, нормалізацію мікроклімату, гідроізоляційний захист і стабілізацію схилу. Результати дослідження створюють науково обґрунтовану основу для комплексної дорожньої карти стратегії збереження підземного історико-архітектурного комплексу. Комплексний підхід, запропонований у роботі, забезпечує підвищення рівня збереження унікальної підземної пам'ятки та може бути застосований для інших гіпогейних об'єктів у подібних геологічних умовах.

Список літератури

- Геологическая карта Украинской СССР масштаба 1:200 000. Серия Днепровско-Донецкая. Лист М-36-II. Объяснительная записка. Шунько В.И., Бохонова Е.С., Липкина-Кучинская Н.Е., Воронов В.А. Киев, 1973. 146 с.
- Грыва А., Смирнов Р., Каубов С., Богданов В. Отчет о специальных инженерно-геологических изысканиях для установления причин неравномерной осадки фундаментов Ильинской церкви в г. Чернигов. ГОССТРОЙ УССР «УкрГИИНТИЗ». Киев, 1973. 168 с.
- Державна геологічна карта України. Масштаб 1:200 000. Серія: Дніпровсько-Донецька. Аркуші: М-36-II (Чернігів), Н-36-XXI (Гомель), Н-36-XXXII (Новозибків), М-36-I (Прип'ять). Київ: Міністерство екології та природних ресурсів України, Північне державне регіональне геологічне підприємство «Північгеологія», 2004. 94 с.
- Каубов С., Богданов В. Отчет о дополнительных инженерно-геологических изысканиях на площадке Ильинской церкви в г. Чернигов. ГОССТРОЙ УССР «УкрГИИНТИЗ». Киев, 1974. 18 с.
- Комплексные исследования с целью охраны Ближних пещер. Киев, 1991. 53 с. (Препр. / ИГН АН Украины; № 91-В).
- 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. (Державний стандарт України).
- Рыбин В.Ф., Куциба В.А., Терпищев А.С., Черный Г.И., Дзекунов Н.Е., Соковнина Н.Х., Скальский А.С. Разработка научных основ и рекомендаций по геологической охране историко-архитектурных памятников Украины. Научный отчет. Киев, 1995.
- Рыбин В.Ф., Куциба В.А., Черный Г.И., Дзекунов Н.Е., Соковнина Н.Х., Руденко Ю.Ф., Скальский А.С. Гидрогеологический мониторинг и способы борьбы с подтоплением зон исторической застройки Киева. Научный отчет. Киев, 1999. 130 с.

- Селівачова У.М., Стадніченко С.М. Особливості геологічного середовища та гранулометричного складу відкладів рукотворних Гнилецьких печер (урочище Церковщина). 36. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України. 2012. Вип. 5. С. 240–244.
- Ситников А.Б. Вопросы миграции веществ в грунтах. Киев: ИГН НАН Украины, 2010. 640 с.
- Склад та зміст науково-проектної документації на реставрацію пам'яток архітектури та містобудування. Зі Зміною № 1. ДБН А.2.2-14:2016 [Чинний від 2016-12-29]. Київ, 2016. 33 с. (Державні будівельні норми України).
- Файвищенко А.Г., Патрушев М.А., Лепихов А.Г., Карнаух Н.В., Рыбин В.Ф., Куцба В.А., Канарева О.С. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработать технологии ликвидации аварийного состояния памятников архитектуры XI–XVII веков Антониевых пещер и Ильинской церкви в Чернигове». Донецк, 1990.
- Файвищенко А.Г., Шевченко В.В. Исполнительная съемка нижнего яруса Антониевых пещер Черниговского государственного архитектурно-исторического заповедника. Пояснительная записка. Инв. ном. 95-102-III. Донецк, 1995.
