

DOI https://doi.org/10.32782/naoma-bulletin-2026-6-2
УДК 725.94:004.94:623.4(477)
ORCID ID: 0009-0006-5039-2075
ORCID ID: 0000-0002-5254-2114

Владислав Білов
аспірант кафедри інформаційних технологій в архітектурі
Київський національний університет будівництва і архітектури
bilov_va-2022@knuba.edu.ua

Олексій Левченко
кандидат архітектури,
доцент кафедри інформаційних технологій в архітектурі
Київський національний університет будівництва і архітектури
levchenko.ov@knuba.edu.ua

ДОКУМЕНТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПАМ'ЯТОК КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ ЗА BIM-ТЕХНОЛОГІЄЮ

Анотація. У дослідженні проаналізовано ключові виклики, пов'язані з документуванням пошкоджень об'єктів культурної спадщини, з урахуванням технічних, організаційно-управлінських і соціальних чинників. ***Мета статті*** – обґрунтувати концепцію технології фіксації пошкоджень пам'яток культурної спадщини та формування структури класифікатора пошкоджень для підготовки навчальних даних і подальшого застосування алгоритмів штучного інтелекту під час опрацювання матеріалів фотограмметрії та лазерного сканування. ***Методи дослідження*** – аналітичний підхід до вивчення сучасних методів фіксації пошкоджень, цифрових інструментів і нормативно-правового регулювання, узагальнення міжнародного досвіду, концептуальне моделювання технологічного процесу, а також пілотне порівняльне оцінювання результатів натурного експертного обстеження та подальшого камерального аналізу цифрових фотоматеріалів і даних лазерного сканування дослідженого об'єкта. ***Результати дослідження*** – встановлено, що камеральний аналіз цифрових матеріалів із застосуванням будівельного інформаційного моделювання (англ. Building Information Modeling, BIM) дає змогу підтвердити та додатково ідентифікувати пошкодження, які могли залишитися непоміченими під час натурного огляду, а також підвищити повноту й системність документування. Запропоновано структуру класифікатора пошкоджень, інтегрованого в модель об'єкта культурної спадщини, створену засобами інформаційного моделювання (англ. Heritage Building Information Modeling, HBIM), що дає змогу пов'язувати технічні дані з відомостями про фактичний стан, критичність, відновлюваність і автентичність елементів об'єкта. Аналітика пілотного дослідження створює основу для формування експертно анотованого набору даних і подальшої перевірки алгоритмів автоматизованого розпізнавання пошкоджень. ***Висновки.*** Підвищення ефективності документування передбачає поєднання натурного обстеження з камеральним аналізом матеріалів фотограмметрії та лазерного сканування, їхню інтеграцію в HBIM, уніфікацію підходів до класифікації пошкоджень і поглиблення міждисциплінарної співпраці. Запропонована концепція потребує подальшої апробації на розширеній вибірці об'єктів культурної спадщини.

Ключові слова: цифрові технології, BIM, HBIM, фіксація пошкоджень, управління даними, культурна спадщина.

Vladyslav Bilov
PhD student at the Department of Information Technologies in Architecture
Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture
bilov_va-2022@knuba.edu.ua

Oleksii Levchenko
Candidate of Architecture,
Associate Professor at the Department of Information Technologies in Architecture
Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture
levchenko.ov@knuba.edu.ua

DOCUMENTATION OF DAMAGE TO CULTURAL HERITAGE MONUMENTS USING BIM TECHNOLOGY

Abstract. This study analyses the key challenges of documenting damage to cultural heritage assets, considering technical, organisational, managerial, and social factors. ***The study aims*** to substantiate a conceptual technological

framework for recording damage to cultural heritage monuments and to develop the structure of a damage classification system for preparing training data and subsequently applying artificial intelligence algorithms to photogrammetric and laser-scanning data. ***Methods*** include an analytical examination of contemporary damage-recording methods, digital tools, and the relevant regulatory framework; a synthesis of international experience; conceptual modelling of the technological workflow; and a pilot comparative assessment of the results of an expert on-site survey and the subsequent desktop analysis of digital photographic materials and laser-scanning data obtained from the case-study building. ***Results*** indicate that desktop analysis of digital materials using building information modeling (BIM) enables verification and identification of damage that may have remained undetected during the on-site survey, thereby improving the completeness and consistency of the documentation process. We propose a damage classification structure integrated into the developed heritage site model using building information modeling (HBIM), linking technical data to information on the actual condition, criticality, recoverability, and authenticity of building elements. The pilot study findings provide a basis for developing an expert-annotated dataset and subsequently validating automated damage-recognition algorithms. ***Conclusions.*** Improving the effectiveness of damage documentation requires the integration of on-site surveys with the desktop analysis of photogrammetric and laser-scanning data, their incorporation into an HBIM environment, the standardisation of damage-classification approaches, and enhanced interdisciplinary cooperation. The proposed concept requires further validation with an expanded sample of real cultural heritage assets.

Key words: digital technologies, BIM, HBIM, damage recording, data management, cultural heritage.

Постановка проблеми. Сучасний стан документування руйнувань об'єктів культурної спадщини характеризується низкою невирішених суперечностей. З одного боку, наявність численних загроз – воєнних дій, природних катастроф та техногенних аварій – актуалізує потребу у швидкому й якісному фіксуванні пошкоджень. З іншого боку, відсутність уніфікованих і стандартизованих методик, недостатнє використання цифрових технологій та низький рівень інтеграції національних і міжнародних нормативних баз створюють суттєві перешкоди для належного виконання цього завдання.

Наявна практика часто зводиться до опису або фотофіксації, що не забезпечує можливості подальшої реставрації чи достовірного відтворення автентичного вигляду пам'яток. Фрагментарність зусиль, дефіцит кваліфікованих фахівців, нестача спеціалізованого обладнання та обмежені фінансові ресурси лише поглиблюють цю проблему.

У результаті відсутність комплексних баз даних і обмежений доступ до вже наявних інформаційних ресурсів унеможливлюють ефективну міжнародну координацію та призводять до ризику безповоротних втрат культурної спадщини. Це становить загрозу не лише для матеріальних об'єктів, а й для збереження історичної пам'яті та культурної ідентичності суспільства. Тлумачення спеціальних термінів і скорочень, використаних у статті та в ілюстраціях, наведено в табл. 2.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання фіксації пошкоджень об'єктів культурної спадщини розглядалося у наукових колах з різних позицій, що дало змогу висвітлити як технічні, так і організаційні аспекти проблеми. Зокрема, у дослідженні Y. Alshawabkeh (Ю. Альшавабке) та ін. (2020) було продемонстровано, що застосування лазерного сканування та фотограмметрії забезпечує високу точність відображення архітектурних елементів, однак потребує значних фінансових і технічних ресурсів [1]. Подібний акцент на використанні технологічних інструментів спостерігався у роботі T. Bakirman (Т. Бакірман) та ін. (2020), де застосування легких безпілотних літальних апаратів розглядалося як мобільне та економічно доцільне рішення для документування культурних об'єктів у важкодоступних місцях об'єктів культурної спадщини. Водночас автори підкреслювали, що відсутність уніфікованих стандартів обмежує можливості систематичного впровадження таких методів [2].

Проблема стандартизації методик знайшла відображення у дослідженні A. Khalil (А. Халіл) та ін. (2021), які здійснили класифікацію даних у процесі цифрової фіксації будівель культурної спадщини. Результати показали, що невизначеність категорій призводить до втрати частини інформації під час подальшого аналізу та реставрації [3]. Водночас досвід міжнародного проєкту HeritageCARE, представлений у праці M. Masciotta (М. Масчотта) та ін. (2021), підтвердив ефективність інтегрованих цифрових підходів, які сприяють превентивному моніторингу та оцінюванню стану пам'яток. Це свідчить про необхідність переходу від реактивного документування ушкоджень до превентивних стратегій збереження [4].

