Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БІЛОВ ВЛАДИСЛАВ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 72.025:004.94

ДИСЕРТАЦІЯ
БУДІВЕЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ, ПОШКОДЖЕНОГО ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

191 – Архітектура та містобудування
19 - Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____В.А. Білов

Науковий керівник: Левченко Олексій Вікторович, кандидат архітектури, доцент

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Білов В.А. Будівельна інформаційна модель об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 191 – Архітектура та містобудування. – Київський національний університет будівництва і архітектури МОН України, Київ, 2026.

У вступі обґрунтовується актуальність теми дослідження, визначаються мета, завдання, об’єкт, предмет, методи та межі дослідження, а також наукова новизна, практичне значення та застосування результатів роботи.

У першому розділі «Теоретико-методологічні основи дослідження використання будівельного інформаційного моделювання при реставрації та подальшій експлуатації об’єктів архітектурної спадщини, пошкоджених внаслідок воєнних дій» здійснено класифікацію об’єктів архітектурної спадщини за видовою належністю відповідно до Закону України «Про охорону культурної спадщини», а також класифікацію воєнних втрат архітектурної спадщини. Обґрунтовано, що цифрова фіксація є обов’язковою не лише для об’єктів, внесених до Державного реєстру нерухомих пам’яток України, а й для щойно виявлених об’єктів культурної спадщини, які зазнали пошкоджень.

На основі проведеного аналізу наукових досліджень виявлено внесок у пам’яткоохоронну сферу значний внесок українських вчених, у роботах яких опрацьовано взаємопов’язані складові консервації (музеєфікації) , реставрації, реновації та цифрового документування архітектурної спадщини. Передусім у науковому середовищі КНУБА теоретико-методологічні засади містобудівних систем, реконструкції та розвитку архітектурного середовища розвинули М. М. Дьомін, В. В. Товбич і О. І. Косаревський; дослідження, реставрацію та повоєнне відновлення об’єктів архітектурної спадщини розглядали О. С. Слєпцов, Ю. В. Івашко, М. І. Орленко та В. О. Молочко; методологічні засади комплексних реставраційно-реконструктивних трансформацій і

регенерацій історичного міського середовища – Н. А. Лещенко; цифрові технології архітектурного проєктування та будівельне інформаційне моделювання – Т. А. Гончаренко, О. В. Кащенко, О. В. Левченко, Т. О. Кащенко та А. В. Михайленко; інженерну фотограмметрію, наземне й повітряне лазерне сканування, геоінформаційне забезпечення та інтероперабельні геопросторові дані – Р. А. Дем'яненко, Р. В. Шульц, Ю. О. Карпінський і А. А. Лященко; технічне обстеження, реконструкцію та відновлення експлуатаційної придатності будівель і споруд – О. Ф. Осипов, О. С. Молодід та О. Ю. Ковальчук.

Також київський пам’яткознавчий і реставраційний напрям представлений працями В. В. Вечерського з історії, типології, виявлення й обліку архітектурної спадщини, а також Л. В. Прибєги з теорії, методології охорони, консервації та реставрації. Харківські науковці В. Є. Новгородов, Г. О. Осиченко, І. В. Древаль, К. Т. Черкасова та Є. І. Губкіна розкрили практику реставрації пам’яток, реконструкції історичних міст, післявоєнного відродження міських комплексів і збереження спадщини модернізму. Одеський осередок репрезентують В. А. Лисенко, О. Б. Раллєв, В. М. Мещеряков та О. І. Менейлюк, у працях яких досліджено реставраційні матеріали й конструктивні рішення, відтворення втрачених об’єктів, формування традиційного характеру історичного середовища та технологію реконструктивно-реставраційних робіт. Львівську школу формують М. В. Бевз, І. Р. Могитич, О. В. Рибчинський і Ю. Я. Дубик, які розвинули методики історико-архітектурних і натурних досліджень, регенерації історичних середмість, збереження фортифікаційної спадщини та підсилення історичних конструкцій. У Дніпрі О. В. Харлан, І. С. Ревський і М. В. Савицький опрацьовують історико-архітектурні дослідження населених місць, реконструкцію історичного середовища, натурне обстеження та конструктивно-технологічні засади відновлення; запорізький напрям дослідження індустріальної й модерністської спадщини представлений працями Т. Бажанової, П. Кравчука та О. В. Харлана. Чернівецький науковий осередок, сформований на базі кафедри архітектури, урбаністики та збереження об’єктів ЮНЕСКО Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича,

представлений працями І. В. Коротун, у яких обґрунтовано архітектурно-містобудівні засади формування буферних зон об’єктів Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО, збереження історичного середовища та застосування сучасних методів дослідження пам’яток. Дослідження інших регіональних осередків доповнюють праці П. А. Ричкова й О. В. Лесика щодо охорони, реставрації та пристосування пам’яток Волині, а також З. В. Лукомської щодо збереження історико-архітектурного середовища Івано-Франківська.

Цифрову складову дослідження співвіднесено із закордонними працями М. Мерфі, Ю. Макговерна і С. Павії, якими започатковано концепцію HBIM, а також Ф. Фассі, К. Акілле, Н. Бруно, Х. Мояно, Х. Е. Ньєто-Хуліана, Б. Рівейро та П. Б. Лоренсу, присвяченими Scan-to-HBIM, параметричному й семантичному моделюванню, структурній діагностиці та цифровим двійникам об’єктів спадщини. Узагальнення цих наукових напрацювань дало змогу розглядати HBIM-модель не лише як геометричну репрезентацію пам’ятки, а як структуроване інформаційне середовище, що поєднує дані про її історію, культурну цінність, матеріали, технічний стан, воєнні пошкодження, реставраційні втручання та подальшу експлуатацію.

В дисертаційній роботі обґрунтовано доцільність застосування історично орієнтованого будівельно-інформаційного моделювання – Heritage Building Information Modeling (HBIM) для об’єктів архітектурної спадщини. Встановлено, що об’єкт архітектурної спадщини, який вирізняється композиційною складністю та унікальністю, що зумовлює специфіку методологічних підходів до її дослідження. Наявні BIM-технології розроблено для задання проєктних параметрів об’єктів, тоді як робота з об’єктами культурної спадщини передбачає першочергове виявлення, верифікацію та відновлення їхніх фактичних характеристик.

Проаналізовано вітчизняний і закордонний досвід реалізації HBIM-проєктів для об’єктів архітектурної спадщини. Встановлено, що інтеграція лазерного сканування та фотограмметрії з параметричним моделюванням робить можливим створення високоточних цифрових моделей, проте автоматизація

процесу сканування у BIM-модель об'єкта спадщини (Scan-to-HBIM) залишається нерозв’язаною проблемою. Визначено перспективність комбінації методів: 3D-сканування, алгоритмічного моделювання (Rhino/Grasshopper), параметричного моделювання в BIM-середовищі (Archicad, Revit, Allplan) та GIS для управління.

У другому розділі **«Методика створення цифрової моделі об’єкта архітектурної спадщини»** викладено загальну методику дослідження, визначено структуру вихідних даних, запропоновано систему рівнів LOD-H/LOI-H та виконано порівняльне оцінювання програмних засобів для HBIM-моделювання. Методика поєднує теоретико-аналітичний, нормативний, інформаційно-параметричний і апробаційний етапи та містить критерії перевірки комплаєнсу , простежуваності, взаємоузгодженості й інтероперабельності даних.

Визначено перелік вихідних даних для створення HBIM відповідно до вимог стандартів BIM серії ISO 19650. Обґрунтовано, що вихідні дані для HBIM мають охоплювати п’ять класів: геометричні дані (результати лазерного 3D-сканування, фотограмметрії, геодезичних вимірювань); атрибутивні та семантичні дані (матеріали, технічний стан, історична цінність, функціональне призначення); історико-архітектурні дані (архівні креслення, описи змін, етапи перебудов); матеріальні дані (фізико-механічні властивості, ступінь зношеності, текстури); функціональні дані (зміна використання приміщень у часі). Для кожного класу визначено методи збору, оброблення та інтеграції у BIM-середовище.

Запропоновано модифіковану шкалу рівнів деталізації для HBIM. LOD-H100 відповідає концептуальній моделі (об’ємні маси, історичні межі); LOD-H200 передбачає узагальнену геометрію з охоронними зонами; LOD-H300 забезпечує деталізовану геометрію з матеріалами; LOD-H400 охоплює конструктивні вузли та реставраційні технології; LOD-H500 призначено для моделі експлуатації та моніторингу. До кожного рівня LOD-H визначено відповідний рівень інформаційного наповнення LOI-H, що охоплює атрибутивні

(датування, історико-культурну цінність, технічний стан), нормативні (охоронні документи, режими використання) та семантичні (класифікацію приміщень, історичні функції) дані. Класифікацію узгоджено з принципами стандартів ISO 19650 та адаптовано до українських ДБН та ДСТУ.

Проведено порівняльний аналіз програмного забезпечення BIM для моделювання об'єктів архітектурної спадщини. Встановлено переваги HBIM-підходу: інтеграція лазерного сканування та фотограмметрії, сумісність з форматами IFC/WebGIS, підтримка проєктно-експлуатаційних процесів. Виявлено два ключові обмеження наявних комерційних BIM-рішень: нездатність коректно відтворювати нерегулярну геометрію історичних конструкцій і відсутність інструментів для автоматичного перетворення хмар точок на параметричні HBIM-об'єкти. Доведено, що застосування AI-алгоритмів для автоматичного присвоєння атрибутів елементам моделі та розроблення спеціалізованих профілів HBIM на базі розширень відкритого формату IFC є технічно обґрунтованим напрямом подолання цих обмежень.

У третьому розділі **«Особливості інформаційної моделі для відновлення та експлуатації об'єкта архітектурної спадщини, пошкодженного внаслідок воєнних дій»** визначено додаткові BIM-параметри для будівель, що отримали пошкодження внаслідок воєнних дій, створено шаблон BIM-процесу та сформульовано пропозиції щодо застосування моделі в процесі подальшої експлуатації.

Систему додаткових HBIM-параметрів структуровано у чотири функціональні блоки. Перший охоплює параметри пошкоджень: просторовий клас пошкодження, тип, причину та механізм руйнування, ступінь деструкції за шкалою 0–5, локалізацію і рівень достовірності фіксації. Другий блок містить параметри структурної безпеки та ризику: фактичний технічний стан, категорію загрози, потребу в тимчасовому підсиленні та обмеження доступу. Третій блок забезпечує інформаційне відображення цінності й автентичності: документований ступінь історико-архітектурної цінності, зв'язок із предметом охорони, ступінь автентичності, джерело та дата експертної оцінки, зв'язок із

подіями війни. Категорія об’єкта архітектурної спадщини, його композиційна роль і значення у структурі міста фіксуються окремими атрибутами та не поєднуються в один показник. Четвертий блок описує життєвий цикл відновлення. Рішення щодо пріоритетності й допустимих втручань приймаються за двома незалежними осями – документованим ступенем історико-архітектурної цінності та ступенем деструкції – з урахуванням автентичності, предмета охорони і технічної безпеки.

Створено шаблон HBIM-процесу побудови цифрової моделі, що складається з семи етапів:

- Етап 0 (стратегічне планування HBIM-проєкту: постановка цілей, вибір рівня LOD-H та LOI-H, визначення форматів даних);
- Етап 1 (збір і валідація вхідних даних: архівні матеріали, нормативні обмеження, виявлення відсутніх відомостей);
- Етап 2 (польове обстеження та інструментальна фіксація: лазерне сканування, фотограмметрія, ручні вимірювання);
- Етап 3 (побудова HBIM-моделі базової геометрії: опрацювання хмар точок, генерація концептуальної геометрії LOD-H100/200);
- Етап 4 (інтеграція даних про ушкодження: нанесення зон руйнування, створення Damage-елементів, класифікація ушкоджень);
- Етап 5 (формування варіантів реставраційних рішень: моделювання сценаріїв відновлення, оцінка впливу на автентичність, вартість, строки);
- Етап 6 (підготовка даних для експлуатації та моніторингу: стандартизація атрибутів, налаштування зв’язків із сенсорами та Big Data-аналітикою).

Здійснено уточнення HBIM-шаблона для різних сценаріїв застосування. Запропоновано матрицю адаптації за трьома напрямами: ступінь деструкції (від легкого до повної втрати), доступність даних (повний пакет або лише архівні фото) та режим роботи (швидка фіксація, планова реставрація, довгостроковий моніторинг). Для кожної комбінації визначено обов’язкові та варіативні етапи шаблону. Уточнено відповідність рівнів LOD-H/LOI-H різним сценаріям: для термінової фіксації передбачено LOD-H100/200 з мінімальним LOI-H; для

реставраційного проєктування LOD-H300/400 з розширеним LOI-H; для експлуатації та моніторингу LOD-H500 з LOI-H, орієнтованим на сенсори та історію втручань.

Показано можливість налаштування шаблону для різних типів об’єктів архітектурної спадщини: окремої будівлі або споруди (церква, садиба, громадська споруда), ансамблю або кварталу, міського фрагмента (city-scale HBIM/CityGML).

Запропоновано модель різнорівневої деталізації: об’ємна модель середовища на LOD-H100 з деталізованими моделями окремих будівель на LOD-H300, або навпаки, залежно від характеру об’єкта.

Розроблено методику формування цифрового паспорта об’єкта архітектурної спадщини на основі HBIM, яка передбачає: ідентифікацію об’єкта; збирання та верифікацію джерел; формування просторового ядра HBIM-моделі; параметризацію історичних, технічних, реставраційних і моніторингових даних; валідацію; керування версіями та архівування. Передбачено формування на основі верифікованих даних цифрового паспорта структурованого набору відомостей для підготовки або актуалізації «Облікової картки об’єкта культурної спадщини». Цифровий паспорт слугує інформаційною основою для накопичення та актуалізації даних про об’єкт і не замінює затвердженої в установленому порядку облікової та науково-проєктної документації.

Визначено функції моделі у сфері моніторингу технічного стану та виявлення ризиків (інтеграція сенсорів, Big Data-аналітика), управління реставраційними роботами (пріоритизація, координація фахівців), попередження надзвичайних ситуацій і реагування на них

Ключові слова: будівельна інформаційна модель, BIM, Heritage BIM, HBIM, архітектурна спадщина, воєнні пошкодження, рівні деталізації LOD-H, цифровий паспорт.

ABSTRACT

Bilov V.A. Building information model of a war-damaged architectural heritage object. - Qualifying scientific work in the form of a manuscript.

Research paper for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 191 - Architecture and urban planning. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science, Kyiv, 2026.

The ***introduction*** substantiates the relevance of the research topic, defines the goal, objectives, object, subject, methods and boundaries of the research, and also determines the scientific novelty, practical significance and application of the results of the work.

In the first section «Theoretical and methodological foundations of research in the restoration and further operation of architecture heritage objects, damaged as a result of military actions», the classification of monuments - objects of architecture by species in accordance with the Law of Ukraine «On the Protection of Cultural Heritage», as well as the classification of war losses of architectural heritage, was carried out. It was substantiated that digital recording is mandatory not only for objects included in the State Register of Immovable Monuments of Ukraine, but also for newly discovered cultural heritage objects that have been damaged.

Based on the analysis of scientific reseaches, the significant contribution to the field of monument protection of Ukrainian scientists was revealed, in whose works the interconnected components of preservation (museification), restoration, renovation and digital documentation of architectural heritage were worked out. First of all, in the scientific environment of the KNUBA, the theoretical and methodological principles of urban planning systems, reconstruction and development of the architectural environment were developed by M. M. Demin and V. V. Tovbych; research, restoration and post-war reconstruction of monuments - objects of architecture were considered by O. S. Sleptsov, O. I. Kosarevsky, Y. V .Ivashko, M. I. Orlenko and V. O. Molochko; methodological principles of complex restoration and reconstruction transformations and regeneration of the historical urban environment - by N. A.

Leshchenko; digital technologies of architectural design and building information modeling - by O. V. Kashchenko, T. A. Goncharenko, O. V. Levchenko, T. O. Kashchenko and A. V. Mykhailenko; engineering photogrammetry, ground and air laser scanning, geoinformation support and interoperable geospatial data - by R. A. Dem'yanenko, R. V. Schultz, Y. O. Karpinsky and A. A. Lyashchenko; technical inspection, reconstruction and restoration of buildings and structures - O. F. Osypov, L. S. Chebanov, O. S. Molodid and O. Y. Kovalchuk.

The Kyiv monument and restoration direction is represented by the works of Y. S. Aseyev, G. N. Logvin, V. I. Tymofienko and V. V. Vechersky on the history, typology, identification and accounting of architectural heritage, as well as L. V. Pribyeha and O. A. Plamenytska on the theory, methodology of protection, conservation and restoration. Kharkiv scientists V. E. Novgorodov, G. O. Osychenko, I. V. Dreval, K. T. Cherkasova and E. I. Gubkina revealed the practice of restoration of monuments, reconstruction of historical cities, post-war revival of urban complexes and preservation of the heritage of modernism. The Odessa center is represented by V. A. Lysenko, O. B. Rallev, V. M. Meshcheryakov and O. I. Meneiliuk, whose works explore restoration materials and constructive solutions, the reproduction of lost objects, the formation of the traditional character of the historical environment and the technology of reconstruction and restoration works. The Lviv school is formed by M. V. Bevz, I. R. Mogytych, O. V. Rybchynskyi and Yu. Ya. Dubyk, who developed methods of historical and architectural and field research, the regeneration of historical city centers, the preservation of fortification heritage and the strengthening of historical structures. In Dnipro, O. V. Kharlan, I. S. Revskyi and M. V. Savytskyi work on historical and architectural research of settlements, the reconstruction of the historical environment, field surveys and constructive and technological principles of restoration; The Zaporizhzhia direction of research into industrial and modernist heritage is represented by the works of T. Bazhanova, P. Kravchuk and O. V. Kharlan. The Chernivtsi scientific center, formed on the basis of the Department of Architecture, Urbanism and Preservation of UNESCO Sites of the Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, is represented by the works of I. V. Korotun, which substantiate

the architectural and urban planning principles of forming buffer zones of UNESCO World Heritage Sites, preserving the historical environment and applying modern methods of studying monuments. The research of other regional centers is complemented by the works of P. A. Rychkov and O. V. Lesyk on the protection, restoration and adaptation of monuments in Volhynia, as well as Z. V. Lukomska on the preservation of the historical and architectural environment of Ivano-Frankivsk.

The digital component of the study is correlated with foreign works by M. Murphy, Y. McGovern and S. Pavia, which initiated the concept of HBIM, as well as F. Fassi, C. Achille, N. Bruno, H. Moyano, H. E. Nieto-Julian, B. Rivero and P. B. Lorensu, devoted to Scan-to-HBIM, parametric and semantic modeling, structural diagnostics and digital twins of heritage objects. The generalization of these scientific developments made it possible to consider the HBIM model not only as a geometric representation of a monument, but as a structured information environment that combines data on its history, cultural value, materials, technical condition, war damage, restoration interventions and further operation.

The feasibility of using historically oriented building information modeling – Heritage Building Information Modeling (HBIM) for monuments - objects of architecture is substantiated. It has been established that a monument is an architectural object that is distinguished by its compositional complexity and uniqueness, which determines the specificity of methodological approaches to its study. Existing BIM technologies are designed to specify the design parameters of objects, while work with cultural heritage objects involves the primary identification, verification and restoration of their actual characteristics.

The domestic and foreign experience of implementing HBIM projects for monuments - architectural objects is analyzed. It was established that the integration of laser scanning and photogrammetry with parametric modeling makes it possible to create high-precision digital models, however, the automation of the scanning process into the BIM model of a heritage object (Scan-to-HBIM) remains an unsolved problem. The prospects of a combination of methods were determined: 3D scanning, algorithmic

modeling (Rhino/Grasshopper), parametric modeling in the BIM environment (Archicad, Revit, Allplan) and GIS for management

The second section, «Methodology for creating a digital model of a architecture heritage object», presents the general research methodology, defines the source-data structure, develops the LOD-H/LOI-H system, and compares software tools for HBIM modelling. The methodology combines theoretical-analytical, regulatory, information-parametric and validation stages and establishes criteria for data completeness, traceability, consistency and interoperability.

A list of source data for HBIM creation has been determined in accordance with the requirements of BIM standards according to the ISO 19650 series. It has been substantiated that source data for HBIM should cover five classes: geometric data (results of 3D laser scanning, photogrammetry, geodetic measurements); attribute and semantic data (materials, technical condition, historical value, functional purpose); historical and architectural data (archival drawings, descriptions of changes, stages of reconstruction); material data (physical and mechanical properties, degree of wear, textures); functional data (change in the use of premises over time). Methods of collection, processing and integration into the BIM environment have been determined for each class. A modified scale of levels of detail for HBIM has been proposed. LOD-H100 corresponds to the conceptual model (volumetric masses, historical boundaries); LOD-H200 provides a generalized geometry with protection zones; LOD-H300 provides detailed geometry with materials; LOD-H400 covers structural units and restoration technologies; LOD-H500 is intended for an operation and monitoring model. For each LOD-H level, a corresponding level of information content LOI-H is defined, which covers attributive (dating, cultural value, technical condition), regulatory (protection documents, modes of use) and semantic (classification of premises, historical functions) data. The classification is consistent with the principles of ISO 19650 standards and adapted to Ukrainian DBN and DSTU.

A comparative analysis of BIM software for modeling cultural heritage - architectural objects has been conducted. The advantages of the HBIM approach were established: integration of laser scanning and photogrammetry, compatibility with

IFC/WebGIS formats, and support for design and operation processes. Two key limitations of existing commercial BIM solutions were identified: the inability to accurately reproduce the irregular geometry of historical structures and the lack of tools for automatically converting point clouds into parametric HBIM objects. It was shown that using AI algorithms to automatically assign attributes to model elements and developing specialized HBIM profiles based on extensions to the open IFC format is a technically sound direction for overcoming these limitations.

In the third section «Features of the information model for the restoration and operation of a architecture heritage object damaged as a result of military actions», additional BIM parameters were defined for buildings damaged as a result of military operations, a BIM process template was created, and proposals were formulated for the application of the model in the process of further operation.

The system of additional HBIM parameters is structured into four functional blocks. The damage block records the spatial class of damage, damage type, cause and mechanism, degree of destruction on a 0–5 scale, localization and data reliability. The structural-safety block records the actual technical condition, threat category and need for temporary reinforcement. The historical-architectural value and authenticity block stores the documented degree of historical-architectural value, relation to the legally established subject of protection, authenticity, source and date of expert assessment, and connection with war events. Heritage status, compositional role and role in the urban structure are recorded as separate attributes and are not merged into a single indicator. The recovery-life-cycle block supports planning and monitoring. Intervention and recovery priorities are determined using two independent axes – the documented degree of historical-architectural value and the degree of destruction – together with authenticity, the subject of protection and structural safety.

A template for the HBIM process of building a digital model has been created, consisting of seven stages:

Stage 0 (strategic planning of the HBIM project: setting goals, selecting the LOD-H and LOI-H levels, defining data formats);

Stage 1 (collection and validation of input data: archival materials, regulatory restrictions, identification of missing information);

Stage 2 (field survey and instrumental fixation: laser scanning, photogrammetry, manual measurements);

Stage 3 (construction of the HBIM model of the basic geometry: processing point clouds, generation of conceptual geometry LOD-H100/200);

Stage 4 (integration of damage data: drawing destruction zones, creating Damage elements, classifying damage);

Stage 5 (formation of restoration solution options: modeling restoration scenarios, assessing the impact on authenticity, cost, timing);

Stage 6 (preparation of data for operation and monitoring: standardization of attributes, setting up connections with sensors and Big Data analytics).

The NBIM template has been refined for different application scenarios. An adaptation matrix has been proposed in three directions: the degree of damage (from light to complete loss), data availability (full package or only archive photos) and operating mode (quick fixation, planned restoration, long-term monitoring). We defined mandatory and variable stages of the template for each combination. The correspondence of LOD-H/LOI-H levels to different scenarios has been clarified: for urgent fixation, LOD-H100/200 with minimal LOI-H is provided; for restoration design, LOD-H300/400 with extended LOI-H; for operation and monitoring, LOD-H500 with LOI-H focused on sensors and the history of interventions.

The possibility of setting up a template for different types of monuments is shown: a separate building or structure (church, estate, public building), an ensemble or quarter, a city fragment (city-scale HBIM/CityGML).

A model of multi-level detailing is proposed: a volumetric model of the environment at LOD-H100 with detailed models of individual buildings at LOD-H300, or vice versa, depending on the nature of the object.

A methodology for forming an HBIM-based digital passport of a architectural heritage site has been developed; this process entails site identification, data source collection and verification, the creation of the HBIM model’s spatial core, the

parameterization of historical, technical, restoration, and monitoring data, as well as validation, version control, and archiving. The digital passport–comprising a structured dataset derived from verified information–is designed to facilitate the preparation or updating of the «Cultural Heritage Site Registration Card». It serves as an information foundation for accumulating and updating data regarding the site but does not replace the officially approved registration and research-design documentation.

The functions of the model in the field of monitoring the technical condition and identifying risks (sensor integration, Big Data analytics), restoration work management (prioritization, coordination of specialists), emergency prevention and response to them.

Keywords: building information model, BIM, Heritage BIM, HBIM, architectural heritage, war damage, LOD-H levels of detail, digital passport.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Білов В. Аналіз ефективності використання будівельного інформаційного моделювання в процесі відновлення та експлуатації історичних будівель. Grail of Science. 2023. № 34. Section Architecture and Construction С. 394–396. DOI: https://doi.org/10.36074/grail-of-science.08.12.2023.89

2. Bilov V., Goi V., Mamonov K., Tregub O., Levchenko O. Advantages of building information modeling (BIM) during the operational life. Amazonia Investiga. 2023. Vol. 12, no. 68. P. 346–363. DOI: https://doi.org/10.34069/AI/2023.68.08.32. *Особистий внесок здобувача: визначення переваг технології BIM на етапі проєктування моделі.*

3. Білов В., Левченко О. BIM як анатомія для будівлі. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2024. № 70. С. 32–45. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.70.32-45. *Особистий внесок здобувача: постановка проблеми виявлення та формулювання повного обсягу та потенціалу BIM технології, основна частина і висновки*

4. Білов В. Класифікація пошкоджень архітектурних пам’яток, зокрема, через воєнні дії, у будівельному інформаційному моделюванні. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2026. № 75. С. 308–329. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2026.75.308-329

5. Білов В., Левченко О. Документування пошкоджень пам’яток культурної спадщини за BIM технологією. Вісник НАОМА. 2026. № 6. С. 14-28. DOI: https://doi.org/10.32782/naoma-bulletin-2026-6-2. *Особистий внесок здобувача: постановка проблеми фіксації пошкоджень об'єктів архітектурної спадщини, основна частина і висновки*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Bilov V. The Use of Building Information Modeling Technologies in the Restoration and Further Operation of Architectural Monuments. Global Innovations

and Collaborative Solutions in Contemporary Science. *Futurity Research Publishing*, (Lodz, Poland, 15.12.2023) Лодзь, Республіка Польща, 2023. С. 153–157. URL: https://futurity-publishing.com/international_conference_3/ (дата звернення: 25.03.2026).

7. Білов В. А. Технології сканування пошкоджених об’єктів культурної спадщини. Архітектура, Будівництво, Дизайн: Технологія, Енергетика, Менеджмент: Міжнародний науково-технічний форум, КНУБА, м. Київ, 16–17 жовтня 2024 р., С.208-209 URL: https://drive.google.com/file/d/1TpA1Hh7c71ChP79W55YV0wPz_pUvVnWz/view (дата звернення: 23.01.2026)

8. Білов. В.А, Левченко О.В. Документування пошкоджень пам’яток культурної спадщини за BIM-технологією. Матеріали XV Міжнародної наукової конференції «Проблеми дослідження, збереження та реставрації історичних фортифікацій», Львів – Івано-Франківськ, Україна, 18–19 вересня 2025. URL: https://lpnu.ua/news/xv-mizhnarodna-naukovo-praktychna-konferentsiia-problemy-doslidzhennia-zberezhennia-ta (дата звернення: 25.03.2026).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Pletsan, K., Havryliuk, A., Poberezhets, H., Yurova, T., Bilov, V., Polotnianko, O. Digital Transformation of Preservation and Restoration of Ukraine’s Cultural Heritage, Studies in Media and Communication, 2023. №11(7), С. 376. DOI: https://doi.org/10.11114/smc.v11i7.6514 *Особистий внесок здобувача: визначення проблеми 3D-моделювання об'єктів архітектурної спадщини*

10. Білов В. А. Інноваційні методи використання будівельного інформаційного моделювання (BIM) у процесі реставрації пам’яток архітектури, пошкоджених внаслідок воєнних дій. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2024. № 6. С. 230–239. DOI: https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.6.26.

ЗМІСТ

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ, СКОРОЧЕНЬ ТА ПЕРЕКЛАДІВ 20

ВСТУП..... 24

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ РЕСТАВРАЦІЇ ТА ПОДАЛЬШІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ, ПОШКОДЖЕНИХ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ 39

1.1. Історія поняття та класифікація об'єктів архітектурної спадщини 39

1.2. Науково-теоретичний досвід дослідження процесів реставрації об'єктів архітектурної спадщини 53

1.3. Актуальність та доцільність застосування BIM для об'єктів архітектурної спадщини. HBIM – будівельна інформаційна модель об'єкта архітектурної спадщини..... 61

1.4. Аналіз вітчизняного та закордонного досвіду проєктів реставрації об'єктів архітектурної спадщини 72

Висновки до розділу 1 92

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ 95

2.1. Загальна методика дослідження 95

2.2. Визначення переліку вихідних даних для створення BIM (Інформаційної моделі будівлі) об'єкта архітектурної спадщини (HBIM)..... 105

2.3. Класифікація рівнів деталізації HBIM - Інформаційної моделі будівлі для об'єктів архітектурної спадщини 117

2.4. Порівняння програмного забезпечення BIM – засоби BIM для опрацювання проєктів для об'єктів культурної спадщини 139

Висновки до розділу 2 152

РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ, ПОШКОДЖЕНОГО ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ 154

3.1. Визначення додаткових HBIM-параметрів для об'єктів архітектурної спадщини, пошкоджених внаслідок воєнних дій 154

3.2 Створення шаблону HBIM-процесу побудови цифрової моделі для об'єктів архітектурної спадщини, пошкоджених внаслідок воєнних дій 176

3.3 Практична адаптація HBIM-шаблону за ступенем деструкції та повнотою вихідних даних 184

3.4 Формулювання пропозицій щодо застосування HBIM-моделі в процесі подальшої експлуатації об'єктів архітектурної спадщини 188

Висновки до розділу 3 203

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 204

Список використаних джерел 209

ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації 243

ДОДАТОК Б Акти впровадження 245

ДОДАТОК В Додаткові матеріали, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації 249

ДОДАТОК Г Джерела ілюстрацій 256

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ, СКОРОЧЕНЬ ТА ПЕРЕКЛАДІВ

Будівельне інформаційне моделювання (Building Information Modeling (BIM)) - Будівельне Інформаційне Моделювання Використання загального цифрового подання активу для сприяння процесам проєктування, спорудження та експлуатації об’єкта будівництва, а також створення надійної основи для прийняття рішень [1]

Вимоги до організаційної інформації (Organisational Information Requirements (OIR)) - вимоги до організаційної інформації, пов’язані з корпоративними цілями організації [1] - це частина вищого рівня структури вимог до інформації. Вони визначають, яка інформація має надходити з проєктів (через AIR – Asset Information Requirements і PIR – Project Information Requirements), для відповідності вимогам організації (тлумачення автора)

Вимоги до інформації про активи (Asset Information Requirements (AIR)) - вимоги до інформації про актив, пов’язані з експлуатуванням активу [1] – це те, що організація хоче знати про свою будівлю (або інший актив), для ефективної її експлуатації, обслуговування та утримання (тлумачення автора)

Вимоги про обмін інформацією (Exchange Information Requirements (EIR)) - «Інформаційна Вимога у контексті Узгодження», створена Стороною Призначення. Вимоги щодо обміну інформацією (EIR) є переліком вимог, визначених у документі, онлайн-формі, чи навіть у електронному листі. EIR встановлює управлінські, комерційні та технічні аспекти того, як мають бути виконані вимоги щодо проєктної інформації та Вимоги Інформації Активу [2]

ГІС - Геоінформаційні системи (GIS - Geographic Information System) - комп'ютерна система для зберігання, організації та вивчення даних, що стосуються положення, площі або розміру об'єктів [3] (переклад автора)

Глобальні навігаційні супутникові системи (Global Navigation Satellite Systems (GNSS)) - Системи Глобальної Супутникової Навігації [4] - система, що складається з сукупності наземного та космічного обладнання та призначена для позиціонування в просторі (місцезнаходження в географічній системі координат)

і в часі, а також визначення параметрів руху (швидкості, напрямку та ін.) для наземних, водних та повітряних об'єктів. (переклад і тлумачення автора)

Інформаційна Модель Проєкту (Project Information Model (PIM)) - Інформаційна модель, що стосується етапу будівництва [1]. Інформаційна модель проєкту (PIM) включає Інформаційний контейнер, що охоплює проєктування та будівництво нових активів, а також повторне використання та оновлення наявних активів. PIM робить внесок в Інформаційну модель активів (AIM) протягом різних фаз життєвого циклу активу (тлумачення автора)

Інформаційна Модель Активу (Asset Information Model (AIM)) - Інформаційна модель, що стосується фази експлуатації [1]. Інформаційна модель активів (AIM) містить підтримку, управління та експлуатацію активом протягом усього життєвого циклу активу. AIM може виступати (i) як сховище для всієї інформації про активи; (ii) як засіб доступу / зв’язку до корпоративних систем (наприклад, CMMS та BMS); та (iii) як засіб отримання та централізації інформації від інших учасників проєкту протягом встановленої фази життєвого циклу проєкту (тлумачення автора)

Життєвий цикл (Life cycle) - термін служби активу, починаючи від визначення вимог щодо нього і до припинення його використання, охоплює етапи концептуального проєктування, розроблення, експлуатування, технічного обслуговування та ліквідації [1]; або також – комплекс послідовних у часі етапів існування об'єкта [5]

Збір даних (Data capture) - процес отримання і фіксації інформації з різних джерел для подальшого збереження, обробки або аналізу (переклад та тлумачення автора)

Комп'ютерне проєктування (Computer Aided Design (CAD)) - автоматизоване проєктування (САПР) означає використання цифрових інструментів для створення, модифікації, аналізу або оптимізації об’єкта чи простору. CAD представляє всі цифрові інструменти до BIM та їхні 2D/3D результати [6] (переклад та тлумачення автора)

Культурна Спадщина (Heritage) – особливості, що належать до культури певного суспільства, такі як традиції, мови або будівлі, які були створені в минулому та все ще мають історичне значення (переклад автора з [7])

Міжнародна Організація зі Стандартизації (International Standardization Organization (ISO)) – міжнародна організація, метою діяльності якої є ратифікація стандартів, розроблених спільними зусиллями делегатів від різних країн. Організація ISO була заснована 23 лютого 1947 р. двадцятьма п'ятьма національними організаціями зі стандартизації, як координаційний орган [8] основними стандартами ISO для даного дослідження є такі як ISO 29481, ISO 19650, ISO 12006 (переклад та тлумачення автора)

Мова розмітки міської географії CityGML - Цей стандарт визначає концептуальну модель та формат обміну для представлення, зберігання та обміну віртуальними 3D-моделями міст [https://www.ogc.org/standards/citygml/] (переклад та тлумачення автора)

Наземне лазерне сканування - TLS (Terrestrial Laser Scanning) - наземний метод, який використовує лазерні імпульси для отримання точних 3D-вимірювань будівель, об'єктів та ландшафтів (переклад та тлумачення автора)

Пам'ятки містобудування і архітектури - унікальні ансамблі і комплекси, окремі об'єкти архітектури, а також пов'язані з ними твори монументальної скульптури і живопису, декоративно-ужиткового і садово-паркового мистецтва, природні ландшафти. [9]

План виконання BIM-проєкту - BEP BIM Execution Plan – це головний документ. Він описує, як саме команда виконує завдання інформаційного моделювання будівництва. Виконавець створює його на основі вимог замовника (переклад та тлумачення автора)

Площинно-вузлове знімання (Plane-table survey) - мензульна зйомка; сукупність дій при складанні детального плану місцевості, що означає побудову топографічного плану місцевості в польових умовах за допомогою кіпрегеля і мензули, це графічний метод зйомки, за якого польові спостереження та побудова графіків виконуються одночасно. Він простіший і дешевший, ніж

теодолітна зйомка, але здебільшого підходить для зйомки невеликих масштабів. Зйомку ведуть в полярній системі координат [10] (переклад автора)

Рівень зрілості (Level of maturity) - рівень деталізації (переклад та тлумачення автора)

Рівень інформаційної потреби (Level of information need) - система вимог, що визначає обсяги та ступінь деталізації інформації. [1] Однією з цілей визначення рівня інформаційної потреби є запобігання наданню надмірного обсягу інформації (тлумачення автора)

Рівень деталізації для об'єктів спадщини LOD-H (Level of Detail for Heritage) (переклад та тлумачення автора)

Рівень інформації для об'єктів спадщини LOI-H (Level of Information for Heritage)(переклад та тлумачення автора)

Середовище Спільних Даних (ССД) (Common Data Environment (CDE)) - узгоджене джерело інформації для будь-якого окремого проєкту чи активу, призначене для збирання, управління та поширення кожного інформаційного контейнера за допомогою керованого процесу [1] (тлумачення автора)

Структура з руху - SfM (Structure from Motion) - алгоритм цифрової фотограмметрії, що дозволяє автоматично створювати тривимірні моделі (хмари точок) із серії двовимірних цифрових фотографій, зроблених з різних ракурсів (переклад та тлумачення автора)

Схема робочого процесу (Workflow pattern) - середовище робочого процесу (переклад та тлумачення автора)

Тематичне дослідження (Case Study) - Вивчення проблеми (як правило, у значенні «прикладу») (переклад та тлумачення автора)

ВСТУП

Українська архітектурна спадщина часто стикається з пошкодженнями об’єктів культурної спадщини, зокрема пам’яток архітектури та містобудування, внаслідок воєнних дій як сучасності, так і минулого. Для відновлення таких об’єктів архітектурної спадщини використовуються сучасні спеціалізовані будівельні інформаційні моделі.