- Черевко І.А., Криль Т.В., Безродний Д.А. Неруйнівні методи встановлення причинно-наслідкового зв'язку аварій водонесучих мереж та умов збереження архітектурної спадщини. *Геол. журн.* 2024. № 3 (388). С. 11–30. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.3.307769>
- Alduchov O.A. & Eskridge R.E. Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1996. Vol. 35 (4). P. 601–609. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<0601:IMFAOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<0601:IMFAOS>2.0.CO;2)
- Aydan Ömer, Ulusay Reşat. Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*. 2003. Vol. 69 (3–4). P. 245–272. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00285-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00285-5)
- Benrabah A., Senent Domínguez S., Collado Giraldo H., Chaves Rodríguez C., Jorda Bordehore L. Stability Assessment of the Maltravieso Cave (Caceres, Spain) Through Engineering Rock Mass Classification, Empirical, Numerical and Remote Techniques. *Remote Sens.* 2024. Vol. 16. P. 3883. <https://doi.org/10.3390/rs16203883>
- Bonini J.E., Vieira B.C., Corrêa A.C.d.B., Soldati M. Landslides and Cultural Heritage – A Review. *Heritage*. 2023. No. 6. P. 6648–6668. <https://doi.org/10.3390/heritage6100348>
- Caves of Aggtelek Karst and Slovak Karst. UNESCO World Heritage Outlook, 2020. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/725/>
- Cherevko I., Kril T., Bugai D., & Shekhunova S. Impact of hydrogeology factors on geotechnical conditions of the heritage Kyiv-Pechersk Lavra Monastery complex: Lessons from three decades of monitoring. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*. 2024. Vol. 13 (3). P. 91–101. <https://doi.org/10.7343/as-2024-765>
- Chiarini V., Duckeck J., & De Waele J. A Global Perspective on Sustainable Show Cave Tourism. *Geoheritage*. 2022. Vol. 14, No. 82. P. 1–27. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00717-5>
- Climate Chernihiv Data reported by the weather station: 331350. 2025. URL: <https://en.tutiempo.net/climate/ws-331350.html>. (Дата звернення: 07.11.2025).
- Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage UNESCO. Paris, 1972. URL: <https://whc.unesco.org/archive/convention-en.pdf>
- Fernandez-Cortes A., Palacio-Perez E., Martin-Pozas T., Cuezva S., Ontañón R., Lario J., Sanchez-Moral S. Defining the Optimal Ranges of Tourist Visits in UNESCO World Heritage Caves with Rock Art: The Case of El Castillo and Covalanas (Cantabria, Spain). *Appl. Sci.* 2025. Vol. 1. P. 3484. <https://doi.org/10.3390/app15073484>
- ICOMOS & ICCROM. Guidance: Recovery following catastrophic events for cultural heritage sites, including subterranean structures. ICCROM. 2024. URL: https://www.iccrom.org/sites/default/files/publications/2024-02/en_icomos-iccrom_guidance_iccrom_2024.pdf
- International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (Venice Charter 1964). ICOMOS, 1964. URL: https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/Venice_Charter_EN_2023.pdf
- IUCN & UIS. World Heritage caves and karst. IUCN. 2008. URL: <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2008-037.pdf>
- Kril T., Cherevko I., Shcherbyna S., & Chalyi O. Modern risk assessment of the influences of natural and military man-made factors on the state of the historical buildings of the Kyiv-Pechersk Lavra. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 2024. Vol. 46 (5). P. 93–105. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.309056>
- Kril T., Shekhunova S. and 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, EAGE*, Nov. 2023. Vol. 2023. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520203>.
- Lange-Enyedi N.T., Borsodi A.K., Németh P., Czuppon G., Kovács I., Leél-Össy S., Dobosy P., Felföldi T., Demény A., Makk J. Habitat-related variability in the morphological and taxonomic diversity of microbial communities in two Hungarian epigenic karst caves. *FEMS Microbiology Ecology*. December 2023. Vol. 99, iss. 12. Fiad 161. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiad161>
- Maerker M., Rellini I., Mucirino L., Torrese P. Cavity detection using a pseudo-3D electric resistivity tomography at the Palaeolithic/Neolithic site of Scaloria Cave, Apulia, Italy: integrated assessment of synthetic and field data sets. *Archaeol Anthropol Sci.* 2023. Vol. 15. P. 175. <https://doi.org/10.1007/s12520-023-01859-5>
- Manuals – PLAXIS. URL: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis>. (Дата звернення: 07.11.2025).
