

Цифрові технології при виконанні реставраційних робіт підземних комплексів

Микола КОРЗАЧЕНКО¹, Тімур ГАНЄЄВ², Ігор ПЕТРЕНКО³

Національний університет «Чернігівська політехніка»

95, вул. Шевченка, Чернігів, Україна, 14035,

¹korzachenko_87@stu.cn.ua, orcid.org/ 0000-0002-5674-8662

²t.ganeev@stu.cn.ua, orcid.org/ 0009-0006-2041-1685

³igor.petrenko0511@stu.cn.ua, orcid.org/ 0009-0006-2103-4324

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.113-122

Анотація. Представлено результати обстеження та створення цифрової моделі підвальних приміщень на прикладі Будинку полкової канцелярії в м. Чернігів. На основі обробки цифрових даних створено самостійні хмари точок для кожного приміщення частини підвального комплексу. Отримані дані інтегровані в єдину систему координат, використовуючи цифрову модель як основу для просторового вирівнювання. Метою роботи є обстеження та створення цифрової моделі підземних приміщень на прикладі Будинку полкової канцелярії з подальшою розробкою реставраційних робіт. Роботи проведені за підтримки Національного заповідника «Чернігів стародавній».

Для Будинку полкової канцелярії було обрано технологію оптичного сканування з інфрачервоним структурованим світлом VCSEL. Також використовувався сканер EINSTAR-SHINING 3D. Проведені лабораторні випробування підтвердили, що стандартне відхилення похибки при скануванні плоского об'єкта на відстані 1,4 метри не перевищує 3 мм.

Даний метод базується на інтегрованому підході до створення 3D-цифрової моделі підземних приміщень з подальшим застосуванням BIM-технологій та пропонується для спрощення розробки проектної документації з реставрації об'єкту та точнішому відтворенню архітектурних особливостей.

На основі проведеної роботи отримано цифрову модель вхідної групи і двох підвальних приміщень.

Використання цифрових методів, таких як 3D-сканування, лазерне знімання та георадарні дослідження, значно підвищує точність фіксації



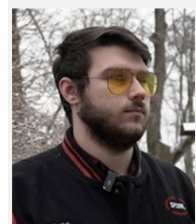
Микола КОРЗАЧЕНКО

доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
к.т.н.



Тімур ГАНЄЄВ

доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
к.т.н., доц.



Ігор ПЕТРЕНКО

асистент кафедри технологій зварювання та будівництва

геометричних параметрів та стану підземних споруд.

Створення цифрових моделей об'єктів (BIM-технології) дозволяє ретельно аналізувати стан конструкцій, прогнозувати потенційні ризики та планувати реставраційні роботи з мінімальним втручанням у первісну структуру.

Цифрові технології сприяють створенню детальних архівів підземних комплексів, що є важливим етапом для їх подальшого збереження, реконструкції та популяризації серед дослідників та громадськості.

Ключові слова. Підземні комплекси, реставраційні роботи, BIM-технології, 3D-сканування, 3D-моделі, хмара точок.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Існують складнощі з обстеження та обміру підземних комплексів. Деякі підземні споруди можуть бути важкодоступними або частково засипаними. Нестабільність конструкцій: ризик обвалів, просідання ґрунту. Відсутність природного освітлення ускладнює огляд та точний обмір, складно визначити орієнтацію у великих розгалужених комплексах. Використання традиційних методів (рулетки, теодоліти) є трудомістким і потребує багато часу. Використання лазерного сканування або дронів у закритих просторах може бути ускладнене через нерівності поверхонь, вузькі проходи, відбиття сигналів. Висока вологість може пошкодити обладнання. Відсутність точних або актуальних планів підземних споруд. Складність у поєднанні нових даних із наявною картографічною інформацією.

Для мінімізації цих ризиків використовують сучасні технології – 3D-сканування.

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є обстеження та створення цифрової моделі підземних приміщень на прикладі Будинку полкової канцелярії в м. Чернігів з подальшою розробкою реставраційних робіт.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В Україні є багато підземних комплексів, що мають історичне, культурне та туристичне значення. Вони включають печерні монастирі, катакомби, шахти, бункери, розгалужені підвальні приміщення та навіть давні підземні міста (Панкратова Н. Д., Гайко Г. І. & Савченко І. О., 2020).