Інноваційні методи використання будівельного моделювання можуть застосовуватися в різних напрямах. Дослідження автора показує, що інноваційні методи можуть значно полегшити процес відновлення об’єктів архітектурної спадщини. Україна започаткувала ініціативу, спрямовану на моніторинг пошкоджених пам'яток. Ця ініціатива допомагає ефективно взаємодіяти з об’єктами архітектурної спадщини, що постраждали внаслідок воєнних дій (ініціатива Ukrainian Heritage Monitoring Lab – HeMo [11]). Експертні методики допомагають з’ясувати ступінь пошкодження та розробити план відновлення. Будівельні інформаційні моделі відіграють важливу роль у відновленні пошкоджених об’єктів архітектурної спадщини внаслідок воєнних дій. Ці інноваційні підходи сприяють збереженню цінної культурної спадщини для майбутніх поколінь.

За даними Міністерства культури України, з початку повномасштабного вторгнення РФ до України загальна чисельність знищених або постраждалих об’єктів культурної спадщини регіонів наразі становить 1990 об’єктів. З них національного значення - 192, місцевого - 1605, щойно виявлених - 193 (станом на 06.08.2026) [12]. Серед них - як об’єкти монументального мистецтва, об’єкти містобудування, так і об’єкти архітектури [13]. Відновлення їх буде одним із першочергових завдань у повоєнний час. Мінімізація термінів та витрат, пов’язаних з процесом реставрації, а також експлуатаційних витрат після неї може бути проаналізована за допомогою сучасних методів Будівельного Інформаційного Моделювання (BIM) [1]

Актуальність вибору дисертаційної теми, пов’язаної з дослідженням уніфікованих підходів до електронного документування та цифрового

моделювання об’єктів культурної спадщини, підтверджується наявністю відповідних державних та громадських ініціатив, зокрема в напрямку створення і ведення електронних реєстрів, електронного обліку та обміну даними про ці об’єкти. Ще у 2023 році Міністерство культури та інформаційної політики презентувало інформаційно-комунікаційну систему обліку нерухомих об’єктів культурної спадщини України «Державний реєстр нерухомих пам’яток України» – єПам’ятка [14]. У серпні 2025 року Офіс підтримки відновлення при Міністерстві організував круглий стіл «Діджиталізація нерухомої спадщини: сканування та цифрова стандартизація об’єктів архітектури», на якому обговорювали створення, збереження та використання цифрової бази даних про об’єкти культурної спадщини. [15] А вже 28 січня 2026 року Кабмін України ухвалив ініційовану Мінкультом Постанову №93 «Про реалізацію експериментального проєкту щодо запровадження інформаційно-комунікаційної системи обліку нерухомих об’єктів культурної спадщини України «Державний реєстр нерухомих пам’яток України» [16]. Її метою прямо визначено цифровізацію процедур збирання, накопичення, зберігання, оброблення та відображення даних про нерухому культурну спадщину.

В свою чергу, UNESCO Heritage Emergency Fund у 2023–2026 роках підтримав Міністерство культури у цифровій трансформації управління культурною спадщиною [17]. Мінкульт спільно з Google у січні 2026 року навчав українські музеї роботі з Google Arts & Culture - цифровими колекціями, тематичними онлайн-історіями, віртуальними виставками та цифровими проєктами [18].

17 липня 2026 року Мінкульт офіційно повідомив про затвердження Наказом №744 від 10.07.2026 р. «Методичних рекомендацій щодо здійснення тривимірного (3D) сканування, організації електронного документообігу та забезпечення цифрової стандартизації даних у процесах створення, оброблення, зберігання та використання інформації про об’єкти культурної спадщини» [19], в розробці яких автор брав безпосередню активну участь.

Ці ініціативи свідчать про перехід від оцифрування окремих об’єктів архітектурної спадщини до формування системної державної цифрової інфраструктури їх документування, обліку, відновлення та подальшого моніторингу, що безпосередньо актуалізує розроблення науково-методичних засад застосування технологій будівельного інформаційного моделювання до об’єктів архітектурної спадщини, пошкоджених внаслідок воєнних дій. За цих умов науковим завданням є не саме оцифрування об’єкта, а формування відтворюваної методики, що визначає склад даних, рівень їх деталізації, достовірність, взаємозв’язки та правила актуалізації.

Дисертацію спрямовано на розроблення HBIM методики для об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій. Її відмінність полягає у спільному опрацюванні рівнів LOD-H/LOI-H, просторово локалізованих параметрів пошкоджень, ступеня деструкції, зовнішньої експертної оцінки історико-архітектурної цінності, реставраційних рішень і подальшого цифрового супроводу об’єкта.

Науково-теоретичне підґрунтя дисертації становить доробок українських учених, у якому послідовно розкрито містобудівні, пам’яткоохоронні, реставраційні, конструктивно-технологічні та цифрові аспекти роботи з архітектурною спадщиною. Передусім у науковому середовищі КНУБА М. М. Дьомін, В. В. Товбич і О. І. Косаревський розвинули системні засади містобудування, реконструкції, просторового розвитку й охорони архітектурно-містобудівної спадщини [20; 21]; О. С. Слєпцов [22], Ю. В. Івашко [23], М. І. Орленко [24] та В. О. Молочко [25] досліджували збереження, реставрацію, відтворення втрачених об’єктів і повоєнне відновлення об’єктів архітектурної спадщини; Н. А. Лещенко – методологічні засади комплексних реставраційно-реконструктивних трансформацій і регенерації історичного міського середовища [26-31]; Т. А. Гончаренко [32], О. В. Кащенко [33], А. В. Михайленко [34] та Т. О. Кащенко [33] а також О. В. Левченко [34; 35; 36], - цифрові технології архітектурного проєктування і будівельне інформаційне моделювання; Р. А. Дем’яненко [37; 38], Р. В. Шульц і А. О. Анненков [39], Ю. О. Карпінський та А.

А. Лященко [40] – інженерну фотограмметрію, лазерне сканування, геоінформаційне забезпечення та інтероперабельні геопросторові дані ; О. Ф. Осипов та Л. С. Чебанов [41], О. С. Молодід і О. Ю. Ковальчук [42] – реконструкцію, технічне обстеження та відновлення експлуатаційної придатності будівель і споруд.

Проаналізовано також київський пам'яткознавчий і реставраційний напрям, який представлений працями Л. В. Прибєги [43] та В. В. Вечерського [44], у яких розкрито історію, типологію, виявлення, облік, охорону, консервацію та реставрацію архітектурної спадщини. В своїх працях харківські науковці В. Є. Новгородов [45], Г. О. Осиченко [46], І. В. Древаль [47] та К. Т. Черкасова [48] опрацювали практику реставрації пам'яток, реконструкцію історичних міст, післявоєнне відродження міських комплексів і збереження спадщини модернізму. Одеський осередок репрезентують праці В. А. Лисенко [49], О. Б. Раллєв [50] та В. М. Мещеряков [51] в яких всебічно розкриваються проблеми теорії та історії архітектури України, питання реставрації, львівську школу – М. В. Бевз [52], І. Р. Могитич [53], О. В. Рибчинський [54] і М. М. Габрель [20] - їхній доробок охоплює реставраційні матеріали й конструктивні рішення, відтворення втрачених об'єктів, регенерацію історичних середмість, збереження фортифікаційної спадщини та підсилення історичних конструкцій. У Дніпрі І. С. Ревський [55; 56] розвинув історико-архітектурні та натурні дослідження населених місць, реконструкцію історичного середовища і конструктивно-технологічні засади відновлення ; запорізький напрям дослідження індустріальної й модерністської спадщини представлений працями Т. Бажанової [57]. Чернівецький науковий осередок репрезентує очолювана І. В. Коротун кафедра архітектури, урбаністики та збереження об'єктів ЮНЕСКО Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича; у працях дослідниці обґрунтовано архітектурно-містобудівні засади формування буферних зон об'єктів Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО, збереження історичного середовища та застосування сучасних методів дослідження пам'яток [58; 59]. Регіональну картину доповнюють праці О. В. Лесика [60] щодо охорони,

реставрації та пристосування пам’яток Волині, а також З. В. Лукомської [61] щодо збереження історико-архітектурного середовища Івано-Франківська.

Узагальнення цих наукових напрацювань дало змогу визначити місце дисертації на перетині пам’яткознавства, реставраційної науки, технології реконструкції та цифрового документування й розглядати HBIM-модель не лише як геометричну репрезентацію об’єкту архітектурної спадщини, а як структуроване інформаційне середовище, що поєднує дані про її історико-культурну цінність, матеріали, технічний стан, воєнні пошкодження, реставраційні втручання та подальшу експлуатацію. Критичне зіставлення опрацьованих праць показало, що зазначені аспекти переважно розвивалися окремо: у наявному теоретичному досвіді не сформовано цілісної параметризованої HBIM-методики, яка поєднувала б рівні геометричної деталізації та інформаційного наповнення, класифікацію і достовірність фіксації воєнних пошкоджень, реставраційні рішення та подальший моніторинг упродовж життєвого циклу об’єкту архітектурної спадщини. На заповнення цієї дослідницької прогалини спрямовано дисертаційну роботу.

Зв’язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота є складовою частиною досліджень, що проводяться в межах науково-дослідної тематики кафедри інформаційних технологій в архітектурі Київського національного університету будівництва і архітектури. Дане дисертаційне дослідження виконане з оглядом на «Концепцію впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні», схваленої Розпорядженням №152р Кабінету Міністрів України від 17 лютого 2021 разом із затвердженим тим же Розпорядженням «Плану заходів з реалізації Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні» [62]. Дослідження є продовженням навчальних програм, що запропоновані кафедрою інформаційних технологій в архітектурі для освітньо-наукових програм другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальностями B2 «CAD, BIM, VDC - технології в проєктуванні дизайн-об’єктів»[63], G17 «Будівельно-інформаційне моделювання – технологія BIM»

[64] та G19 «BIM-Архітектурне проєктування» кафедри інформаційних технологій в архітектурі.

У назві дисертаційного дослідження використано узагальнене поняття «об'єкт архітектурної спадщини», тоді як у подальшому викладі, з метою термінологічної узгодженості з положеннями законодавства України у сфері охорони культурної спадщини, застосовується також і словосполучення «пам'ятка – об'єкт архітектури», під яким у межах цього дослідження розуміється пам'ятка культурної спадщини, що за видовою належністю є об'єктом архітектури [13].

Мета дослідження полягає в розробленні науково-методичних засад створення будівельної інформаційної моделі об'єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій.

Завдання дослідження:

- Проаналізувати вітчизняний та закордонний досвід застосування BIM-технологій до об'єктів культурної спадщини; систематизувати класифікацію об'єктів архітектурної спадщини та їх пошкоджень внаслідок воєнних дій.
- Обґрунтувати доцільність застосування BIM для об'єктів архітектурної спадщини та визначити переваги і обмеження наявних підходів до Heritage BIM.
- Визначити перелік вихідних даних для створення інформаційної моделі об'єкта архітектурної спадщини з урахуванням вимог стандартів ISO 19650 та національних нормативних документів (законів, ДБН, ДСТУ).
- Розробити класифікацію рівнів деталізації (LOD-H та LOI-H) для об'єктів архітектурної спадщини, адаптовану до завдань фіксації воєнних пошкоджень, реставраційного проєктування та моніторингу.
- Виконати порівняльний аналіз програмного забезпечення для застосування HBIM об'єктів архітектурної спадщини та визначити оптимальні комбінації інструментів для різних типів завдань.

- Формалізувати додаткові HBIM-параметри для пошкоджених об’єктів архітектурної спадщини, розмежувавши параметри воєнного впливу й ступеня деструкції, структурної безпеки та ризику, документованої історико-архітектурної цінності й автентичності, а також життєвого циклу відновлення.
- Створити шаблон BIM-процесу побудови цифрової моделі об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій, та здійснити його адаптацію для різних сценаріїв застосування.
- Розробити методику формування цифрового паспорта об’єкта архітектурної спадщини на основі HBIM, передбачивши структуру даних, правила їх валідації й актуалізації та можливість формування відомостей для підготовки або оновлення Облікової картки об’єкта культурної спадщини.
- Апробувати розроблену методику на матеріалі об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій.

Об’єктом дослідження є об’єкт архітектурної спадщини, пошкоджений внаслідок воєнних дій.

Предметом дослідження є процес та методика HBIM-моделювання об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій, із системою додаткових параметрів для опису воєнних пошкоджень, ступеню деструкції, конструктивної безпеки, історико-архітектурної цінності та життєвого циклу відновлення.

Межі дослідження Дослідження охоплює інформаційні моделі об’єктів архітектурної спадщини, на території м. Києва, Київської області та м. Харкова в Україні, фокусуючись саме на таких об’єктах, які зазнали прямого або опосередкованого пошкодження внаслідок воєнних дій. Хронологічні межі дослідження визначаються періодом російсько-української війни та охоплюють доступні й верифіковані матеріали станом на 2026 рік. Розроблення інформаційних моделей виконується як експериментальне моделювання - методичний інструмент апробації для підтвердження дієвості запропонованого шаблону HBIM-процесу.

Межі дослідження обумовлені метою, завданнями та специфікою застосування технології Heritage BIM (HBIM) для документування, оцінювання та відновлення об’єктів культурної спадщини, пошкоджених внаслідок воєнних дій:

- Об’єктно-типологічні межі: охоплюють пам’ятки - об’єкти архітектури національного та місцевого значення різних хронологічних і типологічних груп, які зазнали різного ступеня деструкції внаслідок збройної агресії.
- Територіальні (географічні) межі: обмежені територією міста Києва, Київської області та міста Харкова. Вибір зумовлений високою концентрацією та різноманітністю пошкоджених об’єктів, що формують репрезентативну емпіричну базу для розроблення й верифікації методичних рішень із можливістю їх подальшої екстраполяції на інші регіони України.
- Теоретико-методологічні межі: визначені процесами адаптації стандартних BIM-процесів (згідно із серією стандартів ISO 19650 / ДСТУ EN ISO 19650 та ДБН А.2.2-14:2016) до умов воєнних руйнувань, розробленням спеціалізованих рівнів деталізації (LOD-H) та інформаційного насичення (LOI-H), а також формуванням додаткових атрибутивних параметрів для фіксації пошкоджень. Дослідження не охоплює питань безпосереднього кошторисного нормування та поглиблених фізико-механічних розрахунків несучої здатності конструкцій.

Методи дослідження. Методологічну основу дослідження становить комплекс загальнонаукових і спеціальних методів, застосованих відповідно до поставлених завдань. **Методи аналізу та синтезу** використано для опрацювання й узагальнення наукових праць, нормативно-правових і нормативно-технічних документів, вітчизняного та закордонного досвіду застосування BIM/HBIM у сфері збереження архітектурної спадщини, а також для визначення складу вихідних даних інформаційної моделі. **Метод порівняння** застосовано для зіставлення підходів до цифрової фіксації та HBIM-моделювання, систем рівнів деталізації й інформаційного наповнення, а також функціональних можливостей

програмних засобів для створення та ведення HBIM-моделей. **Методи абстрагування та узагальнення** використано для виокремлення суттєвих характеристик об’єкта архітектурної спадщини та їх пошкоджень і формування на їх основі узагальненої структури вихідних даних, рівнів LOD-H/LOI-H і параметрів інформаційної моделі. **Метод формалізації** застосовано для представлення характеристик об’єкта, його культурної цінності, технічного стану та воєнних пошкоджень у вигляді структурованої системи параметрів, класифікаційних ознак, рівнів і взаємозв’язків, придатних для інтеграції в HBIM-середовище. **Системний підхід і системний аналіз** використано для розгляду HBIM-моделі як цілісної інформаційної системи, визначення її складових, структури, ієрархії та взаємозв’язків між геометричними, атрибутивними, історико-архітектурними, матеріальними, функціональними даними й інформацією про пошкодження. **Метод моделювання** застосовано для розроблення структури будівельної інформаційної моделі об’єкта архітектурної спадщини, модифікованої системи рівнів LOD-H/LOI-H та адаптивного шаблону HBIM-процесу для різних сценаріїв фіксації, відновлення й подальшої експлуатації об’єкта.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

- розроблено методику створення будівельної інформаційної моделі (HBIM) об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженої внаслідок воєнних дій, що інтегрує геометричні, атрибутивні, історико-архітектурні, матеріальні та функціональні дані в єдину цифрову структуру з урахуванням вимог ISO 19650 та національних нормативних документів України;
- запропоновано модифіковану шкалу рівнів деталізації для об’єктів архітектурної спадщини (від LOD-H100 до LOD-H500) та відповідну систему інформаційного наповнення (LOI-H), адаптовану до завдань екстреної фіксації, реставраційного проєктування та довгострокового моніторингу;

- створено шаблон BIM-процесу побудови цифрової моделі об’єктів архітектурної спадщини, постраждалих внаслідок воєнних дій, що складається з семи послідовних етапів (від стратегічного планування HBIM-проєкту до підготовки даних для експлуатації та моніторингу) та є адаптивним до різних типів об’єктів архітектурної спадщини, масштабів руйнування та ресурсних обмежень;

Удосконалено:

- систему додаткових HBIM-параметрів для пошкоджених об’єктів архітектурної спадщини, що охоплює чотири блоки: параметри пошкоджень (тип, ступінь, локалізація, механізм руйнування, рівень достовірності фіксації), параметри структурної безпеки та ризику, параметри культурної цінності й автентичності, параметри життєвого циклу відновлення;- класифікацію вихідних даних для BIM-моделювання об’єктів культурної спадщини шляхом доповнення нормативно-правовим блоком даних (реєстраційні дані, облікова документація, журнал фіксації воєнних пошкоджень (War Damage Log)) та спеціальним атрибутом Статус Спадщини (Heritage Status) із значеннями «Пам’ятка національного значення», «Пам’ятка місцевого значення», «Щойно виявлений об’єкт»;
- концепцію HBIM як цифрового паспорта об’єкта культурної спадщини, що забезпечує зберігання повної інформації про геометрію, матеріали, історико-культурну цінність, ушкодження та втручання, а також інтеграцію з системами моніторингу технічного стану, управління ризиками та готовності до надзвичайних ситуацій
- підходи до порівняльного аналізу програмного забезпечення для використання HBIM-технології шляхом визначення оптимальних комбінацій інструментів (3D-сканування, Rhino/Grasshopper, Archicad/Revit/Allplan, WebGIS) для різних типів завдань з збереження архітектурної спадщини.

Отримали подальший розвиток:

- теоретичні положення щодо інтеграції BIM-технологій у процеси збереження культурної спадщини в умовах збройних конфліктів, зокрема у частині систематизації критеріїв адаптації HBIM-шаблонів залежно від ступеня пошкодження, доступності даних та режиму роботи;
- наукові уявлення про роль HBIM як інструменту управління ризиками та підтримки прийняття рішень щодо збереження й відновлення архітектурної спадщини, зокрема через інтеграцію з аналітикою Великих Даних (Big Data), сенсорним моніторингом та системами Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС).

Досліджені відмінності та акценти визначені з опрацьованих джерел та наукових досліджень, Детальне визначення відмінностей розкрито в першому розділі та в положеннях, де автор посилається на джерело та фіксує власні пропозиції.

Практичне значення одержаних результатів полягає у формуванні науково-методичного апарату для створення HBIM-моделей об’єктів архітектурної спадщини, пошкоджених внаслідок воєнних дій; у визначенні структури параметрів, придатної для реставраційної та науково – проєктної практики; у створенні адаптивного шаблону HBIM – процесу та методики цифрового паспорта. Верифіковані поля паспорта можуть бути використані як інформаційна основа для підготовки або оновлення Облікової картки об’єкта культурної спадщини, але не замінюють облікової документації, складеної й затвердженої в установленому порядку [65].

Результати дослідження можуть бути задіяні у роботі Українського державного інституту культурної спадщини Міністерства культури та інформаційної політики України, відповідних органів місцевої влади, Українського комітету Міжнародної ради з охорони пам’яток та історичних місць (ICOMOS), а також у процесі формування та моніторингу облікової документації Державного реєстру нерухомих пам’яток України.

ОБ’ЄКТ · ПРЕДМЕТ · МЕТА · МЕТОДИ

ОБ’ЄКТ

Об’єкт архітектурної спадщини, пошкоджений внаслідок воєнних дій.

ПРЕДМЕТ

Процес та методика HBIM-моделювання об'єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій, із системою додаткових параметрів для опису воєнних пошкоджень, ступеню деструкції, конструк(т)ивної безпеки, історико-архітектурної цінності та життєвого циклу відновлення.

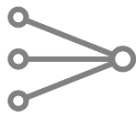
МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблення науково-методичних засад створення будівельної інформаційної моделі об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

АНАЛІЗ І СИНТЕЗ

Опрацювання й узагальнення наукових праць, нормативних документів, вітчизняного та закордонного досвіду BIM/HBIM; визначення складу вихідних даних.



ПОРІВНЯННЯ

Зіставлення підходів до цифрової фіксації та HBIM-моделювання, систем рівнів деталізації й наповнення, можливостей ПЗ.



АБСТРАГУВАННЯ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ

Виокремлення суттєвих характеристик об'єкта і пошкоджень; узагальнена структура даних, рівні LOD-H/LOI-H, параметри.



ФОРМАЛІЗАЦІЯ

Подання характеристик, цінності, технічного стану та пошкоджень як структурованої системи параметрів, ознак, рівнів і зв'язків.



СИСТЕМНИЙ ПІДХІД І СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ

HBIM-модель як цілісна інформаційна система (складові, структура, ієрархія, взаємозв'язки).



МОДЕЛЮВАННЯ

Структура BIM, модифіковані рівні LOD-H/LOI-H, адаптивний шаблон HBIM-процесу.



Рис. В.1 Об’єкт, предмет, мета та методи

Рис. В.1 Об'єкт, предмет, мета, методи

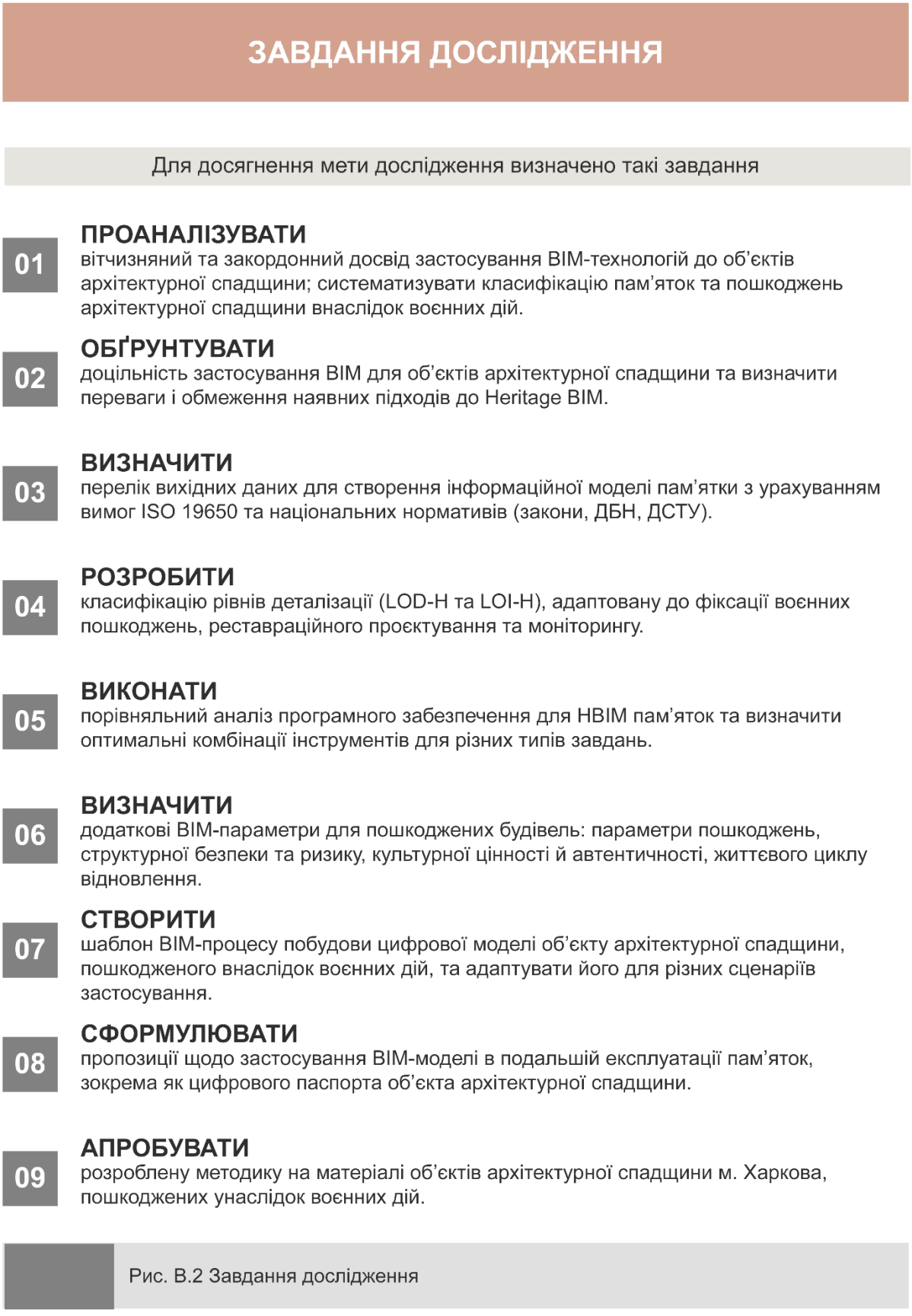


Рис. В.2 Завдання дослідження

Рис. В.2 Завдання дослідження

Матеріали дослідження можуть бути використані в навчальному процесі закладів вищої освіти архітектурного та будівельного профілю, зокрема у курсах з інформаційного моделювання будівель, реставрації об'єктів архітектурної спадщини, цифрових технологій в архітектурі та у спецкурсах з BIM для історичних і культурних об'єктів (Heritage BIM).

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертації, які висуваються на захист, отримані автором особисто. Здійснено одноосібних наукових публікацій та у співавторстві. В публікаціях, написаних у співавторстві, автору належить: визначення переваг технології BIM на етапі проєктування моделі (Додаток А. [2]); постановка проблеми виявлення та формулювання повного обсягу та потенціалу BIM технології, основна частина і висновки (Додаток А. [3]); постановка проблеми фіксації пошкоджень об'єктів архітектурної спадщини, основна частина і висновки (Додаток А. [5]);визначення проблеми 3D-моделювання об'єктів архітектурної спадщини (Додаток А. [9]).

Апробація результатів дослідження. Окремі результати дослідження були представлені у матеріалах Міжнародної наукової конференції «Global Innovations and Collaborative Solutions in Contemporary Science» (Лодзь, Польща, 15 грудня 2023), на Міжнародному науково-технічному форумі «Архітектура, Будівництво, Дизайн: Технологія, Енергетика, Менеджмент» (Київ, Україна, 16–17 жовтня 2024), на Міжнародній міждисциплінарній літній школі передових студій Unite City Architecture Nature (U CAN) (Лонато-дель-Гарда, Італія, 1–7 вересня 2025).

Додатково, результати дослідження апробовано у межах XV Міжнародної наукової конференції «Проблеми дослідження, збереження та реставрації історичних фортифікацій» (Львів – Івано-Франківськ, Україна, 18–19 вересня 2025).

Окремі результати дослідження були впроваджені в навчальний процес Київського національного університету будівництва і архітектури – на архітектурному факультеті, кафедри Інформаційних технологій в архітектурі, при розробці курсового проєкту для студентів 5 курсу групи АБСм25-7 та в

процесі підготовки студентської наукової роботи студента 5 курсу групи АБСм25-7 Хартанович Ірини Русланівни, де автор виступив у ролі наукового керівника. Студентська наукова робота «Сучасні підходи до організації навчального проєктування: досвід застосування та перспективи BIM-технологій» визнана переможцем Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей у 2025/2026 н.р. (Протокол №4 конкурсної комісії від 28.05.2026)

Публікації. Результати дослідження опубліковано у 10 наукових працях: з них 5 – статті у наукових фахових виданнях України, включених до категорії «Б», 2 – статті у закордонних виданнях, 3 – тез наукових доповідей

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з: анотацій, списку публікацій, переліку термінів, вступу, трьох розділів із висновками, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 264 сторінки, з них: 150 сторінок – основний текст, 35 сторінок – рисунки, 34 сторінки – список використаних джерел (загальна кількість – 257 найменувань), 21 сторінка – додатки, з них 3 – акти впроваджень і 6 сторінок - сертифікати.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ РЕСТАВРАЦІЇ ТА ПОДАЛЬШІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ, ПОШКОДЖЕНИХ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

1.1. Історія поняття та класифікація об'єктів архітектурної спадщини

Об'єкти архітектури належать до комплексних, інформаційно складних джерел. В них зберігається важлива інформація історико-краєзнавчого та культурного характеру.

В Україні нерухомі пам'ятки як об'єкти культурної спадщини класифікують відповідно до закону «Про охорону культурної спадщини» за категоріями національного та місцевого значення, а також за іншими ознаками [13]. Наприклад, за призначенням вони поділяються на житлові, культові, господарські, оборонні та поховальні споруди. Досить часто пам'ятка виконує одночасно кілька функцій, зокрема, храми використовувалися як культові й оборонні споруди, замки – як оборонні та житлові.

Об'єкти архітектурної спадщини поділяють за часом і місцем знаходження; за технікою створення; за матеріалом, з якого вони споруджені; за приналежністю до певного стилю чи архітектурної школи/традиції.

Спочатку детальніше наведемо визначення поняття «пам'ятка як об'єкт архітектури». Удосконалення інструментів роботи з об'єктами архітектурної спадщини потребує звернення до закордонного досвіду, зокрема до країн Європейського Союзу [66]. Тому наведемо генезу формування цього поняття у різних країнах.

В Угорщині поняття «пам'ятка» з'являється у Законі від 1881 р., але там йдеться про «художню пам'ятку». Однак цей термін вже має таке трактування: «…під назвою «художня пам'ятка» мається на увазі будь-яка споруда, що перебуває на землі або під землею … та має цінність історичної чи художньої пам'ятки» [67].

У законодавстві Італії не представлено тлумачення поняття «пам’ятка», лише робиться акцент на тому, що охороні підлягають всі предмети, які мають цінність за давністю походження та художніми якостями [68].

У відповідному законі швейцарського кантону Берн згадуються «будівельні пам’ятки». Їх цінність визнається як «старовина» [68].

В Баденському проєкті закону від 1884 р. прописано: «Всі нерухомі та рухомі предмети, які походять з завершеного культурного періоду, і, як характерні свідки часу свого виникнення, мають особливе значення для розуміння мистецтва і художньої промисловості та її історичного розвитку, для знання давнини і для історичного дослідження взагалі, а також для збереження спогадів про події, що мали видатний історичний інтерес, є «пам’ятками» відповідно до змісту цього закону і підлягають піклуванню держави» [68].

Гессенський закон від 1902 р. демонструє вже зовсім інший підхід до характеристики «об’єктів архітектурної спадщини». Вони визначаються як «споруди, що мають значення для історії, а також історії мистецтва» [67]. У Законі швейцарського кантону Невшатель від того ж року художнє значення об’єктів архітектурної спадщини взагалі не згадується; вони визначаються виключно як цінні для країни об’єкти історії [68].

Найбільш широке тлумачення поняття отримало в англійському законі від 1913 р., де вказано, що об’єктами архітектурної спадщини є такі, «збереження яких має суспільне значення, завдяки закладеній в них історичній, архітектурній, меморіальній, художній або археологічній цінності» [69]. На початку XX ст. поняття «об’єкта архітектурної спадщини» в цьому контексті вже стає загальноприйнятим.

У тексті Міжнародної конвенції з охорони всесвітньої культурної і природної спадщини (Париж, 1972 р.) (Ратифікованої Україною в 1988 р.)[70] було надано нове поняття «культурна спадщина», що є більш універсальним - під ним розуміється три категорії об’єктів - це, власне, самі нерухомі пам’ятки, ансамблі й визначні місця.

Поняття «культурна спадщина» значно вплинуло на формування нової культуроохоронної парадигми для всіх категорій нерухомих пам'яток, які мають історико-культурну цінність.

Того ж року ЮНЕСКО прийняла для класифікації у пам'яткоохоронній справі, разом із «культурною спадщиною», поняття «природна спадщина», під яким розуміють різноманітні природні об'єкти, що мають універсальну наукову цінність. Завдяки цьому в сучасній практиці кожен окремий об'єкт архітектурної спадщини не обмежується тільки самим об'єктом, а додатково охоплює й довкілля.

Окремо слід згадати Конвенцію про охорону архітектурної спадщини Європи (Гранада, 1985 р.). Як головну мету в ній визначено «зміцнення та просування політики збереження і примноження європейської спадщини» [28]. У документі наголошується на необхідності спільної координації усіх дій, встановлення принципів співробітництва в практичній сфері збереження архітектурної спадщини.