Одним із ключових напрямів сучасних досліджень стало вивчення питань, пов'язаних із багатофакторними загрозами культурній спадщині. L. Bosher (Л. Бошер) та ін. (2020) на основі

аналізу дійшли висновку, що поєднання природних катастроф, воєнних конфліктів та антропогенних чинників ускладнює процес документування пошкоджень і потребує комплексного підходу до оцінювання ризиків [5]. Подібні результати наведено в дослідженні R. Cacciotti (Р. Каччотті) та ін. (2021), де акцент зроблено на впливі кліматичних змін. Автори наголошують, що зростання частоти кліматично зумовлених катастроф потребує розроблення нових стратегій управління та адаптації систем документування [6].

Регіональний вимір проблеми висвітлено у праці H. Mekonnen (Г. Меконнен) та ін. (2022), де проаналізовано практики збереження культурної спадщини в історичних і релігійних об'єктах Ефіопії. Дослідження засвідчило дефіцит ресурсів і кваліфікованих кадрів, що унеможливлювало належне документування пошкоджень та створювало ризик втрати унікальних пам'яток. Автори підкреслюють, що відсутність інфраструктури для системного архівування даних істотно обмежує перспективи проведення реставраційних робіт [7]. Подібні виклики окреслював і T. Gireesh Kumar (Т. Гіріш Кумар) (2024), аналізуючи проблеми документування в Індії. Автор довів, що відсутність інтегрованої системи обліку та обмежена участь державних структур знижують ефективність фіксації й популяризації культурної спадщини. Дослідження показало, що розрізненість локальних ініціатив не дає змоги сформувати єдину інформаційну базу для збереження пам'яток. Крім того, підкреслено, що недостатня цифровізація ускладнює доступ міжнародних експертів до матеріалів, необхідних для спільних реставраційних проєктів [8].

У роботі A. Kantaros (А. Кантарос) та ін. (2023) розглядалося застосування 3D-друку й сканування. Вчені показали, що новітні технології відкривають перспективи не лише для документування, а й для відтворення пошкоджених елементів пам'яток, хоча висока вартість і складність їхнього впровадження залишаються істотними перешкодами [9]. Подібний акцент на технологічному розвитку простежується у дослідженні H. Wang (Х. Ван) та ін. (2022), де увагу зосереджено на системах управління спадщиною в Китаї. Автори довели, що ієрархічна структура управління впливає на якість та доступність документування, адже централізований контроль ускладнює гнучке реагування на пошкодження у кризових ситуаціях [10].

Мета дослідження – обґрунтувати концепцію технології документування пошкоджень об'єктів архітектурної спадщини шляхом інтеграції даних фотограмметрії та лазерного сканування з HBIM, а також запропонувати структуру класифікатора пошкоджень для формування навчальної вибірки та подальшого застосування алгоритмів штучного інтелекту. Додатковим завданням є визначення послідовності майбутньої апробації концепції на об'єктах культурної спадщини.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні концепції інтегрованого документування пошкоджень об'єктів архітектурної спадщини, яка передбачає послідовне перетворення результатів фотограмметрії та лазерного сканування на семантично структуровану HBIM-модель. Спираючись на дослідження високоточної геометричної фіксації пам'яток [1; 2], категоризацію даних історичних будівель [3] та інтегрований превентивний моніторинг [4], у роботі запропоновано концептуально поєднати ці напрями у HBIM-середовищі та доповнити їх предметно-орієнтованим класифікатором пошкоджень. Відмінність концепції полягає не в застосуванні окремих цифрових технологій як таких, а в структурі їхньої інтеграції та орієнтації результату на підготовку даних для подальшого машинного аналізу й підтримки реставраційних рішень. Структура запропонованого класифікатора має поєднувати тип і просторову локалізацію дефекту, характеристики матеріалу та архітектурного елемента, геометричні параметри пошкодження, рівень критичності, відновлюваність, автентичність, достовірність визначення і часову версійність даних. Запропонований підхід формує інформаційну основу для подальшого навчання алгоритмів штучного інтелекту, напівавтоматизованого аналізу результатів цифрового обстеження та підтримки науково обґрунтованих рішень щодо консервації, реставрації й моніторингу об'єктів культурної спадщини. Методологія потребує подальшої перевірки та коригування.

Методи дослідження мають концептуально-методичний характер. Їхню основу становлять аналіз і порівняння сучасних підходів до цифрового документування культурної спадщини, узагальнення наукових публікацій щодо фотограмметрії, лазерного сканування, безпілотних систем, HBIM і превентивного моніторингу, а також систематизація вимог до інформаційного опису пошкоджень архітектурних і конструктивних елементів.

Формуванню дослідницької проблеми сприяли спостереження авторів під час участі в організованих ЮНЕСКО семінарах і практикумах, присвячених цифровому документуванню об'єктів

культурної спадщини. Зазначений практичний досвід використано для визначення технологічних обмежень збирання й опрацювання просторових даних, зокрема значного обсягу хмар точок, залежності якості результатів від умов знімання, необхідності очищення даних і участі кваліфікованого оператора. Водночас матеріали семінарів не розглядаються як результати контрольованого експерименту чи статистична вибірка. На основі проведеного аналізу застосовано метод концептуального моделювання технологічного процесу. Він передбачає визначення послідовності переходу від польового обстеження і цифрового знімання до формування хмари точок, створення HBIM-моделі, семантичного опису пошкоджень, їхньої експертної верифікації та підготовки структурованих даних для подальшого машинного аналізу. Завершальним етапом запропонованого процесу є формування структурованих, експертно анотованих даних, придатних для подальшого машинного аналізу цифрових зображень і тривимірних представлень об'єкта [11; 12].

На цьому етапі дослідження проведено порівняльне експертне оцінювання результатів натурного обстеження та подальшого камерального аналізу фотограмметричних матеріалів і даних лазерного сканування. Участь в курсі ЮНЕСКО та опрацювання власного об'єкта показали, що повторний перегляд цифрових зображень у камеральних умовах дає змогу виявляти пошкодження, які могли залишитися непоміченими під час безпосереднього візуального огляду. Це пов'язано з можливістю збільшення окремих ділянок зображення, багаторазового перегляду, зіставлення матеріалів із різних ракурсів і зосередженого аналізу без обмежень, характерних для роботи на об'єкті. Отримані результати підтверджують доцільність поєднання натурного обстеження з камеральною обробкою цифрових матеріалів і можуть бути використані як вихідна основа для формування класифікатора пошкоджень. Водночас на цьому етапі не здійснювалося навчання та порівняльне тестування конкретних моделей штучного інтелекту. Вибір архітектури ШІ-моделі, формування навчальних, валідаційних та тестових вибірок, а також визначення точності автоматизованого розпізнавання становлять наступний етап дослідження.

Наведені у роботі кількісні показники мають характер результатів пілотного порівняльного спостереження, виконаного під час навчання на курсі та опрацювання дослідженого об'єкта (іл.1), і не розглядаються як статистично репрезентативні для сукупності об'єктів культурної спадщини. Одиницею спостереження був окремий випадок пошкодження, просторово пов'язаний з архітектурним елементом об'єкта. Спочатку експерт формував перелік пошкоджень під час натурного огляду, після чого ті самі ділянки повторно перевірялися під час камерального аналізу цифрових фотоматеріалів і результатів сканування. Підсумковий перелік формувався шляхом об'єднання пошкоджень, зафіксованих на обох етапах, із виключенням повторних записів. Частку пошкоджень, ідентифікованих під час камерального аналізу, визначали як відношення кількості пошкоджень, підтверджених або додатково виявлених за цифровими матеріалами, до загальної кількості пошкоджень у підсумковому переліку. Скорочення часу визначали як відносну різницю між тривалістю традиційного та цифрового способів опрацювання однакового набору елементів. Економію трудовитрат розраховували як різницю між сумарною тривалістю ручного та напівавтоматизованого опрацювання. Показники характеризують досліджений пілотний випадок і потребують подальшої перевірки на розширеній вибірці об'єктів. Пілотне порівняльне спостереження проведене на одному дослідному об'єкті. Обстеження охоплювало 400 архітектурних елементів, для яких сформовано 200 унікальних записів про пошкодження та опрацьовано 490 цифрових зображень. Окремим записом вважався один випадок пошкодження, просторово пов'язаний із конкретним архітектурним елементом. Повторні відображення того самого дефекту на різних знімках не враховувалися як окремі випадки.