Києво-Печерська лавра (м. Київ) один із найвідоміших православних монастирських комплексів у світі, заснований у XI столітті. Печери лаври використовувалися як місце для усамітнення монахів, а згодом стали усипальницею. Тут зберігаються мощі святих. Печери поділяються на Ближні (313 м) і Дальні (293 м).

Одеські катакомби (м. Одеса) – найдовша у світі система штучних підземних ходів (~2,5...3 тис. км), що виникли через видобуток вапняку.

Підземелля Львова (м. Львів) – унікальна мережа підземних ходів і приміщень, які утворилися внаслідок розширення та забудови міста. Цікаві об'єкти: Підземелля Домініканського собору, Єзуїтського монастиря, аптеки-музею, а також печери в районі Високого замку.

Бакотський печерний монастир (Хмельницька обл.). Висічений у скелях на березі Дністра, заснований у XI столітті. Частково затоплений після створення Дністровського водосховища.

Соледарські та Артемівські соляні шахти (Донецька обл.). Видобуток солі тут ведеться понад 100 років, а в глибинах шахт створено унікальні підземні зали. У шахтах проводяться концерти завдяки унікальній акустиці, а також тут є підземний санаторій для лікування захворювань дихальної системи.

Змієві печери (Харківська обл.). Печерний комплекс, висічений у крейдяних породах, ймовірно, слугував сховищем для населення у давні часи.

Кам'янець-Подільські підземелля (Хмельницька обл.). Включають таємні ходи та сховища, зокрема у фортеці та житлових будівлях. За легендами, деякі ходи ведуть далеко за межі міста.

Печери Криму (Мармароська, Червона, Еміне-Баїр-Хосар). Карстові печери з унікальними сталактитами, сталагмітами, підземними озерами. Печера Еміне-Баїр-Хосар зберігає рештки давніх тварин, включаючи мамонтів.

Ужгородські підземелля (Закарпаття). Лабіринти під Ужгородським замком, які використовувалися як сховища та катівні.

Підземний Львів-2 – Дніпровські тунелі (Дніпро). Залишки підземної залізниці, створеної під час Другої світової війни.

Антонієві печери в м. Чернігові – пам'ятка підземної культової архітектури XI-XIX століть. Засновані в 1069 році як печерний християнський монастир князем

Святославом Ярославичем і церковним діячем Антонієм Печерським.

Після утворення провалля в 2002 році неподалік храму Всіх Святих в Ніжині було виявлено підземні тунелі та приміщення (деякі заввишки чотири метри), які мають площу близько 200 квадратних метрів.

Окрім даного переліку існує ще багато інших стародавніх підземель, більшість з яких не досліджені та не виявлені, такі об'єкти стають відомими лише після часткового їх обвалення та утворення провалля на території. Також існує велика кількість підвальних приміщень історичних будівель, які також знаходяться в незадовільному стані.

Ці комплекси є не лише історичною спадщиною, а й важливими об'єктами для дослідження, реставрації та туристичного розвитку. Дослідження штучних печер та підземних комплексів, а також їх захист та збереження залишається актуальною проблемою сучасних наукових досліджень (Korzachenko M., 2022).

Для спрощення розробки проєктної документації з реставрації об'єкту та точнішому відтворенню історичних особливостей пропонується метод, що базується на інтегрованому підході до створення 3D-цифрової моделі підземних приміщень з подальшим застосуванням BIM-технологій.

Запропонований метод був перевірений на частині підвалу Будинку полкової канцелярії (Будинок Мазепи) спорудженого у 1690-х роках на території Дитинця в м. Чернігів показано на Рис. 1, 2.

За останнє десятиліття 3D-цифрові моделі для віртуального доступу до культурної спадщини набули широкого використання через зростаючу зацікавленість до їхнього застосування як універсального сховища археологічних даних, матеріалів щодо збереження пам'яток, реконструктивних інтерпретацій втрачених будівель та поширення культурного контенту в мережі (Wang B. & Zhang F., 2024).



Рис.1. Загальний вигляд Будинку Полкової канцелярії.
Fig.1. General view of the Regimental Chancellery Building.