Поняття «архітектурна спадщина», використана в цьому документі, охоплює такі постійні об'єкти:

1) «пам'ятки: усі будівлі та споруди, що представляють значний історичний, археологічний, художній, науковий, соціальний або технічний інтерес, включно з їх устаткуванням та обладнанням» [71];

2) «групи будівель: однорідні групи міських або сільських будівель, що становлять історичний, археологічний, художній, науковий, соціальний або технічний інтерес, які є достатньо узгодженими для формування топографічно визначеної одиниці» [71];

3) «об'єкти: спільні твори людини та природи, які є частково забудованими територіями, достатньо характерними й однорідними для їх топографічної визначеності, і становлять помітний історичний, археологічний, мистецький, науковий, соціальний чи технічний інтерес» [71].

У вступі до Венеціанської хартії (прийняття 31.05.1964) [72] наголошено, що людство дедалі більше усвідомлює єдність людських цінностей та починає

ставитися до пам’яток старовини як до спільного надбання, визнає спільну відповідальність за збереження їх для майбутніх поколінь. Укладачі тексту «Хартії», що зіткнулися зі швидкими змінами у світі в післявоєнний період, вказують на обов’язок передати спадщину у повному багатстві її автентичності. У той час гостро стояло питання збереження об’єктів архітектурної спадщини, які сильно постраждали від Другої світової війни. За цих обставин збереження означає охорону об’єктів архітектурної спадщини для майбутніх поколінь і підтримку «на постійній основі» (стаття 4 «Хартії»), захищену різними обмеженнями, такими як «незмінність планування або оздоблення будівлі» (стаття 5 «Хартії»), «збереження традиційної обстановки», заборона «нового будівництва, знесення або модифікації» (стаття 6 «Хартії»), заборона переміщення «всієї чи частини пам’ятки… за винятком випадків, коли цього вимагає охорона цієї пам’ятки» (стаття 7 «Хартії»). Художнє оздоблення у складі об’єкта архітектурної спадщини також повинно залишатися, за можливості, без істотних змін (стаття 8 «Хартії»)[72].

Надзвичайно важливим для міжнародної ролі Венеціанської хартії як «офіційного кодексу в галузі збереження культурної спадщини» було те, що у статті 1 вона визначала концепцію пам’ятки, яка базувалася на європейських традиціях ще доримських часів, у дуже широкому сенсі – пам’ятки «не менше як витвори мистецтва, ніж як історичні свідчення» (стаття 3), які мають бути захищені не шляхом «управління змінами», а шляхом консервації/реставрації: концепція історичної пам’ятки охоплює не лише окремий архітектурний твір, а також міське чи сільське середовище, у якому знайдено свідчення певної цивілізації, значущого розвитку чи історичної події. Це стосується не лише великих творів мистецтва, а й більш традиційних творів минулого, які з часом набули значення [72].

Венеційська хартія визначає концепцію пам’ятки з урахуванням «традиційних витворів минулого», маючи на увазі пам’ятки та місця, які у 1972р. «Конвенція про всесвітню спадщину» визначає як «культурну спадщину» однак

стосовно пам’яток усіх видів, не обов’язково тих, що мають «видатну цінність», як того вимагає «Конвенція про всесвітню спадщину» [70].

У законодавчих документах держав-членів ЄС немає єдиного визначення для будівель, що мають історичну цінність, та не надана чітка характеристика спадщини! Проте є кілька загальних характеристик, що зустрічаються в різних національних інтерпретаціях:

- важливе історичне, мистецьке, культурне, естетичне та/або наукове значення;

- представлення творчого доробку, унікальних навичок людства (у різних галузях – мистецтво, архітектура, техніка, технології тощо);

- «автентичність» і «рідкість / унікальність» (в окремих країнах);

- «вік» (в окремих країнах, наприклад, в Естонії).

Також відносно недавно у світі сформувалося поняття «цифрової спадщини» – оцифрованої культурної спадщини у вигляді мистецьких, історичних, наукових та інших видів інформації і артефактів, що зберігаються у цифровому форматі [73]. Комплексно це поняття розглянули та закріпили 17 жовтня 2003 року в Парижі, коли під час Генеральної конференції Організації Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури (ЮНЕСКО) було створено Конвенцію про охорону нематеріальної культурної спадщини та ухвалено «Хартію про збереження цифрової спадщини».[73] Хартія стала першим міжнародним документом, який визначає правові та концептуальні основи захисту оцифрованих культурних і наукових цінностей. Цей документ є відповіддю на труднощі цифрової епохи, коли фізичні об’єкти та інформаційні ресурси поступово переміщуються в цифровий простір. Основною метою Хартії є забезпечення доступу до культурної спадщини для майбутніх поколінь та збереження знань, історії й ідентичності у цифровому форматі.

Прийняття Хартії стало реакцією на глобальні зміни, спричинені розвитком інформаційних технологій. У 2000-х роках почала зростати усвідомленість того, що значна частина світової культурної спадщини, як матеріальної, так і нематеріальної, може бути втрачена без ефективних заходів

щодо її цифрового збереження. Водночас збільшення обсягів створення нових цифрових матеріалів, як-от електронні документи, зображення, відео й аудіозаписи, підкреслює необхідність їхнього захисту та відповідального управління ними.

ЮНЕСКО визнала, що без належної системи збереження цифрової спадщини культурні цінності можуть бути втрачені назавжди, і саме тому виникла потреба в розробці документу, що регулював би ці питання. Хартія окреслила основні принципи, згідно з якими об’єкти цифрової спадщини мають бути доступними для дослідження, збереження та використання, що стало важливим кроком до створення глобальної політики у цій сфері.

Хартія ЮНЕСКО щодо цифрової спадщини має кілька основних положень, які регламентують ключові аспекти її збереження, зокрема:

1. **Збереження інформаційних ресурсів у цифровому форматі**. Хартія підкреслює важливість збереження всіх об’єктів, що мають культурну, освітню, наукову та історичну цінність. Документ зобов’язує держави-учасниці розробляти політику та інфраструктуру для довготривалого збереження цифрових об’єктів.
2. **Забезпечення доступу до цифрової спадщини**. Хартія звертає увагу на те, що культурна спадщина має бути доступною для громадськості, науковців і дослідників. Це положення відображає необхідність відповідального підходу до управління цифровими об’єктами для того, щоб вони могли бути доступними для вивчення та використання.
3. **Захист авторських прав і прав власності**. ЮНЕСКО визначає важливість дотримання авторських прав і прав інтелектуальної власності на цифрові об’єкти, що дозволяє зберегти автентичність і повагу до творців оцифрованих ресурсів.
4. **Налагодження міжнародного співробітництва**. Хартія закликає до об’єднання зусиль держав, організацій, наукових установ та приватного сектора для створення єдиного глобального підходу до збереження цифрової спадщини. Міжнародне співробітництво допомагає виробити

єдині стандарти та технології збереження, що сприяють сталому розвитку у сфері захисту культурних цінностей [73].

Незважаючи на важливість ухвалення Хартії, реалізація її положень стикається з низкою проблем:

- **Технологічна застарілість**. Цифрові носії й формати мають обмежений термін зберігання, і багато з них можуть стати непридатними вже через кілька років. Це потребує розробки стратегій щодо постійного оновлення формату даних.
- **Обсяг ресурсів**. Процес оцифрування та зберігання цифрових ресурсів вимагає значних фінансових і людських ресурсів, а не всі країни мають достатньо засобів для повного виконання вимог Хартії.
- **Правові та етичні аспекти**. Права на цифрову спадщину можуть належати приватним особам або комерційним організаціям, що створює правові труднощі у питаннях доступу до інформації, яка має культурне значення.[73]

З моменту прийняття Хартії ЮНЕСКО багато країн почали впроваджувати національні програми зі збереження цифрових культурних об’єктів. Цей документ надихнув на розробку нових стандартів оцифрування та зберігання даних, що полегшило створення архівів цифрової спадщини. Хартія стала основою для розробки інституційних політик збереження культурної спадщини в цифровому форматі, сприяючи формуванню уніфікованих підходів і методологій у цій сфері. (рис. 1.1)

Цифрове збереження стало важливою частиною дослідницької діяльності, що дало змогу глибше вивчати історичні та архітектурні об’єкти та артефакти. Наприклад, завдяки цифровій спадщині дослідники можуть зберігати зображення, моделі й документи про об’єкти архітектурної спадщини, яким загрожує руйнація, що дає змогу відтворювати їх у разі знищення.

Хартія про збереження цифрової спадщини ЮНЕСКО 2003 року є важливим міжнародним документом, який визначає правові та етичні основи збереження цифрових культурних ресурсів. Вона забезпечує глобальне

усвідомлення важливості цифрової спадщини як невід'ємної частини культурної пам'яті людства та стимулює країни до розроблення політик і технологій для її збереження. У сучасному світі, де об'єкти архітектурної спадщини та інші культурні цінності піддаються загрозам з боку воєн, кліматичних змін та техногенних катастроф, значення Хартії є особливо актуальним, оскільки вона сприяє збереженню світової спадщини для майбутніх поколінь у цифровому форматі. Останніми роками культурній спадщині, до якої належать і об'єкти архітектурної спадщини, приділяється все більше уваги. Зокрема, це можна побачити на прикладі останніх стратегічних документів ЄС. Уже загальноприйнятим стає той факт, що розвиток культури на основі традиційної спадщини сприяє стійкому зростанню, появі творчих інновацій, формуванню нових робочих місць. Комюніке Європейської Комісії від 24 липня 2014р. «На шляху до комплексного підходу до культурної спадщини для Європи» [74] містить заклик до інтегрованого підходу, що дасть змогу у повній мірі використовувати потенціал культурного надбання кожної країни для активного розвитку економіки, рівня життя, єдності. Звіт «Культурна спадщина має значення для Європи», розроблений Експертною групою Європейської Комісії з питань культурної спадщини Horizon 2020 в 2015 р., також загострює увагу на цих моментах [74].

2018 рік був оголошений Європейським роком культурної спадщини (EYCH)[75], що сприяло проведенню різних тематичних заходів з урахуванням розвитку всіх видів спадщини на всіх рівнях. Представлена «Європейська рамкова програма дій щодо культурної спадщини» [76] продемонструвала актуалізацію питань розумної реставрації, необхідність адаптації об'єктів архітектурної спадщини до сучасних умов і налагодження обміну передовим досвідом у цій галузі.

Розвиток законодавства України в сфері охорони культурної спадщини має довгу історію, яка, зокрема, включає радянський спадок, процес адаптації міжнародних стандартів після здобуття незалежності та впровадження сучасних норм.

ЕВОЛЮЦІЯ СВІТОВОГО ЗАКОНОДАВСТВА

До 1881 системного законодавства щодо пам'яток не існувало — охорона мала епізодичний характер

НАЦІОНАЛЬНІ ЗАКОНИ ПРО ПАМ'ЯТКИ · 1881–1913

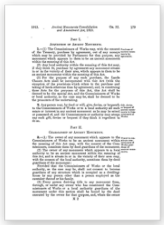
1881 — УГОРЩИНА
Закон про «художню пам'ятку»
Будь-яка споруда, що має цінність історичної чи художньої пам'ятки — перше правове закріплення поняття.



1881
«Закон про художню пам'ятку»

1884 — БАДЕН
Баденський проєкт закону
Нерухомі та рухомі предмети завершеного культурного періоду як «характерні свідки часу свого виникнення».

1902 — ГЕССЕН
Гессенський закон
Об'єкти архітектурної спадщини як «споруди, що мають значення для історії, а також історії мистецтва».



1913
«Закон про давні пам'ятки»

1905 — НЕВШАТЕЛЬ
Закон кантону Невшатель
Художнє значення не згадується — пам'ятки визнаються виключно як цінні для країни об'єкти історії.

1913 — АНГЛІЯ
Англійський закон — найширше тлумачення
Пам'ятки — ті, збереження яких має суспільне значення завдяки і сторичній, архітектурній, меморіальній чи художній цінності.



1964
«Венеційська Хартія»

МІЖНАРОДНІ ХАРТІЇ ТА КОНВЕНЦІЇ · 1964–2003

1964 — ВЕНЕЦІЯ
Венеційська хартія
Міжнародні принципи консервації та реставрації; пам'ятка розглядається невіддільно від історичного середовища.



1972
«Конвенція про всесвітню спадщину»

1972 — ЮНЕСКО ПАРИЖ
Конвенція про всесвітню спадщину · ратиф. Україною 1988
Універсальне поняття «культурна спадщина» — пам'ятки, ансамблі, місця; а також «природна спадщина».

2003 — ЮНЕСКО
Хартія про збереження цифрової спадщини
Правові та етичні основи збереження цифрових ресурсів — місток до НВІМ і цифрового документування.



2003
«Хартія про цифрову спадщину»

РОЗДІЛ 1

Рис. 1.1 Еволюція світового законодавства про пам'ятки — об'єкти архітектури (1881–2003)

Рис. 1.1 Еволюція світового законодавства про пам'ятки - об'єкти архітектури

До здобуття незалежності Україна діяла в рамках законодавства СРСР, яке передбачало основні засади збереження культурної спадщини, але обмежувало дослідження та охорону окремими ідеологічними рамками. Основними нормативними актами були **Закон УРСР «Про охорону і використання пам'яток історії та культури» (1978 р.)** [77], який регламентував облік, збереження та реставрацію пам’яток історії, мистецтва і архітектури. Були створені спеціалізовані органи, проте їх діяльність мала обмежений характер через політичний контроль та низку постанов і рішень Ради Міністрів СРСР які зобов’язували підтримувати облік і створювати реєстри пам’яток, але державний бюджет рідко виділяв належне фінансування для охорони та реставрації культурних об’єктів.

Після здобуття незалежності Україна почала розробляти національні законодавчі акти, що відповідають міжнародним стандартам охорони культурної спадщини:

- **Закон України «Основи законодавства України про культуру» (1992 р.)** [78] – перший законодавчий акт незалежної України у сфері охорони культурної спадщини. Він передбачав створення державних реєстрів і системи охорони пам’яток.
- **Конституція України (1996 р.)** – закріпила охорону культурної спадщини як одне з конституційних зобов’язань держави. Стаття 54 гарантувала захист прав на культурну спадщину і наголосила на відповідальності держави перед наступними поколіннями [79].

Однак ці закони потребували доопрацювання для забезпечення більш ефективної реалізації заходів із захисту пам’яток.

У період 2000 – 2010 років розпочалися активні спроби інтеграції міжнародних стандартів, зокрема з урахуванням зобов’язань України в рамках Ради Європи та ЮНЕСКО.

- **Закон України «Про охорону культурної спадщини» (2000 р.)** [80]– визначив основні терміни, ввів класифікацію пам’яток на об’єкти місцевого й національного значення, передбачив створення центрального

органу для управління питаннями охорони культурної спадщини. Він також регулював порядок проведення археологічних досліджень і реставраційних робіт.

- **Ратифікація Конвенції ЮНЕСКО «Про охорону всесвітньої культурної та природної спадщини» (1988 р.)** [81]**, Конвенції про охорону нематеріальної культурної спадщини (2003 р.)** [82] **і Гаазької конвенції про захист культурних цінностей у разі збройного конфлікту (1954 р.)** [83] забезпечила гармонізацію національного законодавства з міжнародними нормами та зобов'язаннями щодо захисту культурної спадщини.

Цей період став переломним у залученні міжнародних практик і принципів збереження культурної спадщини.

Після 2010 року зросла увага до посилення контролю за збереженням культурної спадщини через численні факти руйнації та незаконного будівництва на історичних територіях.

- **Внесенням змін до Закону України «Про охорону культурної спадщини» (2011, 2016 рр.)** – було уточнено вимоги щодо проєктування та будівництва на територіях пам'яток, введено положення про відповідальність за їх руйнування та передбачено більш суворий контроль у цій сфері [84].
- **Закон України «Про архітектурну діяльність»** [85] – містить низку положень щодо необхідності погодження з органами охорони культурної спадщини проєктів на територіях, що мають історико-культурну цінність.

У цей час виникла потреба у створенні електронних реєстрів пам'яток та інтеграції цифрових технологій у процес контролю за станом об'єктів спадщини.

Початок повномасштабного російського вторгнення в 2022 році вивів на перший план необхідність захисту культурної спадщини, особливо в зонах бойових дій. У цьому контексті значну увагу приділили цифровому збереженню спадщини та посиленню відповідальності за руйнування об'єктів архітектурної спадщини.

- **Внесення змін до законодавства про кримінальну відповідальність за знищення культурних об'єктів (2022 р.)** [86] – посилило покарання за умисне руйнування пам'яток культури та історії.
- **Проєкти щодо цифровізації об'єктів архітектурної спадщини** – спрямовані на створення 3D-моделей важливих об'єктів, що дозволяє їх точне документування. Ці ініціативи сприяли захисту інформації про об'єкти архітектурної спадщини, які можуть бути знищені.
- **Відновлення та охорона культурної спадщини у співпраці з міжнародними організаціями** – Україна активізувала співпрацю з ЮНЕСКО, Європейським Союзом, ICOMOS та іншими міжнародними організаціями для отримання допомоги у збереженні спадщини в умовах війни.

Відповідно до Закону України «Про охорону культурної спадщини» [13] пам'ятка – це об'єкт культурної спадщини, занесений до Державного реєстру нерухомих пам'яток України.

Аналіз статті 2 цього Закону, у якій визначено типи та види культурної спадщини, дає змогу виокремити серед них об'єкти архітектури та містобудування. Ними є окремі споруди, а також пов'язані з ними твори монументального, декоративного й образотворчого мистецтва, які характеризуються ознаками певних культур, епох, стилів, традицій, авторів; природно-архітектурні комплекси (ансамблі), історичні центри, вулиці, квартали, площі, залишки давнього планування та забудови, що виступають носіями певних містобудівних ідей [13].

Крім того, у «Порядку визначення категорій пам'яток для занесення об'єктів культурної спадщини у Державний реєстр нерухомих пам'яток України» (далі - Порядок) [87], надані критерії відповідності вимогам, що висуваються об'єктам для визнання їх об'єктами культурної спадщини та віднесення до категорії пам'яток національного або місцевого значення (пп. 10 та 11 Порядку). Такі об'єкти повинні насамперед обов'язково відповідати критерію автентичності, який, виходячи зі змісту тексту вказаних пунктів,

необхідно розуміти як базовий, вихідний критерій [87]. З вказаних у Порядку критеріїв архітектурні об’єкти повинні відповідати ще, як мінімум, одному з наведених:

- для об’єктів національного значення – «мають значний вплив на розвиток культури, архітектури, містобудування, мистецтва країни; репрезентують шедевр творчого генія, стали етапними творами видатних архітекторів або інших митців; були творами зниклої цивілізації чи художнього стилю» (п. 10 Порядку) [87];

- для об’єктів місцевого значення – «вплинули на розвиток культури, архітектури, містобудування, мистецтва певного населеного пункту чи регіону; є творами видатних архітекторів або інших митців; є культурною спадщиною національної меншості або регіональної етнічної групи» (п. 11 Порядку) [87].

Як визначає більшість дослідників, відповідно до останніх тенденцій у реставраційній теорії, поняття «архітектурна пам’ятка» пропонується трактувати у розширеному варіанті, ідентифікуючи його з терміном «об’єкт архітектурної спадщини», що є частиною культурної спадщини. При цьому термін «архітектурна та містобудівна спадщина» містить таке поняття: «сукупність успадкованих від попередніх епох об’єктів архітектурно-містобудівної діяльності, які повністю або частково збереглися в автентичному стані та репрезентують культурний, мистецький і технічний розвиток людської цивілізації, а також є складовою нерухомої культурної спадщини» [13]. Об’єктами архітектурної спадщини є людські поселення та споруди, що мають історико-культурну цінність, а також пам’ятні місця, предмети, пов’язані з історичними подіями, розвитком суспільства та держави, окремими особами [13].

Отже, специфіка та різноманіття форм об’єктів архітектурної спадщини як об’єктів культурної спадщини зумовили необхідність визначення цих понять на законодавчому рівні. (рис.1.2)

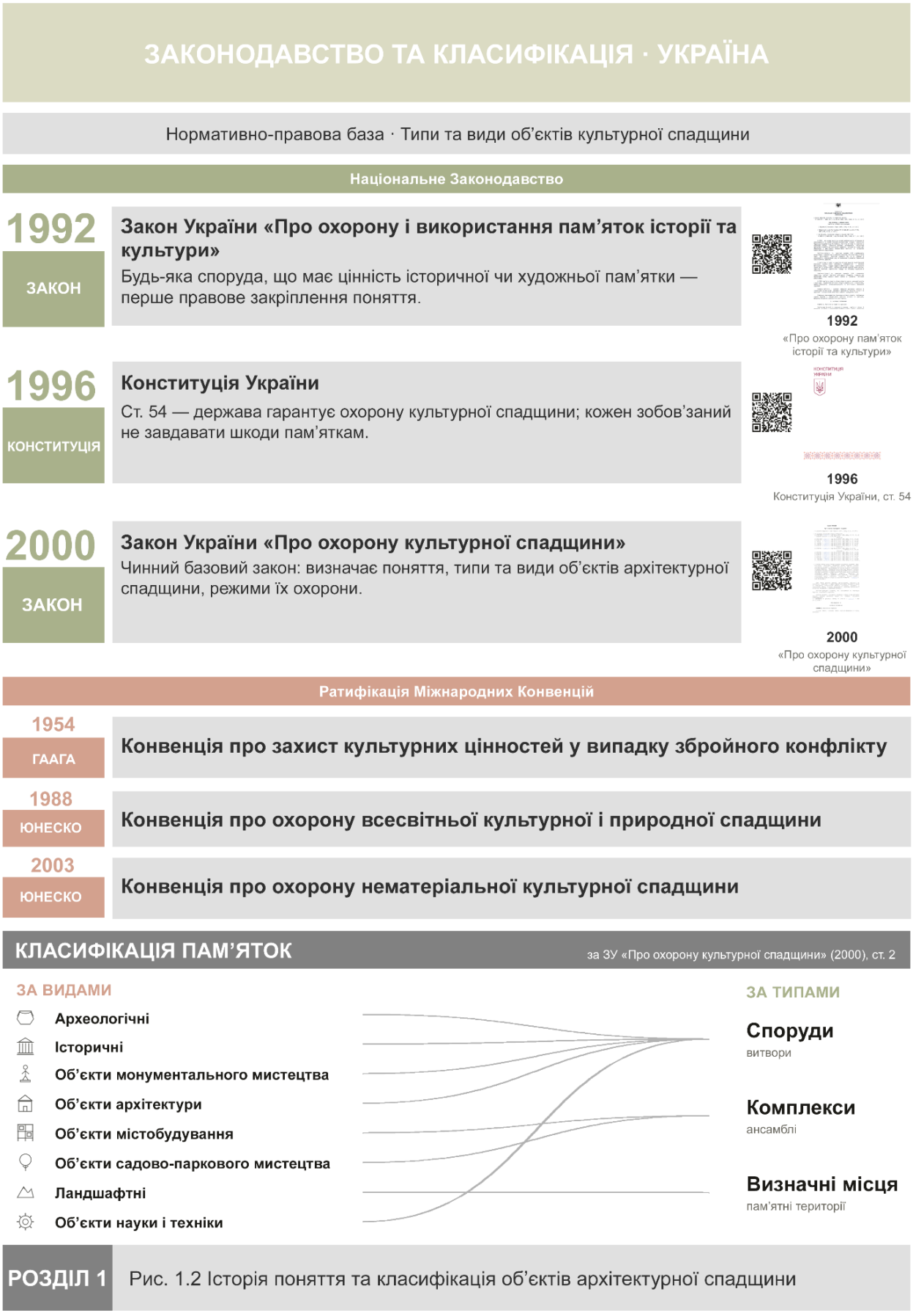


Рис. 1.2 Історія поняття та класифікація об’єктів архітектурної спадщини

Об’єкти архітектурної спадщини в Україні мають значний культурний і комерційний потенціал, який, з урахуванням їхньої автентичності, може бути реалізований через їхнє раціональне використання. Традиційно українська практика охорони спадщини склалася як реакція на численні втрати культурних надбань протягом століть – через війни, зміни влади та інші труднощі. Історично орієнтований на збереження автентичності, цей підхід став бар’єром для адаптації та економічної інтеграції об'єктів архітектурної спадщини у суспільне життя, на відміну від європейського досвіду, де комерційне використання та адаптація об’єктів спадщини є звичними.[88] Потрібно, щоб об'єкти архітектурної спадщини були доступними та корисними для суспільства. Новітні технології, такі як 3D-моделювання, можуть забезпечити якісну документацію, прозорість і контроль, сприяючи як культурному, так і економічному розвитку спадщини.[55]

Отже, чинне українське законодавство встановлює зарахування до об’єктів архітектурної спадщини таких, які відповідають критеріям, закріпленим у підзаконному нормативному акті. При цьому вказані критерії дещо суб’єктивні, оскільки об’єкта архітектурної спадщини – це об’єкт цивільних прав, що має ознаки нерухомого майна та цінність з погляду пізнання культури історичного розвитку народу та його державності. Як головні критерії слід виокремити значення об’єктів архітектурної спадщини для наступних поколінь як відображення ключових етапів розвитку суспільства, а як об’єкт цивільних прав, він характеризується наявністю встановлених обмежень щодо процедури її використання.

1.2. Науково-теоретичний досвід дослідження процесів реставрації об’єктів архітектурної спадщини

Критичний аналіз теоретичного досвіду здійснено за змістом праць і тим рівнем наукового завдання, який у них розв’язано. Порівнювалися чотири взаємопов’язані напрями: пам’яткознавче та містобудівне обґрунтування цінності об’єкта; принципи реставрації, реконструкції й регенерації; методи

обстеження та просторової фіксації; організація цифрових даних у BIM/HBIM. Такий підхід дає змогу відокремити вже сформовані наукові положення від невирішеної частини проблеми – побудови цілісного параметризованого інформаційного процесу для об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженої внаслідок воєнних дій.

У працях представників КНУБА М. М. Дьоміна, В. В. Товбича та О. І. Косаревського проблема спадщини розглянута на містобудівному, системному й нормативному рівнях. М. М. Дьомін зі співавторами обґрунтував теоретико-методичні основи ревіталізації та просторового розвитку поствоєнної України з урахуванням нематеріального контексту; В. В. Товбич і О. І. Косаревський проаналізували напрями вдосконалення пам’яткоохоронного законодавства [20; 21]. Ці результати визначають загальні умови відновлення та правові обмеження втручання, однак у межах зазначених праць не розроблено структуру HBIM-даних, яка пов’язувала б містобудівний контекст із конкретним елементом об’єкта архітектурної спадщини, просторовою зоною його пошкодження, джерелом відомостей і ступенем достовірності.

Реставраційний напрям у КНУБА представлений дослідженнями О. С. Слєпцова [22], Ю. В. Івашко і М. І. Орленко [23] та В. О. Молочка [25]. М. І. Орленко систематизувала проблеми й методи реставрації об’єктів архітектурної спадщини України XI – початку XX ст.; В. М. Мещеряков і О. С. Слєпцов визначили типи відтворення втрачених об’єктів на прикладі Одеського Спасо-Преображенського собору [22]; В. О. Молочко показав зміни реставраційної та пам’яткоохоронної діяльності, спричинені російсько-українською війною [25]. У цих працях обґрунтовано принципи й допустимі способи втручання на рівні об’єкта архітектурної спадщини та реставраційного проєкту, проте не визначено машинозчитуваного зв’язку між методом втручання, локалізацією пошкодження, його причиною, механізмом, ступенем деструкції та часовим станом елемента.

Окреме значення для дисертації мають праці Н. А. Лещенко. У них сформовано комплексний процес реставраційно-реконструктивних

трансформацій, систематизовано методи за активністю втручання та рівнями якісних змін, а спільно з М. Д. Кисельовим визначено ступені деструкції історичних замків і фортифікацій як основу вибору способів їх збереження, відновлення й активізації [26-31]. Отже, сама класифікація об’єктів за ступенем деструкції та залежність реставраційного рішення від цього показника вже мають наукове обґрунтування і використовується в дисертаційній роботі для подальшого переведення результатів такої оцінки до параметрів HBIM: ступінь деструкції фіксується окремо від документованої історико-архітектурної цінності та пов’язується з елементом, зоною пошкодження, джерелом і достовірністю даних.

Цифровий напрям КНУБА розкривають праці О. В. Кащенка, О. В. Левченка, А. В. Михайленка, Р. В. Шульца, Ю. О. Карпінського та А. А. Лященка. О. В. Кащенко зі співавторами розглянув інформаційні технології в архітектурному проєктуванні [33]; О. В. Левченко та А. В. Михайленко – принципи формування BIM, збереження інформації та обміну у форматі IFC [34; 35; 36]; Р. В. Шульц і А. О. Анненков – інтегрування наземного лазерного сканування і фотограмметрії [39]; Ю. О. Карпінський та А. А. Лященко – стандартизацію геопросторових даних і метаданих. Напрацювання забезпечують геометричну точність, інтероперабельність і формальну організацію інформації [40]. Водночас вони не створюють спеціалізованої семантики об’єкта архітектурної спадщини, не визначають LOD для різних реставраційних завдань і не формалізують неповні та суперечливі відомості про воєнне пошкодження.

Конструктивно-технологічні праці О. Ф. Осипова та Л. С. Чебанова [41], О. С. Молодіда і О. Ю. Ковальчука [42] охоплюють проєктування технології реконструкції, відновлення експлуатаційної придатності та особливості обстеження будівель і споруд, пошкоджених внаслідок воєнних дій. Їх результати дають методичну основу для встановлення технічного стану, виявлення дефектів і підготовки відновлювальних робіт. Проте інженерний звіт або відомість дефектів у цих дослідженнях не перетворюються на довготривалу

HBIM-структуру, де кожна зафіксована зміна має просторовий ідентифікатор, часову версію, доказове джерело та зв’язок із предметом охорони, автентичністю і наступним втручанням.

Київська пам’яткоохоронна школа сформувала методологічну основу для визначення змісту майбутньої інформаційної моделі. У монографії Л. В. Прибєги архітектурна спадщина розглянута через виявлення, охорону, збереження автентичної матеріальної структури та принципи реставрації [43]; В. В. Вечерський розробив теорію і практику історико-містобудівних пам’яткоохоронних досліджень населених місць [44]. Ці праці відповідають на питання, які характеристики об’єкта мають історико-культурну цінність і в яких просторових межах вони підлягають охороні. Вони не ставили завдання цифрової параметризації, тому дисертація не замінює експертного визначення цінності, а забезпечує внесення його документованого результату до HBIM із посиланням на автора, джерело та дату оцінювання.

Харківські, одеські та львівські дослідження конкретизують способи роботи з історичним середовищем і різними типами об’єктів архітектурної спадщини. Г. О. Осиченко дослідила реконструкцію історичного середовища міста [46], а Е. Т. Черкасова з колегами – реновацію та ревалоризацію об’єктів архітектури [48]. В. М. Мещеряков на матеріалі Одеського Спасо-Преображенського собору розкрив склад вихідних історичних матеріалів і послідовність науково-проєктного відтворення [51]. М. В. Бевз обґрунтував методологію збереження та регенерації заповідних архітектурних комплексів [52], а О. В. Рибчинський – стратегії ревіталізації середмість історичних міст [54]. Однак одиницею аналізу тут переважно є об’єкт, комплекс або міське середовище; структура даних на рівні пошкодженого елемента й локалізованої зони та її ведення упродовж відновлення не розроблялися.

Інші праці розширюють джерельну й типологічну базу дослідження. І. С. Ревський розглянув інтерпретацію джерел як методологічний принцип історико-архітектурного дослідження та реконструкції класицистичних площ [55; 56]; Т. Бажанова встановила історію і містобудівні особливості

запорізького селища № 6 [57]; З. В. Лукомська із співавторами запропонували багатовекторну модель ревіталізації комплексу палацу Потоцьких в Івано-Франківську [61]. О. В. Лесик систематизував принципи реставрації об’єктів архітектурної спадщини [60]. І. В. Коротун обґрунтувала формування буферних зон об’єктів ЮНЕСКО, а у спільній праці щодо дерев’яних храмів Буковини застосувала сучасні методи натурного дослідження і цифрової фіксації [58; 59]. Ці дослідження розв’язують питання історичної інтерпретації, охоронного контексту, ревіталізації та фіксації, але не об’єднують їх у параметризованій HBIM-моделі воєнно пошкодженого об’єкта.

У закордонному досвіді окремі складові цифрового процесу розроблено глибше. С. Бойкенс, К. Хімпе і Б. Мартенс під час віртуальної реставрації синагоги Виногради впорядкували архівні джерела, припущення та етапи моделювання [89; 90]; Н. Бруно і Р. Рончелла побудували орієнтовану на реставрацію HBIM-систему собору в Пармі [91]; Ф. К’яборандо, М. Ло Турко і Ф. Рінаудо пов’язали хмару точок з картуванням деградації [92]. Їхні рішення підтверджують можливість поєднання геометрії та семантики, проте залишаються переважно об’єктно- або програмно-специфічними. Вони не враховують української облікової документації, сукупності причин і механізмів воєнного ураження та переходу від екстреної фіксації до реставраційного проєктування, експлуатації й повторного моніторингу.

У дослідженні М. Андріасяна (M. Andriasyan) показано, що поєднання лазерного сканування та фотограмметрії з автоматизованими алгоритмами оброблення хмар точок робить можливим безпосередню трансформацію результатів вимірювань у параметричну BIM-модель. При цьому якість моделі визначається не лише точністю зйомки, а й правильністю організації первинних даних: їх щільністю, логічною сегментацією та наявністю впорядкованих метаданих [93].

Ефективне впровадження BIM-технологій є неможливим без чіткого та послідовного визначення вимог до інформації, необхідної для формування цифрової моделі будівлі. Для об’єктів архітектурної спадщини це питання

набуває особливої ваги, адже обсяг і характер даних значно виходять за межі стандартних геометричних та атрибутивних параметрів. Окрім просторових характеристик, така модель має охоплювати історико-архітектурну інформацію, відомості про матеріали, декоративні елементи та технічний стан конструкцій. Саме тому міжнародні стандарти серії ISO 19650 відіграють важливу роль, оскільки визначають принципи організації та управління BIM-інформацією на всіх етапах існування та функціонування об'єкта [94; 95]

Формуючи вихідні дані для BIM-моделювання об'єктів культурної спадщини, необхідно спиратися на вимоги національного законодавства у сфері її охорони. Саме воно визначає правила обліку, дослідження, збереження та використання об'єктів архітектурної спадщини, а також регламентує склад науково-проєктної документації й відповідальність за точність фіксації їхнього стану [1].

Серія стандартів ISO 19650 (частини 1–6) забезпечує узгоджену та послідовну систему управління інформацією, що охоплює процеси її збирання, зберігання, опрацювання та обміну від етапів проєктування й будівництва до експлуатації та можливих змін або реконструкції. Стандарт ISO 19650-1 закладає базові принципи інформаційного менеджменту, визначає ролі учасників проєкту та логіку побудови інформаційних структур. Водночас ISO 19650-2 деталізує процедури етапу реалізації проєкту, акцентуючи увагу на впорядкованому інформаційному обміні в межах спільного середовища даних (Common Data Environment, CDE) [94]

На національному рівні положення ISO 19650 адаптовані шляхом імплементації стандартів ДСТУ EN ISO 19650-1:2020 та ДСТУ EN ISO 19650-2:2020, що забезпечує узгодженість процесів управління інформацією в Україні та інтеграцію міжнародних підходів у національну практику проєктування й будівництва [1].