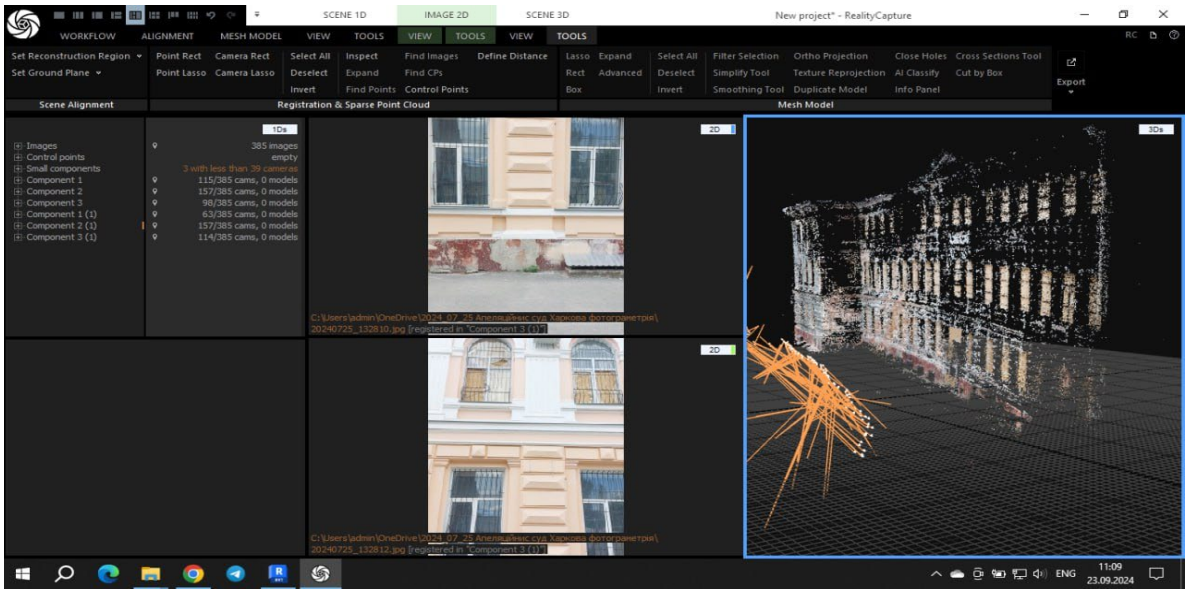
Виклад основного матеріалу. Фіксація пошкоджень елементів об'єктів культурної спадщини традиційно здійснюється вручну під час візуальних інспекцій або фотофіксації. Наприклад, під час обстеження історичних будівель, у тому числі після пошкоджень унаслідок військових дій, вручну фіксують руйнування, тріщини, вибоїни або сліди ерозії на фасадах і декоративних елементах.

Останнім часом застосовують лазерне сканування або фотограмметрію, що дає змогу створювати тривимірні моделі об'єктів. Процес формування 3D-моделей з даних, отриманих методом лазерного сканування або фотограмметрії, пов'язаний із низкою технічних та обчислювальних викликів. Основним джерелом цих труднощів є великий обсяг даних, поданих у вигляді хмар точок, які потребують значних обчислювальних ресурсів

для обробки. Алгоритми, що використовуються для перетворення цих даних у тривимірні моделі, є складними та чутливими до різних факторів, що впливають на точність кінцевого результату (іл. 1). Якість вихідних даних безпосередньо залежить від умов проведення сканування. Недостатнє освітлення, наявність перешкод або специфічні властивості об'єктів (наприклад, гладкі або прозорі поверхні) можуть призводити до спотворень та зниження точності. Окрім того, отримані дані часто містять «шум» або артефакти, які потребують ручної або автоматизованої фільтрації.

До того ж успішне створення 3D-моделей вимагає від оператора певного рівня кваліфікації та досвіду, зокрема в налаштуванні обладнання та обробці даних. Загалом лазерне сканування або фотограмметрія залишаються трудомісткими та потребують значного часу. Автори переконалися в цьому, беручи участь в організованих представниками ЮНЕСКО [13–20] семінарах і практикумах (іл. 2).

BIM і HBIM. Незважаючи на те, що новітні технології лазерного сканування забезпечують оперативну та високоточну фіксацію



Іл. 1. Використання методів фотограметрії для фіксації пошкоджень. [Ілюстрація авторів]



Іл. 2. Лазерне сканування. [Світлина В. Білова]

просторово-геометричних параметрів об'єктів, отримані масиви даних (хмари точок) здебільшого є семантично порожніми. Вони не репрезентують ретроспективних відомостей щодо історико-архітектурного генезису споруди, фізико-механічних властивостей матеріалів, конструктивної морфології, наявності деформацій чи історії попередніх втручань. Відтак критично важливим етапом цифрової інвентаризації об'єктів культурної спадщини постає перетворення суто геометричних даних на інформаційні моделі історичних будівель (HBIM – Heritage Building Information Modeling).

Як зазначає менеджер проєктів зі сталого розвитку міжнародної компанії iC consulenten Клаудіу Сільвестру, імплементація технології HBIM дає змогу не лише реконструювати тривимірну геометрію, а й просторово локалізувати хронологічні етапи зведення, трансформації та реставрації пам'ятки. Інформаційна модель функціонує як інтегративна платформа, до якої прив'язуються архівні іконографічні матеріали, обмірні креслення, акти технічного стану, а також результати інструментальних і лабораторних досліджень. Це формує комплексну базу даних, що є фундаментальною передумовою для прийняття науково обґрунтованих реставраційних і консерваційних рішень з урахуванням автентичного контексту об'єкта. Окрім того, HBIM-модель забезпечує безперервність управління даними (lifecycle management) на постреставраційному етапі, слугуючи інструментом для моніторингу технічного стану, планування превентивних заходів та прогнозування розвитку деструктивних процесів [21].

Актуальний науковий дискурс у сфері охорони спадщини значною мірою зосереджується на оптимізації методології створення та експлуатації HBIM. Водночас основною проблемою є подолання розриву між етапом просторового оцифрування та практичним застосуванням семантичних моделей для довгострокового фасиліті-менеджменту пам'яток (іл. 3).

Варто наголосити на концептуальній відмінності між класичним підходом BIM та HBIM, яка визначається не лише метричною точністю, а й характером, обсягом і структурованою складністю даних. Традиційний BIM орієнтований на нове будівництво, де фізичні параметри конструкцій є апріорі відомими, застосовуються чинні нормативні стандарти та типізовані елементи, а витрати на моделювання інтегруються в початковий бюджет проєктування. Натомість генерування HBIM відбувається у специфічних умовах: зазвичай за обмеженого фінансування та під час роботи з об'єктами, що мають складну хронологічну стратифікацію. Історична забудова, яка передувала епосі індустріальної стандартизації, відзначається суттєвою морфологічною гетерогенністю: відхиленням стін від вертикалі, асиметрією та різногабаритністю прорізів, а також наявністю фрагментів різних будівельних періодів.

З огляду на зазначену специфіку, досягнення абсолютної геометричної ідентичності (створення ідеального «цифрового двійника») часто є економічно та технічно нераціональним. У науково-реставраційній практиці HBIM доцільно інтерпретувати як просторово організоване середовище – тривимірний семантичний контейнер, у якому оптимізована геометрична оболонка є матрицею для інтеграції вичерпних наборів історико-технічних даних.

Наприклад, під час моделювання столярних заповнень (історичних вікон чи дверей) першочерговим є визначення раціонального рівня



Іл. 3. Методика процесу створення HBIM. [Ілюстрація авторів]

деталізації, достатнього для ідентифікації елемента, аналізу та проєктування втручань, без потреби відтворювати кожну мікродеформацію геометрії. Ті характеристики, які складно або недоцільно відтворювати засобами 3D-моделювання (специфіка історичного скління, сліди ремонтів, тип автентичної фурнітури), фіксуються за допомогою системи атрибутивних параметрів.