- Margottini C., Antidze N., Corominas J., Crosta G.B., Frattini P., Gigli G., Giordan D., Iwasaki I., Lollino G., Manconi A., Marinos P., Scavia C., Sonnessa A., Spizzichino D., Vacheishvili N. Landslide hazard, monitoring and conservation strategy for the safeguard of Vardzia Byzantine monastery complex. *Landslides*. 2015. Vol. 12. P. 193–204. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0548-z>
- PLAXIS 2D. Geotechnical Engineering Software. URL: <https://www.bentley.com/software/plaxis-2d/> (Дата звернення: 05.05.2025).
- Prehistoric Sites and Decorated Caves of the Vézère Valley. UNESCO World Heritage Centre, 2021. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/85/>
- Shults R., Bilous M., and Kovtun V. Monitoring and preservation of the Kyiv Pechersk Lavra caves, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2019. XLII-2/W11. P. 1053–1058. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1053-2019>, 2019
- Singh S., Dhyani S., Kokate P., Chakraborty S., Nimsadkar S. Deterioration of World Heritage Cave Monument of Ajanta, India: Insights to Important Biological Agents and Environment Friendly Solutions. *Heritage*. 2019. No. 2. P. 2545–2554. <https://doi.org/10.3390/heritage2030156>
- Sun B., Li X., Cui K., Peng N., Hong J., Chen R., Jia C. Study on the Characteristics of Damaged Sandstone in the Longshan Grottoes Using Water Chemistry and Freeze-Thaw Cycling. *Minerals*. 2023. Vol. 13. P. 430. <https://doi.org/10.3390/min13030430>
- Toomey R.S. III. Geological monitoring of caves and associated landscapes, in Young R., and Norby L., Geological Monitoring: Boulder, Colorado, Geological Society of America, 2009. P. 27–46. doi: 10.1130/2009.monitoring(02)
- Zhang H., Li T., Tang S., Li P., Wang Y. & Tang C. The influence of environmental humidity change on the stability of rock caves in Longyou Grottoes. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023. Vol. 140. 105291. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105291>

References

- Alduchov O.A. & Eskridge R.E. 1996. Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 35 (4), 601–609. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<0601:IM-FAOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<0601:IM-FAOS>2.0.CO;2)
- Aydan Ömer, Ulusay Reşat. 2003. Geotechnical and geo-environmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*, 69 (3–4), 245–272. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00285-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00285-5)
- Benrabah A., Senent Domínguez S., Collado Giraldo H., Chaves Rodríguez C., Jorda Bordehore L. 2024. Stability Assessment of the Maltravieso Cave (Caceres, Spain) Through Engineering Rock Mass Classification, Empirical, Numerical and Remote Techniques. *Remote Sens.*, 16, 3883. <https://doi.org/10.3390/rs16203883>
- Bonini J.E., Vieira B.C., Corrêa A.C.d.B., Soldati M. 2023. Landslides and Cultural Heritage – A Review. *Heritage*, 6, 6648–6668. <https://doi.org/10.3390/heritage6100348>
- Caves of Aggtelek Karst and Slovak Karst. 2020. UNESCO World Heritage Outlook. Retrieved from: <https://whc.unesco.org/en/list/725/>
- 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. *Geologichnij žurnal*, 3 (388), 11–30. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.3.307769> (in Ukrainian).
- Cherevko I., Kril T., Bugai D. & Shekhunova S. 2024. Impact of hydrogeology factors on geotechnical conditions of the heritage Kyiv-Pechersk Lavra Monastery complex: Lessons from three decades of monitoring. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*, 13 (3), 91–101. <https://doi.org/10.7343/as-2024-765>
- Chiarini V., Duckeck J., & De Waele J.A. 2022. Global Perspective on Sustainable Show Cave Tourism. *Geoheritage*, 14, 82, 1–27. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00717-5>.
- Climate Chernihiv. 2025. Data reported by the weather station: 331350. Retrieved from: <https://en.tutiempo.net/climate/ws-331350.html> (Accessed 07 November 2025).