За відсутності чітко структурованих інформаційних вимог ефективний обмін даними та узгодженість BIM-моделі між учасниками проєкту стають практично недосяжними [96; 97]. Так, Ф. Г. Абанда та співавтори (F. H. Abanda

et al.) підкреслюють, що стандарт ISO 19650 створює умови для інтеграції BIM-процесу в практичну діяльність завдяки чіткому визначенню ролей і відповідальності учасників, що сприяє покращенню координації та співпраці [96]. Дослідження було виконано із застосуванням методу змішаних типів (mixed methods), що поєднував систематичний аналіз нормативної документації зі стандартів і якісні глибинні інтерв'ю з вісьмома експертами BIM-команд, що дало змогу відстежити впровадження положень стандартів у практичну діяльність.

Водночас Й. Ліндхольм та співавтори (J. Lindholm et al.) запропонували структуру постачання інформації, зорієнтовану на організацію інформаційних поставок через CDE, що оптимізує процеси створення, валідації та передачі даних у BIM-проєктах [97]. Методологія цього дослідження базувалася на case study двох реальних проєктів і серії практичних воркшопів, що дало змогу оцінити ефективність впровадження ISO 19650 в робочих процесах

Два підходи до впровадження стандартів ISO 19650, викладені Ф. Г. Абандою та співавторами (F. H. Abanda et al.) і Й. Ліндгольмом та співавторами (J. Lindholm et al.), доповнюють один одного, проте забезпечують різні практичні результати. Зокрема Ф. Г. Абанда та співавтори (F. H. Abanda et al.) зосереджують увагу на розумінні фахівцями стандартів ISO 19650 і труднощах інтерпретації їхнього текстового змісту без візуального представлення процесів. Натомість Й. Ліндгольм та співавтори (J. Lindholm et al.) насамперед приділяють увагу практичним інструментам організації обміну інформацією та плануванню інформаційних поставок у спільному середовищі даних, що є більш придатним для команд із досвідом застосування стандартів ISO 19650. [96; 97]

Аналіз сучасних публікацій [98-100], присвячених методам збору вихідних даних для BIM, засвідчує наявність суперечливих підходів щодо того, які типи інформації доцільно включати до моделі та в якій формі їх представляти.

Деякі дослідження акцентують на застосуванні графових і семантичних моделей для представлення BIM-даних. Завдяки цьому стає можливим виявлення і врахування складних просторових і топологічних зв'язків між

частинами будівлі. Так, Ю. Ван та співавтори (Y. Wang et al.) [98] застосовують методи графового зіставлення для виявлення логічних зв'язків між компонентами інженерних систем, у результаті чого BIM-модель трансформується на графову базу даних. Запропонований підхід забезпечує високу точність у відтворенні структурних взаємозв'язків, однак це потребує ретельного попереднього оброблення та впорядкування даних [98].

Водночас окремі наукові праці зосереджуються на автоматизації BIM-процесів із використанням мультимодальних глибоких нейронних мереж (MMDL) для класифікації елементів. Зокрема, Х. Лю та співавтори (H. Liu et al.) [99] зазначають, що поєднання візуальної інформації з такими базовими атрибутивними характеристиками, як товщина елементів або клас матеріалу, створює сприятливі умови для ефективного навчання моделей автоматичної класифікації. Просторові та топологічні взаємозв'язки між елементами враховуються лише частково, що потенційно обмежує точність формування цілісних цифрових моделей складних об'єктів [99].

Зокрема, Ф. Банфі (F. Banfi) визначає BIM не просто як технічний інструмент, а як живу та гнучку платформу. Вона допомагає впорядковувати історико-архітектурні дані та підтримує прийняття рішень щодо збереження й управління об'єктами архітектурної спадщини [100]. У процесі інтеграції цих даних HBIM-модель перестає бути сухим описом будівлі та перетворюється на цифрову «історію». Це надає можливість аналізувати, планувати та зберігати культурну спадщину в усій її багатогранності.

Отже, наукова новизна дисертації не пов'язується із самим використанням BIM, лазерного сканування, класифікацією об'єктів архітектурної спадщини за цінністю або первинним визначенням ступенів їх деструкції: ці положення мають сформовану теоретичну базу. Невирішеним залишається їх системне поєднання для об'єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій. На відміну від проаналізованих праць, у дисертації одночасно формалізовано три рівні даних – об'єкт архітектурної спадщини, архітектурно-конструктивний елемент і просторова зона пошкодження; взаємопов'язано

адаптивні LOD-H та LOI-H; розділено документований ступінь історико-архітектурної цінності й ступінь деструкції; структуровано просторовий клас, тип, причину, механізм, локалізацію та достовірність фіксації пошкодження. Зазначені параметри включено до адаптивного HBIM-процесу та методики цифрового паспорта, що забезпечує простежуваність даних від первинного обстеження до вибору втручання, оновлення стану й підготовки відомостей для Облікової картки. Саме ця інтеграція, а не повторення окремих відомих класифікацій чи технологій, становить відмінність і наукову новизну дослідження.

1.3. Актуальність та доцільність застосування BIM для об’єктів архітектурної спадщини. HBIM – будівельна інформаційна модель об’єкта архітектурної спадщини.

Мета збереження об’єктів архітектурної спадщини полягає не лише у фізичному захисті їх від руйнації, реставраційних і відновлювальних роботах, а й у ретельному документуванні поточного стану, пошуку та збереженні даних про первісний стан, історію видозмін (перебудов, руйнувань і минулих відновлень), обліку та моніторингу об’єктів архітектурної спадщини, супроводі технічного стану в процесі експлуатації.

Нині додаткову загрозу для існування об’єктів архітектурної спадщини – становлять воєнні дії на території нашої держави. Вже зафіксовано численні порушення правил ведення війни з боку держави-агресора, які призвели, зокрема, до втрат значного обсягу об’єктів архітектурної спадщини. Їх відновлення ускладнюється відсутністю необхідної облікової інформації. З огляду на всесвітній досвід, можна впевнено заявляти про ефективність сучасних інформаційних технологій у сфері збереження культурної спадщини. Наявність цифрових «двійників» цінних історичних будівель і споруд є максимально інформативним джерелом для процесу їх відновлення.

Загалом, будівельне інформаційне моделювання (BIM) (п.3.3.14 ДСТУ ISO 19650-1:2020) [1] – можна зарахувати до новітніх технологій, що постійно розвиваються й удосконалюються. Можливості BIM для нового будівництва та управління наявними будівлями широко висвітлені у професійній літературі. Специфічним є застосування цього методу до об'єктів архітектурної спадщини.

Сучасні BIM-технології розраховані на завдання щодо заданих параметрів об'єктів, а не на їх пошук, відновлення чи перевірку. Втім, значна частина процесів, пов'язаних з документуванням, проєктними роботами, реалізацією необхідних заходів зі збереження та подальшою експлуатацією об'єкта архітектурної спадщини, є аналогічною тим, що відбуваються на нових або типових об'єктах архітектури та будівництва. Саме це дає змогу працювати над адаптацією цих технологій для роботи з об'єктами архітектурної спадщини як нерухомою частиною культурної спадщини.

Згідно з останніми тенденціями, інформаційне моделювання слід розглядати як процес, а не як модель: тривимірне цифрове представлення проєкту, в якому всі елементи побудованої моделі мають додаткові інформаційні компоненти різного характеру [101; 102]. Система автоматизованого проєктування і розрахунку вже являє собою 3D-модель, на основі якої можна отримувати необхідні проєкції, але це виключно геометрія. Будівельна інформаційна модель інтелектуальна, відрізняється наявністю зв'язку всіх елементів з базою метаданих щодо характеристик та властивостей окремих елементів об'єкта [103; 104].

У BIM всі необхідні параметри призначаються ще до етапу моделювання, але їх можна постійно оновлювати. Ця функція є однією з найважливіших у роботі з архітектурною спадщиною, оскільки постійно з'являються нові дані, інтерпретації, гіпотези, виникає необхідність у додаткових втручаннях і внесенні змін у структуру будівлі тощо [105].

Незначний досвід використання BIM у роботі з об'єкта архітектурної спадщини можна пояснити певним скептицизмом і консервативним підходом з боку професіоналів зі збереження архітектурної спадщини [106], але це також

може статися через те, що зусилля з моделювання та перетворення на розумні об’єкти є великими, а під час обробки даних наявні будівлі зазвичай мають проблеми невизначеності та відсутності повноцінної інтерпретації даних, досліджень, класифікації параметрів. До того ж історичні будівлі практично не пов’язані з процедурами стандартизації (що є однією з найпотужніших особливостей BIM), оскільки вони є результатом різних історичних шарів, добудов і знесень, змін у використанні/функціях тощо. Тому слід провести оцінку можливостей застосування BIM у секторі культурної спадщини на основі реальних прикладів з сучасної практики.

До аналізу особливостей використання BIM під час роботи з об’єктами архітектурної спадщини звернулися С. Логотетіс, А. Делінасіу і Е. Стиліанідіс [107]. Вони спробували надати опис програмних платформ і кроків для створення BIM-моделей наявних будівель, а також порівняли CAD- і BIM-технології щодо визначення поняття «інформація». Р. Волк, Ф. Шультман та Ю. Стенгель [106] надають уявлення про значну кількість історичних проєктів за BIM, на основі огляду яких вони спробували визначити загальні проблеми використання цієї технології в історичних будівлях. Серед них такі:

- автоматизація збору даних і створення BIM;
- оновлення та підтримка інформації в BIM;
- обробка та моделювання «невизначених даних» [106].

У цьому контексті «невизначені дані» – це просторові та компонентні дані, які складно привести до стандартів.

Додатково необхідно дослідити використання BIM для збору та зберігання різних типів даних, закладених безпосередньо в реставраційному проєктуванні:

- підтримку процесів документування об’єкта архітектурної спадщини під час проведення натурних досліджень;
- аналіз та систематизацію різнопланових джерел історичної інформації (наративи, лапідарні джерела, наукові публікації, звіти тощо);
- фіксацію камеральних досліджень;
- підтримку проєктних робіт;

- організацію процесів і нагляд на об’єкті під час виконання реставраційних робіт (безпека, відповідність закладеним технологіям тощо);
- моніторинг, прогнозування та превентивні заходи проти руйнувань і втрати об’єкта архітектурної спадщини.

Актуальність використання BIM стосується і практики консервації об’єктів архітектурної спадщини. Цей процес досить складний і потребує участі спеціалістів різних профілів, робочі комунікації між якими можна здійснювати саме шляхом інформаційного моделювання. Усі необхідні типи даних заносяться, зберігаються, використовуються та оновлюються на єдиній платформі [108].

Усі процедури з попередніх досліджень, технологічних розробок і реалізації на об’єкті зазначаються в інформаційній моделі об’єкта архітектурної спадщини [109]. Стандартна документація для цих об’єктів, що підлягають збереженню, включає наступні дані [110]:

- геометричні характеристики, зокрема розміри та об’єм;
- інформацію про архітектурну стилістику, що охоплює конкретні архітектурні елементи та будівельні технології;
- характеристики матеріалів, які зазвичай деталізуються на проєкціях, де кожен матеріал позначається окремим типом штрихування;
- дані щодо деградації елементів, які графічно позначаються – типологія деградацій може бути описана за допомогою глосаріїв, наприклад, ICOMOS-ISCS [111];
- інформацію про фасадні інтервенції; сценарії деградації фасадів використовуються для планування відповідних заходів, які графічно позначаються на кресленнях фасадів;
- інформацію про структурні пошкодження, у разі наявності таких пошкоджень необхідно провести їх детальне обстеження для належного планування втручань;

- збір даних і, за необхідності, моделювання параметрів довкілля та його потенційного впливу на структуру будівлі, а також інформацію щодо технічного обслуговування та підтримки прийняття рішень.

Практика збереження об’єктів архітектурної спадщини, зазвичай, виконується із залученням багатьох різних професіоналів, що часто призводить до проблем із втратою та реплікацією даних [112]. В дослідженні розглядаються приклади різного використання BIM у роботі з об’єктами архітектурної спадщини для оцінки основних напрямів розвитку цієї сфери.

Огляд будівлі передбачає визначення її розмірів, геометрії, стилю, матеріалів тощо. Цей етап є ключовим, оскільки допомагає покращити розуміння структури та стану будівлі, активно сприяє плануванню збереження [113].

Сучасною тенденцією є поєднання цифрової фотограмметрії з лазерним скануванням. Цифрова фотограмметрія заснована на принципі тріангуляції, оскільки отримані зображення знімаються з різних точок фіксації. Поєднання її з лазерним скануванням дає змогу отримувати фотографії текстур матеріалів з високою роздільною здатністю і, як наслідок, інформацію про деградацію матеріалу [110]. Фотографії потребують постобробки, і зазвичай це можливо лише за допомогою окремої частини програмного забезпечення (набору команд для редагування фотознімків) [114].

Однак поєднання вихідних даних лазерного сканування та цифрової фотограмметрії повинно бути делікатним, щоб не призводити до поширення помилок внаслідок розбіжностей у калібруванні пристроїв. Також можна створити структуру із зображень високої роздільної здатності за допомогою методології Structure from Motion (SfM) [115]. SfM заснований на принципі, що чотири некомпланарні поверхні можуть бути виявлені за трьома ортогональними проєкціями. Цей метод полягає у фотографуванні способом безперервного переміщення камери для отримання конвергентних зображень, з подальшою цифровою реконструкцією геометрії.

Деякі наземні лазерні сканери (TLS) також засновані на принципі тріангуляції [116]. Вони створюють хмару точок сканованого об’єкта, яка

потребує постобробки, а потім трансформується в 3D-модель. Постобробка хмари точок і далі є трудомістким завданням. TLS може бути інтегрована з геоінформаційною системою (GIS) для того, щоб геолокаційним шляхом визначити сканований об’єкт за декартовими координатами й аналізувати геопросторові дані. Останні технології використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА, широко відомі як дрони) з GIS для сканування ландшафту. Це особливо корисно, коли ландшафт пов’язаний з досліджуваною будівлею [117].

Вихідні дані TLS є хмарами точок і потребують обробки для використання в побудові моделі BIM. Однак побудова BIM-моделі є пропедевтичним завданням. Найпоширеніші операції:

- усунення шумів, яке полягає у виявленні та усуненні просканованих елементів, які не є частиною дослідження;
- реєстрація хмари точок, яка полягає в об’єднанні різних хмар точок одного об’єкта, отриманих із різних сеансів сканування;
- мешинг, який полягає у створенні трикутних поверхонь, що потім перетворюються на 3D-моделі, виконується за допомогою спеціального програмного забезпечення.

Це завдання тривале і складне, але є спроби його автоматизувати. Автоматизація є аспектом, що активно вивчається, оскільки вона допоможе швидше та дешевше проводити дослідження у сфері вивчення й створення моделей культурної спадщини. Крім того, архітектору-реставратору, якому доручено оцифрувати об’єкт архітектурної спадщини та надати проєкт його реставрації, було б складно, якби йому довелося самостійно вручну обробляти хмари точок.

Наприклад, Garagnani розробив плагін під назвою GreenSpider, який допомагає автоматизувати імпорт хмар точок [118]. GreenSpider імпортує деякі вибрані точки хмари точок і перетворює їх на знімки (тобто опорні точки), що дає змогу відстежувати зв’язки та перетворювати їх у 3D-параметричні об’єкти. На практиці GreenSpider допомагає користувачеві вибрати потрібні точки хмари й перетворити їх на 3D-тіла (тобто невизначені тривимірні об’єкти). Ці 3D-тіла

можна імпортувати в будь-яку платформу 3D-моделювання – після вбудовування семантичної інформації, такої як матеріали, розміри тощо, а потім вставити в модель BIM як бібліотечні об’єкти («сімейства»), тобто категорії подібних об’єктів.

Крім того, можна забезпечити збагачення метаданих, зберігаючи об’єкти GreenSpider як Industry Foundation Classes (IFC) [119]. GreenSpider є наочним прикладом автоматизації, оскільки він був розроблений для роботи безпосередньо на BIM-платформі як плагін. Було зроблено й інші спроби автоматизації постобробки даних лазерного сканування [120; 121].

Під час перетворення між хмарою точок і геометричною моделлю можна прийняти кілька рішень для досягнення різних ступенів деталізації. Дослідження з BIM посилається на рівень деталізації або рівень опрацювання – Level of Development (LOD) [122] і рівень інформаційного насичення – Level of Information (LOI) [123]. LOD належить до графічних елементів моделі, якщо є опис завдання в Employer’s Information Requirement (EIR)[124], тоді як LOI стосується не графічної інформації [125], зокрема, раніше, за BSI PAS 1192:2-2013 [126] LOD визначався як рівень деталізації, що має як мінімум являти розподіл простору для доступу до продукту для обслуговування, встановлення та заміни на додаток до робочого простору. Наприклад, простір, необхідний для вмикання або вимикання клапанів. EU BIM Task Group визначає рівні зрілості BIM, де геометрія пов’язана з її здатністю зберігати інформацію [127]. Було визначено чотири рівні:

- рівень 0: некерована САПР, 2D з папером як засобом обміну даними;
- рівень 1: керована САПР у форматі 2D або 3D з інструментом для спільної роботи, що забезпечує спільне середовище даних, деякі стандартні структури даних і формати;
- рівень 2: кероване 3D-середовище, що зберігається в окремих BIM-інструментах [128] із доданими даними, підхід може використовувати дані графіку робіт 4D й елементи витрат 5D;

- рівень 3: повністю відкритий процес та інтеграція даних, що керуються сервером спільної моделі. Його можна розглядати як iBIM [129] або інтегрований BIM(M), який потенційно використовує паралельні інженерні процеси.

Відносно об’єктів архітектурної спадщини ці рівні були інтерпретовані так [130]:

- рівень 0: стосується сценарію, коли інформацію про обстеження вручну отримують на місці за допомогою вимірювальних стрічок і нівелірів, створюють за допомогою пакета САПР у неструктурованому форматі, а потім передають за допомогою паперових креслень;
- рівень 1: це сценарій, коли дані об’єкта отримують у цифровому вигляді за допомогою EDM (тахеометра), а потім передають у середовище 2D або 3D CAD, яке використовує стандартизовані структури даних;
- рівень 2: це сценарій, коли дані отримують у цифровому форматі у 3D-форматі за допомогою, наприклад, лазерного сканера, які потім передаються у спеціалізоване, стандартизоване, параметричне середовище 3D-моделювання, але передається і співпрацює з іншими дисциплінами за допомогою галузевих стандартних інструментів інтерфейсу (наприклад, IFC);
- рівень 3: не розглядається для будівель - об’єктів архітектурної спадщини. Крім того, хоча галузеві визначення цих рівнів містять неструктуровану інформацію, наприклад, таку, як вартість, їхні еквіваленти для об’єктів культурної спадщини зосереджуються виключно на геометрії будівлі.



Рис. 1.3 Рівні зрілості BIM в інтерпретації для HBIM

Тенденції в BIM для об’єктів культурної спадщини полягають у створенні HBIM-моделі, яка має рівень зрілості 2, за якого геометричні дані були отримані за допомогою автоматичних процедур, таких як сеанси лазерного сканування, а BIM-модель створена за допомогою параметричних об’єктів. Але процес переходу до рівня 3 стосується досліджень об’єкта архітектурної спадщини як з погляду будівельних матеріалів, так і часових параметрів експлуатації – життєвого циклу (Life Cycle) [131].

Нині значною проблемою у сфері збереження архітектурної спадщини стали збройні конфлікти (зокрема, в Україні). Їх наслідки, за параметрами впливу на об’єкти культурної спадщини, прирівнюють до наслідків катастроф. Технології BIM також знайшли активне застосування у боротьбі з цими наслідками, але вимагають попереднього застосування до об’єкта архітектурної спадщини, для її моделювання та каталогізації всіх матеріалів – створення цифрового репозиторію об’єктів архітектурної спадщини.

Катастрофи можна визначити як «дії, які спричиняють загрозу життю, добробуту, матеріальним благам і довкіллю через екстремальні природні процеси або технології» [132]. Природні й антропогенні катастрофи впливають на антропогенне середовище. Масштабні збитки, заподіяні інфраструктурі й будинкам, супроводжуються травмами та смертельними наслідками, розвитком або стагнацією місцевої економіки, а також втратою джерел засобів до існування [133]. Відновлення після стихійних лих (PDR) є дуже актуальним у сучасному світі, оскільки частота катастроф різного характеру досить висока, а наслідки – істотні та трагічні. Окрім стихійних лих (землетрусів, цунамі тощо), катастрофи спричиняються й антропогенними факторами, такими, як конфлікти та війни, що додатково підвищує значення PDR [134]. Дослідження в цій сфері ініціюються з метою запобігання можливим наслідкам або хоча б зменшення їх для урбанізованого середовища, але такі проєкти є досить складними для реалізації з погляду необхідної потужності та ресурсів [135]. Також PDR класифікується як непередбачуваний, хаотичний, складний і динамічний процес, що спричиняє додаткові труднощі у застосуванні BIM порівняно з традиційним будівництвом.

Основною проблемою у реалізації цих проєктів є брак відповідного механізму координації та системи моніторингу [136]. Успішна реалізація проєктів PDR важлива для відновлення основних послуг і повернення до нормального життя після катастроф.

Залучення BIM до боротьби зі стихійними лихами вже стало очевидним фактом. Причому це стосується всіх етапів – періоду до стихійного лиха, під час нього та після нього. Наприклад, Н. Наварі та С. Равіндран [137] провели дослідження щодо визначення переваг BIM у реагуванні на катастрофи. Було розглянуто різні сценарії, у яких BIM використовувався на кількох етапах, зокрема під час запобігання, підготовки, реакції та відновлення. Розглянуті приклади наочно продемонстрували, що запровадження цих технологій може допомогти підготуватися до катастрофи. Для цього рекомендується використовувати інструменти доповненої реальності, що дають змогу змоделювати сценарії катастроф і обрати найкращий метод реагування. Керівники об’єктів отримують можливість відстежувати важливі параметри будівлі (технічний стан конструкцій та інженерних мереж, якість повітря всередині будівлі тощо) для проведення технічного обслуговування та запобігання виходу будівлі з ладу у разі надзвичайної події. Крім того, BIM дає змогу створювати тривимірні моделі, за допомогою яких простіше зрозуміти ширшу картину наслідків стихійного лиха та прискорити оцінку збитків, завданих будівлі, а також швидко визначити характер та обсяг аварійних робіт і порятунку людей.

Міста, райони та країни, що постраждали від військових руйнувань, зараз заведено називати «конфліктними» та «постконфліктними» (термінологія ООН). Для повоєнного відновлення України значний інтерес становлять просторові аспекти відновлення міст: перепланування міст або їх збереження з розширенням каркасних ліній (магістральних вулиць, проспектів) та вузлів, розущільнення історичних центрів, зв’язок із гідрографічними осями, плани відновлення міст разом із передмістями. Збереження історичного центру та його забудови – це збереження стійкості ядра планувальної структури міста. Відновлення

зруйнованої історичної забудови – це повернення втраченого вигляду старого міста та його туристичного образу.

1.4. Аналіз вітчизняного та закордонного досвіду проєктів реставрації об’єктів архітектурної спадщини

В Україні облік та всі дії з пам’ятками (проєктування робіт, їх виконання тощо) визначаються на законодавчому рівні з відповідною нормативною документацією. Закон України «Про охорону культурної спадщини», як зазначено в його загальних положеннях: «регулює правові, організаційні, соціальні та економічні відносини у сфері охорони культурної спадщини з метою її збереження, використання об’єктів культурної спадщини у суспільному житті, захисту традиційного характеру середовища в інтересах нинішнього і майбутніх поколінь.

Об’єкти культурної спадщини, які знаходяться на території України, у межах її територіального моря та прилеглої зони, охороняються державою.

Охорона об’єктів культурної спадщини є одним із пріоритетних завдань органів державної влади та органів місцевого самоврядування» [13].

Також цим Законом регламентуються поняття виявлення об’єкта культурної спадщини, його дослідження, зміна, консервація, музеєфікація, пристосування, реабілітація, ремонт і реставрація.

В рамках виконання Закону про охорону культурної спадщини, прийнято «Порядок обліку об’єктів культурної спадщини» [138], яким регламентується ведення «Державного реєстру нерухомих пам’яток України» – банк даних, сформований за єдиними ознаками та принципами, що містить відомості про пам’ятки культурної спадщини, в тому числі об’єкти архітектурної спадщини.

Також законодавчо визначене поняття «облік нерухомих об’єктів культурної спадщини» – комплекс заходів, спрямованих на виявлення, наукове вивчення, класифікацію, державну реєстрацію нерухомих об’єктів культурної спадщини.

Складання облікової документації на об’єкт культурної спадщини передбачає виконання робіт з його комплексного дослідження, фіксації, визначення антропологічної, археологічної, естетичної, етнографічної, історичної, мистецької, наукової чи художньої цінності, а також встановлення предмета охорони.

Облікова документація на кожен об’єкт культурної спадщини включає:

- паспорт об’єкта культурної спадщини;
- облікову картку об’єкта культурної спадщини;
- акт технічного стану об’єкта культурної спадщини.

Виготовлена та підписана в установленому порядку облікова документація є підставою для подання клопотання про занесення об’єкта культурної спадщини до Державного реєстру нерухомих пам’яток України [139].

Планування або проєктування будь-яких подальших дій з пам’ятками культурної спадщини нормуються ДБН А.2.2-14:2016 «Склад та зміст науково-проєктної документації на реставрацію, консервацію та ремонт пам’яток культурної спадщини» [140] та ремонтно-реставраційні роботи на об’єктах культурної спадщини, які віднесено до пам’яток архітектури та містобудування, визначаються Державним стандартом України ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 «Настанова щодо виконання ремонтно-Реставраційних робіт на пам’ятках архітектури та містобудування» [141]. Цей стандарт встановлює загальні вимоги до технології виконання робіт із консервації, реставрації, реабілітації, музеєфікації, реставраційного ремонту та пристосування пам’яток, у тому числі й широкого розвитку комп’ютерних технологій, що дає все більше нових можливостей для збереження у цифровому вигляді об’єктів історико-культурної спадщини. З впровадженням інформаційних технологій у всі сфери проєктної діяльності та появою перших систем автоматизованого проєктування (CAD) у 60-х роках відбувся перехід від зберігання та документування інформації про архітектурні споруди у вигляді фотографій та окремих креслень (які являють собою проєкції будівлі й не завжди відповідають одна одній) до нових методів проєктування.

Виникнення на початку 80-х технологій комп'ютерного моделювання – моделювання на основі просторової моделі (випуск у 1982 році першої версії AutoCAD, розробленої компанією Autodesk) – також є результатом процесу еволюції систем автоматизованого проєктування. З появою нової технології перед архітекторами, археологами, реставраторами й істориками-реконструкторами відкрилися нові перспективи. Активне застосування 3D-технологій візуалізації в історичних та археологічних дослідженнях розпочалося у 1990-х роках у провідних закладах вищої освіти (ЗВО) в США, Великої Британії, Франції, Італії, Іспанії та інших європейських країнах [142-144].

Попри те, що значна кількість об'єктів є специфічною для конкретного проєкту, вони можуть отримати переваги від параметризації, коли невеликі зміни параметрів роблять об'єкт придатним для використання в іншому подібному проєкті. На сьогодні більшість бібліотек історичного моделювання створюється «ad hoc», тобто на основі конкретного проєкту.

Сучасні наукові ініціативи засновані на тематичних дослідженнях (моделюванні історичних структур) із використанням різних апаратних і програмних систем дистанційного зондування та програмних платформ BIM. Крім того, розглядається проблема побудови параметричних архітектурних бібліотек: переважно як це подати графічно, на відміну від кодування параметричних об'єктів. HBIM розвинувся в DIT (Dublin Institute of Technology), де об'єкти бібліотеки побудовані з використанням мови геометричного опису (GDL). На додаток до GDL зараз перевіряється мова генеративного моделювання (GML) для можливості використання як автономних, так і міжплатформених бібліотек. Останні роботи з автоматизації націлені на покращення поточного повільного процесу перетворення неструктурованих хмар точок у структуровані семантичні BIM-компоненти. Результатами цього дослідження було створення інтелектуальних комп'ютерних моделей, які використовуються для консерваційного аналізу та прийняття рішень щодо збереження історичних споруд і їхнього середовища. Практичним прикладом застосування такого підходу є роботи на класичній будівлі кінця XIX століття в Ірландії, що була

частково зруйнована під час громадянської війни 1922 р. на початку становлення Республіки. Наслідки руйнувань будівлі становлять загрозу структурній стабільності її частин. Задача дослідження полягає в тому, щоб використати HBIM для практичної ілюстрації поточного масштабу пошкодження/руйнування та як основу для запропонованих консерваційних заходів [90].

Так вченими дослідницької групи HUM799 Факультету архітектурно-графічних представлень Севільського університету в Іспанії була здійснена дослідницька робота із застосуванням інструментальних технологій BIM для створення інформаційної моделі собору La Virgen de la Antigua в Севільї з метою експерименту з цими інструментами та знайти шляхи, що сприяють створенню взаємозв'язків між різноманітними даними щодо цієї будівлі – морфологічними, конструктивними, історичними, культурними тощо, зібраними та зареєстрованими в інформаційній моделі. Для дослідження була створена експериментальна модель для її майбутнього використання у різних аспектах – від управління об'єктом архітектурної спадщини та його збереження до втручання в нього, його дослідження та експлуатації [145].

Співробітники факультету архітектури, містобудування та планування Левенського католицького університету (KU Leuven) у Бельгії Стефан Бойкенс, Керолайн Хімпе та Боб Мартенс разом з дослідниками Віденського технічного університету (TU Vienna) виконали віртуальну реставрацію Виноградної синагоги (Vinohrady synagogue) у Празі із застосуванням технології BIM (рис.1.4), де ключовим принципом процесу реставрації є коректне документування інформації [89; 90].

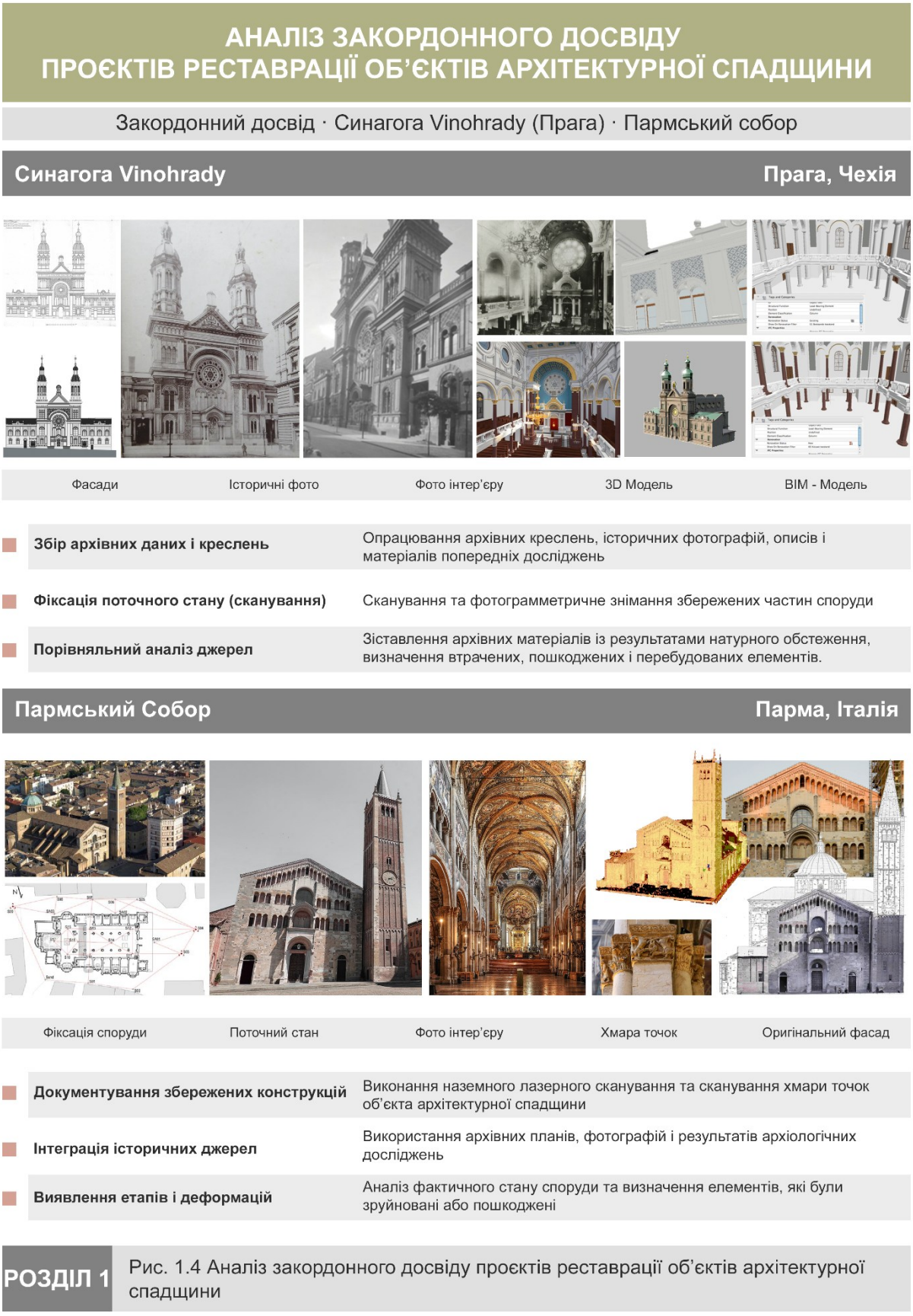


Рис. 1.4 Аналіз закордонного досвіду проєктів реставрації об'єктів архітектурної спадщини

Якщо дотримуватися цієї методології, процес реставрації залишається доступним для стороннього аналізу та, за необхідності, інтерпретації в майбутньому.

Ще одним прикладом є Пармський собор, що датується другою половиною XI ст. Будівля розташована в історичному центрі Парми, її головний фасад виходить на площу Пьяцца Дуомо, з південного сходу – площа Сан-Джованні, з інших сторін територія обмежена вузькими вулицями. Будівельна історія об'єкта досить складна, що можна простежити за різночасовими результатами втручань у будівлю.

План будівлі, що збереглася до нашого часу, нагадує латинський хрест. Базиліка має три нефи, перекриті хрестовими склепіннями, та галерею з бочковими склепіннями. Споруда оформлена двома бічними каплицями, зведеними у XVI ст. До нави підіймаються трансепт і хор. Трансепт перекритий п'ятьма баневими секціями. Над перехрестям розташований купол на восьмигранному барабані. Під трансептом і хорами розташована крипта.

При будівництві собору були використані такі будівельні та оздоблювальні матеріали: загальний масив зведений з цегли, на зовнішніх стінах у деяких місцях збереглися залишки тинькування, стовпи та кути викладені з каменю (пісковика та вапняку), декоративні елементи виготовлені з теракоти та мармуру (рис. 1.4).

Було визначено, що різного роду ремонтні роботи у соборі ведуться з XVI ст. Найбільш значною проблемою на сьогодні є втрата стійкості конструктивних елементів і руйнація матеріалів. Руйнування конструктивної основи спричинено значною вагою куполу та високими опорами склепінь центральної нави. Це спричиняє просідання фундаментів та відхилення бічних стін, які сприймають розпір. Крім того, зовнішні стіни руйнуються унаслідок розшарування матеріалів (вапняку та пісковику), які стають крихкими під дією атмосферних факторів.

Розв'язання цих проблем можливе шляхом проведення протиаварійних реставраційних і технічних робіт на об'єкті архітектурної спадщини. Сам об'єкт

є досить складним за своїми об’ємно-просторовими характеристиками, тому було прийнято рішення щодо впровадження HBIM у робочий процес.