Отже, якщо фундаментальною парадигмою класичного BIM є стандартизація елементів і процесів, то специфіка HBIM полягає у здатності опрацьовувати унікальну, морфологічно неоднорідну та трансформовану в часі інформацію. При цьому архітектура даних такої моделі має залишатися відкритою та інтуїтивно зрозумілою для мультидисциплінарних команд – архітекторів-реставраторів, істориків, інженерів і майстрів, які можуть не бути вузькопрофільними фахівцями з інформаційного моделювання, проте є експертами в роботі з об'єктами культурної спадщини.

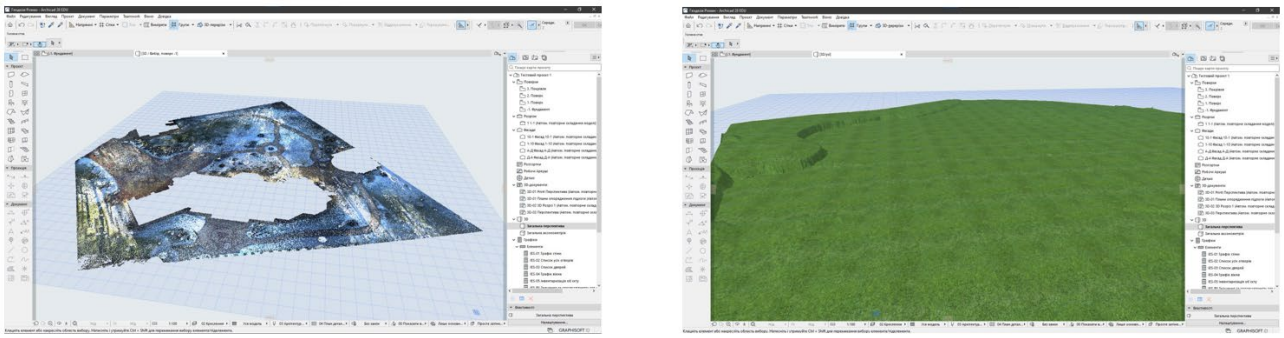
Інтеграція алгоритмічних методів і BIM-технологій у процес моніторингу та реставрації об'єктів культурної спадщини. Сучасні підходи передбачають автоматизацію процесу з використанням штучного інтелекту, який здатен розпізнавати пошкодження, що залишаються непоміченими людиною, наприклад, мікротріщини у кам'яних деталях або відшарування фарби на стінах. Застосування штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання дає змогу автоматично аналізувати ці дані, виявляти тріщини, деформації та втрати елементів конструкцій, класифікувати ступінь пошкоджень і прогнозувати ризики подальшого руйнування [11]. Інтеграція таких систем із BIM-технологіями допомагає створювати вузькоспеціалізовані класифікатори дефектів, де кожен елемент об'єкта має власні характеристики, зокрема інформацію про пошкодження, рівень загрози та послідовність відновлювальних заходів, а також забезпечує формування динамічних цифрових архівів, які оновлюються в реальному часі. Такі алгоритми дають змогу ефективніше планувати огляди та швидко формувати цифрові архіви пошкоджень.

Визначення критичності пошкоджень включає аналіз їхнього впливу на стан об'єкта, диференціювання відновлюваних і невідновлюваних елементів, а також визначення втрати цінності як культурного спадку.

Наприклад, під час обстеження історичних церков важливим є визначення, які автентичні декоративні елементи можна зберегти, а які потребують реставрації або заміни. У BIM-моделі ці дані прив'язуються до конкретних елементів конструкцій, що дає змогу відображати критичні ділянки та планувати відновлювальні роботи з високою точністю. Ступінь пошкодження геометрії будівельних конструкцій і декоративних елементів також може відображатися в моделях «до» та «після» пошкодження. Наприклад, під час реконструкції історичних театрів або палаців створюються тривимірні моделі архітектурних елементів, які демонструють зміни форми балконів, арок чи карнизів. Для оптимізації обробки великої кількості різнорідної інформації до просторової BIM-моделі включається описова частина елементів, що дає змогу уникнути створення надмірних бібліотек і забезпечує комплексне відтворення несучих конструкцій, декоративних елементів та скульптурних деталей. Автоматичне вимірювання критичних станів елементів, таких як прогини, крени, тріщини та інші деформації, може здійснюватися за допомогою спеціальних класифікаторів пошкоджень, інтегрованих у BIM-модель. Наприклад, під час обстеження історичних мостів або куполів храмів можна оцінити прогини арок і кривизну несучих балок, що дає змогу точно визначити склад та обсяги відновлювальних робіт. Програмні засоби, такі як Trimble Business Center або Autodesk Recap, забезпечують автоматизовану обробку даних і відображення результатів з порівнянням у BIM-моделі, що підвищує точність планування реставрації.

На жаль, поточними інструментами автоматично можна лише перетворити хмари точок у тривимірну модель рельєфу території (іл. 4), але наявні методи автоматичного та напівавтоматичного розпізнавання елементів поки не забезпечують універсальної й достатньо надійної семантичної класифікації морфологічно неоднорідної історичної забудови. Сучасна інтеграція ШІ у BIM-додатки підтверджує можливість автоматизованої класифікації 3D-стану, хоча такий підхід не розв'язує повністю задачу семантичного розпізнавання всіх архітектурних елементів [12].

Наприклад, під час сканування фасадів історичних будівель хмара точок дає точну геометрію поверхні, але для визначення функціонального призначення кожного елемента потрібні додаткова обробка та ручне маркування. Ця проблема залишається актуальною, тому Міністерством розвитку громад і територій розробляються рекомендації щодо впровадження автоматичних



Іл. 4. Перетворення хмари точок у тривимірну модель рельєфу. [Ілюстрація авторів]

методів класифікації елементів у практику обстеження та відновлення об'єктів. Інтеграція автоматизованих методів збору, аналізу та обробки даних про пошкодження елементів у BIM-моделі забезпечує підвищення точності оцінки стану об'єктів, планування відновлювальних робіт та збереження цінності культурної спадщини. Крім того, використання штучного інтелекту сприяє розробленню інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у реставрації, зокрема автоматичних пропозицій щодо пріоритетності відновлення окремих елементів і оптимізації ресурсів. Застосування штучного інтелекту (ШІ) та алгоритмів машинного навчання відкрило шлях до автоматичного аналізу цих BIM-моделей для виявлення тріщин, деформацій, втрат окремих конструктивних елементів, а також до класифікації ступеня пошкоджень і прогнозування потенційних ризиків [11].

Класифікація пошкоджень. У комплексних моделях історичних будівель кожен елемент повинен мати прив'язані параметри критичності, ступеня пошкодження та відновлюваності, що дає змогу оптимізувати процес реставрації та мінімізувати втрату автентичних деталей. Інтеграція таких систем із BIM-технологіями сприяє створенню спеціалізованих класифікаторів дефектів, де кожен елемент об'єкта має власні характеристики, що враховують інформацію про пошкодження, рівень загрози та пріоритетність відновлювальних робіт. Також це дасть змогу формувати динамічні цифрові архіви, що оновлюються у реальному часі. Серед прикладів реалізації – автоматична обробка фотограмметричних моделей для виявлення дефектів фасадів історичних будівель, аналіз пошкоджень у кам'яних скульптурах та створення інтерактивних карт пошкоджень з прогнозуванням динаміки руйнування [11].

Використання таких комплексних цифрових рішень поєднує точність, відтворюваність результатів і збереження культурної спадщини на науково обґрунтованій основі, підвищуючи ефективність управління реставраційними процесами та забезпечуючи інтеграцію навчальних і наукових підходів у сфері консервації [12].

Пілотне порівняння натурної та камеральної фіксації ушкоджень. У межах пілотного спостереження застосовано поєднання натурного огляду, цифрової фотозйомки та опрацювання результатів сканування. Метою було формування цифрового архіву з геометрично пов'язаними зображеннями елементів досліджуваного об'єкта. Ділянки об'єкта аналізувалися у два етапи: безпосередньо під час натурного огляду та повторно під час камерального перегляду цифрових матеріалів. Підсумковий перелік формувався шляхом об'єднання результатів обох етапів із виключенням повторюваних записів. Під час камерального аналізу було підтверджено або додатково ідентифіковано 87% пошкоджень, включених до підсумкового переліку. Для контрольної підвибірки з 84 архітектурних елементів середня тривалість ручного опрацювання становила 42 хв на елемент, а камерального цифрового – 15 хв. Відносне скорочення часу становило 64,3%, а сумарна економія для контрольної підвибірки – 2268 хв, або 37,8 людино-годин, що після округлення становить 38 людино-годин. Отримані показники характеризують один пілотний об'єкт і не є результатами тестування моделі штучного інтелекту. Формат архіву – IFC та прикріплені 2D-знімки.