- Composition and content of scientific and design documentation for the restoration of monuments of architecture and urban planning. 2016. With Amendment No. 1. DBN A.2.2-14:2016 [effective from 2016-12-29]. Kyiv. 33 p. (in Ukrainian).
- Comprehensive research aimed at protecting the Near Caves. Kyiv, 1991. 53 p. (Preprint / Institute of Geological Sciences of the Academy of Sciences of Ukraine; No. 91-B). (in Russian).
- Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage. 1972. UNESCO. Paris. URL: <https://whc.unesco.org/archive/convention-en.pdf>
- Fayvishenko A.G., Patrushev M.A., Lepikhov A.G., Karnaukh N.V., Rybin V.F., Kutsiba V.A., Kanareva O.S. 1990. Developing Technologies for Eliminating the Disaster Condition of the 11th–17th Century Architectural Monuments of the Anthony Caves and the Church of St. Elijah in Chernihiv. Research Report. Donetsk (in Russian).
- Fayvishenko A.G., Shevchenko V.V. 1995. Executive shooting of the lower tier of the Anthony Caves of the Chernigov State Architectural and Historical Reserve. Explanatory note. Inv. nom. 95-102-III. Donetsk (in Russian).
- Fernandez-Cortes A., Palacio-Perez E., Martin-Pozas T., Cueva S., Ontañón R., Lario J., Sanchez-Moral S. 2025. Defining the Optimal Ranges of Tourist Visits in UNESCO World Heritage Caves with Rock Art: The Case of El Castillo and Covalanas (Cantabria, Spain). *Appl. Sci.*, 15, 3484. <https://doi.org/10.3390/app15073484>
- Geological map of the Ukrainian USSR, scale 1:200,000. 1973. Dnieper-Donetsk series. Sheet M-36-II. Explanatory note. Shunko V.I., Bokhonova E.S., Lipkina-Kuchinskaya N.E., Voronov V.A. Kyiv. 146 p. (in Russian).
- Gryva A., Smirnov R., Kaubov S., Bogdanov V. 1973. Report on Special Engineering-Geological Surveys to Establish the Causes of Uneven Foundation Settlement of the Church of St. Elijah in Chernihiv. State Construction Committee of the Ukrainian SSR "UkrGIINTIZ". Kyiv. 168 p. (in Russian).
- Guidelines for the implementation of repair and restoration work on monuments of architecture and urban planning. 2016. DSTU-N B V.3.2-4:2016 [effective from 2017-01-01]. Kyiv. 50 p. (in Ukrainian).
- Guidelines for the inspection of buildings and structures to determine and assess their technical condition. 2017. DSTU-N B V.1.2-18:1016. [effective from 2017-04-01]. Kyiv. 44 p. (in Ukrainian).
- ICOMOS & ICCROM. 2024. Guidance: Recovery following catastrophic events for cultural heritage sites, including subterranean structures. ICCROM. Retrieved from: https://www.iccom.org/sites/default/files/publications/2024-02/en_icomos-iccrom_guidance_iccom_2024.pdf
- International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (Venice Charter 1964). ICOMOS, 1964. Retrieved from: https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/Venice_Charter_EN_2023.pdf
- IUCN & UIS. 2008. World Heritage caves and karst. IUCN. Retrieved from: <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2008-037.pdf>
- Kaubov S., Bogdanov V. 1974. Report on Additional Engineering-Geological Surveys at the Site of the Church of St. Elijah in Chernihiv. State Construction Committee of the Ukrainian SSR "UkrGIINTIZ". Kyiv. 18 p. (in Russian).
- Kril T., Cherevko I., Shcherbyna S. & Chalyi O. 2024. Modern risk assessment of the influences of natural and military man-made factors on the state of the historical buildings of the Kyiv-Pechersk Lavra. *Geofizicheskij Zhurnal*, 46 (5), 93–105. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.309056>
- Kril T., Shekhunova S. and 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, EAGE*, Nov. 2023, 2023, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520203>
- Lange-Enyedi N.T., Borsodi A.K., Németh P., Czuppon G., Kovács I., Leél-Össy S., Dobosy P., Felföldi T., Demény A., Makk J. December 2023. Habitat-related variability in the morphological and taxonomic diversity of microbial communities in two Hungarian epigenic karst caves. *FEMS Microbiology Ecology*, 99, 12, 161. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiad161>
- Maerker M., Rellini I., Mucerino L., Torrese P. 2023. Cavity detection using a pseudo-3D electric resistivity tomography at the Palaeolithic/Neolithic site of Scaloria Cave, Apulia, Italy: integrated assessment of synthetic and field data sets. *Archaeol Anthropol Sci.*, 15, 175. <https://doi.org/10.1007/s12520-023-01859-5>
- Manuals – PLAXIS. Retrieved from: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis> (Accessed 07 November 2025).