За результатами дослідження передбачалося отримати загальну 3D-модель собору, на основі якої планувалося запровадити HBIM і формувати базу для подальших детальніших обстежень. Ця кінцева модель є повністю керованою, що дає змогу використовувати її в середовищі BIM, а також ретельно деталізованою для повноцінного відображення всіх архітектурних елементів споруди.

Для цього дослідження важливим було документування деградації матеріалів, що закладено в моделі HBIM. Воно було виконано на основі ортофотознімків зовнішніх фасадів з прив’язкою їх до 3D-моделі. Робочі масштаби: 1:20, 1:50, 1:100. Необхідними умовами були: багаторазова роздільна здатність, масштабованість, інтегровані методи дослідження. Все це допомогло скласти карти поверхонь об’єкта архітектурної спадщини, що є основою для подальших робіт (дослідницьких, реставраційних, консерваційних тощо).

Однією з проблем під час застосування BIM є встановлення зв’язків між двомірними зображеннями та інформативними даними. Chiabrando та ін. запропонували розв’язувати це питання за допомогою створення 3D-мапінгу безпосередньо на фасаді будівлі за допомогою спеціальних адаптивних компонентів [92] (рис. 1.4).

Bruno та Roncella запропонували свою методологію, що ґрунтується на створенні ортофотопланів і здатна автоматично формувати відповідне картографування на 3D-моделі [91].

Для цього до Revit був розроблений плагін, що забезпечив:

- прив’язку елементів до ортофотоплана, їх відображення у вікні Revit;
- застосування цих елементів в якості основного інструменту для створення двовимірних зображень;
- автоматичне 3D-моделювання відповідних елементів, починаючи з 2D-полігонів.

Такий інструмент розрахований безпосередньо на ведення реставраційної документації, у якій застосовують двовимірні зображення площин стін із зазначенням матеріалів, їх деградації або втручань, які потрібно виконати чи які вже виконані. Новий метод було опрацьовано з додаванням асиміляції з GIS.

Окрема увага була приділена моделюванню метаданих. Автори наголошують, що процедура перевірки якості та точності BIM-моделі ще не остаточно визначена. Для документування процесу моделювання потрібні такі дані:

- детальний покроковий опис процесу побудови моделі;
- дані про відповідність моделі даним обстеження (рівень точності LOA);
- дані (геометричні, структурні та матеріальні) об’єкта (рівень знань LOK).

Визначення рівнів точності надано Інститутом будівельної документації США (USIBD) та описано в (USIBD 2016), а авторами прийнято 5 рівнів: LOA10, LOA20, LOA30, LOA40, LOA50.

Для рівня деталізації немає конкретного еталонного стандарту. Тому було запропоновано використовувати рівень деталізації, що наведений у «Технічних стандартах для будівництва» (Італійський стандарт NTC 2009). У них визначено чотири рівні деталізації: LOK0 - передбачуваний, LOK1 - обмежений, LOK2 - відповідний, LOK3 - точний. Різниця між ними полягає у параметрах відображення геометрії, матеріалів і структур.

Для бази даних була розроблена структура, яка враховує техніку моделювання, авторство моделі, дату створення тощо; визначені параметри відповідності моделі досліджуваним даним: LOA та LOK. Інформація вводиться за допомогою спеціального інтерфейсу. Вона автоматично зв’язується з кожним окремим змодельованим об’єктом. Загальна якість моделі може відрізнятися, змінюватися залежно від локальної якості деталізації окремих елементів [92].

Дослідження мало формат експерименту. Його результати також підтверджують доцільність застосування HBIM для роботи з об’єктами архітектурної спадщини, хоча зазначено, що це потребує значних фінансових

вкладень та часу на навчання й обробку матеріалів. Проте перевагою є можливість забезпечити ефективне управління спадщиною.

Більш детального опрацювання, також потребують такі питання:

- нові можливості отримання точних даних, забезпечення їх верифікації;
- оптимізація процесу обробки матеріалів і подальшого створення моделі на їх основі;
- вирішення сумісності різних елементів системи й адаптація їх до актуальних потреб користувачів.

Чжан Гуаньін під час створення інформаційної моделі альтанки в Монастирі Хуайшенси в Китаї сформував параметричну бібліотеку базових елементів системи доу-гун, яку потім застосували під час розробки інформаційної моделі храму Шенмудянь [146].

Надзвичайно корисним для дослідження є досвід аналізу наслідків руйнувань інфраструктури м. Мосул (Ірак). Місто Мосул було взято під контроль ІДІЛ у червні 2014 р. Воно фактично стало полем бою, що призвело до значних пошкоджень міської інфраструктури (житлового сектору, дорожньої мережі, водо- та електропостачання тощо). Згідно з урядовими звітами, було втрачено близько 60–70% інфраструктури міста. Це обумовило необхідність розробки сучасних рішень для постконфліктної реконструкції, які передбачають практичний та функціональний підхід в управлінні всіма процесами. Дослідниками для опрацювання була обрана технологія BIM, що дозволила відобразити повну картину життєвого циклу відновлюваної міської системи [147].

Були запропоновані послідовні етапи:

1. Застосування 3D BIM – розробка 3D BIM-моделі житла з урахуванням особливостей і характеристик запропонованого прототипу. Для цього застосували інструменти Autodesk Revit. Вона стала базовою для опрацювання подальших кроків.
2. Застосування 4D BIM – планування часових рамок розробки проєктної документації на основі Autodesk Navisworks.

3. Застосування 5D BIM – оцінка вартості будівництва в реальному часі з залученням CostX.
4. Застосування 6D BIM – перевірка закладеної у проєкт експлуатаційної поведінки з використанням конкретних географічних налаштувань м. Мосул та будівельні характеристики моделі житла. Було використано інструменти Autodesk Revit і Green Building Studio.
5. Застосування 7D BIM для контролю фази деконструкції запропонованого прототипу житла на основі Autodesk Revit.

Зайд О. Саїд, Авар Альмухтар, Генрі Абанда і Йосеф Тах наочно продемонстрували доцільність використання BIM під час реконструкції міської інфраструктури внаслідок воєнних дій на прикладі житлового сектору в м. Мосулі. Основними позитивними моментами є зменшення ризиків, пов’язаних із неправильним плануванням, підвищення надійності та функціональності запропонованих рішень у складних умовах за високого ступеня руйнувань [147].

Масштаби втрат у Сирії під час активних бойових дій (2011–2017) оцінюються як катастрофічні – від мінімального (5–30% забудови) до високого рівня (до 75%) і дуже високого, коли на місці будинків залишилися лише руїни. Серед різних пропозицій на увагу заслуговує методика, запропонована дослідниками Хусейном Алтахом і Салахом Хаджісмайлом для оцінки просторових втрат у зруйнованих містах [148], у якій оцінювався ступінь руйнування просторових елементів кожного міста: центру, секторів (районів) та передмість.

Для Сирії була запропонована наступна стратегія застосування BIM:

1. Визначення меж території, що має ознаки історичного місця (використання GIS-інструменту для збору всієї інформації про історичне місто, при якому не потрібно повне 3D-моделювання, розробити інтерактивну карту, створити будівельну карту архітектурної спадщини).
2. Містобудівне зонування території з урахуванням функціонального призначення та адміністративного поділу.

3. Створення 3D-моделей для важливих історичних будівель на основі доступних інструментів (фотограмметрії, лазерного сканування) для використання в консерваційних роботах у майбутньому.
4. Визначення ступеня руйнувань будівель, споруд та об’єктів культурної спадщини (ОКС), спричинених у ході військових дій.
5. Оцінка рівня руйнування територій.
6. Визначення територій, що можуть бути віднесені до ОКС як визначного місця з урахуванням отриманих ушкоджень.

Результати опрацювання всіх етапів відображаються в моделі BIM, що також зумовлює формування структури бази даних для опису кожного об’єкта. Методика, запропонована для дослідження об’єктів культурної спадщини Сирії, може бути використана для визначення напрямів реконструкції територій історичних центрів міст, які зазнали руйнувань унаслідок воєнних дій. При оцінці пошкоджень на першому етапі обстеження може бути використано метод якісної оцінки ступеня ушкодження з градацією: слабке, середнє, сильне, повне, що дозволить визначити напрямки реконструкції під час регенерації території [148].(рис. 1.5)

Відомий на весь світ об’єкт архітектурної спадщини, собор Паризької Богоматері, був серйозно пошкоджений внаслідок пожежі 15 квітня 2019 р. Руйнування зазнала більша частина даху собору, шпиль обвалився, були пошкоджені верхні частини стін. У грудні цього ж року була створена організація, що опікується роботою з консервації та реставрації собору. Було заявлено про офіційне шефство Autodesk над проєктом реставрації. Autodesk надав технологічні рішення для проєктування та будівництва:

- підтримку будівельного інформаційного моделювання (BIM);
- інтелектуальний процес тривимірного моделювання даних і геометрії;
- технічну експертизу.

Такий підхід забезпечив стійкість об’єкта до майбутніх подій та в процесі реставраційних втручань. Всі учасники проєкту отримали доступ до Спільного Середовища Даних (ССД). Крім того, було прийнято концептуальне рішення

щодо побудови BIM-моделі собору до пожежі та після неї для визначення наслідків і формування стратегії відновлення.

Над створенням цифрової екосистеми для собору працювали співробітники Французького національного центру наукових досліджень (CNRS). Було вивчено можливості застосування BIM, зокрема у проєктуванні та управлінні історичними об'єктами. Цифровий двійник забезпечує супровід наукового дослідження, реставрації, подальшої відбудови та експлуатації шляхом поступової інтеграції інформації та знань від різних сторін.

Компанія Autodesk вже брала участь в оцифруванні та реставрації об'єктів архітектурної спадщини (Ейфелева вежа, Париж, Франція; археологічні пам'ятки, Вольтерра, Італія; Театро Ліріко, Мілан, Італія). Тому технічна підтримка у відновленні собору Паризької Богоматері була цілком логічним кроком.

Значну роль у побудові моделі собору відіграло лазерне сканування, здійснене мистецтвознавцем з Бельгії Ендрю Таллоном у 2010 р. Воно було проведено лазерним сканером Leica ScanStation C10 за участю Пола Блера з Колумбійського університету [149]. Дослідників цікавили природа готичної структури та виявлення будь-яких аномалій у конструктивній системі будівлі. Це стало найбільш точним варіантом обмірів собору та фіксації його стану до пожежі. Дані збереглися у вигляді кількох хмар точок. Файл хмари точок – це лише цифрова версія будівлі-близнюка, але з нею не пов'язана жодна спеціальна інформація, за винятком розмірів, кольорів тощо. Таллон також зробив панорамні фотографії високої роздільної здатності для відображення тривимірних форм, які не міг відтворити лазерний сканер.

EPA й Autodesk співпрацювали при створенні BIM-моделі в Revit, приділяючи особливу увагу структурним елементам будівлі, таким, як кам'яна кладка. Вони створили моделі склепіння, навісу і шпиля собору Нотр-Дам і садів за ним. Модель столярних виробів зробити не вдалося, оскільки були відсутні докладні креслення покрівлі, а також не було проведено лазерного сканування внутрішніх поверхонь конструкцій даху та вежі. Через значне забруднення

свинцем доступ до об’єкта потребував контролю, а працівники на об’єкті мали дотримуватися заходів безпеки, які також моніторилися за BIM-моделлю.

BIM-модель об’єкта після пожежі також була побудована в Revit на основі дослідження, проведеного з використанням 12 лазерних сканерів, за допомогою яких було виконано 46 000 сканувань. У результаті було з’ясовано, що будівля має 30028 м² кам’яних стін і 3925 м² свинцевого даху. Модель містить 186 об’ємів, кожен з яких відрізняється від інших, що виявилося найтрудомісткішим етапом у створенні моделі на базі результатів лазерного сканування. Для початку Autodesk залучила компанію AGP, яка спеціалізується на фіксації реальності та цифрових реставраціях для створення досить детальної 3D-цифрової моделі собору в тому вигляді, як він існував до надзвичайної події. Проєкт поєднав програмне забезпечення Autodesk і дані AGP із попередніми скануваннями Нотр-Даму. AGP використала свою попередню роботу з новим лазерним скануванням, фотограмметрією та записами, зробленими БПЛА після пожежі для того, щоб зафіксувати повний вид собору. Компанії AGP та Autodesk спільно провели повторне сканування, щоб визначити зміни, що зазнали внаслідок пожежі. Персонал на місці за допомогою лазерного та фотографічного обладнання зафіксував 3D-геометрію хмари точок собору. Згодом інші фахівці перетворили ці дані на детальні форми та об’єкти, аж до окремих будівельних каменів. Це дозволило експертам оцінити, як змістилася конструкція під час пожежі, що є важливим для прогнозування потенційних проблем із структурною цілісністю та планування процесу реставрації [150]. Через складність, структурні деталі та величезний розмір Нотр-Даму компаніям Autodesk і AGP знадобилося понад рік для створення повномасштабної моделі. Це визначний приклад історичного моделювання за технологією BIM.

Цифрова модель, на створення якої пішло понад рік, охоплює понад 12000 об’єктів, понад 30000 м² кам’яної стіни, понад 3900 м² свинцевого даху та 186 склепінь собору (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Аналіз закордонного досвіду проєктів реставрації об'єктів архітектурної спадщини

Було використано два різні набори даних; їх поєднання дало змогу визначити всі характеристики пошкоджень конструкції. Після завершення всіх відновлювальних робіт і відкриття собору планується використовувати BIM-моделі для керування об’єктом у майбутньому, потенційно застосовуючи датчики, які могли б точно визначати місцезнаходження потенційних пожеж. Отже, використання BIM у проєкті реставрації собору Нотр-Дам наочно продемонструвало його ключові переваги:

- збереження історичного значення - BIM підтвердив, що зусилля з відновлення були спрямовані на збереження історичного й архітектурного значення собору;
- покращена система співпраці - цифрова модель сприяла безперебійній роботі на об’єкті, зменшуючи непорозуміння та помилки в розробці та реалізації проєктних рішень;
- ефективність - точне цифрове планування оптимізувало весь процес реставрації, заощаджуючи час і ресурси;
- спадщина для майбутнього - реставрація собору за допомогою BIM створила прецедент для майбутніх проєктів і продемонструвала потенціал BIM-технологій у збереженні історичних будівель.

Окремо слід зупинитися на дослідженні Khalid A. Hussein та Emad Hani Ismaeel [153], яке спрямоване на детальне опрацювання інструментарію HBIM, можливості його інтеграції з іншими технологіями. Вони звертаються до створення різних типів цифрової реальності (віртуальної, доповненої, штучної), що використовуються для відображення об’єктів архітектурної спадщини, допомагають краще осягнути об’єкти при неможливості подивитись на них «наживо». Також пропонується інтеграція з штучними інтелектуальними методиками (ШІ, AI), геоінформаційними системами (ГІС, GIS) тощо.

Khalid A. Hussein та Emad Hani Ismaeel визначили пріоритети застосування HBIM для роботи з об’єктами архітектурної спадщини й окреслили основні тенденції та напрями подальшого розвитку, а саме:

- створення моделей об’єктів архітектурної спадщини з паралельним документуванням;
- розширення комунікативних функцій HBIM як платформи, що використовується спеціалістами й експертами у галузі охорони та збереження архітектурної спадщини;
- використання HBIM як інструменту управління та контролю при роботі з об’єктами архітектурної спадщини;
- використання HBIM у дослідженнях технічного стану об’єктів архітектурної спадщини і розробці технологічних питань відновлення, збереження та пристосування об’єктів давньої архітектури;
- використання HBIM у реставрації елементів культурної спадщини.

Робота Аммара Дахіла і Мустафи Альшаві [154] присвячена ретельному вивченню додатків BIM, які підтримують управління аварійними ситуаціями в будівлях (моделювання аварійних ситуацій, планування території, моделювання наявних умов тощо). У процесі таких досліджень були визначені переваги застосування BIM протягом життєвого циклу проєкту.

Згідно з дослідженням J.-E. Kim та C.-H. Hong [155]: BIM-інформація є дуже корисним інструментом для реагування на наслідки стихійних лих. Автори запропонували «інформаційну систему інтеграції катастроф на основі BIM». Її впровадження сприяло роботі відповідних служб з надання екстреної допомоги – передбачено можливість швидкого пошуку місця, де виникла проблема, ушкодження, аварійна ситуація. Wang та ін. [156] створили віртуальне середовище на основі BIM для того, щоб люди могли управляти будинками під час катастроф. Boguslawski та ін. [157] запропонували алгоритм для розрахунку маршрутів евакуації. Для цих розробок була залучена інтеграція BIM з геоінформаційною системою (GIS), що дала змогу визначати та накреслити найшвидший і найбезпечніший маршрут, постійно проводити моніторинг ситуації та за необхідності вносити зміни. Адаптація цих розробок до умов України, зважаючи на руйнування житлових і громадських будівель під час

ракетних атак, буде дуже доречною під час планування управління будівлею на основі BIM.

Завдяки BIM було визначено внесок у формування стійкості архітектурних об’єктів до наслідків катастроф на усіх стадіях (до, впродовж та після), зокрема, вплив на ефективність рятувальних операцій, діяльність з відновлення будівель, споруд та відповідної інфраструктури. Академічні дослідники й особи, які приймають рішення, відіграють важливу роль у заохоченні та навчанні громадськості щодо значення BIM як інструменту для підвищення надійності вбудованих середовищ протягом усього процесу управління наслідками катастроф [158].

S. Kermanshachi та B. Rouhanizadeh [159] присвятили свою працю розробці методології автоматичної оцінки вартості відновлення та реставрації пошкоджених об’єктів на основі BIM. Це ще одна позитивна практика, що допомагає на основі моделі проводити оптимальну оцінку вартості всіх робіт і складати бюджет. Запропонований інструмент має певні обмеження: з його допомогою можна оцінити вартість лише відновлення пошкоджених ділянок/елементів/конструкцій об’єкта.

Рекомендації щодо використання BIM для відновлення історичних будівель надані, зокрема, Biagini та ін. [160]. Вони наголошують, що підтримка належного стану історичних будівель, проведення ремонтно-реставраційних робіт на об’єктах архітектурної спадщини залежать від організації управління всіма процесами безпосередньо на місці. Традиційні методи передбачають створення технологічних карт на всі роботи у форматі 2D, які не можуть фізично надати всю необхідну інформацію та всі дані у системному вигляді. BIM розв’язує ці питання, створюючи 3D-модель об’єкта архітектурної спадщини з необхідною системою даних. Як приклад – наведені роботи на об’єкті «Basilica di Collemaggio», що був серйозно пошкоджений внаслідок землетрусу. Було прийнято рішення застосувати BIM для таких цілей:

- симуляція сценаріїв руйнувань для прийняття рішень щодо втраченого купола;

- проведення структурного аналізу будівлі;
- організація управління будівельним майданчиком [161].

Робота Rad та ін. мала на меті продемонструвати можливості застосування BIM у поєднанні з моніторингом життєвого циклу (LCC) об’єкта в галузі оцінки стійкості будівлі до руйнувань певного характеру. У цьому прикладі було проаналізовано наслідки землетрусу протягом усього циклу експлуатації будівлі. Розгляд стосувався стадії розробки концептуальних пропозицій. Представлений авторами підхід BIM-LCC стосується тільки однієї проблеми, що може виникнути у процесі експлуатації будівлі [162], але все одно він підтверджує актуальність та широкий потенціал використання технологій BIM для наявних об’єктів, особливо об’єктів архітектурної спадщини.

Досвід документування замку Валентино в Турині – одного з найдетальніше описаних у наукових дослідженнях прикладів застосування HBIM – ілюструє ефективне управління рівнями деталізації в проєктній практиці: поетапний перехід від LOD 200 до LOD 400 у тісній координації між дослідниками, реставраторами та адміністрацією, підкріплений докладним BIM Execution Plan із чіткими вимогами до кожного типу елементів на кожному етапі. Цей досвід має безпосереднє методологічне значення для аналогічних проєктів в Україні [163].

В Україні вже також існує певний досвід, який під час російської повномасштабної агресії набуває все більшого поширення. Це фактично єдина можливість збереження об’єктів архітектурної спадщини – створення цифрових копій, що дасть змогу, в разі необхідності, отримати повну інформацію про об’єкт.

З 2016 р. у Львові працює проєкт Skeiron. Його завдання – оцифрування музейних колекцій, архітектури, створення віртуальних турів. Широко відомим уже став їхній благодійний проєкт «Відчуй Україну на дотик» [164]. До нього увійшли 3D-моделі семи об’єктів зі Львова. Особливості цього проєкту полягають в тому, що моделі розраховані на людей з вадами зору. Також цікавими ініціативами є такі проєкти: мобільний додаток «Кишенькове місто»

[165] (вміщує 3D-моделі архітектурних об’єктів та об’єктів культурної спадщини) та «Музей у 3D» [166].

З березня 2022 р. команда активно почала сканувати архітектуру Львова, історичний центр якого включений до списку світової спадщини ЮНЕСКО – саме тому на його документуванні було зроблено акцент.

У рамках проєкту «Save Ukrainian Heritage» нині відсканована 39 історичних споруд на заході України та понад 200 об’єктів задокументовано за допомогою методів фотограмметрії [167].

Зараз команда Skeiron працює над документуванням Чернівецького університету – це дуже великі обсяги роботи: «…понад 20000 фотографій та понад три тисячі станцій сканування» [167]. Розмір цих файлів становить понад 2,5 терабайта. Безпосередньо сканування будівлі університету відбувалося протягом місяця, далі велася обробка отриманих матеріалів. Паралельно команда опрацьовує інші об’єкти, зокрема, Софію Київську. Також Skeiron виконали оцифровку вілли Юзефи Франц у Львові (рис.1.6)

Ще один проєкт стосується виключно Маріуполя, він має назву «Save Mariupol Heritage». Графічне відновлення ведеться на основі фотографій з використанням технологій фотограмметрії. Першим був Маріупольський драматичний театр – команда представила 3D-тур по ньому.

Суміжні проєкти Pixelated Realities, AERO 3D, My Future Heritage і ScanUA, а також використання лазерного сканування у судовій експертизі розширюють джерельну базу відновлення [168]. Критичне обмеження цих практик полягає в тому, що цифрова копія або хмара точок ще не є HBIM: без параметризації, фіксації достовірності та процедур оновлення вона залишається одноразовим геометричним архівом. Саме перехід від цифрової фіксації до керованої інформаційної моделі є предметом наступних розділів (рис. 1.6).

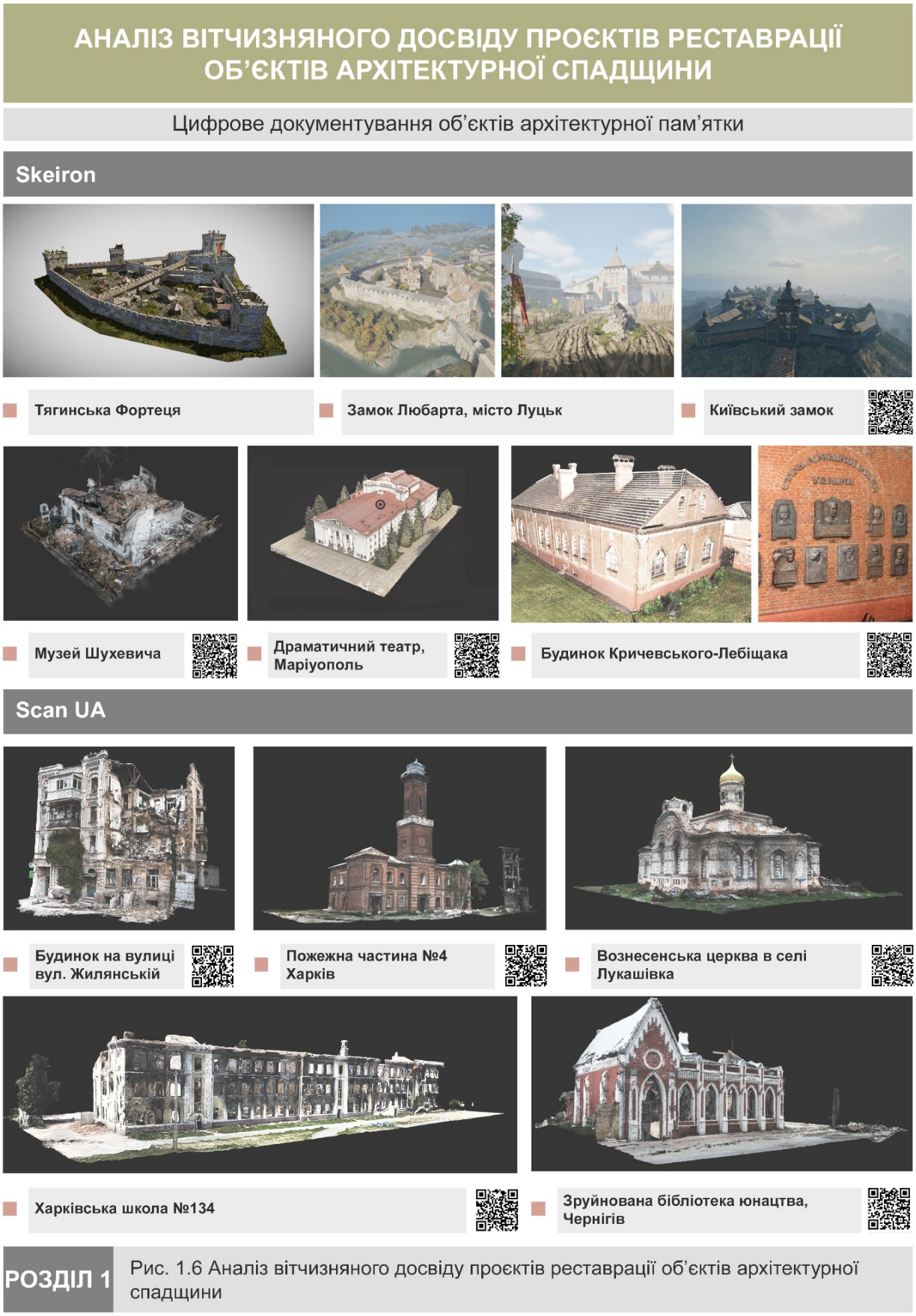


Рис. 1.6. Аналіз вітчизняного досвіду проєктів реставрації об'єктів архітектурної спадщини

Висновки до розділу 1

1. Технологія будівельного інформаційного моделювання (BIM) цілком відповідає сучасним потребам у проєктуванні, управлінні будівельними процесами й експлуатації різнопланових будівель, споруд, комплексів тощо, забезпечуючи цілісне та системне сприйняття всіх елементів і процесів, їхніх взаємозв'язків протягом усього життєвого циклу.

2. Засоби моделювання та програмний інструментарій, що створюються для реалізації BIM, відкривають нові можливості й у галузі вивчення архітектурної спадщини, причому ці напрацювання HBIM можна застосовувати як до наявних об'єктів архітектурної спадщини, так і до роботи з кадастровою інформацією, що не має безпосереднього стосунку до конкретних об'єктів, а скоріше належить до визначених історичних періодів, географічних районів чи стилів.

3. Класична практика архітектурної реставрації подає інформаційне моделювання нерухомих об'єктів культурної спадщини як 3D-моделювання, що намагається спрощено визначити HBIM як новий підхід до фіксації об'єктів архітектурної спадщини. Насправді HBIM дає набагато більше. Фактично інформаційна модель стає місцем і засобом не лише зберігання відомостей про об'єкт архітектурної спадщини, а й серйозним інструментом під час дослідницької роботи з цією інформацією, а також у навчально-просвітницькій та комунікаційній діяльності. Ця модель також тісно пов'язана з моніторингом стану об'єкта і його можливим використанням (експлуатацією). Отже, інформаційна модель об'єкта архітектурної спадщини, це не просто його віртуальна копія, яка передає геометрію споруди, а «інтелектуальний банк» із взаємозалежною інформацією про об'єкт, причому обсяг цього контейнера практично необмежений, а вміст може постійно поповнюватися.

4. Окремого уточнення потребує визначення кола об'єктів нерухомої культурної спадщини, до яких доцільно застосовувати обрані технології. Аналіз міжнародної та національної термінології свідчить про відсутність уніфікованого підходу до позначення архітектурної складової нерухомої

культурної спадщини. У міжнародному професійному дискурсі поряд із поняттям «architectural monument» переважно застосовується ширше поняття «architectural heritage», що охоплює окремі об’єкта архітектурної спадщини, групи будівель і визначні місця. Законодавство держав, що утворилися після розпаду СРСР, також демонструє різні підходи: в окремих країнах зберігається самостійна категорія архітектурної пам’ятки, тоді як в інших застосовуються ширші категорії об’єктів культурної або нерухомої культурної спадщини. В Україні відповідна класифікація визначається національним законодавством про охорону культурної спадщини. У зв’язку з цим застосування HBIM, на думку автора, доцільно пов’язувати не з формальним віднесенням об’єкта до конкретного виду пам’ятки, а з його належністю до нерухомої культурної спадщини та наявністю архітектурно-будівельної складової, що потребує документування, дослідження, збереження або відновлення.

5. Зазначимо новизну застосування HBIM для об’єктів культурної спадщини. Зокрема, HBIM це:

- новий спосіб фіксації об’єктів архітектурної спадщини - інформацію можна всебічно обробляти та перевіряти на відповідність і актуальність;
- нові можливості моніторингу й досліджень - модель дає змогу аналізувати об’єкт загалом або частинами;
- фактично «електронний паспорт» об’єкта - застосовується на всіх стадіях роботи з культурною спадщиною;
- можливість створення глобальної інформаційної системи об’єктів архітектурної спадщини, де класифікована інформація про цей об'єкт стає загальнодоступною для електронного пошуку й обліку.

6. Наразі BIM є сучасним і досить універсальним інструментом для управління процесами проєктування, реалізації та подальшого моніторингу будівель під час експлуатації, включно з утилізацією об’єкта після закінчення життєвого циклу або постійною адаптацією до змін технічних умов. Насамперед він був націлений на роботу з новим будівництвом, але результати використання продемонстрували досить широкі можливості закладених у нього технологій.

Тому BIM стали залучати до науково-проєктних робіт на історичних будівлях, відтворивши нову специфіку даних – HBIM. Загальна проблема використання цих технологій для об’єктів архітектурної спадщини полягає в необхідності адаптувати деякі окремі опції та параметри. HBIM виступає як зручний засіб комунікації між усіма учасниками процесу, але не має необхідних засобів для створення повноцінної бази даних для історичних об’єктів. Вони є унікальними, що зумовлює постійний збір значних обсягів інформації різного типу та складності, яка потребує специфічних процедур її опрацювання. Однак застосування HBIM на різних об’єктах архітектурної спадщини з метою їх обстеження та моніторингу, графічної реконструкції (візуалізації первісного вигляду або в різні етапи існування) та відновлення в натурі вже продемонструвало позитивний ефект. Недостатньо опрацьованим залишається питання застосування цих технологій у процесі подальшої експлуатації об’єкта архітектурної спадщини після його відновлення та пристосування до актуальної функції. Для нових будівель і комплексів у країнах Європи цей досвід уже є опрацьованим. Але об’єкти архітектурної спадщини здебільшого залишаються поза увагою, хоча питання постійного моніторингу стану будівлі є пріоритетним. Управління всіма процесами експлуатації - контроль температурно-вологісного режиму, графіки обстежень і поточних ремонтів, тощо - дасть змогу контролювати стан об’єкта архітектурної спадщини та запобігти новим руйнаціям і пошкодженням внаслідок господарської діяльності.

РОЗДІЛ 2.
МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ ОБ‘ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ

2.1.Загальна методика дослідження

Загальну методику дослідження сформовано відповідно до мети й дев’яти завдань роботи як послідовність взаємопов’язаних пізнавальних і проєктно-модельних процедур. Дослідження має теоретико-методологічний та інформаційно-модельний характер: від аналізу й синтезу наукового досвіду, нормативних вимог і практик цифрової фіксації воно переходить до порівняння підходів, структурування вихідних даних, формалізації авторської системи параметрів, побудови адаптивного процесу HBIM засобами моделювання та перевірки його внутрішньої працездатності на модельному фрагменті. Така логіка дозволяє уникнути ототожнення методів дисертаційного дослідження з технологіями, які можуть застосовуватися виконавцями конкретного проєкту обстеження або реставрації.

Робоча гіпотеза полягає в тому, що результативність використання HBIM для збереження пошкоджених об’єктів архітектурної спадщини визначається не лише точністю тривимірної геометрії, а передусім узгодженістю геометричних, історико-архітектурних, матеріальних, технічних, правових і часових даних. Якщо ці відомості організовано в простежувану систему, де для кожного запису встановлено джерело, дату, автора, ступінь достовірності й статус перевірки, цифрова модель може бути спільним інформаційним середовищем для документування, обґрунтування проєктних рішень, підготовки реставраційних заходів та подальшого моніторингу. Водночас правовий статус об’єкта архітектурної спадщини, зафіксована історико-архітектурна цінність і предмет охорони принципово відокремлюються від ступеня деструкції, технічного стану й ризику втрати: ці групи показників взаємодіють під час прийняття рішення, але не можуть бути зведені до одного універсального «рівня значущості».

Для забезпечення послідовності аналізу об’єкт дослідження декомпоновано на чотири взаємопов’язані рівні: об’єкт або комплекс як цілісна історико-архітектурна система; архітектурний чи конструктивний елемент; локалізована зона пошкодження; інформаційний запис (атрибут), пов’язаний із відповідним елементом або зоною. Така ієрархія дає змогу переходити від загальної характеристики об’єкта до конкретної ознаки його стану, не втрачаючи зв’язку з документаційним джерелом. Одиницею порівняння є цифрова технологія, програмне середовище або організаційний етап; одиницею формалізації - параметр і правило його заповнення; одиницею модельної перевірки - параметризований елемент (до прикладу - частина зовнішньої несучої стіни) з прив’язаними зонами пошкодження.

Джерельний базис охоплює наукові праці з реставрації, охорони спадщини, цифрової фіксації, BIM/HBIM та інформаційного менеджменту; чинні нормативно-правові й нормативно-технічні документи; оприлюднені приклади облікової, науково-проєктної та архівної документації; матеріали реалізованих цифрових проєктів і професійні рекомендації. Аналіз натурних обмірів, геодезії, лазерного сканування, фотограмметрії, аерофотознімання, неруйнівних методів контролю й датчиків моніторингу здійснюється в роботі як аналіз можливих джерел даних для запропонованого процесу. Самостійне виконання повного комплексу таких польових робіт, інструментальне встановлення їх точності та експериментальне тестування всіх розглянутих програмних платформ не входять до емпіричних процедур цієї дисертації. Це обмеження враховано під час формулювання результатів: оцінюється придатність і місце технологій в інформаційному процесі, а не декларується їх натурна верифікація автором.

Структурно методика складається з чотирьох етапів: концептуально-аналітичного, критеріально-структурного, інформаційно-параметричного та перевірочно-результативного (табл. 2.1). Етапи не є ізольованими: результати кожного попереднього етапу стають вхідними даними наступного, а виявлені під

час перевірки суперечності повертають дослідницький процес до уточнення класифікації, параметрів або правил інформаційного обміну.

Перший, концептуально-аналітичний етап. Його призначенням є визначення теоретичних передумов, дослідницької прогалини, меж і понятійного апарату роботи. На цьому етапі використано методи аналізу та синтезу і метод порівняння. Аналіз забезпечив декомпозицію широкої проблеми цифрового збереження спадщини на окремі складові: документування автентичної субстанції, представлення пошкоджень, керування рівнем деталізації, інформаційний обмін, формування цифрового паспорта й підтримку реставраційних рішень. Синтез використано для повторного об'єднання цих складових у цілісну постановку дослідження.