Ключові метрики:

– частка виявлених дефектів – 87 %;

– скорочення часу інспекції – 64 %;

– кількість сформованих карт ушкоджень – 214.

Оцінка критичності та атрибутика BIM. Критерії атрибутивного оцінювання HBIM. Criticality характеризує невідкладність реагування

з урахуванням загрози безпеці, ймовірності прогресування та наслідків для елемента: 1 – незначне стабільне пошкодження; 2 – локальне, плановий моніторинг; 3 – суттєве, потрібне інструментальне обстеження; 4 – критичне, необхідні термінові стабілізаційні заходи; 5 – аварійне, існує безпосередня небезпека втрати або обвалення. Оцінка не замінює висновок сертифікованого інженера.

Recoverability відображає технічну можливість збереження матеріальної субстанції: 0 – не визначено без додаткових досліджень; 1 – відновлення практично неможливе, переважає документування втрати; 2 – можливе часткове збереження з істотним доповненням; 3 – відновлення можливе з помірним втручанням; 4 – можливе переважно консерваційними заходами. Показник не є оберненою шкалою Criticality: критичний елемент може мати високу відновлюваність за своєчасного втручання.

Authenticity Tag фіксує статус походження, а не «рівень автентичності»: Original – первісна або історично значуща субстанція; Historic replacement – історична заміна, що набула цінності; Later intervention – пізніше втручання без підтвердженої культурної цінності; Reconstruction – відтворений елемент; Unknown – походження не встановлено. Тег присвоюють на підставі натурних, архівних і матеріалознавчих даних із посиланням на джерело доказу.

До кожного відсканованого елемента створено картку у BIM-моделі з полями Criticality, Recoverability, Authenticity Tag. Приклад: карниз – Criticality 3, Recoverability 2, Authenticity Tag «Original» (іл. 5).

Ключові метрики:

– середній час заповнення картки – 1,5 хв на елемент;

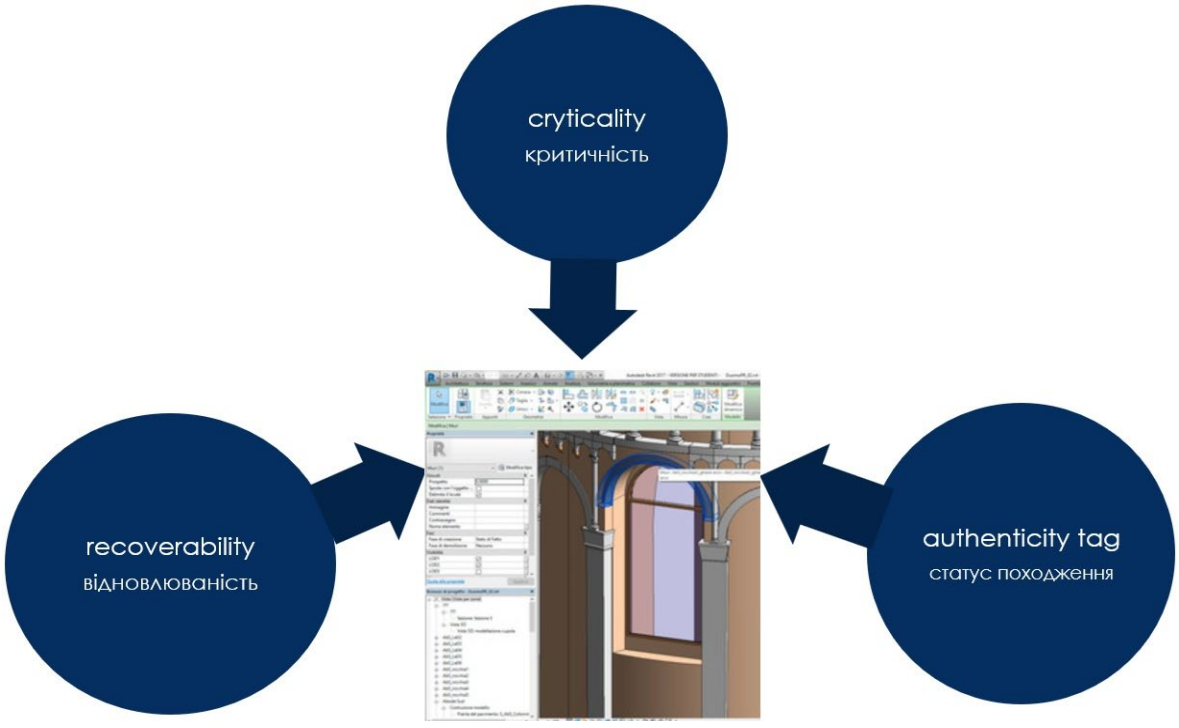
– критичність визначена для всіх включених до вибірки елементів – 100%;

– кількість оновлених записів у BIM-моделі – 1420.

Порівняння геометрії до та після пошкодження. Для контролю деформацій застосовано показники прогину, крену та розкриття тріщин. Для дослідженого балкона прогин збільшився з 3 мм до пошкодження до 12 мм після. Абсолютне збільшення становило 9 мм, а відносне – 300%. Для карниза крен збільшився з 0,4° до 1,2°; абсолютне збільшення становило 0,8°, а відносне – 200%. У HBIM зберігаються дві версії елементів із зазначенням дат сканування, джерел даних та історії змін.

Ключові показники:

– кількість елементів із версіями стану «до/після» – 315;



Іл. 5. Атрибутика HBIM в оцінці пошкоджень. [Ілюстрація авторів]

– збільшення прогину дослідженого балкона – 9 мм, або 300%;

– збільшення крену дослідженого карниза – 0,8°, або 200%.

Порогові вимірювання та експертний класифікатор пошкоджень. Для дослідженого випадку створено класифікатор з пілотними граничними показниками для прогинів (>10 мм), кренів (>1°), тріщин (>1 мм). У разі перевищення порогів елемент автоматично позначався червоним у BIM-інтерфейсі. У процесі використано смартфон Samsung Galaxy A52 для виконання знімків фотограмметрії, OpenScanTools, CloudCompare для первинної обробки, Autodesk Recap для реєстрації хмари точок та Archicad 26 для побудови моделі.

Ключові метрики:

– частка випадків пошкоджень, однозначно віднесених експертом до класів запропонованого класифікатора – 92 % (показник 92% визначали як відношення кількості пошкоджень, для яких експерт зміг однозначно встановити клас за запропонованою структурою, до загальної кількості класифікованих випадків, решту становили неоднозначні випадки, що потребували додаткових даних або уточнення структури класифікатора);

– кількість попереджень – 378;

– скорочення маркування – 55 %.

Від хмари точок до моделі: напівручний воркфлоу. Поточні обмеження автоматичного розпізнавання – низька точність для нестандартних профілів. Тому використано напівручний підхід: попередньо визначений тип елемента перевіряє та, за потреби, коригує експерт; оператор підтверджує або коригує. Завдяки напівавтоматизованій процедурі обсяг ручного маркування скорочено на 55%, тобто до 45% від початкового.

Ключові метрики:

– частка елементів, для яких запропонований тип не потребував подальшого експертного коригування – 75% (показник визначали як відношення кількості елементів, класифікацію яких експерт підтвердив без зміни, до загальної кількості перевірених елементів);

– середній час на підтвердження – 20 секунд/елемент;

– економія трудовитрат – 38 людино-годин для контрольної підвибірки з 84 елементів.