Рис.2. Загальний вигляд підвального приміщення.
Fig.2. General view of the basement premises.

Створення 3D-моделей підземних комплексів можна отримати точним відображення поточного стану об'єкту, використовуючи фотограмметрію, оптичне та лазерне сканування, з подальшим процесом моделювання та відтворення існуючих геометричних даних. Це дозволяє створювати точні цифрові моделі, які існують на даний час (Волошин В. У. та ін., 2021). Окрім цього можна виконувати 3D-цифрові реконструкції на основі архівних даних: фото, креслень, описів об'єктів, тощо.

На якість 3D-даних, отриманих за допомогою дистанційного оптичного пристрою, можуть впливати різні фактори. При плануванні знімання необхідно враховувати вибір обладнання, логістичні аспекти та умови навколишнього середовища. Ретельний аналіз цих факторів дозволяє оптимізувати процес 3D-зйомки та мінімізувати потенційні проблеми, які можуть виникнути під час роботи. Крім того, просторові обмеження та кліматичні умови відіграють важливу роль.

Для Будинку полкової канцелярії було обрано технологію оптичного сканування з інфрачервоним структурованим світлом VCSEL (Rapusaand A. & Matoušková E., 2023), яка реалізована у багатьох пристроях провідних виробників. У даному випадку використовувався сканер EINSTAR- SHINING 3D, який забезпечує оптимальне співвідношення між точністю, швидкістю роботи, вагою обладнання, його габаритами та вартістю. Проведені лабораторні випробування підтвердили, що стандартне відхилення похибки при скануванні плоского об'єкта на відстані 1,4 метри не перевищує 3 мм. Максимальна швидкість роботи пристрою становить дев'яност вісімдесят тисяч точок за секунду. Крім того, його вага не перевищує 0,5 кг, що дозволяє транспортувати обладнання у невеликій сумці.

Перед початком роботи було також розглянуто можливість використання щільного фотограмметричного знімання як альтернативи оптичному скануванню. Ця методика є ефективним засобом для створення текстурованих хмар точок, а її головна перевага полягає у мінімізації необхідного обладнання: для проведення знімання достатньо лише цифрової камери, штатива та ноутбука для перевірки даних. Однак, на момент планування роботи (грудень 2024 року) дана технологія значно поступається якістю цифрових моделей після обробки та точністю

фіксації дефектів поверхні через низьку щільність хмари точок. З цієї причини було ухвалено рішення використовувати оптичний тип сканування для отримання максимально точних даних.

На об'єкті, перед початком роботи, було апробовано оптичний сканер та обладнання для фотограмметричної зйомки. Основним інструментом було обрано оптичне сканування, оскільки воно забезпечує високу метричну точність та надійність, що були підтверджені у попередніх дослідженнях. Водночас метод обробки зображень застосовувався в експериментальному режимі на окремих наборах даних.

Перед польовими роботами, у лабораторії НУ «Чернігівська політехніка», було проведено детальну перевірку продуктивності сканера. Проаналізовано якість отриманих даних, стабільність роботи пристрою та оптимальну робочу дистанцію. Аналогічне тестування виконувалося безпосередньо на об'єкті, де оцінювалися фактичні характеристики електронної та оптичної системи в умовах низької температури та підвищеної вологості. У процесі випробувань тестовими об'єктами слугували самі поверхні підземного комплексу. На основі цих даних було визначено оптимальні параметри сканування для різних дистанцій, що дозволило підвищити точність та ефективність роботи обладнання наведено в Табл. 1.

Табл. 1. Налаштування оптичного сканеру
Table 1. Optical scanner settings

Елемент	Робоча відстань, м	Роздільна здатність	
		Якість	Відстань між точками, мм
Поверхня конструкцій	1...1,4	низька	10
Поверхня конструкцій	0,6...0,8	середня	5
Поверхня конструкцій	0,4	висока	1

Під час попереднього огляду об'єкту було розроблено оптимальну траєкторію руху та позиції для оптичного сканування, що дозволило мінімізувати час збору даних і врахувати всі особливості архітектурних деталей.