За допомогою аналізу та синтезу простежено перехід від традиційної обмірної, графічної та облікової фіксації об'єктів архітектурної спадщини до цифрових геометричних моделей і далі - до семантично насичених HBIM-систем. Метод порівняння використано для зіставлення мети, складу інформації та характеру результату на різних етапах розвитку підходів, а також для встановлення того, які компоненти проблеми досліджено достатньо, які вирішуються фрагментарно, а які залишаються неузгодженими. Внаслідок цього відокремлено розвинені напрями геометричної фіксації та візуалізації від недостатньо формалізованих питань семантичного опису руйнувань, простежуваності джерел, адаптивної деталізації й перетворення моделі на придатний до оновлення цифровий паспорт.

Методи аналізу та синтезу застосовано до нормативно-правових і нормативно-технічних джерел для встановлення обов'язкових відомостей про об'єкт архітектурної спадщини, меж допустимого використання цифрових даних та співвідношення авторського цифрового паспорта з офіційною обліковою і науково-проєктною документацією. Методом порівняння зіставлено положення законодавства про охорону культурної спадщини, вимоги до обліку пам'яток, норми обстеження та принципи інформаційного менеджменту за ознаками юридичної сили, призначення документа, обов'язковості поля, відповідального

суб’єкта й періодичності оновлення. Це дало підстави сформулювати правило: цифровий паспорт не замінює офіційної Облікової картки пам’ятки, однак його перевірені, датовані й простежувані поля можуть становити інформаційну основу для її складання або актуалізації уповноваженими фахівцями.

Результатом першого етапу є концептуальна рамка дослідження, у якій сформульовано робочу гіпотезу, уточнено терміни BIM, HBIM, цифрова модель і цифровий паспорт, визначено рівні декомпозиції об’єкта, обмежено авторські твердження фактично виконаними процедурами та встановлено вимоги до подальшої формалізації. Цей результат безпосередньо забезпечує виконання завдань щодо аналізу сучасного стану досліджень, нормативної бази та цифрових технологій у сфері збереження архітектурної спадщини.

Другий, критеріально-структурний етап. Його метою є перетворення різнорідного масиву відомостей на систему, придатну для порівняння та подальшої параметризації. На цьому етапі використано метод порівняння, методи абстрагування та узагальнення, системний підхід і системний аналіз. Класифікування та типологічне групування виконують не роль окремих методів, а роль операцій упорядкування матеріалу: кожний клас даних пов’язується із джерелом отримання, носієм, способом перевірки, рівнем просторової прив’язки та сценарієм використання інформаційних контейнерів та параметрів.

На основі аналізу джерел сформовано п’ять взаємопов’язаних класів вихідних даних: геометричні; атрибутивно-семантичні; історико-архітектурні; матеріалознавчі; функціональні. Окремим наскрізним контуром визначено нормативно-правові й облікові відомості, оскільки вони не зводяться до одного просторового класу, але задають статус об’єкта, предмет охорони, обмеження та відповідальних осіб. Для кожного класу встановлюються мінімальні метадані: ідентифікатор, назва, джерело, автор або установа, дата створення чи обстеження, масштаб або точність за наявності, формат, ступінь достовірності, статус погодження та зв’язок із версією моделі. Саме метадані забезпечують можливість відрізнити задокументований факт від припущення, статус реконструкції або проєктної пропозиції.

З використанням системного підходу та системного аналізу встановлено відповідність між інформаційними цілями, необхідними даними, способами їх одержання, рівнями деталізації та очікуваними результатами; результат цієї операції подано у вигляді матриці. У її рядках розміщено сценарії застосування – аварійна фіксація, попереднє оцінювання, розроблення проєкту реставрації, супровід виконання робіт, експлуатація й моніторинг; у стовпцях – геометрична деталізація, інформаційна насиченість, точність, актуальність, формат обміну та відповідальний виконавець. Завдяки цьому потреба в даних визначається не максимально можливою кількістю параметрів, а конкретним управлінським або проєктним завданням.

Для керування деталізацією використано адаптивну систему LOD-H/LOI-H. LOD-H характеризує достатній рівень геометричного представлення історичного елемента, а LOI-H – достатній склад пов’язаних з ним атрибутів. Їх не трактовано як механічно однакові величини: елемент може мати відносно просту геометрію, але потребувати розгорнутого опису походження, матеріалу, автентичності, ушкоджень і реставраційних втручань. Для аварійної фіксації передбачено LOD-H100/200 з мінімальним LOI-H; для проєктування реставрації – LOD-H300/400 із розширеним LOI-H; для експлуатації та моніторингу – вибірковий LOD-H500 лише для тих елементів, де це виправдано завданням. Такий підхід запобігає як інформаційній недостатності, так і невиправданому надмоделюванню.

Метод порівняння застосовано до функціональних можливостей програмного забезпечення, заявлених розробниками, описаних у документації та апробованих в опублікованих проєктах. Ознаками зіставлення є підтримка складної та нерегулярної геометрії, робота з хмарами точок і растровими підосновами, створення користувацьких атрибутів, класифікація елементів і пошкоджень, обмін IFC та іншими відкритими форматами, взаємодія з ГІС і базами даних, керування версіями та можливість спільної роботи. Порівняння не підмінює повноцінного експериментального тесту кожної платформи; його

результатом є обґрунтована відповідність класів інструментів окремим операціям HBIM-процесу.

Результатом другого етапу є структурована модель вихідних даних, система критеріїв їх оцінювання, сценарна матриця LOD-H/LOI-H та вимоги до цифрового середовища. Вони утворюють формалізований міст між теоретичними положеннями першого розділу і авторською методикою створення HBIM-моделі, викладеною в третьому розділі. (Рис 2.2 - 2.9)

Третій, інформаційно-параметричний етап. На цьому етапі застосовано методи абстрагування та узагальнення, метод формалізації, системний підхід і системний аналіз, а також метод моделювання. Абстрагування дозволило відокремити інваріантні правила, придатні для різних типів об’єктів архітектурної спадщини, від конкретних значень, що залежать від матеріалу, конструктивної системи, характеру руйнування чи наявності архівних джерел; узагальнення – об’єднати ці правила в єдину структуру. Формалізація перетворила їх на класи параметрів, допустимі значення, зв’язки та умови оновлення, а системний аналіз і моделювання забезпечили побудову авторської структури HBIM-процесу.

Система параметрів організована за принципом «об’єкт – елемент – пошкодження – доказ – рішення». На рівні об’єкта фіксуються ідентифікаційні, правові, містобудівні та історико-архітектурні відомості; на рівні елемента – тип, матеріал, орієнтовний період, конструктивна функція, ознаки автентичності, збереженість і належність до предмета охорони; на рівні зони пошкодження – вид, локалізація, геометричні показники, імовірна причина, ступінь деструкції, небезпека розвитку та дата фіксації. Пошкодження представляється або окремим інформаційним об’єктом, або групою атрибутів, але в обох випадках має стійкий зв’язок із пошкодженим елементом, доказовим матеріалом і версією моделі. Є окреме поле для фіксації прийнятого рішення експертами.

Для кожного параметра визначаються назва, зміст, тип даних, одиниця вимірювання, обов’язковість, допустимі значення, джерело, відповідальний за

внесення, дата, статус перевірки й історія змін. Невідоме значення не замінюється довільним припущенням: використовуються спеціальні стани «не встановлено», «потребує перевірки», «реконструйовано за аналогом» або «проєктне значення». Таке розмежування підвищує наукову коректність моделі та дає змогу контролювати, які висновки ґрунтуються на первинному джерелі, а які мають гіпотетичний характер.

Запропонований HBIM-процес охоплює підготовчий етап стратегічного планування та шість операційних етапів: 1) збирання, ідентифікацію і верифікацію вихідних даних; 2) одержання або імпорт просторової основи; 3) побудову базової геометрії й ієрархії елементів; 4) інтеграцію відомостей про матеріали, ціннісні характеристики, технічний стан і пошкодження; 5) формування та порівняння сценаріїв реставраційних втручань; 6) підготовку моделі до експлуатації, моніторингу, оновлення та архівування. У дисертації ці етапи розроблено як нормативно-логічну послідовність дій для майбутнього проєкту. Наприклад, натурна й інструментальна фіксація є необхідною операцією виконавця конкретного HBIM-проєкту, але не подається як самостійно виконаний автором повномасштабний польовий експеримент.

Метод моделювання застосовано також для побудови структури цифрового паспорта. Він розглядається як актуалізована сукупність пов’язаних записів про ідентифікацію об’єкта архітектурної спадщини, правовий статус, геометрію, історичний розвиток, предмет охорони, матеріали, технічний стан, пошкодження, проведені й заплановані втручання та результати моніторингу. Методика його створення передбачає ідентифікацію об’єкта, збирання й перевірку джерел, формування просторового ядра, параметризацію, валідацію, керування версіями, періодичне оновлення та архівування. Поля, що відповідають вимогам офіційної облікової документації, позначаються окремо; після професійної і правової перевірки вони можуть бути використані для підготовки або оновлення Облікової картки пам’ятки. (Рис. 3.14)

Результатом третього етапу є авторська інформаційно-параметрична модель: класи додаткових HBIM-параметрів, правила представлення

пошкоджень, адаптивний шаблон LOD-H/LOI-H, послідовність створення та оновлення моделі й методика формування цифрового паспорта. Цей результат пов’язує кожну інформаційну вимогу з конкретною операцією та очікуваним користувацьким результатом. (Рис. 2.9)

Четвертий, перевірочно-результативний етап. Його завданням є не доведення універсальної ефективності HBIM усіма можливими засобами, а перевірка логічної несуперечності, достатності й відтворюваності запропонованої структури. На цьому етапі застосовано метод моделювання та метод узагальнення. Модельну перевірку здійснено на елементі «зовнішня несуча стіна», для якого послідовно відтворено ідентифікацію, геометричне представлення, опис матеріалу й конструктивної функції, фіксацію зон пошкодження, прив’язку доказових матеріалів, визначення статусу даних і формування варіанта реставраційного рішення. (Рис. 3.7 - 3.8)

Перевірка на модельному елементі дає змогу встановити, чи може одна структура даних підтримувати різні сценарії без втрати простежуваності. Для аварійної фіксації контролюється наявність мінімального набору полів і швидке локалізування небезпечної зони; для проєктування реставрації – достатність розширених відомостей про матеріал, автентичність, ступінь деструкції та попередні втручання; для моніторингу – можливість додавати датовані спостереження, не перезаписуючи попередній стан. Перевіряється інформаційна логіка та зв’язність параметрів, а не розрахункова несуча здатність стіни, метрологічна точність приладів чи відповідність конкретного проєктного рішення всім умовам реального об’єкта архітектурної спадщини.

Критеріями перевірки визначено: повноту – наявність обов’язкових класів і полів для обраного сценарію; простежуваність – можливість встановити походження, дату, автора та статус кожного істотного запису; узгодженість – відсутність логічних суперечностей між рівнями об’єкта, елемента й пошкодження; адаптивність – можливість змінювати LOD-H/LOI-H і склад даних відповідно до завдання без руйнування структури; відтворюваність – можливість іншого виконавця повторити послідовність формування моделі за

визначеними правилами. Інтероперабельність розглядається як складова відтворюваності й перевіряється на рівні передбачених відкритих форматів, стабільних ідентифікаторів і правил експорту, без твердження про повну безвтратність обміну між усіма програмами.

За результатами перевірки передбачено зворотний зв’язок: відсутнє поле додається до мінімального набору; неоднозначне поняття уточнюється; надлишковий параметр переводиться до розширеного рівня; суперечливі значення не усереднюються, а зберігаються як окремі версії з позначенням джерел; зміна стану об’єкта фіксується новим датованим записом. Це перетворює методику з лінійної інструкції на ітеративний процес керування знаннями про об’єкт архітектурної спадщини.

Завершальне узагальнення співвідносить отримані результати з метою та завданнями дослідження, визначає наукову новизну, практичне значення й межі застосування. Запропонована методика призначена для організації й перевірки інформації та підтримки професійного рішення, однак не замінює ліцензованого технічного обстеження, історико-архітектурного опорного плану, науково-проєктної документації, експертизи цінності, авторського чи технічного нагляду. Остаточні реставраційні рішення мають ухвалюватися фахівцями відповідної кваліфікації на підставі натурних даних, нормативних вимог і погоджень органів охорони культурної спадщини.

Таким чином, запропонована загальна методика забезпечує наскрізний зв’язок між дослідницькою проблемою, джерелами, методами, операціями, проміжними результатами та формами перевірки. Її кінцевим результатом є не окрема тривимірна модель як самоціль, а обгрунтований і відтворювальний спосіб формування адаптивної HBIM-системи та цифрового паспорта пошкодженого об’єкта архітектурної спадщини, придатних до поетапного уточнення в процесі документування, реставрації й моніторингу. (рис.2.1)

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

ВІД ТЕОРЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ — ДО ПЕРЕВІРКИ АДАПТИВНОГО НВІМ-ПРОЦЕСУ

ЕТАП	МЕТОДИ	ДОСЛІДНИЦЬКІ ОПЕРАЦІЇ	РЕЗУЛЬТАТ
КОНЦЕПЦІЯ ТА АНАЛІЗ **1**	• Аналіз і синтез • Порівняння	• Визначення проблеми, прогалини, меж і робочої гіпотези • Уточнення термінів та одиниць аналізу • Опрацювання наукових і нормативних джерел • Формування критеріїв методики	**• Концептуальна модель проблеми** **• Вимоги до НВІМ-методики** **• Обґрунтовані межі дослідження**
КРИТЕРІЇ ТА СТРУКТУРА **2**	• Порівняння • Абстрагування та узагальнення • Системний підхід і системний аналіз	• Структурування п'яти класів вихідних даних • Визначення метаданих і вимог до достовірності • Побудова сценарної матриці LOD-H / LOI-H • Порівняння програм за єдиними критеріями	**• Структура вихідних даних** **• Матриця інформаційних вимог** **• Правила вибору рівнів деталізації**
ДАНІ ТА ПАРАМЕТРИ **3**	• Абстрагування та узагальнення • Формалізація • Системний підхід і системний аналіз • Моделювання	• Формалізація НВІМ-параметрів і допустимих значень • Зв'язок «об'єкт — елемент — зона — пошкодження» • Побудова адаптивного НВІМ-процесу • Формування структури цифрового паспорта	**• Параметрична модель даних** **• Адаптивний НВІМ-шаблон** **• Структура і алгоритм формування цифрового паспорта**
ПЕРЕВІРКА ТА РЕЗУЛЬТАТ **4**	• Моделювання • Абстрагування та узагальнення	• Апробація на елементі «зовнішня несуча стіна» • Контроль заповнення обов'язкових параметрів, джерел, статусів і версій даних • Зіставлення складу даних для трьох сценаріїв LOD-H / LOI-H • Уточнення структури, правил оновлення та меж застосування	**• Логічно узгоджена структура даних** **• Уточнені правила формування і оновлення моделі** **• Визначені межі застосування**

РОЗДІЛ 2 Рис. 2.1 Загальна методика дослідження — від теоретичного аналізу до перевірки адаптивного НВІМ-процесу

Рис. 2.1 Загальна методика дослідження

2.2. Визначення переліку вихідних даних для створення BIM (Інформаційної моделі будівлі) об'єкта архітектурної спадщини (HBIM)

Визначення переліку вихідних даних для створення інформаційної моделі будівлі (BIM) є послідовним процесом збирання та узгодження різнотипної інформації про об’єкт – від фіксації його фактичного технічного стану до цифрового відтворення геометрії та змістових характеристик. Йдеться не лише про обміри, а про комплексне опрацювання будівлі, за якого результати натурних досліджень, аналіз пошкоджень і історичний контекст поєднуються в єдину інформаційну основу моделі.

Вихідні дані для створення BIM мають охоплювати аналітично систематизовану інформацію про стан об'єкта та характер пошкоджень, результати інструментальних обмірів і тривимірної фіксації, історико-архівні та матеріалознавчі матеріали, а також атрибутивні дані, придатні для параметризації елементів моделі. Саме поєднання змістовного аналізу об’єкта з точними цифровими вимірюваннями забезпечує формування повноцінної інформаційної основи для BIM-моделювання. (Рис. 2.2)

Відповідно до стандарту ISO 19650-1, визначення інформаційних вимог посідає центральне місце в BIM-процесі. Ці вимоги структуруються на організаційні інформаційні вимоги (Organizational Information Requirements, OIR), інформаційні вимоги до активів (Asset Information Requirements, AIR) та вимоги до обміну інформацією (Exchange Information Requirements, EIR) і окреслюють обсяг та характер інформації, яка має бути закладена в BIM-моделі для забезпечення потреб усіх зацікавлених сторін на різних етапах життєвого циклу об’єкта [94].

За відсутності чітко сформульованих інформаційних вимог ефективний обмін даними та узгодженість BIM-моделі між учасниками проєкту стають практично недосяжними.



Рис. 2.2 Порівняння завдань на проєктування BIM та HBIM

Особливої уваги потребує питання адаптації стандартів ISO 19650 до потреб HBIM, для якого характерним є значно ширший спектр вихідних даних. У таких проєктах необхідно враховувати історико-культурну структуру, архівні креслення, описи стану елементів і матеріалів, що забезпечують не лише точне відтворення форми об’єкта, а й збереження його унікальних особливостей на всіх стадіях існування.

Методика збору вихідних даних для HBIM забезпечує впорядкування інформації та формує основу для побудови моделей, проте усталеного універсального підходу до її реалізації не існує. Графові моделі забезпечують докладний аналіз взаємозв’язків між елементами та коректне відтворення їхньої топології, однак для великих за обсягом моделей вони складні в реалізації й потребують значних обчислювальних ресурсів. З іншого боку, підходи, що базуються на методах глибокого навчання, ефективно працюють із великими масивами даних і забезпечують автоматизацію класифікації елементів, проте часто не враховують ключові топологічні та семантичні зв’язки, що може негативно позначатися на точності формування HBIM-моделей [170; 171].

Вибір методу збору вихідних даних має безпосередньо залежати від цілей HBIM-проєкту: для задач, де критичними є топологія та структурні взаємозв’язки (зокрема для складних історичних конструкцій), доцільніше застосовувати графові моделі; для великих наборів даних і автоматичної класифікації – більш ефективними є мультимодальні глибокі підходи, які можуть потребувати додаткової інтеграції топологічної інформації для повноцінної BIM-моделі.

На підставі аналізу теоретичних джерел [169–172] складено таблицю (рис.2.3), у якій відображено відмінності між ключовими методами збирання та опрацювання вихідних даних для HBIM із виокремленням їхніх головних характеристик, переваг і можливих обмежень кожного підходу.

МЕТОДИ ЗБОРУ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ДАНИХ

Об’єкти архітектурної спадщини · порівняння підходів опису елементів у HBIM

МЕТОД	ГОЛОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПЕРЕВАГИ	ОБМЕЖЕННЯ
Графові та семантичні представлення BIM	Графові й семантичні моделідля відображення логічних і топологічних звязків між елементами BIM-моделі.	Глибоке розуміння взаємозв’язків, точне відтворення структури об’єкта.	Потребує попередньої підготовки даних і значних обчислювальних ресурсів.
Мультимодальні глибокі нейронні мережі (MMDL)	Автоматизована класифікація BIM-елементів на основі поєднання візуальних даних та атрибутивної інформації.	Ефективне опрацювання великих обсягів даних, зменшення ручної роботи.	Обмежено враховує топологічні та просторові взаємозвязки між елементами.
Генеративний графовий підхід	Інтеграція BIM-моделей і графових нейронних мереж для автоматизованого проєктування та рішень.	Автоматизація проєктних процесів, оптимізація конструкційних рішень.	Складність реалізації у великих проєктах, потреба в потужних ресурсах.
Generative AIBIM	Поєднання BIM із генеративним AI для автоматизованого структурного проєктування.	Підвищує продуктивність проєктування, інтелектуалізація процесів.	Потребує додаткової інтеграції для точності, складне навчання моделей.
Аналіз вартості життєвого циклу (LCCA) з BIM	Збір і аналіз атрибутивних даних BIM-моделі для планування вартості та життєвого циклу об’єкта.	Планування економічно обґрунтованих рішень, підтримка сталого проєктування.	Не забезпечує детального врахування топології та просторових зв’язків.

РОЗДІЛ 2 Рис. 2.3 Методи збору та характеристика даних.

Рис. 2.3 Методи збору та характеристика даних

Створення BIM-моделі нерухомого об’єкта культурної спадщини неможливе без інтеграції головних класів даних (рис. 2.4):

– геометричних;

– атрибутивних;

– історико-архітектурних;

– матеріальних (будівельні та оздоблювальні матеріали, їх характеристики та стан) ;

– функціональних.

Кожен із цих класів формує власний погляд на об’єкт у цифровому просторі, а правильне поєднання всіх компонентів дає змогу отримати повноцінну, аналітично насичену модель.

Окрім геометричних і фізичних параметрів, до переліку вихідних даних необхідно включити нормативно-правовий блок даних, що забезпечує юридичну достовірність моделі для подальших реставраційних робіт: реєстраційні дані (охоронний номер, дата та номер рішення про внесення до Реєстру – для верифікації статусу); дані облікової документації (електронні копії паспорта пам’ятки та акта технічного стану як першоджерел для верифікації геометрії); відомості про пошкодження (War Damage Log) – тип боєприпасу та епіцентр вибуху (якщо відомо), що впливають на аналіз прихованих дефектів конструкцій (зв’язок з розділом 1.3 щодо досвіду відновлення після збройних конфліктів). Такий підхід відповідає усталеним європейським практикам документування спадщини під загрозою (Heritage at Risk), розглянутим у дослідженнях Аль-Муккаді (Al-Muqdadi, 2022) [173] та Яна (Yang, 2020) [174].

Геометричні дані. Геометрія є каркасом будь-якої HBIM-моделі. Найчастіше її отримують за допомогою 3D-сканування (TLS) і фотограмметрії. Огляд наукових публікацій засвідчив, що саме ці методи найчастіше застосовують для документування об’єктів архітектурної спадщини.

Збір вихідних даних здійснюється за гібридною схемою, обґрунтованою в розділі 1.2 (щодо ефективності цифрових інструментів). Для об’єктів зі складною пошкодженою геометрією застосовується метод лазерного сканування (TLS) з

подальшим опрацюванням в алгоритмічному середовищі (Rhino/Grasshopper). Це робить можливим отримання хмари точок класу точності LOA 30–50, що є мінімально необхідним показником для фіксації деформацій несучих конструкцій. За висновками Андріасяна та співавторів (Andriasyan et al., 2020) [93], пряме моделювання пошкодженої спадщини без етапу параметричної оптимізації (Parametric Bridge) призводить до значних похибок у визначенні обсягів втрат матеріалів.

Наземне лазерне сканування (TLS) забезпечує високоточну фіксацію складних топологічних елементів, тоді як фотограмметрія дає змогу швидко та ефективно охоплювати великі фасадні площини й вертикальні поверхні.

Лазерне сканування (LiDAR) дає змогу отримати дуже щільні хмари точок з точністю до ±2–5 мм. Це забезпечує можливість відтворювати навіть архітектурні деталі, зокрема фасадні фризи та арки. Однак такі дані займають значний обсяг цифрових даних, що вимагає використання високопродуктивних комп’ютерів і спеціалізованих алгоритмів для інтеграції інформації у BIM-середовище. Рекомендується поетапний підхід: спочатку видалення “цифрового шуму”, далі нормалізація хмар точок, а перед імпортом у модель – перевірка можливих колізій. Така послідовність сприяє збереженню точності та узгодженості даних [176].

Фотограмметрія, на відміну від LiDAR, дозволяє створювати насичене текстурування поверхонь і забезпечує високу візуальну деталізацію, що є особливо важливим для великих фасадних площ [177]. Проте точність цього методу значною мірою залежить від освітлення, конфігурації камер і якості знімків, що обмежує його застосування для точних інженерних розрахунків і підкреслює необхідність адаптації методів збору даних до конкретних умов зйомки [175]. Методологічно доцільним є ретельне планування фотозйомки, застосування контрольних точок і калібрування камер, що дає змогу отримати відтворювані та високоточні фотограмметричні моделі у BIM-середовищі [178].

Геодезичні вимірювання безпосередньо визначають рівень деталізації (LOD) BIM-моделі на різних етапах життєвого циклу об’єкта. Обрана точність

вимірювань визначає не лише обсяг геометричних даних, а й ефективність подальшого використання моделі під час проєктування, будівництва та експлуатації [179].

Узагальнений аналіз засвідчує, що найбільш обґрунтованим є поєднання зазначених підходів: LiDAR забезпечує просторову й топологічну точність та високий рівень геометричної деталізації, тоді як фотограмметрія доповнює модель візуальним контекстом і реалістичним текстуруванням поверхонь [178]. У методологічному контексті це передбачає інтеграцію отриманих даних у BIM-середовище шляхом формування єдиного координатного простору та застосування алгоритмів суміщення хмар точок і текстур, що створює умови для формування моделі, яка водночас є точною і візуально-інформативною [176].

Організація вихідних даних має забезпечувати їхню подальшу сумісність і можливість повторного використання в цифровому середовищі. Це досягається через уніфікацію параметрів, стандартизацію описів і підготовку інформації до параметричного моделювання [93].

Атрибутивні та семантичні дані. Атрибутивні дані містять інформацію про елементи будівлі: матеріали, технічний стан, історико-культурну цінність, функціональне призначення. Вони перетворюють тривимірну геометрію на «розумну» модель, придатну для управління та аналізу [172], поєднуючи її з історією об’єкта та його функціональними характеристиками, що значно розширює аналітичні можливості BIM [171].

Дослідження Х. Мояно та співавторів [180] засвідчує, що без спільних стандартів обмін даними між різними BIM-платформами працює обмежено. Стандартизовані словники сприяють сумісності системи, а локальні класифікації краще передають культурно-історичні особливості, проте ускладнюють масштабування та узгодження даних між собою.

Використання стандартів IFC у поєднанні з онтологіями є ефективним інструментом уніфікації атрибутивних даних і забезпечує сумісність між різними BIM-платформами. Для об’єктів архітектурної спадщини це має принципове значення, оскільки семантичне наповнення моделі має одночасно

враховувати історичний зміст і правові особливості об’єкта [13]. У методологічному аспекті це вимагає формування єдиної атрибутивної бази, систематичної перевірки якості даних і підтримання семантичної узгодженості між усіма елементами BIM-моделі [176; 181].

Історико-архітектурні дані. Історичні джерела, архівні креслення та матеріали, а також описи змін функціонального використання об’єкта створюють підґрунтя для відтворення етапів розвитку будівлі з урахуванням її стилістичних і культурних характеристик [175]. У HBIM-моделюванні історико-архітектурні дані дають змогу простежити трансформації об’єкта в часі та репрезентувати ключові зміни його просторової й функціональної структури. Якщо поєднати BIM-моделювання з аналітичними та інтелектуальними методами, то можна створювати інформаційні моделі будівель, які не просто відображають їхню структуру, а й фіксують усі історичні зміни об’єкта на різних етапах його існування [182].

У методологічному вимірі формування інформаційної моделі об’єкта архітектурної спадщини ґрунтується на створенні багаторівневої, чітко структурованої HBIM-моделі, у межах якої історичні креслення та описи трансформацій будівлі не просто переводяться в цифровий формат, а проходять послідовні процедури нормалізації, георефернціювання та інтеграції в єдину інформаційну платформу. Кожен елемент історичних відомостей підлягає перевірці точності вимірювань і узгодженню зі стандартами IFC, що дає змогу зберегти семантичну цілісність даних і забезпечити сумісність атрибутів у BIM-моделі [182].

Твердження М. Цая та М. Здрілька [182] узгоджується з підходом Р. Волька та співавторів, які наголошують на важливості врахування часових і конструктивних змін під час створення BIM-моделей наявних будівель, особливо через системне документування трансформацій просторових і конструктивних рішень [106].

У методологічному контексті оптимальним є поетапне формування HBIM-моделі. Спершу відтворюється геометрична та топологічна структура об’єкта на

основі архівних матеріалів і сучасних цифрових вимірювань (LiDAR, фотограмметрія). На наступному етапі модель доповнюється атрибутивними та історичними даними, із застосуванням механізмів виявлення й усунення колізій, перевірки узгодженості часових рівнів та фіксації кожної реконструкційної зміни, що забезпечує правильне поєднання інформації з різних джерел [106].

Завдяки інтеграції HBIM-підходів можливо створювати багатошарові цифрові моделі, що об'єднують геометрію, текстури, атрибути та VR/AR-візуалізації. Така модель відображає поточний стан будівлі, а також дає змогу моделювати різні сценарії реставрації, прогнозувати вплив зовнішніх чинників та оцінювати наслідки різних консерваційних рішень, перетворюючи її на потужний інструмент для ухвалення розумних і аргументованих рішень щодо збереження культурних пам'яток [100].

Матеріальні дані (будівельні та оздоблювальні матеріали, їхні характеристики та стан)**.** Матеріали, з яких виготовлений об'єкт архітектурної спадщини, їхні властивості та ступінь зношеності є головними показниками для оцінювання технічного стану об'єкта та прогнозування поведінки конструкцій у цифровій моделі [183]. Шкромада О.І. та співавтори [184] додають до цих даних ще й текстури та фотограмметричні зображення для наочного відображення поверхні, що вважається корисним у реставраційній практиці. Проте використання візуальних матеріалів не завжди забезпечує інженерів точними даними. З огляду на це, постає питання: що важливіше: зберегти історичну правду чи зробити модель максимально практичною для роботи?

У методологічному контексті процес охоплює створення багаторівневої системи даних про матеріали. Спочатку в лабораторії та під час польових досліджень визначають їхні основні властивості – міцність, вологість, щільність, проникність. Потім усі ці показники впорядковують і нормалізують за допомогою статистичних методів. Завдяки цьому можна коректно поєднати матеріали різного походження та різних історичних періодів в одну інформаційну модель будівлі [183].

Найкраще поєднувати точні дані про властивості матеріалів із фотограмметрією та лазерними вимірюваннями. Разом вони створюють текстуровані шари HBIM-моделі, які дають змогу не лише “бачити” поточний стан поверхонь, а й зрозуміти, де саме з’являються пошкодження, які ділянки уражені біологічними процесами та як клімат впливає на руйнування матеріалів. У результаті HBIM-модель набуває властивостей цифрового двійника, придатного для технічної діагностики, прогнозування процесів руйнування та науково обґрунтованого планування реставраційних втручань [184].

Поєднання статистично обґрунтованої класифікації матеріалів із реальними вимірюваннями їхнього стану дає змогу HBIM-моделі відображати не лише зовнішній вигляд, а й технічні характеристики об’єкта, що важливо для діагностики, прогнозування та планування реставраційних заходів [183; 184].

Функціональні дані. Цей клас даних показує, як змінюється використання приміщень з часом. Завдяки цьому HBIM-модель може відтворювати не лише проєктну, а й реальну експлуатаційну фазу будівництва. Це особливо корисно, коли потрібно вирішити, чи варто оновлювати будівлю, чи змінювати її призначення [171; 181].

Інтеграція може відбуватися двома шляхами: через роботу з архівними таблицями та документами або через використання стандартів, що допомагають узгодити атрибути. Однак, різні методи дають різний рівень деталізації та достовірності, що ускладнює реконструкцію [100].

Методологія передбачає поступове створення структури даних, що враховує час. Кожне приміщення чи кожна зона отримує параметри, що показують, коли і як вони використовувалися, як змінювалося їхнє призначення та які особливості експлуатації були важливими. Такий підхід дає змогу моделі HBIM “прив’язати” функціональні характеристики до конкретних етапів життя будівлі. У результаті модель стає більш цінною для аналізу та ухвалення рішень [171].

Важливо узгоджувати старі функціональні описи з сучасними класифікаціями та стандартами обміну даними, наприклад, із форматом IFC. Це допомагає порівнювати, як будівля використовувалася раніше і як вона

функціонує зараз, а також створює підґрунтя для аналізу різних сценаріїв її розвитку. Р. Вольк та співавтори зазначають [106], що саме стандартизоване кодування функцій робить можливим використання HBIM для завдань ревіталізації та повторного адаптивного використання будівель.

Розвиток методології інтеграції функціональних даних нині пов’язують із HBIM-підходами. Вони поєднують технічні параметри з візуалізацією сценаріїв використання простору у VR та AR. Це робить HBIM-модель більш «розумною»: вона дає змогу бачити наслідки змін не лише з погляду техніки чи експлуатації, а й у культурному та просторовому контексті. Такий підхід особливо важливий, коли йдеться про збереження архітектурної спадщини [182]. У результаті зіставлення теоретичних підходів, представлених у працях [106; 171; 176; 177; 180–182], складено схему (рис. 2.4)

Таким чином, процес формування HBIM-моделі об’єкта культурної спадщини постає як послідовна, ієрархічно впорядкована система дій, у межах якої кожен клас вихідних даних має чітко окреслене функціональне призначення та реалізується через відповідні методи збору, оброблення й інтеграції цифрової інформації. Така структурна логіка побудови моделі забезпечує не лише високу геометричну достовірність просторового представлення об’єкта, а й комплексне семантичне, історико-часове та функціональне наповнення інформаційної моделі. Отже, HBIM у такому розумінні виходить за межі статичної тривимірної візуалізації та постає як жива інформаційно-аналітична платформа, що підтримує науковий аналіз, обґрунтування реставраційних рішень, довготривалий моніторинг технічного стану і комплексне управління об’єктами архітектурної спадщини на всіх етапах їхнього існування та функціонування.