Приклад кейсу (мінімальний). Досліджуваним об'єктом був фасад адміністративної будівлі, спорудженої у 1899–1902 роках у стилі неоренесансу з каменю, цегли та металу, з дерев'яними заповненнями віконних та дверних прорізів та з металевою покрівлею. Фасад оздоблено тинькуванням із пофарбуванням. Обстежена ділянка охоплювала близько 2000 м² брутто-площі фасадів. Брутто-площу фасадів визначено за HBIM-моделлю як суму площ обстежених фасадних поверхонь із включенням площі прорізів та без урахування розгорнутої площі дрібного декоративного рельєфу.

Основними видами зафіксованих пошкоджень були тріщини, відшарування, деформації, втрати матеріалу тощо. Натурну фіксацію виконували за допомогою смартфона Samsung Galaxy A52, а камеральне опрацювання – у програмах OpenScanTools, CloudCompare та Archicad 26.

На кожному елементі може бути довільна кількість визначених пошкоджень, зафіксованих як в атрибутах (властивостях елемента), так і геометрично. Наприклад:

– балкон (Criticality 4): 2 дефекти, прогин 3 мм – після 12 мм;

– карниз (Criticality 3): крен 0,4° – після 1,2°;

– віконна рама (Criticality 2): деформація рами.

Час інспекції «людина» – 5 год; «Check + BIM» – 1,7 год. Кількість дефектів, виявлених на моделі, додатково – +40 %.

Ключові метрики:

– скорочення часу інспекції – 66 %;

– додатково виявлені дефекти – 12 шт.;

– кількість виявлених пошкоджень збільшено на 8 % завдяки точнішій оцінці.

Алгоритм пілотного опрацювання включав натурний огляд, цифрову фотозйомку та сканування, реєстрацію й очищення просторових даних, повторний камеральний перегляд, формування двох переліків пошкоджень, їхнє зіставлення, виключення дублікатів, експертну класифікацію, прив'язку підтверджених випадків до HBIM-елементів і розрахунок порівняльних показників. Під час навчальних сесій методичні підходи обговорювали з профільними фахівцями; безпосереднє формування та перевірку підсумкового переліку пошкоджень здійснювали автори й експерти J. Kallas [13; 15; 16] та S. Revenko [19; 20]. У разі розбіжностей остаточну класифікацію визначали шляхом узгодженого експертного рішення.

Зведені дані таблиці продемонстрували високий рівень ефективності застосованого процесу цифрових технологій (іл. 6).

Так, алгориметрична фіксація забезпечила виявлення 87% дефектів і скорочення часу інспекції на 64%, повна атрибутизація елементів у BIM

Таблиця 1

Зведена таблиця метрик

Підрозділ	Основна дія	Ключовий (KPI)	Значення
Камеральний аналіз цифрових матеріалів	Підтверджені або додатково ідентифіковані	Частка, %	87
Камеральний аналіз цифрових матеріалів	Час інспекції	Скорочення, %	64
Атрибутика BIM	Елементи з атрибутами	Покриття, %	100
Геометрія до/після	Збільшення прогину	%	300
Класифікатор	Частка однозначно класифікованих випадків	%	92
Напівручний воркфлоу	Економія трудовитрат	людино-годин для контрольної підвибірки	38
Кейсовий приклад	Додатково виявлені дефекти	шт.	12

Примітка. *Показники отримано під час пілотного опрацювання дослідного об'єкта. Вони характеризують порівняння натурного експертного огляду з подальшим камеральним аналізом цифрових матеріалів і застосуванням порогових критеріїв у HBIM. Показники не є результатами навчання або тестування моделі штучного інтелекту та не можуть бути поширені на інші типи пам'яток без подальшої апробації.*



Іл. 6. Схема процесу. [Складено авторами]

досягла 100% покриття (за визначеними критеріями), порівняння геометрії «до/після» засвідчило збільшення прогину, класифікатор дав змогу охопити 92% визначених пошкоджень, а завдяки напівручному воркфлоу заощадили 38 годин на об'єкт, а на кейсовому прикладі додатково було виявлено 12 дефектів, що комплексно підтвердило зростання точності, швидкості та економічної доцільності проведених робіт.

Результати підтверджують доцільність поєднання натурного огляду з повторним камеральним аналізом фотоматеріалів, даних сканування та HBIM-атрибутики. На цьому етапі показники характеризують роботу експерта з цифровими матеріалами та застосування порогових правил, а не ефективність навченої моделі штучного інтелекту. Сформований масив експертно класифікованих даних розглядається як основа для наступного етапу – формування навчальних, валідаційних і тестових вибірок та перевірки алгоритмів автоматичного розпізнавання.

Сучасні дослідження демонструють можливість застосування алгоритмів штучного інтелекту для аналізу цифрових зображень фасадів історичних будівель, визначення типів деградації та формування карт пошкоджень. При цьому автоматизоване розпізнавання доцільно розглядати як допоміжний засіб, який використовується разом із натурним обстеженням, візуальними матеріалами та експертною оцінкою [11].

Головні висновки і перспективи використання результатів дослідження. Документування пошкоджень пам'яток культурної спадщини не може обмежуватися лише візуальними оглядами та фотозйомкою, адже такий підхід забезпечує лише поверхове уявлення про характер пошкоджень і не відповідає сучасним вимогам щодо збереження культурної спадщини. Для підвищення ефективності необхідно застосовувати сучасні технології, зокрема фотограмметрію та лазерне сканування, 3D-моделювання та алгоритми штучного інтелекту, які здатні автоматизувати процес аналізу й класифікації пошкоджень. Перспективним напрямом є створення класифікаторів ушкоджень, інтегрованих у BIM-моделі,

що дає змогу поєднувати технічні дані з відомостями про фактичний стан об'єктів і формувати науково обґрунтовану основу для ухвалення рішень у сфері охорони та реставрації культурної спадщини. Таким чином, інтеграція цифрових технологій стає ключовою умовою підвищення точності документування та ефективності управлінських рішень у сфері збереження культурної спадщини.

Пілотне застосування цифрової моделі, фотограмметричних матеріалів і результатів сканування засвідчило доцільність поєднання натурного огляду з повторним камеральним аналізом. Наведені результати характеризують один пілотний випадок і не є оцінкою точності навченої моделі штучного інтелекту. Вони становлять основу для подальшого формування навчальних, валідаційних і тестових вибірок.

Таблиця 2

Терміни та скорочення, використані у статті

Термін/скорочення	Тлумачення та значення у статті
BIM (Building Information Modeling)	Будівельне інформаційне моделювання – процес створення, використання й оновлення цифрової інформації про об'єкт. BIM-модель поєднує тривимірну геометрію з властивостями елементів та зв'язками між ними.
HBIM (Heritage Building Information Modeling)	Інформаційне моделювання об'єктів культурної спадщини – застосування BIM до історичних споруд з урахуванням їхньої історії, матеріалів, культурної цінності, стану та попередніх втручань.
Воркфлоу (workflow)	Робочий процес – послідовність взаємопов'язаних операцій зі збирання, опрацювання, перевірки та використання даних. «Напівручний воркфлоу» у статті означає поєднання програмних операцій із ручною перевіркою й коригуванням результатів експертом.
2D, 3D, 4D	2D – двовимірне подання, наприклад, фотографія; 3D – тривимірне подання геометрії. 4D у схемі HBIM означає доповнення 3D-моделі часовими даними: датами змін і графіками робіт.
Фотограмметрія	Метод визначення форми, розмірів і просторового розташування об'єктів за фотографіями. Знімки з різних ракурсів дають змогу скласти тривимірне уявлення про поверхню.
Лазерне сканування	Вимірювання просторових координат численних точок поверхні лазерним приладом для цифрової фіксації геометрії об'єкта.
Хмара точок	Набір точок із просторовими координатами, що відображає поверхню об'єкта. Самі координати не визначають типу, призначення чи історичної цінності архітектурних елементів.
Реєстрація хмари точок	Просторове суміщення поодиноких сканів у спільній системі координат для формування цілісної цифрової моделі об'єкта.
«Шум» та артефакти даних	«Шум» – випадкові похибки вимірювань; артефакти – хибні точки або фрагменти, утворені під час знімання чи оброблення. Їх усувають очищенням і фільтрацією даних.
Семантичний опис і класифікація	Надання геометричним елементам змістового значення: назви, типу, призначення та зв'язків із описовими даними. Семантична класифікація визначає, до якого класу належить елемент або пошкодження.
Атрибути, атрибутика, атрибутизація	Атрибути – описові властивості елемента в полях моделі. Наприклад, матеріал, датування або стан. Атрибутика – сукупність таких властивостей; атрибутизація – їх внесення та прив'язування до елементів.
Criticality	Критичність пошкодження – показник невідкладності реагування з урахуванням загрози безпеці, розвитку пошкодження та наслідків для елемента. У статті застосовано шкалу 1–5.
Recoverability	Відновлюваність – оцінка технічної можливості збереження матеріальної субстанції елемента. У статті використано шкалу 0–4; цей показник не є оберненою шкалою критичності.
Authenticity Tag	Позначка статусу походження елемента: Original – первісний або історично значущий; Historic replacement – історична заміна; Later intervention – пізніше втручання; Reconstruction – відтворений; Unknown – невстановленого походження. Це позначення категорії, а не числова оцінка автентичності.
IFC (Industry Foundation Classes)	Відкритий міжнародний стандарт подання й обміну даними інформаційних моделей будівель. Файли IFC використовують для передавання геометрії, властивостей елементів і зв'язків між ними та різними програмами.