Для роботи було обрано ділянку, яка включала вхідну групу (спуск в підвал), та два приміщення підвалу. Відповідно процес 3D-зйомки підвальної частини комплексу було розділено на 3 частини: сканування спуску до підвалу; сканування приміщення

№1, сканування приміщення №2. На першому етапі під час сканування вхідної групи робоча дистанція змінювалися залежно від елементів зі складною геометричною будовою. Сканування приміщень №1 та №2 вимагали більшої кількості позицій та ускладненої траєкторії руху сканера, це обумовлювалось наявністю ніш, віконних прорізів, виступаючих частин конструкцій,

архітектурних елементів.

Після завершення етапу сканування було проведено обробку отриманих цифрових даних, у результаті було створено самостійні хмари точок для кожного приміщення частини підвального комплексу приведено на Рис. 3-6.

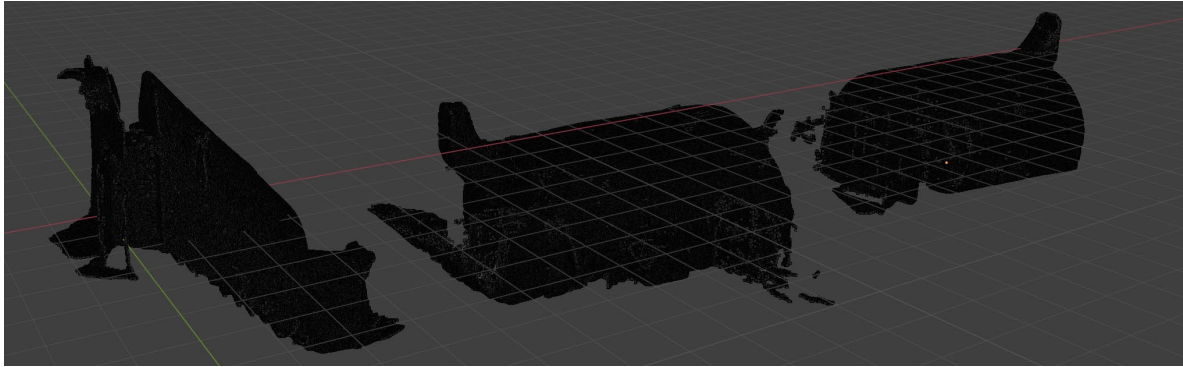


Рис.3. Хмари точок.

Fig.3. Point clouds.