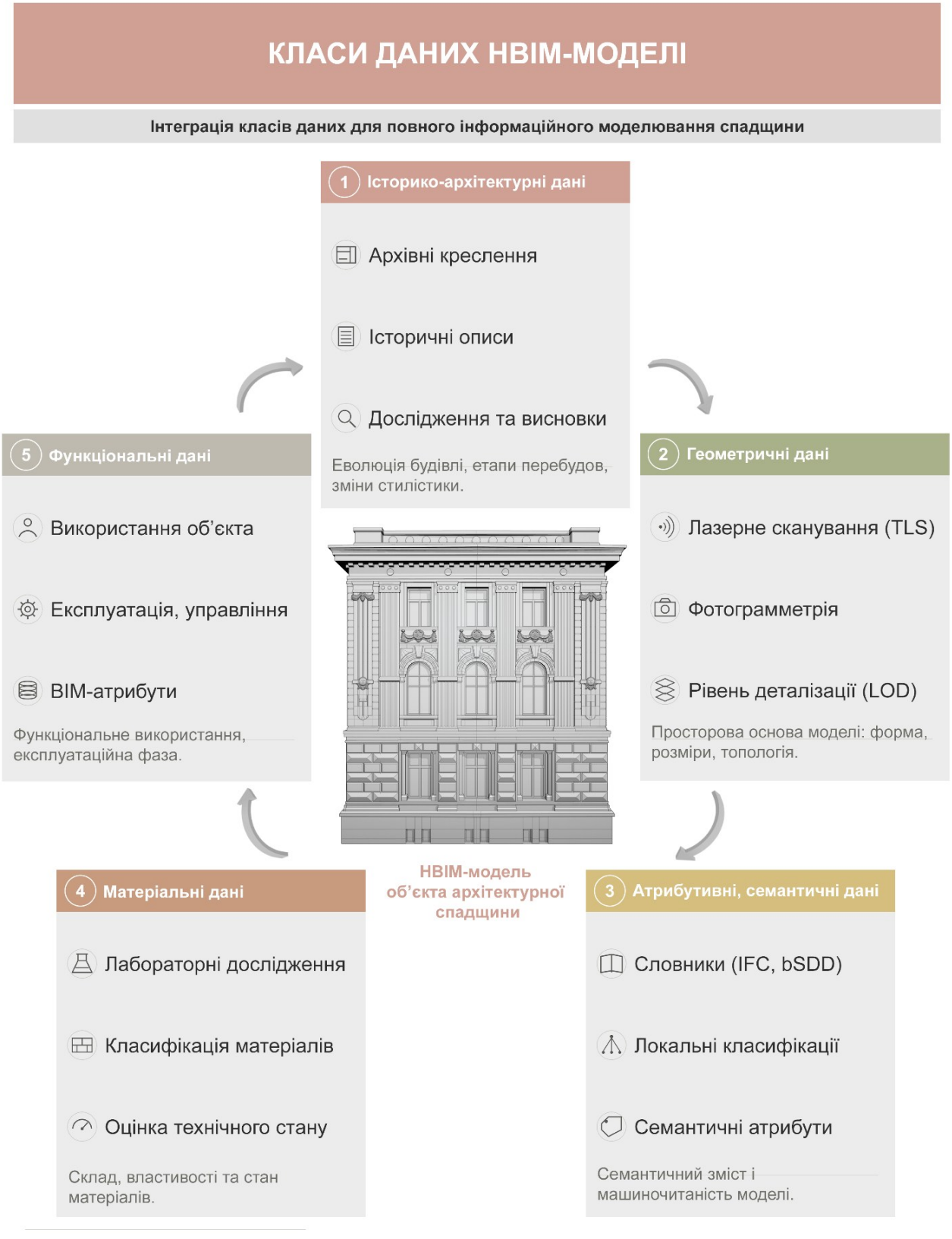


Рис. 2.4 Класи даних HBIM-моделі об'єкта архітектурної спадщини

2.3.Класифікація рівнів деталізації HBIM - Інформаційної моделі будівлі для об’єктів архітектурної спадщини

Технологія інформаційного моделювання будівель (BIM) поступово набула широкого застосування у сфері збереження архітектурної спадщини, трансформувавшись у спеціалізовану піддисципліну – HBIM (Heritage Building Information Modelling). Адаптація принципів BIM до вимог роботи з об’єктами архітектурної спадщини виявилася нетривіальним завданням і передбачала не лише технічне пристосування програмного забезпечення, а й переосмислення парадигми цифрового представлення будівлі – від ідеально правильних форм до складних, нерегулярних, часто пошкоджених архітектурних об’єктів [185; 186].

У центрі цієї методології перебуває поняття рівня деталізації (Level of Detail / Level of Development – LOD). Саме LOD визначає, наскільки повно й точно цифрова модель відображає реальний об’єкт на кожному етапі роботи. Класифікація рівнів деталізації є не лише технічною специфікацією: вона одночасно виконує три принципово різні функції – слугує інструментом контролю якості моделі, забезпечує спільну мову між усіма учасниками проєкту (архітекторами, реставраторами, замовниками, охоронними органами) та, зрештою, визначає обсяг ресурсів, необхідних для досягнення відповідного рівня деталізації [187; 188].

Дослідження класифікаційних підходів набуває особливої актуальності з огляду на три взаємопов’язані чинники. По-перше, технології збору просторових даних – лазерне сканування, фотограметрія з безпілотних літальних апаратів, структуроване підсвічування – розвиваються з такою інтенсивністю, що рівні деталізації, донедавна технічно недосяжні, перетворюються на стандартну практику. По-друге, у науковому обігу утверджується концепція цифрових двійників об’єктів архітектурної спадщини – динамічних моделей, що оновлюються синхронно зі станом об’єкта в реальному часі. По-третє, стабільне зростання кількості наукових публікацій з HBIM свідчить про потребу галузі в

уніфікованій термінології, спільних стандартах і узгодженій класифікаційній системі [185; 189].

Водночас спільна класифікаційна система залишається несформованою. Різні наукові школи й національні традиції реставраційної практики породили власні класифікаційні підходи, що нерідко суперечать один одному або використовують однакові терміни для різних понять. З огляду на це, систематичний аналіз наявних підходів до класифікації рівнів деталізації є не суто теоретичним завданням, а нагальною методологічною потребою – особливо в контексті розроблення уніфікованих підходів для практики охорони культурної спадщини в Україні [169, 186].

Окремої уваги потребує принципова відмінність HBIM від традиційного BIM, яку будь-яка класифікаційна система рівнів деталізації має враховувати: невизначеність і неповність вихідних даних. Якщо нове будівництво спирається на чітку, повну й однозначну проєктну докментацію, то об’єкт архітектурної спадщини забезпечений лише фрагментарними джерелами: архівними матеріалами сумнівної точності, результатами натурних обстежень і науковими гіпотезами. Первісний вигляд будівлі та її конструктивна логіка є предметом реконструкції, а не безпосередньої документальної фіксації. Урахування цієї невизначеності в класифікаційній системі є не факультативною, а обов’язковою вимогою [190; 191].

Усвідомлення відмінності між BIM і HBIM зумовлює необхідність ретельнішого аналізу самого поняття «рівень деталізації» та виокремлення його складових, кожна з яких має власне змістове навантаження. Без такого термінологічного розмежування будь-яка класифікаційна дискусія ризикує перетворитися на діалог у взаємно неспівмірних системах координат (рис. 2.5).

У контексті HBIM поняття рівня деталізації охоплює не одну категорію, а ціле сімейство взаємопов’язаних, але самостійних понять. У стандартному BIM LOD є, переважно, технічною характеристикою геометричної точності моделі. У HBIM він розгортається щонайменше у чотири відносно незалежні виміри, кожен з яких може розвиватися за власною логікою [190; 192].



Рис. 2.5 Порівняння рівнів деталізації BIM та HBIM

Перший вимір (рис. 2.6) – рівень геометричної деталізації (Level of Geometry – LOG) – охоплює діапазон від загального абрису будівлі (LOG 1) до точного відтворення фактури поверхні, дрібних архітектурних деталей і характеру деградованих ділянок (LOG 5). Максимально досяжний рівень LOG для конкретного об’єкта визначається методом збору первинних просторових даних: фотограметрія, лазерне сканування або їхня комбінація забезпечують принципово різну вихідну точність [163; 193].

Другий вимір (рис. 2.6) – рівень точності вимірювань (Level of Accuracy – LOA) – запропонували M. Аріко та співавтори (M. Aricò et al.); вона кількісно характеризує відхилення між цифровою моделлю та реальним об’єктом. LOA є особливо значущим під час оцінювання якості хмар точок, отриманих методом лазерного сканування. Розмежування LOA і LOG робить можливим чітке розрізнення питань якості первинних вимірювань і питань допустимої геометричної спрощеності: модель може мати низький LOA (похибка вимірювань) і водночас цілком задовільний LOG відповідно до поставлених завдань [194; 195].

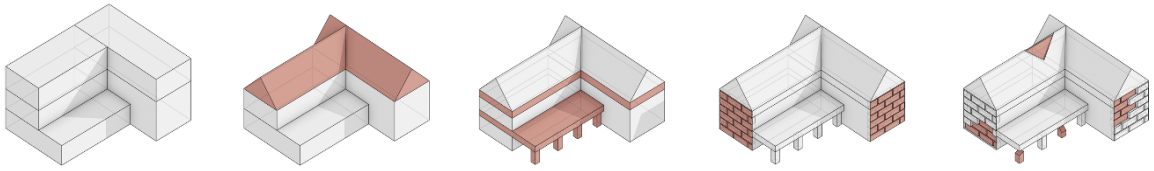
Третій вимір (рис. 2.7) – рівень знань (Level of Knowledge – LOK) – є поняттям, специфічним виключно для HBIM і таким, що не має аналогу у стандартному BIM. LOK характеризує ступінь достовірності відомостей, зафіксованих у моделі. Для об’єктів архітектурної спадщини неповнота даних є нормою, а не винятком: частина конструкцій прихована від безпосереднього огляду, задокументована лише за архівними кресленнями сумнівної точності або відновлена після руйнування. LOK структурує цю невизначеність, забезпечує її видимість і керованість у межах моделі [190; 192].

РІВЕНЬ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ДЕТАЛІЗАЦІЇ (LOG) ТА ТОЧНОСТІ (LOA)

Дві взаємопов'язані складові просторової достовірності та точності HBIM-моделі

РІВЕНЬ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ДЕТАЛІЗАЦІЇ · LOG

LOG (Level of Geometry) характеризує ступінь геометричної опрацьованості елементів HBIM-моделі.



LOG 100
Узагальнений об'єм

LOG 200
Покрівельний об'єм

LOG 300
Конструктивні Елементи

LOG 400
Фактура Матеріалу

LOG 400
Деградовані Ділянки

Рівні геометричної деталізації — від загального об'єму до мікродеталей

ЩО ВКЛЮЧАЄ

- Форма, розміри та пропорції
- Профілі, декор і складні деталі
- Взаємне розташування елементів
- Фіксація деформацій і втрат

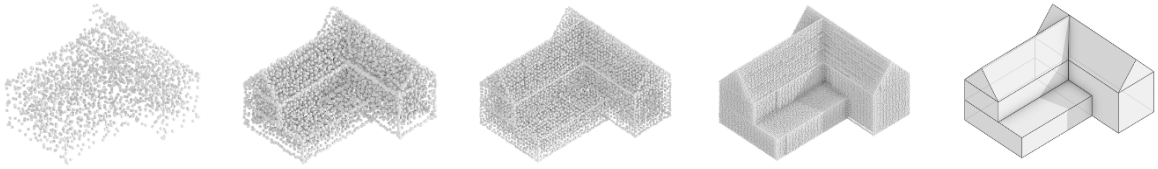
ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

- Реконструкція та реставрація
- Складна історична геометрія
- Аналіз деформацій та пошкоджень
- Основа для точного 3D-моделювання

РОЛЬ У HBIM Дає змогу відобразити реальну просторову структуру об'єкта та коректно відтворити збережені й втрачені частини.

РІВЕНЬ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ · LOA

LOA (Level of Accuracy) відображає точність геометричних даних і ступінь відповідності моделі фактичному стану об'єкта.



LOA 10 · ± 5 см
GPS · Тахеометрія

LOA 20 · ± 15 мм
Тахеометрія · Фотограмметрія

LOA 30 · ± 5 мм
Наземне сканування (TLS)

LOA 40 · ± 2 мм
Щільне TLS · Фотограмметрія

LOA 50 · ± 1 мм
Преицзійні Сканери · Метрологія

Рівні точності вимірювань — від оглядового до високоточного

ЩО ВКЛЮЧАЄ

- Точність лазерного сканування
- Щільність і якість хмари точок
- Допустимі похибки моделювання
- Відповідність натурним обмірам

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

- Контроль якості цифрової фіксації
- Оцінка надійності вимірювань
- Обґрунтування проєктних рішень
- Порівняння моделі з реальним станом

РОЛЬ У HBIM Визначає достовірність геометрії для дослідження, консервації, реставрації та технічного аналізу об'єкта архітектурної спадщини.

LOG формує геометричну виразність моделі, а LOA підтверджує її точність і достовірність — разом вони дають надійну основу для дослідження, реставрації та збереження культурної спадщини.

РОЗДІЛ 2 Рис. 2.6 Класифікація рівнів деталізації HBIM — LOG та LOA

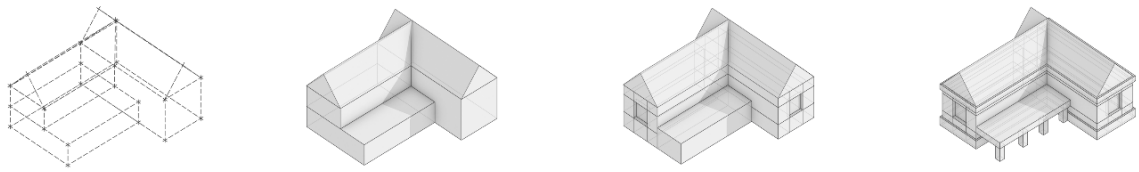
Рис. 2.6 Класифікація рівнів деталізації HBIM - LOG та LOA

РІВЕНЬ ЗНАНЬ (LOK) ТА ІНФОРМАЦІЙНОГО НАПОВНЕННЯ (LOI)

Дві взаємопов'язані складові просторової достовірності та точності HBIM-моделі

РІВЕНЬ ЗНАНЬ · LOK

LOK (Level of Knowledge) відображає рівень наявних знань про історичний об'єкт і ступінь його цифрової реконструкції.



LOK 1 · Низький
Фрагментирні джерела

LOK 2 · Середній
Загальна реконструкція

LOK 3 · Високий
Архівно підтверджений

LOK 4 · Дуже високий
Мінімальна невизначеність

Рівні знань про об'єкт — від фрагментарних джерел до документально підтверджених

ЩО ВКЛЮЧАЄ

- Повноту та достовірність джерел
- Ступінь інтерпретації даних
- Рівень невизначеності реконструкції
- Автентичність історичних етапів

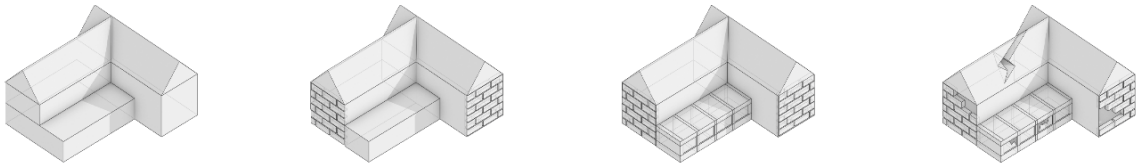
ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

- Оцінка надійності відтворення
- Обґрунтування історичної достовірності
- Визначення рівня невизначеності
- Основа для наукових і реставраційних рішень

РОЛЬ У HBIM Визначає надійність відтворення геометрії, матеріалів, історичних етапів та автентичних елементів пам'ятки.

РІВЕНЬ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАПОВНЕННЯ · LOI

LOI (Level of Information) визначає обсяг і якість атрибутивних та семантичних даних, що супроводжують елементи HBIM-моделі.



LOI 1 · Ідентифікація
Базові дані об'єкта

LOI 2 · Матеріали
Матеріали та характеристики

LOI 3 · Функції та семантика
Атрибути й призначення

LOI 4 · Стан і пошкодження
Повний опис моделі

Рівні інформаційного наповнення — від базових атрибутів до повного семантичного опису

ЩО ВКЛЮЧАЄ

- Матеріали та характеристики
- Функції й призначення елементів
- Історичні та семантичні атрибути
- Дані про стан, пошкодження й зміни

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

- Підтримка досліджень і реставрації
- Документування змін і пошкоджень
- Інтеграція історичних і технічних даних
- Підґрунтя для моніторингу та управління

РОЛЬ У HBIM Формує зміст моделі та забезпечує повноцінне інформаційне представлення об'єкта архіектурної спадщини.

У HBIM LOK і LOI взаємопов'язані: LOK визначає ступінь достовірності знань про об'єкт, а LOI — повноту й якість його інформаційного наповнення. Разом вони забезпечують надійну основу для дослідження, реставрації та збереження культурної спадщини.

РОЗДІЛ 2 Рис. 2.7 Класифікація рівнів деталізації HBIM — LOK та LOI

Рис. 2.7 Класифікація рівнів деталізації HBIM - LOK та LOI

Четвертий вимір (рис. 2.7) – рівень інформаційного наповнення (Level of Information – LOI) – стосується не геометрії, а семантичного наповнення моделі, тобто обсягу відомостей, пов'язаних з кожним її елементом. На нижніх рівнях LOI це лише базові ідентифікатори: назва, матеріал, приблизний вік. На вищих рівнях – повна атрибутивна характеристика: технологія будівництва, хронологія реставраційних втручань, актуальний стан збереженості та рекомендації щодо подальшого використання. LOI зростає поступово в процесі накопичення даних архівних, натурних і лабораторних досліджень [185; 186].

У сучасних дослідженнях з управління об'єктами архітектурної спадщини Р. Салах (R. Salah), Н. Ґечі (N. Géczy) та К. Айтайне Карольфі (K. Ajtayné Károlyfi) пропонують синтетичне поняття – рівень цифрового двійника (Level of Digital Twin – LoDT). Воно охоплює не лише статичну геометрію і семантику, а й динамічні дані моніторингу в реальному часі: температурно-вологісний режим конструкцій, деформації несучих елементів, параметри мікрокліматичного впливу. LoDT характеризує загальний рівень інформаційної повноти цифрової моделі об'єкта архітектурної спадщини – наскільки точно вона фіксує й відображає фактичний його стан [185; 193].

Тож, яким чином ці категорії деталізації закріплені в чинних міжнародних стандартах і наскільки такі стандарти придатні для роботи з об'єктами архітектурної спадщини? Відповідь є неоднозначною – і саме в цьому полягає головна складність уніфікації підходів у глобальному вимірі (рис. 2.8).

Найширше представлена в практиці HBIM американська класифікація AIA/BIMForum, що охоплює шість рівнів – від LOD 100 до LOD 500. Її поширеність зумовлена інтеграцією в більшість BIM-платформ і термінологічною доступністю для фахівців архітектурної галузі. Проте ця сама простота виявляється її суттєвим обмеженням під час роботи з об'єктами архітектурної спадщини: класифікація не передбачає механізму відображення невизначеності даних, не дає змоги вести в одній моделі різні хронологічні шари, а традиційні будівельні технології не вписуються в логіку системи, розробленої для конструкцій зі сталі та бетону [187; 196].

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ КЛАСИФКАЦІЇ РІВНІВ ДЕТАЛІЗАЦІЇ BIM / HBIM

Об’єкти архітектурної спадщини · системи рівнів деталізації BIM / HBIM

СТАНДАРТ	КЛАСИФІКАЦІЯ	ОСНОВНИЙ АКЦЕНТ	ЗАСТОСУВАННЯ	ОСОБЛИВОСТІ ДЛЯ HBIM
AIA / BIMForum США	**Рівні інформ. потреби**	Геометрія та інформація	Нове будівництво (адаптується)	Найпоширеніший; слугує базовим для більшості HBIM-проєктів.
ISO 19650 Міжнародна	**Рівні інформ. потреби**	Інформаційний менеджмент	Будівлі будь-якого типу	Регулює процес передавання інформації, а не геометрію; основа цифрових двійників.
UNI 11337 Італія	**LOD A-G**	Геометрія та семантика	Об’єкти архітектурної спадщини	Розділяє геометричну (LOG) та інформаційну (LOI) складові як незалежні — важливо для пам'яток.
PAS 1192 / ISO 19650 Велика Британія	**LOD / LOI**	Геометрія та інформація	Будівлі будь-якого типу	Основа ISO 19650; розрізняє графічну та неграфічну інформацію.
HBIM-специфічні Академічні	**LOG / LOI / LOK / LOA**	Геометрія, інформація та знання	Виключно об’єкти архітектурної спадщини	Враховує невизначеність вихідних даних; підтримує темпоральний і структурний виміри.

РОЗДІЛ 2 Рис. 2.8 Порівняння підходу до рівнів деталізації у міжнародних стандартах

Рис. 2.8 Порівняння підходу до рівнів деталізації у міжнародних стандартах

Істотним кроком у напрямі врахування специфіки спадщини стало запровадження в Італії норми UNI 11337 з градацією LOD від A до G, у якій геометричні та інформаційні складові виокремлено як відносно незалежні параметри. Саме ця роздільність виявилася принципово важливою: для об'єктів архітектурної спадщини – це цілком природна ситуація, коли висока геометрична точність лазерного сканування не підкріплена рівнозначною повнотою семантичних даних і навпаки. На основі UNI 11337 сформувалася значна частина академічних HBIM-класифікацій, орієнтованих на об'єкти культурної спадщини [169; 192].

Принципово інший підхід до проблеми представлений у стандарті ISO 19650, який акцентує увагу не на геометричній точності, а на визначенні обсягу інформації, необхідної для ухвалення конкретного управлінського рішення. Поняття рівня інформаційних потреб (Level of Information Need) описує мінімальний обсяг даних, достатній для кожного етапу управління об'єктом. Для реставраційних проєктів, в яких інформаційні потреби суттєво змінюються від стадії попередніх досліджень до стадії виконання робіт, цей підхід виявляється особливо доречним [191; 192].

З огляду на це, варто звернутися до британського стандарту PAS 1192, що став основою для ISO 19650 і запровадив важливе розмежування між графічною інформацією (геометрією) та неграфічною інформацією (атрибутами), встановивши для кожної складової окремий рівень деталізації. Це розмежування концептуально відповідає підходу LOG/LOI і утворює природну методологічну основу для адаптації стандарту до потреб HBIM. Досвід застосування PAS 1192 для об'єктів спадщини у Великій Британії підтверджує придатність стандарту за умови його цілеспрямованої методологічної адаптації [188; 197]. Жодна з проаналізованих систем не дає вичерпної відповіді на специфічні запити HBIM щодо об'єктів архітектурної спадщини. Це зумовлює потребу у формуванні власної класифікаційної схеми, яка акумулювала б сильні сторони кожного зі стандартів і водночас усувала їхні очевидні прогалини – насамперед у частині

врахування невизначеності вихідних даних і типологічного різноманіття об’єктів культурної спадщини.

З огляду на результати аналізу міжнародних стандартів і практики реальних проєктів у цьому дослідженні пропонується уніфікована шестирівнева класифікаційна схема (рис. 2.9), яка інтегрує геометричну точність, семантичне наповнення та рівень знань (LOK) і орієнтована на практичні потреби управління пам’ятками в українському правовому й інституційному контексті. Зокрема, схема розроблена з урахуванням вимог ДБН А.2.2-3:2014 «Склад та зміст проєктної документації на будівництво» [140], ДБН А.2.2-14:2016 «Склад та зміст науково-проєктної документації на реставрацію пам’яток – об’єктів архітектури та містобудування» [204] і ДБН Б.2.2-3:2021 «Склад, зміст, порядок розроблення, погодження та затвердження науково-проєктної документації для будівництва» [205].

LOD 100 є вихідним рівнем класифікації. На цьому рівні об’єкт архітектурної спадщини представлений узагальненим геометричним об’ємом без деталізації окремих конструктивних елементів, з точністю ±20 см. Для первинного реєстрування об’єкта в державному реєстрі культурної спадщини та базової просторової прив’язки до картографічної основи такого рівня деталізації достатньо. Семантична складова обмежена мінімально необхідним набором атрибутів: назва, тип, охоронний статус, хронологічні рамки [188; 197; 206].

LOD 200 забезпечує перехід від загальної просторової характеристики до конкретизації складових об’єкта. Точність ±10 см робить можливою ідентифікацію окремих функціональних зон, конструктивних систем і матеріалів основних елементів. Цей рівень є мінімально необхідним для попередньої оцінки технічного стану об’єкта архітектурної спадщини та підготовки техніко-економічного обґрунтування реставрації. Інформаційна складова охоплює відомості про попередні дослідження й реставраційні втручання, що формують початковий масив даних для подальшого накопичення знань про об’єкт [187; 196].

LOD 300 є найпоширенішим рівнем у практиці реставраційного проєктування. Геометрична точність ±5 см узгоджується з результатами наземного лазерного сканування та фотограмметрії після оброблення й інтеграції просторових даних у цифрову модель. За такого рівня точності можна відтворити карнизи, портали, декоративні обрамлення та конструктивні з'єднання. Атрибутивна інформація містить детальний опис матеріалів, стану збереженості окремих елементів і характеру їхніх пошкоджень. Модель цього рівня використовують для розроблення проєктної, кошторисної та тендерної документації [194; 195; 208].

Рівні LOD 350 і LOD 400 використовують на етапах координації та виконання реставраційних робіт. Для LOD 350 прийнято геометричну точність ±2 см, якої достатньо для узгодження робіт між виконавцями та перевірки сумісності окремих конструктивних елементів. LOD 400 передбачає геометричну точність ±2-3 мм, що досягається із застосуванням наземного лазерного сканування, високоточної фотограмметрії та технологій цифрового виробництва. Моделі цього рівня використовують під час виготовлення, реставрації та монтажу індивідуальних архітектурних елементів, а допустимі відхилення встановлюють відповідно до нормативних вимог [194; 200; 208].

LOD 500 є завершальним рівнем класифікації та відповідає моделі «як збудовано» (as-built). Для об'єктів архітектурної спадщини модель цього рівня містить повну атрибутивну інформацію про кожен елемент, включаючи матеріали, технологію будівництва, хронологію змін, поточний технічний стан і виконані ремонтно-реставраційні втручання. Геометрія моделі відображає фактичний стан об'єкта після завершення робіт, а її точність узгоджується з вимогами нормативних документів, що регламентують виконання та приймання ремонтно-реставраційних робіт [194; 200]. LOI 500 передбачає три повністю заповнені категорії: атрибутивну (вичерпна характеристика елементів), нормативну (акти приймання виконаних робіт, фінальне охоронне зобов'язання, відповідність ДБН А.2.2-14:2016 «Склад та зміст науково-проєктної документації на реставрацію пам'яток архітектури та містобудування» [140] і

ДБН Б.2.2-3:2021 «Склад та зміст історико-архітектурного опорного плану населеного пункту») [205] та семантичну (задокументована еволюція функцій і значень). LOD 500 є інформаційною основою для функціонування цифрового двійника та управління об’єктом архітектурної спадщини [185; 186].

Зважаючи на наведене, запропонована шестирівнева шкала не є універсальним рішенням для всіх типів об’єктів. Різні типи об’єктів архітектурної спадщини мають суттєво відмінні конструктивні системи, матеріали й ступені збереженості, що унеможливлює застосування однакових рівнів деталізації без типологічних коригувань. Уніфікована шкала LOD є аналітичним інструментом, а не жорсткою нормою. Для різних типів об’єктів архітектурної спадщини вона потребує відповідних типологічних коригувань: конструктивна специфіка, матеріали, ступінь збереженості й функція об’єкта визначають власні вимоги до мінімально необхідного і максимально доцільного рівнів деталізації [189; 201] (рис. 2.9).

Фортифікаційні споруди – замки, фортеці, башти, міські мури – належать до найскладніших класів об’єктів для HBIM. Їхня конструктивна система відзначається значними руйнаціями й, що особливо важливо, тривалою та вкрай неоднорідною будівельною хронологією: мурування XIII ст. межує в них з конструкціями XVII ст. і перебудовами XIX ст. Для таких об’єктів стандартна шкала LOD без періодичного в часі виміру (LOD_T) є недостатньою, оскільки не забезпечує відображення кількох хронологічних шарів в єдиній інформаційній структурі [198].

Культові споруди – собори, церкви, монастирські комплекси – формують принципово інший тип вимог: надзвичайно насичене декоративне оздоблення поєднується в них з масивними несучими конструкціями. Та сама будівля потребує одночасно LOG 3–4 для стін і перекриттів та LOG 5 для капітелей, іконостасів і різьблення. Розв’язанням цієї суперечності є ієрархічний підхід, за якого різні елементи однієї моделі функціонують на відмінних рівнях геометричної деталізації [195; 200].

Для інженерних споруд – мостів, акведуків, підпірних стін, що мають статус пам’яток, – визначальною специфікою є необхідність структурного аналізу безпосередньо в середовищі HBIM-моделі. Відповідно запроваджено поняття структурного рівня деталізації (Structural Level of Detail – SLD), узгодженого з вимогами методів скінченних або дискретних елементів, що застосовуються для розрахунку кам’яних конструкцій. Геометричні та семантичні складові на цьому рівні слугують не лише для документування об’єкта, а й для прогнозування поведінки споруди під навантаженням [196; 199].

Такі споруди здебільшого є частково або повністю зруйнованими, що разом із тривалою й неоднорідною будівельною хронологією суттєво ускладнює їх інформаційне моделювання. Стандартна LOD-логіка виявляється в таких умовах неефективною: елемент, що зберігся лише у вигляді фундаменту, матиме низький LOG (відсутній об’єкт сканування), проте потенційно високий LOI (архівні матеріали можуть містити детальну інформацію про оригінал). Ця розбіжність між рівнями потребує окремої концепції диференційованої деталізації, що не зводить одне до одного [169; 192].

Великі ансамблі – монастирі, замкові комплекси, садиби – актуалізують проблему ресурсного забезпечення: досягти однаково високої деталізації для всіх споруд комплексу одночасно неможливо. Розв’язком є ієрархічна модель: основна модель ансамблю на LOD 200–300 та вкладені підпорядковані моделі окремих споруд і елементів на LOD 400–500. Такий підхід дає змогу сконцентрувати ресурси там, де це об’єктивно необхідно [202; 203].

Після встановлення необхідного рівня деталізації для конкретного типу об’єкта архітектурної спадщини виникає не менш важливе практичне питання: яким способом цей рівень досягається. Ключову роль у цьому відіграє процес Scan-to-HBIM – перетворення хмари точок на структуровану інформаційну модель, де кожен технічний крок безпосередньо визначає досяжну деталізацію кінцевого продукту.

ТИПОЛОГІЧНА ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ РІВНІВ ДЕТАЛІЗАЦІЇ НВІМ

РІВНІ ДЕТАЛІЗАЦІЇ НВІМ

РІВЕНЬ	НАЗВА	ГЕОМЕТРИЧНА ТОЧНІСТЬ	ЗАСТОСУВАННЯ В BIM
LOD 100	Концептуальний	± 20 см	Первинний облік, реєстр пам'ток, кадастр.
LOD 200	Схематичний	± 10 см	Техніко-економічне обґрунтування, реставрація.
LOD 300	Детальний	± 5 см	Проєктна документація, тендерні матеріали.
LOD 350	Координаційний	± 2 см	Координація реставраційно-цінних підрядників.
LOD 400	Виконавчий	± 5 мм	Виконавча документація, авторський нагляд.
LOD 500	Архівний (as-Build)	± 2 мм	Модель «як збудовано», цифровий двійник, довгострокове управління.

ЗА ТИПОМ ОБ'ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ

ТИП	ПРИКЛАД МОДЕЛІ	ОБЛІК	РЕСТАВРАЦІЯ	УПРАВЛІННЯ	ДОДАТКОВИЙ ВИМІР
Фортифікаційні споруди Замки, Фортеці	 Кам'янець-Подільська-фортеця	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD_T*
Культові споруди Церкви, Собори	 Церква св.Миколая	LOD 200	LOD 350	LOD 500	Розширений LOI
Цивільна Архітектура Палаци, Садиби	 Палац Мистецтв, Прикарпаття	LOD 200	LOD 300	LOD 400-500	Стандартний LOI
Інженерні споруди Мости, Акведуки	 Ірпінський Міст	LOD 200	LOD 300	LOD 400 + SLD**	SLD**
Промислова Архітектура	 Робітничий гуртожиток, м.Ізюм	LOD 100	LOD 300	LOD 400	Базовий LOI
Ансамблі, комплекси	 Успенський собор Києво-Печерської Лаври	LOD 100-200	LOD 200-300	LOD 300-400	CityGML

РОЗДІЛ 2 Рис. 2.9 Класифікаційна схема і типологічна диференціація рівнів деталізації

Рис. 2.9 Класифікаційна схема і типологічна диференціація рівнів деталізації

Перетворення хмари точок на структуровану HBIM-модель у практиці отримало назву Scan-to-BIM. Для об’єктів архітектурної спадщини цей процес є ключовою методологічною послідовністю, в якій кожен крок безпосередньо визначає, який рівень деталізації буде реалізовано в підсумку [194; 195].

Процес починається зі збору просторових даних. Якість хмари точок визначає верхню межу LOG: побудувати більш деталізовану модель, ніж дозволяють вихідні вимірювання, неможливо. Сучасне обладнання класу Faro Focus або Leica BLK360 може забезпечити точність 2–3 мм на відстані до 30 м, що відповідає LOG 4–5. Проте реальні умови можуть вносити обмеження – наприклад, закритий доступ або складна геометрія можуть знижувати рівень деталізації [163; 193].

Найважчим кроком є сегментація – перетворення суцільного масиву точок на структуровані елементи, що відповідають конкретним архітектурним компонентам. Ручна сегментація для типової будівлі потребує від 50 до 200 годин кваліфікованої праці. З огляду на це, автоматизація цього процесу засобами машинного навчання є нині одним із найактуальніших напрямів досліджень: алгоритми, здатні самостійно ідентифікувати стіни, арки, колони й карнизи в неструктурованому масиві точок, можуть суттєво скоротити час і вартість переходу між рівнями деталізації [194; 201].

Класифікаційно-орієнтований підхід – групування елементів моделі за типами та матеріалами безпосередньо на етапі сегментації хмари точок – робить можливим структурування подальшої роботи і скорочення часу переходу від LOD 200 до LOD 300 у середньому на 30–40% порівняно з традиційним послідовним моделюванням. Такий результат засвідчує помітне підвищення продуктивності без концептуальних змін у методології [194; 195].

Застосування алгоритмів штучного інтелекту відкриває перспективи подальшої автоматизації керування рівнями деталізації. Алгоритми глибокого навчання вже класифікують архітектурні компоненти у хмарах точок із точністю, близькою до результатів ручної обробки. Це робить можливим автоматичне призначення рівнів деталізації для різних зон моделі за заздалегідь визначеними

правилами, що залежать від типу елемента та його значущості для збереження цінності об’єкта архітектурної спадщини [189; 201].

Технічна точність сканування та геометрична відтворюваність є лише двома вимірами якості HBIM-моделі. Не менш важливим, а подеколи й визначальним, є ступінь семантичного наповнення моделі, тобто те, наскільки змістовно описані її інформаційні шари. Саме ця складова забезпечує перехід від статичної документальної копії до повноцінного цифрового двійника об’єкта архітектурної спадщини.

Цифровий двійник принципово відрізняється від традиційної точної моделі: це динамічна цифрова репрезентація об’єкта, що безперервно оновлюється на основі даних сенсорного моніторингу відповідно до змін у фізичному стані споруди. У цій концепції семантична складова рівнів деталізації – інформація, закладена в атрибутах елементів моделі, – набуває визначального значення [185; 193].

LOI цифрового двійника об’єкта архітектурної спадщини виходить за межі статичних атрибутів. Поряд із відомостями про матеріал, вік і стан збереженості модель містить динамічні параметри, що змінюються в реальному часі: температурно-вологісний режим у конструкціях, деформації несучих елементів, ознаки мікробіологічного ураження. Інтеграція статичних і динамічних шарів в єдину HBIM-модель є одним із головних технічних завдань сучасного управління об’єктами культурної спадщини [185; 186].

Семантично збагачена HBIM-модель також робить можливою інтеграцію із зовнішніми базами даних культурної спадщини та геоінформаційними системами. Стандарт CityGML забезпечує багатомасштабне представлення моделі: від загальноміського рівня (LoD1) до деталізованого опису окремого архітектурного елемента (LoD4). Завдяки цьому HBIM-модель стає органічною складовою ширшої цифрової екосистеми збереження спадщини [202; 203].

Онтологічний підхід, заснований на використанні формалізованих онтологій CIDOC-CRM, IFCOwl або спеціалізованих HBIM-онтологій, дає змогу подати цифрову модель у вигляді графа знань. У такій моделі кожний елемент

пов’язаний із учасниками його створення та реставрації, використаними матеріалами, технологіями, часовим періодом і функціональним призначенням. Така організація даних забезпечує цілісне подання знань про об’єкт архітектурної спадщини та найбільш повно відображає концепцію LOK [186; 192].

Концепція Adaptive LOD – адаптивного рівня деталізації – передбачає динамічне керування моделлю: дані зберігаються в повному обсязі, однак система автоматично надає їх на рівні деталізації, що відповідає конкретному запиту та категорії користувача. Реставратор, який досліджує окрему капітель, отримує LOG 5; адміністратор, що планує загальні охоронні заходи – LOG 2. Таким чином, сама модель функціонує в різних режимах залежно від різних завдань [185; 193].