Продовження таблиці 2

Термін/скорочення	Тлумачення та значення у статті
Натурне обстеження і камеральний аналіз	Натурне обстеження виконують безпосередньо на об'єкті. Камеральний аналіз – опрацювання зібраних фотографій, результатів вимірювань і цифрових моделей поза об'єктом.
Експертна верифікація та анотування	Верифікація – перевірка фахівцем правильності даних і висновків. Анотування – доповнення даних описами, класифікаційними позначеннями та, за потреби, межами пошкоджених ділянок.
ШІ та машинне навчання	Штучний інтелект (ШІ) – комп'ютерні методи виконання завдань, зокрема розпізнавання та класифікації. Машинне навчання – напрям ШІ, у якому алгоритми виявляють закономірності на основі прикладів даних.
Навчальна, валідаційна і тестова вибірки	Навчальна вибірка використовується для навчання моделі; валідаційна – для її вибору й налаштування; тестова – для підсумкового оцінювання на окремих даних, які не використовувалися для навчання чи налаштування.
KPI та метрики	KPI (Key Performance Indicator) – ключовий показник результативності. Метрики – кількісні характеристики процесу або результату; у статті це, зокрема, частки виявлених пошкоджень, витрати часу та обсяг заповнених даних.
«Check + BIM»	Умовне позначення застосованої у статті експертної перевірки цифрових матеріалів із використанням BIM-моделі. Це назва способу опрацювання в наведеному порівнянні, а не окремої програми.
Кейс і пілотне дослідження	Кейс – конкретний випадок застосування методики на об'єкті. Пілотне дослідження – попередня перевірка підходу в обмеженому масштабі перед його ширшим застосуванням.
Версійність даних	Збереження датованих станів моделі та історії змін, що дає змогу порівнювати стан елементів у різні моменти часу.
Превентивний моніторинг	Систематичне спостереження за станом об'єкта для раннього виявлення небажаних змін і своєчасного запобігання розвитку пошкоджень.
Lifecycle management	Управління об'єктом і пов'язаною з ним інформацією впродовж його життєвого циклу. У контексті статті – зберігання, перевірка та оновлення даних, зокрема після реставрації.
Фасиліті-менеджмент (facility management)	Управління експлуатацією та технічним утриманням будівлі, включно з організацією оглядів, обслуговування та необхідних робіт.
Хронологічна стратифікація	Поєднання в споруді частин і нашарувань різних будівельних періодів, сформованих під час зведення, перебудов і ремонту.
Морфологічна гетерогенність	Неоднорідність форми та будови елементів, зокрема відмінності в розмірах, профілях, симетрії й геометричних відхиленнях.
Іконографічні матеріали	Історичні зображення об'єкта – фотографії, малюнки, гравюри та інші візуальні джерела, що допомагають встановити його попередній вигляд.
Цифровий двійник	Цифрове представлення реального об'єкта, яке актуалізується на основі даних про його стан і використовується для аналізу змін. Самої геометричної подібності недостатньо для такого зв'язку з реальним об'єктом.
Семантичний контейнер	У статті – образне позначення середовища HBIM, у якому до геометричних елементів прив'язано історичні, технічні й інші змістові відомості.
«Репорти»	Звіти; на іл. 6 – документи, автоматично сформовані на підставі даних BIM-моделі.

Примітка. *Визначення подано стисло відповідно до контексту дослідження; шкали показників наведено в основному тексті. (Складено авторами).*

Список використаних джерел

1. Alshawabkeh Y. et al. Heritage documentation using laser scanner and photogrammetry. The case study of Qasr Al-Abidit, Jordan. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2020. T. 16. e00133. DOI: https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00133.

2. Bakirman T. et al. Implementation of ultra-light UAV systems for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*. 2020. T. 44. C. 174–184. DOI: https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.01.006.

3. Khalil A., Stravoravdis S., Backes D. Categorisation of building data in the digital documentation of heritage buildings. *Applied Geomatics.* 2021. T. 13. C. 29–54. DOI: https://doi.org/10.1007/s12518-020-00322-7.

4. Masciotta M. G. et al. A digital-based integrated methodology for the preventive conservation of cultural heritage: the experience of HeritageCare project. *International Journal of Architectural Heritage*. 2021. T. 15, № 6. C. 844–863. DOI: https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1668985.

5. Bosher L. et al. Dealing with multiple hazards and threats on cultural heritage sites: an assessment of 80 case studies. *Disaster Prevention and Management: An International Journal.* 2020. T. 29, № 1. С. 109–128. DOI: https://doi.org/10.1108/dpm-08-2018-0245.

6. Cacciotti R. et al. Climate change-induced disasters and cultural heritage: optimizing management strategies in Central Europe. *Climate Risk Management.* 2021. T. 32. 100301. DOI: https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100301.

7. Mekonnen H., Bires Z., Berhanu K. Practices and challenges of cultural heritage conservation in historical and religious heritage sites: evidence from North Shoa Zone, Amhara region, Ethiopia. *Heritage Science*. 2022. T. 10. 172. DOI: https://doi.org/10.1186/s40494-022-00802-6.

8. Gireesh Kumar T. K. Identification, documentation and promotion of cultural heritage: problems and prospects in the Indian context. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development.* 2022. 14(6). 950–962. DOI: https://doi.org/10.1108/jchmsd-03-2022-0043.

9. Kantaros A., Ganetsos T., Petrescu F. I. T. Three-dimensional printing and 3D scanning: emerging technologies exhibiting high potential in the field of cultural heritage. *Applied Sciences*. 2023. T. 13, № 8. 4777. DOI: https://doi.org/10.3390/app13084777.

10. Wang H., Zhang B., Qiu H. How a hierarchical governance structure influences cultural heritage destination sustainability: a context of red tourism in China. *Journal of Hospitality and Tourism Management*. 2022. T. 50. С. 421–432. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2022.02.002.

11. Ararat M. B., Yenice T. K. The use of artificial intelligence in damage assessment of historical buildings. *Frontiers of Architectural Research*. 2025. T. 15, № 2. С. 554–565. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foar.2025.06.008.

12. Muñoz-Silva E. M. et al. Binary damage classification of built heritage with a 3D neural network. npj *Heritage Science*. 2025. T. 13. DOI: https://doi.org/10.1038/s40494-025-01597-y.

13. Kallas J., Napolitano R. Image-based 3D modeling as a damage prioritization tool for historic buildings in post-disaster areas: the case of the 2020 Beirut blast. *Journal of Cultural Heritage*. 2023. T. 62. С. 314–321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.06.007.

14. Paulino D. M. S., Kaushal S. S., Kallas J., Napolitano R. Data-driven documentation: techniques for historic buildings after anthropogenic and natural hazards. *Springer Series on Cultural Computing*. 2026. С. 89–112. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-91949-7_5.

15. Kallas J., Napolitano R. Beyond field surveys: understanding the role of 3D spatial attributes for data-driven blast vulnerability assessment of masonry buildings. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2025. T. 128. 105672. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105672.