- Margottini C., Antidze N., Corominas J., Crosta G.B., Frattini P., Gigli G., Giordan D., Iwasaki I., Lollino G., Manconi A., Marinis P., Scavia C., Sonnassa A., Spizzichino D., Vacheishvili N. 2015. Landslide hazard, monitoring and conservation strategy for the safeguard of Vardzia Byzantine monastery complex. *Landslides*, 12, 193–204. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0548-z>
- PLAXIS 2D. Geotechnical Engineering Software. Retrieved from: <https://www.bentley.com/software/plaxis-2d/> (Accessed 05 May 2025).
- Prehistoric Sites and Decorated Caves of the Vézère Valley. 2021. UNESCO World Heritage Centre. Retrieved from: <https://whc.unesco.org/en/list/85/>
- Rybin V.F., Kutsiba V.A., Cherny G.I., Dzekunov N.E., Sokovnina N. Kh., Rudenko Yu.F., Skal'skiy A.S. 1999. Hydrogeological monitoring and methods for combating flooding of historical development zones of Kyiv. Scientific report. Kyiv. 130 p. (in Russian).

- Rybin V.F., Kutsiba V.A., Terepishchii A.S., Cherny G.I., Dzekunov N.E., Sokovnina N.Kh., Skal'skiy A.S. 1995. Development of scientific foundations and recommendations for geological protection of historical and architectural monuments of Ukraine. Scientific report. Kyiv (in Russian).
- Selivachova Yu.M., Stadnichenko S.M. 2012. Geological environment peculiarities and granulometric composition of Hnylets man-made caves sediments (Tserkovshchina Dell). *Collection of scientific works of IGS of the NAS of Ukraine*, 5, 240–244 (in Ukrainian).
- Shults R., Bilous M., Kovtun V. 2019. Monitoring and preservation of the Kyiv Pechersk Lavra caves, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, 1053–1058. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1053-2019>
- Singh S., Dhyani S., Kokate P., Chakraborty S., Nimsadkar S. 2019. Deterioration of World Heritage Cave Monument of Ajanta, India: Insights to Important Biological Agents and Environment Friendly Solutions. *Heritage*, 2, 2545–2554. <https://doi.org/10.3390/heritage2030156>
- Sitnikov A.B. 2010. Issues of migration of substances in soils. Kyiv: IGS of the NAS of Ukraine. 640 p. (in Russian).
- State Geological Map of Ukraine. 2004. Scale 1:200,000. Series: Dnieper-Donetsk. Sheets: M-36-II (Chernihiv), N-36-XXXI (Gomel), N-36-XXXII (Novozybkiv), M-36-I (Pripyat). Kyiv: Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, Northern State Regional Geological Enterprise “Pivnichgeologiya”. 94 p. (in Ukrainian).
- Sun B., Li X., Cui K., Peng N., Hong J., Chen R., Jia C. 2023. Study on the Characteristics of Damaged Sandstone in the Longshan Grottoes Using Water Chemistry and Freeze–Thaw Cycling. *Minerals*, 13, 430. <https://doi.org/10.3390/min13030430>
- Toomey R.S. 2009. III. Geological monitoring of caves and associated landscapes, in Young, R., and Norby, L., *Geological Monitoring: Boulder, Colorado*, Geological Society of America, p. 27–46. doi: 10.1130/2009.monitoring(02)
- Zhang H., Li T., Tang S., Li P., Wang Y. & Tang C. 2023. The influence of environmental humidity change on the stability of rock caves in Longyou Grottoes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 140, 105291. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105291>