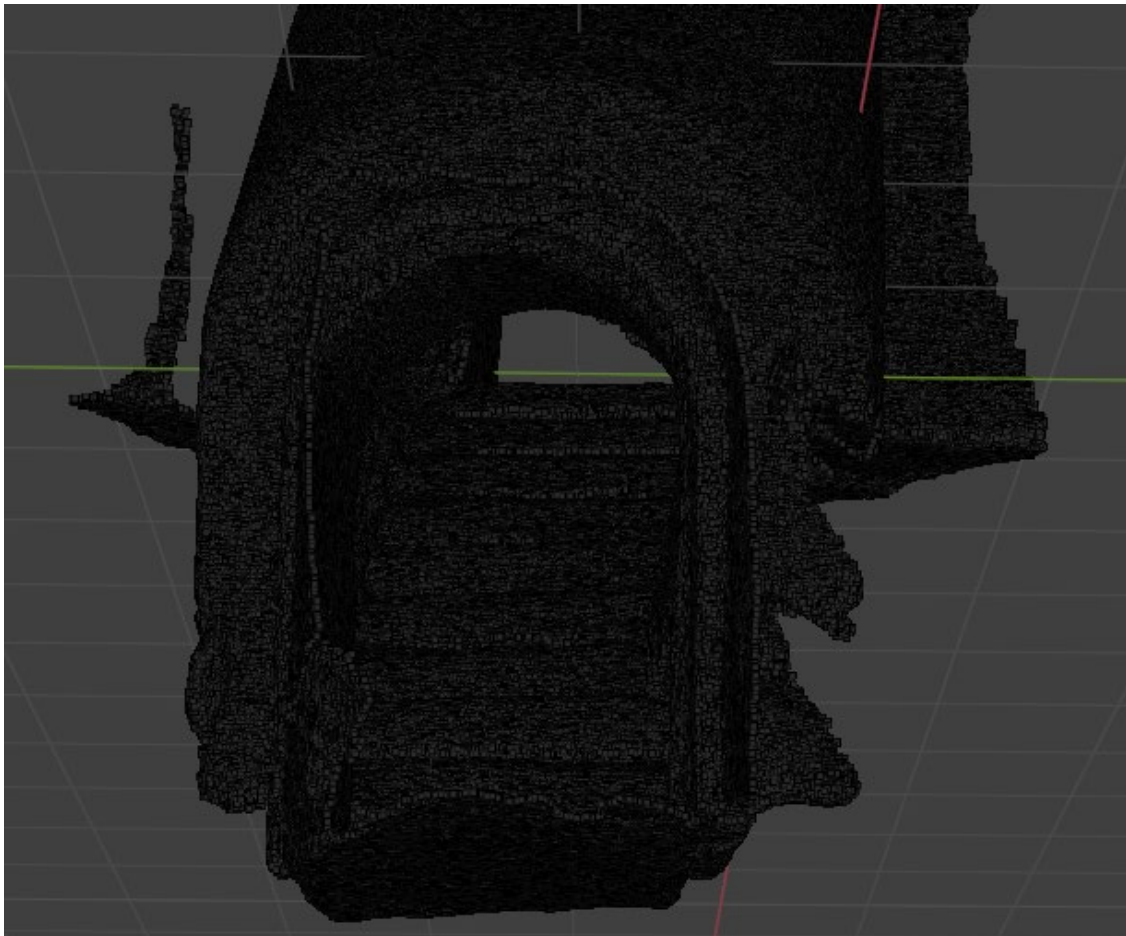


Рис.4. Вхідна група.

Fig.4. Input group.



Рис.5. Приміщення №1.

Fig.5. Room №1.



Рис.6. Приміщення №2.

Fig.6. Room №2.

Хмара точок – це набір просторових точок, отриманий за допомогою 3D-сканування об'єкта. Вона відображає точну геометрію будівлі, споруди або природного середовища, що використовується для створення цифрових моделей. Хмара точок складається з тисяч або мільйонів точок у тривимірному просторі, кожна з яких має координати (X, Y, Z). Додатково вони можуть містити: колірні дані (RGB) – для фотореалістичного представлення; інтенсивність відбитого сигналу – для аналізу матеріалів.

У BIM (Building Information Modeling) хмари точок можуть бути використані, як: створення цифрових моделей – точні 3D-

моделі існуючих будівель або територій; реставрація та реконструкція – відтворення історичних пам'яток або застарілих конструкцій; порівняння проекту та реальності – перевірка відповідності будівництва проєктній документації; моніторинг змін – відстеження деформацій та пошкоджень будівель; інтеграція з BIM-середовищем – використання у програмах Autodesk Revit, Navisworks, ArchiCAD тощо.

Спочатку отримали хмару точок для ділянки спуску до підвалу, яку призначили початковою системою координат. Розширення цифрової моделі комплексу виконували приєднанням хмар точок наступних

приміщень, використовуючи ту ж систему координат, вирівнюючи нові сканування відповідно до траєкторії руху сканера.

На фінальному етапі всі отримані дані

були інтегровані в єдину систему координат, використовуючи цифрову модель як основу для просторового вирівнювання показано на Рис.7-9.



Рис.7. Результати обробки хмари точок.

Fig.7. Point cloud processing results.



Рис.8. Створення цифрового 3д двійника вхідної групи.

Fig.8. Creation of a digital 3D twin of the entrance group.



Рис.9. Створення цифрового 3д двійника приміщення №1.
Fig.9. Creation of a digital 3D twin of the Room №1.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Використання цифрових методів, таких як 3D-сканування, лазерне знімання та георадарні дослідження, значно підвищує точність фіксації геометричних параметрів та стану підземних споруд.

Створення цифрових моделей об'єктів (ВІМ-технології) дозволяє ретельно аналізувати стан конструкцій, прогнозувати потенційні ризики та планувати реставраційні роботи з мінімальним втручанням у первісну структуру.

Використання цифрових технологій зменшує ризики для дослідників, оскільки дозволяє здійснювати дистанційні вимірювання та віртуальні обстеження об'єктів, що перебувають у аварійному стані або є важкодоступними.