16. Kallas J., Napolitano R. Understanding key building attributes influencing flood vulnerability in masonry structures after the 2023 Kakhovka dam breach in Ukraine. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. 2025. T. 18, № 3. 51. DOI: https://doi.org/10.1145/3744743.

17. Zitouni M., Arruda M. R. T., Cantor P., Branco F. Thermal effect of firebrand accumulation in ceramic roof tiles. *Fire*. 2025. T. 8, № 2. 55. DOI: https://doi.org/10.3390/fire8020055.

18. Arruda M. R. T., Cantor P., Bicelli A., Branco F. Thermal reaction of firebrand accumulation in construction materials. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. T. 20. e02985. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02985.

19. Skamantzari M., De Vos P.-J., Revenko S., Ferreira V. M. Advanced 3D documentation and capacity building for post-conflict damage assessment: the case of the Taras Shevchenko Chernihiv regional academic music and drama theatre, Ukraine. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2025. T. XLVIII-M-9-2025. С. 1373–1378. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-1373-2025.

20. Reina Ortiz M., Santana Quintero M., Revenko S. Heritage at risk and pedagogical approaches: training professionals in digital documentation for UNESCO World Heritage sites under threat at the Saint Sophia Cathedral Complex in Kyiv, Ukraine. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2026. T. XLIX-B5-2026. С. 113–119. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIX-B5-2026-113-2026.

21. Гришина О. Свідоме успадкування. Експерт ІС Consulenten Клаудіу Сільвестру про традиційні підходи та інновації в реконструкції історичних будівель. *Pragmatika.Media*. 22.05.2025. URL: https://pragmatika.media/svidome-uspadkuvannia-ekspert-ic-consulenten-klaudiu-silvestru-pro-tradytsijni-pidkhody-ta-innovatsii-v-rekonstruktsii-istorychnykh-budivel/ (дата звернення: 03.08.2026).

References

1. Alshawabkeh, Y., El-Khalili, M., Almasri, E., Bala'awi, F., & Al-Massarweh, A. (2020). Heritage documentation using laser scanner and photogrammetry: The case study of Qasr Al-Abidit, Jordan. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage,* 16, e00133. https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00133 [in English].

2. Bakirman, T., Bayram, B., Akpinar, B., Karabulut, M. F., Bayrak, O. C., Yigitoglu, A., & Seker, D. Z. (2020). Implementation of ultra-light UAV systems for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, 44, 174–184. https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.01.006 [in English].

3. Khalil, A., Stravoravdis, S., & Backes, D. (2021). Categorisation of building data in the digital documentation of heritage buildings. *Applied Geomatics,* 13(1), 29–54. https://doi.org/10.1007/s12518-020-00322-7 [in English].

4. Masciotta, M. G., Morais, M. J., Ramos, L. F., Oliveira, D. V., Sánchez-Aparicio, L. J., & González-Aguilera, D. (2021). A digital-based integrated methodology for the preventive conservation of cultural heritage: The experience of the Heritage Care project. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(6), 844–863. https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1668985 [in English].

5. Bosher, L., Kim, D., Okubo, T., Chmutina, K., & Jigyasu, R. (2020). Dealing with multiple hazards and threats on cultural heritage sites: An assessment of 80 case studies. *Disaster Prevention And Management: An International Journal,* 29(1), 109–128. https://doi.org/10.1108/DPM-08-2018-0245 [in English].

6. Cacciotti, R., Kaiser, A., Sardella, A., De Nuntiis, P., Drdácký, M., Hanus, C., & Bonazza, A. (2021). Climate change-induced disasters and cultural heritage: Optimizing management strategies in Central Europe. *Climate Risk Management*, 32, 100301. https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100301 [in English].

7. Mekonnen, H., Bires, Z., & Berhanu, K. (2022). Practices and challenges of cultural heritage conservation in historical and religious heritage sites: Evidence from North Shoa Zone, Amhara Region, Ethiopia. *Heritage Science,* 10, 172. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00802-6 [in English].

8. Gireesh Kumar, T. K. (2024). Identification, documentation and promotion of cultural heritage: Problems and prospects in the Indian context. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development,* 14(6), 950–962. https://doi.org/10.1108/JCHMSD-03-2022-0043 [in English].

9. Kantaros, A., Ganetsos, T., & Petrescu, F. I. T. (2023). Three-dimensional printing and 3D scanning: Emerging technologies exhibiting high potential in the field of cultural heritage. *Applied Sciences,* 13(8), 4777. https://doi.org/10.3390/app13084777 [in English].

10. Wang, H., Zhang, B., & Qiu, H. (2022). How a hierarchical governance structure influences cultural heritage destination sustainability: A context of red tourism in China. *Journal Of Hospitality And Tourism Management*, 50, 421–432. https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2022.02.002 [in English].

11. Ararat, M. B., & Yenice, T. K. (2025). The use of artificial intelligence in damage assessment of historical buildings. *Frontiers of Architectural Research*. 15(2). 554-565. https://doi.org/10.1016/j.foar.2025.06.008 [in English].

12. Muñoz-Silva, E. M., Vasquez-Gomez, J. I., Merlo-Zapata, C. A., & Antonio-Cruz, M. (2025). Binary damage classification of built heritage with a 3D neural network. npj *Heritage Science*, 13, Article 124. https://doi.org/10.1038/s40494-025-01597-y [in English].

13. Kallas, J., & Napolitano, R. (2023). Image-based 3D modeling as a damage prioritization tool for historic buildings in post-disaster areas: The case of the 2020 Beirut blast. *Journal of Cultural Heritage*, 62, 314–321. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.06.007 [in English].

14. Paulino, D. M. S., Kaushal, S. S., Kallas, J., & Napolitano, R. (2025). Data-driven documentation: Techniques for historic buildings after anthropogenic and natural hazards. *In Springer series on cultural computing* (pp. 89–112). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-91949-7_5 [in English].

15. Kallas, J., & Napolitano, R. (2025a). Beyond field surveys: Understanding the role of 3D spatial attributes for data-driven blast vulnerability assessment of masonry buildings. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 128, Article 105672. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105672 [in English].

16. Kallas, J., & Napolitano, R. (2025b). Understanding key building attributes influencing flood vulnerability in masonry structures after the 2023 Kakhovka Dam breach in Ukraine. *Journal on Computing and Cultural Heritage.* https://doi.org/10.1145/3744743 [in English].

17. Zitouni, M., Tiago Arruda, M. R., Cantor, P., & Branco, F. (2025). Thermal effect of firebrand accumulation in ceramic roof tiles. *Fire*, 8(2), Article 55. https://doi.org/10.3390/fire8020055 [in English]

18. Arruda, M. R. T., Cantor, P., Bicelli, A., & Branco, F. (2024). Thermal reaction of firebrand accumulation in construction materials. *Case Studies in Construction Materials,* 20, Article e02985. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02985 [in English].

19. Skamantzari, M., De Vos, P.-J., Revenko, S., & Ferreira, V. M. (2025). Advanced 3D documentation and capacity building for post-conflict damage assessment: the case of the Taras Shevchenko Chernihiv regional academic music and drama theatre, Ukraine. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-9-2025, 1373–1378. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-1373-2025 [in English].

20. Reina Ortiz, M., Santana Quintero, M., & Revenko, S. (2026). Heritage at risk and pedagogical approaches: Training professionals in digital documentation for UNESCO World Heritage Sites under threat at the Saint-Sophia Cathedral Complex in Kyiv, Ukraine. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIX-B5-2026, 113–119. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIX-B5-2026-113-2026 [in English].

21. Grishina O. (2025, May 22) Conscious inheritance. Expert IC Consulenten Klaudiu Silvestru on traditional approaches and innovations in the reconstruction of historical buildings (interview) – *Pragmatika.Media* URL: https://pragmatika.media/svidome-uspadkuvannia-ekspert-ic-consulenten-klaudiu-silvestru-pro-tradytsijni-pidkhody-ta-innovatsii-v-rekonstruktsii-istorychnykh-budivel/ (Accessed: August 03, 2026) [in Ukrainian].

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Дата першого надходження статті до видання: 02.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 12.11.2026