Цифрові технології сприяють створенню детальних архівів підземних комплексів, що є важливим етапом для їх подальшого

збереження, реконструкції та популяризації серед дослідників та громадськості.

Використання цифрових методів дозволяє проводити реставраційні роботи з більшою точністю та передбачуваністю, що зменшує ймовірність помилок та знижує витрати на реалізацію проєкту.

Відправною точкою методу є реалістична цифрова модель, яка разом із архівними кресленнями та документами слугує основою для початкового етапу реконструкції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Панкратова, Н. Д., Гайко, Г. І. & Савченко, І. О. (2020) *Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій*. Київ : Наукова думка.
2. Korzachenko, M. (2022) Assessment of the technical condition of cave complexes. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(58), 92–99. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3083>

3. Wang, B. & Zhang, F. (2024) Research on the digital protection and three-dimensional modeling technology of ancient buildings. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-2491>
4. Волошин, В. У. та ін. (2021) 3d фотограмметрія в архітектурі, містобудуванні та збереженні культурної спадщини. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, №16. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-04)
5. Rapucaand, A. & Matoušková, E. (2023) Testing of close-range photogrammetry and laser scanning for easy documentation of historical objects and buildings parts. *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal*, 32(4). <https://doi.org/10.14311/CEJ.2023.04.0038>

REFERENCES

1. Pankratova, N. D., Haiko, H. I. & Savchenko, I. O. (2020) *Rozvytok pidzemnoi urbanistyky yak systemy alternatyvnykh proiektnykh konfigurationsii* [Development of underground urbanism as a system of alternative design configurations]. Kyiv: Naukova dumka (in Ukrainian).
2. Korzachenko, M. (2022) Assessment of the technical condition of cave complexes. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(58), 92–99. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3083>
3. Wang, B. & Zhang, F. (2024) Research on the digital protection and three-dimensional modeling technology of ancient buildings. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-2491>
4. Voloshyn, V. U. та ін. (2021) 3d fotogrametriia v arkhitekturi, mistobuduvanni ta zberezheni kulturnoi spadshchyny [3D photogrammetry in architecture, urban planning and preservation of cultural heritage]. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, №16. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-04) (in Ukrainian).
5. Rapucaand, A. & Matoušková, E. (2023) Testing of close-range photogrammetry and laser scanning for easy documentation of historical objects and buildings parts. *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal*, 32(4). <https://doi.org/10.14311/CEJ.2023.04.0038>

Digital Technologies in the Implementation of Restoration Works of Underground Complexes

Mykola KORZACHENKO

Timur HANIEIEV

Ihor PETRENKO

Summary The results of the survey and the creation of a digital model of the basement spaces are presented, with the case study of the Regimental Chancellery House in Chernihiv. Based on the processing of digital data, separate point clouds were generated for each room of the basement complex. The collected data were integrated into a unified coordinate system, with the digital model serving as a basis for spatial alignment. The aim of the study is to survey and create a digital model of the underground spaces of the Regimental Chancellery House, followed by the development of restoration works. The research was carried out with the support of the National Reserve "Ancient Chernihiv". This method relies on an integrated approach to creating a 3D digital model of underground spaces, followed by the application of BIM technologies. It is proposed as a means to simplify the development of restoration project documentation and ensure a more accurate reproduction of architectural features.

For the Regimental Chancellery House, an optical scanning technology utilizing VCSEL infrared structured light was chosen. Additionally, the EINSTAR-SHINING 3D scanner was used. Laboratory tests confirmed that the standard deviation of error when scanning a flat object at a distance of 1.4 meters does not exceed 3 mm. Based on the conducted research, a digital model of the entrance group and two basement spaces was obtained.

The use of digital methods, such as 3D scanning, laser surveying, and ground-penetrating radar studies, significantly enhances the accuracy of recording the geometric parameters and condition of underground structures.

The development of digital models using BIM technologies enables a detailed analysis of structural conditions, risk prediction, and restoration planning with minimal intervention in the original structure.

Digital technologies contribute to the creation of detailed archives of underground complexes, which is a crucial step for their further preservation, reconstruction, and promotion among researchers and the public.

Keywords. Underground complexes, restoration works, BIM technologies, 3D scanning, 3D models, point cloud.