В межах цих підходів формується ще одне поняття – рівень цифрової представленості (Level of Digital Representation, LoDR). Він характеризує не лише технічні параметри моделі, а й контекст її функціонування: ступінь інтегрованості в цифрову екосистему управління об’єктом архітектурної спадщини, характер зв’язків із зовнішніми системами та рівень доступності для різних категорій користувачів. У цьому аспекті рівень деталізації набуває не суто технічного, а організаційно-управлінського змісту [185; 193].

Принципово важливою є така теза: модель із LOG 5 і LOI 5, що зберігається у закритому репозиторії без доступу для реставраторів і дослідників, за реальною ефективністю може поступатися моделі з LOD 300, яку команда використовує щоденно і щомісяця оновлює. Ефективність HBIM визначається не лише технічними характеристиками, а й тим, чи функціонує модель у реальній практиці управління об’єктом [186; 191].

Методологія системного аналізу пропонує розглядати класифікацію рівнів деталізації HBIM не як сукупність технічних специфікацій, а як елемент комплексної системи управління знаннями про об’єкт архітектурної спадщини. Рівні деталізації є не ізольованими технічними категоріями, а вузлами єдиної

інформаційної мережі, що визначаються через зв’язки з іншими елементами системи [169; 192].

Дворівневий аналіз проблемної ситуації у сфері HBIM-класифікацій виявляє три вузли напруги: термінологічну неузгодженість між різними “школами” і стандартами, відсутність чітких методологічних настанов щодо вибору оптимального рівня деталізації для конкретних завдань та нездатність більшості BIM-платформ ефективно опрацьовувати складні нерегулярні геометрії, властиві об’єктам архітектурної спадщини [169; 190].

Функціонально орієнтований підхід дає змогу розв’язати принаймні частину зазначених проблем: рівень LOD для кожного елемента або зони моделі визначається не за принципом максимальної деталізації, а виходячи з конкретних управлінських рішень, для підготовки яких цей елемент призначений. Це дає змогу застосовувати необхідний рівень деталізації лише там, де він потрібний для прийняття рішень, не ускладнюючи модель зайвою інформацією [188; 197].

Практичним інструментом реалізації цього підходу є матриця потреб у рівнях деталізації – документ, що системно визначає необхідний LOD/LOG/LOI/LOK для кожної функції HBIM і кожного типу елементів будівлі. Матриця є складовою BIM Execution Plan для конкретного об’єкта і перетворює класифікацію з абстрактної схеми на дієвий робочий інструмент [186; 191].

Аналіз практики впровадження HBIM виявляє типові помилки, що повторюються незалежно від країни та об’єкта: надмірна деталізація другорядних елементів за недостатньої уваги до архітектурно значущих; змішування геометричного і семантичного рівнів; відсутність чітких критеріїв переходу між рівнями; ігнорування LOK під час роботи з реконструйованими елементами. Систематизація цих помилок є одним із головних внесків методологічних досліджень у практику HBIM [187; 188].

Людський вимір проблеми полягає в тому, що різні учасники проєктної команди: архітектори, реставратори, конструктори, замовники – нерідко вкладають різний зміст у ті самі LOD-вимоги. Термінологічні розбіжності на ранніх стадіях роботи спричиняють значні витрати на виправлення на пізніших

етапах. Рішенням є стандартизація комунікаційних протоколів і запровадження практики спільних контрольних перевірок моделі на кожному основному рівні деталізації [169; 192].

Методологічна чіткість у визначенні рівнів деталізації є необхідною, але недостатньою умовою ефективного HBIM. Не менш важливим є питання про те, як ця класифікація застосовується в часі: яким чином модель змінюється, оновлюється та розвивається разом із об'єкта архітектурної спадщини впродовж усього циклу його існування – від первинного обліку до управління після завершення реставрації.

На відміну від типового будівельного BIM, модель якого набуває остаточного вигляду після здачі об'єкта, HBIM-модель є динамічною системою, що безперервно оновлюється: нові дослідження, реставраційні роботи та зміни стану об'єкта послідовно відображаються в моделі. Організація цього безперервного процесу є суттю управління рівнями деталізації впродовж життєвого циклу об'єкта архітектурної спадщини [186; 191].

У проєктній діяльності можна виокремити три основні сценарії зміни рівня деталізації моделі. Сценарій поетапного підвищення рівня деталізації передбачає перехід від LOD 200 до LOD 400–500 у процесі підготовки до масштабної реставрації, з урахуванням накопичення результатів обстежень, досліджень і проєктних матеріалів. Адаптивна деталізація полягає в одночасному існуванні різних рівнів деталізації в різних частинах однієї моделі залежно від поточних пріоритетів. Підтримувальна актуалізація передбачає регулярне оновлення атрибутів після завершення реставраційних робіт без зміни геометрії [188; 191].

Періодичне версіювання є особливою рисою HBIM, не властивою стандартному BIM. Різні версії моделі відповідають тут не стадіям проєктування, а різним хронологічним станам об'єкта: первинне будівництво XII ст., добудова XVI ст., відновлення після пожежі XIX ст., реставрація 1960-х років. Управління цими періодичними в часі шарами в єдиній системі є одним із найскладніших і найменш розв'язаних методологічних завдань сучасного HBIM [198; 203].

Окремої уваги потребує проблема технологічного старіння: BIM-платформи й формати файлів змінюються, і модель, створена 10–15 років тому, може виявитися нечитабельною. Регулярна міграція даних між платформами та форматами – не технічна надмірність, а необхідна умова збереження цифрової спадщини. Кожна така міграція актуалізує питання повноти збереження рівнів деталізації [185; 191].

Диференційований доступ до моделі за рівнями LOD є ще одним виміром управління, що набуває дедалі більшого значення. LOD 400–500 містить детальну інформацію про конструктивно вразливі місця, несанкціонований доступ до яких може становити загрозу для безпеки об’єкта архітектурної спадщини. Обґрунтованим рішенням є розмежування доступу: публічний – до LOD 200, для реставраторів – до LOD 400, для органів охорони спадщини та власників – до повного LOD 500. У цьому аспекті рівень деталізації також функціонує як інструмент управління ризиками [188; 191].

Розгляд практики управління рівнями деталізації впродовж життєвого циклу об’єктів архітектурної спадщини дає змогу окреслити загальний вектор розвитку класифікаційних підходів у глобальному вимірі. Бібліометричний аналіз, узагальнення проєктного досвіду та технологічні тенденції формують виразну картину з чітким напрямом.

Бібліометричний аналіз публікаційного масиву HBIM за останні роки засвідчує випереджальне зростання досліджень зі стандартизації рівнів деталізації та інтероперабельності між платформами. Чотири основні вектори цього зростання – відкриті стандарти обміну даними (IFC, CityGML), онтології для семантичного опису спадщини, автоматизація класифікації за допомогою машинного навчання та інтеграція з цифровими двійниками й IoT-сенсорами [189; 201].

Аналіз тенденцій розвитку HBIM-класифікацій дає змогу окреслити перспективні напрями подальших досліджень, серед яких вирізняється розроблення HBIM-специфічних рівнів деталізації для категорій об’єктів архітектурної спадщини, що досі залишаються поза межами стандартних

класифікаційних схем: підводна архітектурна спадщина, руйновані об’єкти, великомасштабні ансамблі, нематеріальна спадщина у прив’язці до конкретних місць. Для кожної з цих категорій стандартні шкали LOD є недостатніми – кожна потребує власної класифікаційної логіки. Окремою сферою є стандартизація HBIM-деталізації для судово-технічних експертиз і страхування об’єктів архітектурної спадщини [185; 202].

Методи неруйнівних досліджень (георадарне зондування (GPR), магнітометрія, термографія, ультразвукові дослідження) забезпечують вивчення внутрішньої будови конструкцій без їх пошкодження. Вони дають змогу виявити приховані металеві елементи, анкери, кріплення, внутрішні порожнини, тріщини, неоднорідності матеріалу та інші дефекти, які не визначаються під час візуального обстеження. Елементи, що є недоступними для зовнішнього спостереження: структура кам’яної кладки, порожнини, тріщини, зони зволоження – можуть бути зафіксовані й просторово прив’язані в HBIM-моделі. Ця інформація потребує окремого рівня деталізації – NDT-LOD (Non-Destructive Testing Level of Detail) [196; 199].

Для України питання стандартизації HBIM-класифікацій набуло нового трагічного виміру: масштабні руйнування архітектурної спадщини внаслідок збройної агресії перетворили оперативне цифрове документування об’єктів архітектурної спадщини на інструмент збереження культурної пам’яті. Навіть модель LOD 100–200, створена в умовах воєнної небезпеки, зберігає інформацію, яка інакше була б втрачена безповоротно. Щоб така документація у майбутньому стала основою реставрації, мінімальні вимоги до аварійних рівнів деталізації мають бути визначені нормативно [169; 185].

Завдання, що постало перед Україною, має не лише технічний, а й правовий вимір: навіть найдосконаліша класифікаційна схема залишиться інструментом для вузького кола фахівців доти, доки вона не отримає нормативного закріплення в державній системі охорони культурної спадщини. Саме цей аспект потребує окремого і ретельного розгляду.

Питання про те, які рівні LOD є обов’язковими під час взяття об’єкта на державний облік, видачі дозволу на реставрацію та приймання виконаних робіт, є не академічною дискусією, а правовою реальністю. Провідні європейські країни рухаються в напрямі нормативного закріплення мінімально допустимих рівнів деталізації для різних видів офіційних документів. Це не бюрократична надмірність, а умова якості та повноти цифрової документаційної бази культурної спадщини держави [191; 197].

Починаючи з 2016 року, Велика Британія вимагає BIM Level 2 для всіх державних будівельних проєктів, зокрема для реставрації об’єктів архітектурної спадщини. Іспанія через Tecnifex і за рекомендаціями Міністерства культури визначає мінімальні LOD для паспортів об’єкта архітектурної спадщини. Італія частково надала UNI 11337 статус обов’язкового стандарту для державних контрактів. Кожна з цих моделей має певні обмеження, проте кожна формує відповідь на питання, яке в Україні досі не отримало нормативного врегулювання [169; 188].

Чинне українське законодавство у сфері охорони культурної спадщини – Закон України «Про охорону культурної спадщини» та відповідні підзаконні акти – не містить жодних вимог до цифрового документування або рівнів деталізації BIM-моделей. Це суттєва прогалина, що потребує заповнення. Водночас загальна стратегія впровадження BIM у будівельній галузі України формує формально-правовий фундамент, на якому може бути вибудована галузева HBIM-стандартизація [186; 187].

Розроблення нормативного документа, що встановлював би мінімальні LOD для різних офіційних документів у сфері управління об’єктами архітектурної спадщини, потребує міждисциплінарної команди: фахівців з охорони спадщини, BIM-практиків і юристів. Шестирівнева класифікація, запропонована в цій роботі, може слугувати технічним ядром для цього документа. При цьому необхідно диференціювати вимоги за категоріями пам’яток: об'єкти всесвітнього, національного, місцевого значення та щойно

виявлені мають різний охоронний статус і різний обсяг доступних ресурсів [188, 197].

Окремої уваги потребує питання нормативних стандартів для документування об’єктів архітектурної спадщини, що зазнали руйнівних впливів. Аварійна документація на LOD 100–200, виконана в умовах обмеженого часу та ресурсів, зберігає критично важливу інформацію. Щоб вона стала основою для майбутньої реставрації, а не лише архівним матеріалом, мінімальний обов’язковий рівень такого документування має бути чітко визначений і методологічно обґрунтований [185; 193].

Порівняльний аналіз, здійснений у цьому дослідженні, фіксує формування двох магістральних парадигм у розвитку класифікацій HBIM. Технологічно орієнтована парадигма зосереджена на удосконаленні методів збору даних і автоматизації їх трансформації в моделі та постійно підвищує технічну межу досяжного LOD. Здійснений аналіз дав змогу сформувати класифікацію HBIM, у якій рівні деталізації враховують інформаційні потреби, повноту даних і особливості документування об’єктів архітектурної спадщини [169; 185]. Запропоновані підходи можуть бути використані під час розроблення національної методології HBIM для об’єктів архітектурної спадщини України [192; 197].

Отже, класифікація рівнів деталізації HBIM для об’єктів архітектурної спадщини є не статичною технічною схемою, а динамічною методологічною системою, що потребує узгодження технічних, семантичних, організаційних і правових вимірів у єдиній логіці.

2.4.Порівняння програмного забезпечення BIM – засоби BIM для опрацювання проєктів для об’єктів культурної спадщини

У комплексному огляді HBIM-фреймворків наявне програмне забезпечення систематизується за критеріями масштабованості, підтримки форматів обміну даними, можливостей семантичного анотування та інтеграції із

зовнішніми системами зберігання даних [193]. Виокремлюються три покоління BIM-платформ для спадщини: перше зорієнтоване на геометричне документування, друге – на управління інформацією, а третє – на інтеграцію із системами моніторингу та цифровими двійниками.

Таким чином, теоретичні засади застосування BIM-технологій у роботі з архітектурною спадщиною є достатньо обґрунтованими в міжнародній науковій літературі. Розуміння цієї методологічної бази є необхідним підґрунтям для переходу до конкретного аналізу програмного забезпечення, адже саме теоретичні вимоги до HBIM визначають критерії оцінювання платформ. Тому наступним кроком є розгляд провідних BIM-рішень та їхньої відповідності специфіці роботи з об’єктами архітектурної спадщини.

Ринок програмного забезпечення для інформаційного моделювання будівель є надзвичайно різноманітним: від потужних комерційних рішень на кшталт Autodesk Revit, Graphisoft Archicad, Allplan та Bentley OpenBuildings до відкритих платформ – FreeCAD, Bonsai (BlenderBIM) та OpenBIM-інструментів. Вибір програмного забезпечення для роботи з об’єктами архітектурної спадщини, є нетривіальним завданням, оскільки жодна зі стандартних платформ не була спочатку розроблена саме для цієї мети.

Бібліометричний аналіз публікацій у галузі HBIM за 2010–2024 рр. засвідчує, що Autodesk Revit є найпоширенішою платформою в академічних дослідженнях HBIM – на неї припадає понад 65% усіх задокументованих прикладів [209]. Водночас зазначається, що популярність Revit не завжди свідчить про його перевагу над альтернативами: у багатьох випадках дослідники обирають знайомий інструмент, а не той, що оптимальний для конкретного завдання.

Критичний бібліометричний аналіз трьох десятиліть розвитку BIM і HBIM (1993–2024 рр.) показує, що перші спроби адаптувати BIM для спадщини натрапили на суттєве обмеження – неможливість точного відтворення криволінійної та нерегулярної геометрії об’єктів архітектурної спадщини у параметричних бібліотеках Revit [189]. Розв’язання цієї проблеми відбувалося

шляхом розроблення спеціалізованих сімейств (families) і адаптованих бібліотек елементів, що суттєво підвищувало трудомісткість проєктів.

У дослідженні відкритого програмного забезпечення для HBIM доведено, що FreeCAD з модулем BIM і BlenderBIM (на основі Bonsai/Blender) є найбільш функціонально розвиненими безкоштовними альтернативами [210]. Перевага відкритих рішень полягає в повній підтримці стандарту IFC (Industry Foundation Classes), тоді як комерційні платформи нерідко реалізують IFC-сумісність лише частково, що призводить до втрати даних під час міжплатформного обміну. У роботі також розглядаються перспективи інтеграції великих мовних моделей (LLM) для автоматизації процесів семантичного анотування в HBIM-моделях.

У результаті дослідження концепції «Exo-HBIM» (Echo-Based Heritage Digital Twin) показано, що жодна з сучасних BIM-платформ не забезпечує нативної підтримки повного циклу – від збирання хмари точок до управління інформацією в реальному часі [211]. Пропонується архітектура, що поєднує можливості Autodesk Revit для параметричного моделювання з відкритими рішеннями для зберігання та обміну даними, зокрема з платформою Linked Open Data.

Огляд провідних платформ засвідчує, що ефективність BIM-рішень для об’єктів архітектурної спадщини значною мірою залежить від якості первинних геопросторових даних, покладених в основу моделі. Без точної геометричної основи навіть найдосконаліша платформа не дасть змогу створити достовірну HBIM-модель. Тому необхідно розглянути методи збору первинних даних, зокрема лазерне сканування та фотограмметрію, у взаємодії з BIM-середовищами.

Точність геометричної основи HBIM-моделі безпосередньо залежить від якості первинних вимірювальних даних. Серед методів дистанційного збору геопросторових даних для об’єктів архітектурної спадщини виокремлюються наземне лазерне сканування (Terrestrial Laser Scanning, TLS), аерофотограмметрія (включно з БПЛА), структуроване світлове сканування та сферична фотозйомка.

Систематичний огляд і порівняльний аналіз методів лазерного сканування та фотограмметрії в поєднанні з BIM встановили, що інтеграція хмари точок, отриманої методом TLS, із середовищем Autodesk Revit є технічно складнішою, аніж у конкурентних платформах, і вимагає додаткових плагінів – ReCap Pro та Dynamo [212]. Натомість для Bentley MicroStation та OpenBuildings існують нативні інструменти для роботи з хмарами точок без конвертації.

У напівавтоматизованому робочому процесі Scan-to-HBIM із класифікацією хмари точок на основі машинного навчання показано, як різні BIM-платформи обробляють сегментовані хмари точок [194]: Autodesk Revit вимагає ручного розміщення параметричних об'єктів за орієнтиром хмари, тоді як PointCab та Scan2BIM дають змогу частково автоматизувати побудову стін і перекриттів. Для Graphisoft Archicad зафіксовано кращу нативну підтримку прямого імпорту хмари точок у форматі E57.

У дослідженні комплексної реконструкції будівель із застосуванням новітніх технологій підкреслюється, що попереднє лазерне сканування є єдиним надійним методом отримання вихідних даних для проєктування у разі часткового руйнування будівлі [224]. Програмне забезпечення Autodesk ReCap, Trimble RealWorks, Scalipso та Leica Cyclone розглядається як основні інструменти первинного оброблення хмар точок перед їхньою передачею до BIM-середовища.

Методологічне підґрунтя для переходу від документування до сталого управління об'єктами архітектурної спадщини через HBIM, представлене на конференції ISPRS HERITAGE 2025, передбачає, що ключовою проблемою є не збирання первинних даних (тут технологічно існують зрілі рішення), а їхнє перетворення на структуровану семантичну модель із підтримуваним у часі циклом оновлення [225]. Саме довгостроковий менеджмент даних, а не одноразове сканування, є справжньою проблемою для збереження архітектурної спадщини.

Узагальнення наведених результатів дає змогу порівняти можливості найпоширеніших BIM-платформ щодо інтеграції геопросторових даних і

реалізації технології Scan-to-HBIM. Основні характеристики таких платформ наведено в табл. 2.6.

Якісно зібрані первинні дані та точна геометрична модель є лише початком повноцінного управління архітектурною спадщиною. Для роботи з мережею об’єктів на міському чи регіональному рівні необхідна інтеграція HBIM із геоінформаційними системами, що суттєво розширює можливості для аналізу та ухвалення управлінських рішень. Різні платформи реалізують цю інтеграцію по-різному, що є одним із ключових критеріїв для їх порівняння.

Таблиця 2.6

Порівняння BIM-платформ за можливостями роботи з геопросторовими даними та реалізації технології Scan-to-HBIM

Платформа	**Підтримка хмар точок**	**Формат E57**	**Засоби Scan-to-HBIM**	**Особливості застосування**	**Джерела**
Autodesk Revit	через Autodesk ReCap	через ReCap	переважно ручне моделювання, використання Dynamo	найбільш поширене середовище, потребує додаткових модулів	[209; 212; 223]
Trimble RealWorks	нативна, спеціалізована платформа	підтримується	часткова автоматизація геометричної реконструкції	призначений для реєстрації, очищення, сегментації, аналізу та моделювання за хмарами точок	[213-216]
Trimble Business Center	нативна	імпорт / експорт E57	переважно підготовка даних; виділення геометричних ознак	геодезично орієнтоване середовище	[217]
Scalypso Modeler / BIM Module	спеціалізована	підтримується в екосистемі Scalypso	напівавтоматизоване Scan-to-BIM-моделювання	реконструкція геометрії за даними лазерного сканування та передавання створених елементів до BIM/CAD-середовищ, зокрема Revit	[222; 223]
Allplan	через інтеграцію Scalypso	через Scalypso, підтримується ASTM E57	часткова автоматизація реконструкції та передавання геометрії	поєднання Scan-to-BIM із нативним BIM-моделюванням	[218-221]

Платформа	Підтримка хмар точок	Формат E57	Засоби Scan-to-HBIM	Особливості застосування	Джерела
Bentley MicroStation / OpenBuildings	нативна	нативна	підтримка роботи без проміжної конвертації	ефективна обробка великих хмар точок	[212]
Graphisoft Archicad	нативна	нативна	прямий імпорт E57	зручна робота з геометрично складними об’єктами	[223]
PointCab / Scan2BIM	спеціалізовані засоби	підтримується	часткова автоматизація побудови стін і перекриттів	використовується як доповнення до BIM-платформ	[223]
Leica Cyclone	первинне опрацювання	нативна	підготовка даних до імпорту	призначене для оброблення результатів лазерного сканування	[224]

Джерело: складено автором на основі [209; 212; 213-218; 221; 223; 224]

Методика переходу від GIS до HBIM і назад у межах оцінювання технічного стану мереж громадських будівель культурної спадщини розглянута в праці Т. Фортунато (T. Fortunato) та співавтори [226]. За результатами порівняльного аналізу платформ встановлено, що ArcGIS та QGIS різною мірою підтримують двосторонній обмін даними з BIM-середовищами: ArcGIS Pro має нативний модуль BIM for ArcGIS з прямою підтримкою файлів Revit, тоді як QGIS потребує проміжної конвертації через формат IFC або CityGML.

Підхід HBIM-HGIS (Heritage GIS) для багаторівневого документування сучасної бразильської архітектури, який запропонували Р. Фернандіс Діонізіу та співавтори [227] демонструють, що Archicad забезпечує кращий нативний експорт у формати CityGML та KML, критично важливі для інтеграції з GIS, тоді як Revit вимагає ручного налаштування параметрів геодезичної прив’язки.

В умовах підходу HBIM-WebGIS, що передбачає публікацію HBIM-даних у відкритому вебсередовищі, виявлено, що FreeCAD разом із IfcOpenShell забезпечує найкращу підтримку відкритих форматів, придатних для публікації у WebGIS, тоді як комерційні платформи нерідко зберігають частину даних у пропрієтарних форматах, ускладнюючи їхнє відкрите поширення [228]. Стандарт IFC 4.3 визначається як ключовий для забезпечення сумісності між BIM і GIS.

Дослідження інтеграції HBIM та GIS через об’єктно-реляційні бази даних PostgreSQL/PostGIS для збереження об’єктів із глинобитними конструкціями – одного з найпоширеніших типів традиційної архітектурної спадщини Середземноморського регіону – встановило, що Autodesk Revit та відкриті рішення на базі IFC однаково ефективно підтримують зв’язок із PostgreSQL, проте відрізняються за підтримкою семантичних атрибутів будівельних матеріалів [229].

Концептуальне підґрунтя для інтеграції знань про спадщину в цифрові моделі через поєднання онтологій, пов’язаних із відкритими даними (LOD), та HBIM представлене на конференції ISPRS HERITAGE 2025 [230].

Оскільки рівень інтеграції із геоінформаційними системами та відкритими форматами істотно відрізняється залежно від програмного забезпечення, доцільно узагальнити ці відмінності у вигляді порівняльної таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Порівняння BIM-платформ за рівнем інтеграції з GIS та підтримкою відкритих стандартів

Платформа	**Інтеграція з GIS**	**CityGML / KML**	**IFC**	**Підтримка відкритих даних**	**Джерела**
Autodesk Revit	ArcGIS Pro, потребує налаштування	обмежена	част-кова	потребує додаткових інструментів	[226; 227; 230]
Graphisoft Archicad	висока	нативний експорт	висока	придатне для інтеграції з GIS	[186; 227]
FreeCAD + IfcOpenShell	через IFC	підтримується	повна	найкраща підтримка відкритих форматів	[210; 228]
Allplan	добра – UTM, SHP, геоприв'язка та геодані	CityGML – через спеціалізований Add-On; KMZ – нативний	висока	висока – IFC, CityGML, SHP, LandXML, KMZ та ін	[218- 221]

Платформа	Інтеграція з GIS	CityGML / KML	IFC	Підтримка відкритих даних	Джерела
Trimble Business Center	дуже висока – GIS-модуль, ArcGIS, системи координат	KML/KMZ – нативні імпорт та експорт; CityGML – не основний формат	добра / част-кова	висока – IFC, E57, KML/KMZ, SHP, GDB, LandXML та ін.	[217]
Bentley OpenBuildings	висока	підтримується	добра	орієнтоване на великі інфраструктурні проєкти	[193; 226]
BIMserver / OpenBIM	інтеграція через відкриті стандарти	підтримується	повна	забезпечує централізоване керування моделями	[193]

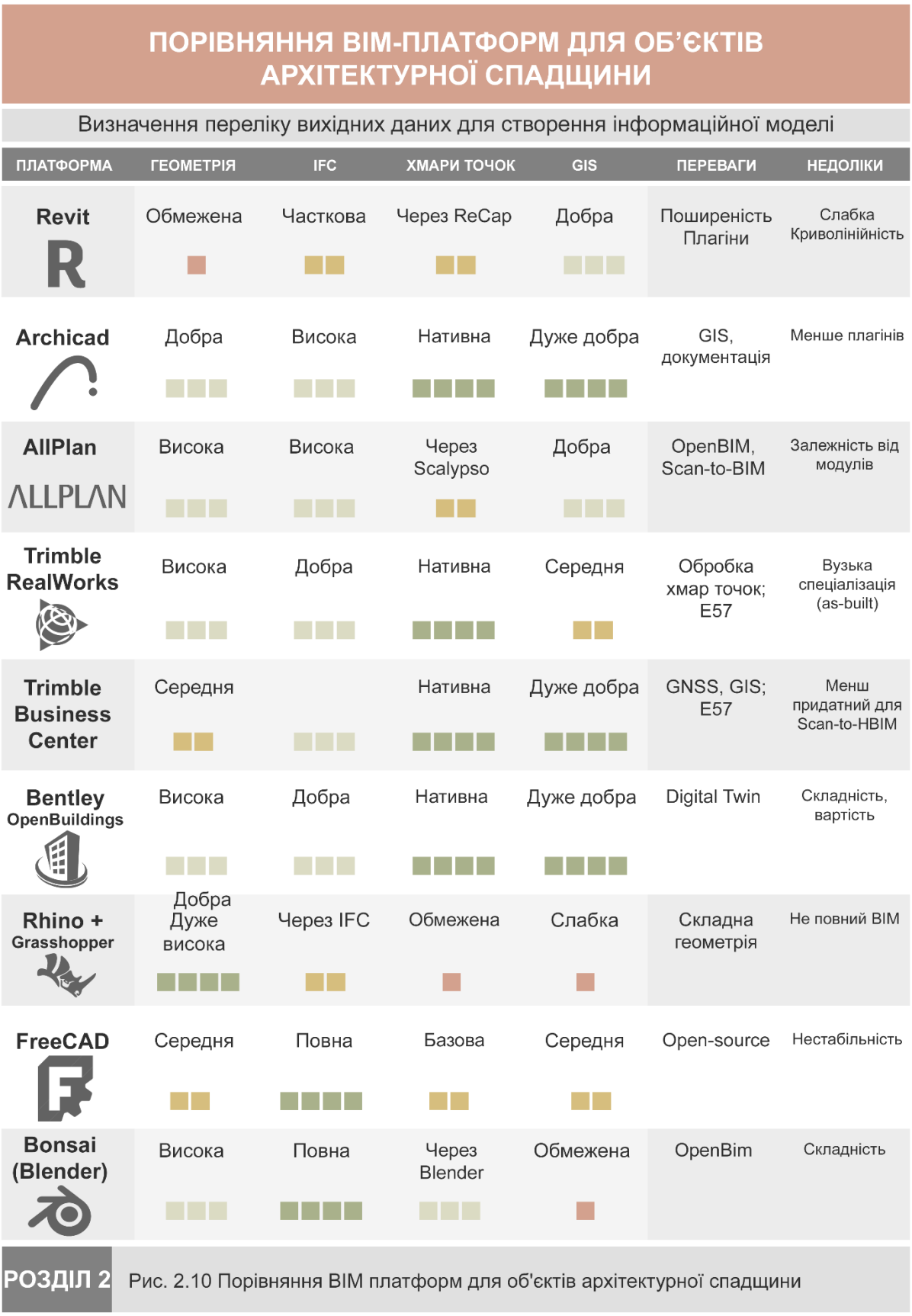
Джерело: складено автором на основі [186; 193; 210; 217; 218-221; 226-228; 230]

Поглиблення GIS-інтеграції безпосередньо пов’язане з ширшою тенденцією до переходу від статичних моделей до динамічних цифрових двійників, здатних відображати актуальний стан об’єкта в режимі реального часу. Ця тенденція породжує нові вимоги до BIM-платформ і відкриває нові можливості для сталого управління архітектурною спадщиною. Тому важливо розглянути, наскільки різні платформи відповідають цим вимогам у межах мультимасштабного аналізу.

Міждисциплінарне дослідження, що охоплює бібліометричний аналіз та опитування фахівців галузі, встановило, що найбільш функціонально досконалою платформою для побудови цифрових двійників об’єктів архітектурної спадщини наразі є Bentley iTwin (раніше – ProjectWise), хоча її впровадження потребує суттєвих інвестицій у технічну інфраструктуру та підготовку персоналу [231]. Серед відкритих альтернатив виокремлюється платформа Eclipse Ditto як перспективний інструмент для управління даними IoT. Аналіз можливостей цифрових двійників і мультимасштабного аналізу дає

змогу перейти до системного порівняння BIM-платформ за конкретними критеріями, доречними для роботи з об’єктами архітектурної спадщини. Така порівняльна характеристика є необхідним узагальненням розглянутих аспектів і дає змогу сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо вибору програмного забезпечення.

Для узагальнення отриманих результатів і більш наочного порівняння можливостей різних програмних рішень доцільно звернутися до порівняльної таблиці (рис. 2.10), у якій зібрано основні BIM-платформи, що використовуються у сфері збереження архітектурної спадщини, та наведено їхнє оцінювання за ключовими критеріями, важливими для HBIM. Такий підхід дає змогу в стислій формі показати сильні та слабкі сторони кожного інструменту й окреслити практичні підходи до вибору програмного забезпечення з урахуванням особливостей об’єкта та поставлених дослідницьких завдань. На підставі проаналізованої наукової літератури можна систематизувати головні критерії порівняння BIM-платформ для роботи з об’єктами архітектурної спадщини та оцінити провідні рішення за кожним із них. До головних критеріїв належать: підтримка нерегулярної геометрії, сумісність з IFC, інтеграція з GIS, можливості семантичного анотування, підтримка хмар точок, вартість ліцензування та наявність україномовної локалізації або технічної підтримки.



ПОРІВНЯННЯ BIM-ПЛАТФОРМ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ

Визначення переліку вихідних даних для створення інформаційної моделі

ПЛАТФОРМА	ГЕОМЕТРІЯ	IFC	ХМАРИ ТОЧОК	GIS	ПЕРЕВАГИ	НЕДОЛІКИ
Revit	Обмежена	Часткова	Через ReCap	Добра	Поширеність Плагіни	Слабка Криволінійність
Archicad	Добра	Висока	Нативна	Дуже добра	GIS, документація	Менше плагінів
AllPlan	Висока	Висока	Через Scalypso	Добра	OpenBIM, Scan-to-BIM	Залежність від модулів
Trimble RealWorks	Висока	Добра	Нативна	Середня	Обробка хмар точок; E57	Вузька спеціалізація (as-built)
Trimble Business Center	Середня		Нативна	Дуже добра	GNSS, GIS; E57	Менш придатний для Scan-to-HBIM
Bentley OpenBuildings	Висока	Добра	Нативна	Дуже добра	Digital Twin	Складність, вартість
Rhino + Grasshopper	Добра Дуже висока	Через IFC	Обмежена	Слабка	Складна геометрія	Не повний BIM
FreeCAD	Середня	Повна	Базова	Середня	Open-source	Нестабільність
Bonsai (Blender)	Висока	Повна	Через Blender	Обмежена	OpenBim	Складність

РОЗДІЛ 2 Рис. 2.10 Порівняння BIM платформ для об'єктів архітектурної спадщини

Рис. 2.10 Порівняння BIM платформ для об'єктів архітектурної спадщини

Систематичний підхід до генерування HBIM-моделей у проєктах архітектурної реставрації засвідчує, що Autodesk Revit є оптимальним вибором для об'єктів архітектурної спадщини із переважно прямолінійною архітектурою (класицизм, бароко з регулярним планом), тоді як для складної криволінійної геометрії (готика, романський стиль, органічна архітектура) ефективнішим є поєднання Rhino/Grasshopper та IfcOpenShell [200].

Детальне порівняння HBIM-фреймворків за критеріями підтримки мультимасштабного аналізу, інтеграції з репозиторіями даних і сенсорними системами встановило, що BIMserver (безкоштовний проєкт з відкритим вихідним кодом) забезпечує найбільшу гнучкість у налаштуванні схем даних, але потребує суттєвих технічних компетенцій для розгортання та підтримки [193].

Дослідження обмежень HBIM систематизує проблеми, з якими стикаються практики під час вибору BIM-платформи для спадщини [209]. Серед ключових обмежень виокремлюються: відсутність стандартизованих бібліотек для традиційних будівельних матеріалів і технік (наприклад, цегляної кладки XIX ст., ліплення, різьблення по дереву), складність параметризації нестандартної геометрії та відсутність галузевих стандартів для HBIM (на відміну від традиційного BIM, де діє ISO 19650).

У дослідженні реконструкції будівель із використанням BIM-технологій в українському контексті підкреслюється, що для пошкоджених і зруйнованих об'єктів культурної спадщини особливу роль відіграє здатність BIM-платформи інтегрувати архівні фотографії, креслення та описи в єдину модель – завдання, у якому Autodesk Revit поступається Graphisoft Archicad завдяки кращим інструментам роботи з 2D-кресленнями та сканованими документами.

Аналіз інтеграції відкритого HBIM із великими мовними моделями (GPT, Gemini, Claude тощо) для автоматизації класифікації та анотування елементів спадщини свідчить про нові можливості для зменшення трудомісткості HBIM-процесів, особливо на етапі семантичного збагачення моделей, де традиційно потрібна значна ручна праця фахівців-реставраторів [210].

Порівняльна характеристика платформ показує, що одним із визначальних чинників під час вибору BIM-рішення є його здатність до взаємодії з іншими програмними середовищами. Особливо гостро ця проблема постає під час залучення фахівців різних дисциплін, кожен із яких може працювати у власному програмному середовищі. Тому питання інтероперабельності та стандартів обміну даними заслуговує на окремий детальний розгляд.

Інтероперабельність – це здатність різних програмних систем до обміну та коректної інтерпретації даних, що є однією з найгостріших проблем у сфері HBIM. Ключовим стандартом обміну даними у BIM є формат IFC (Industry Foundation Classes), який підтримується організацією buildingSMART International. Однак повнота реалізації IFC у різних платформах суттєво різниться. Огляд досліджень з HBIM та управління інформацією встановив, що Archicad та Vectorworks демонструють вищу відповідність стандарту IFC порівняно з Autodesk Revit і Allplan, де під час експорту в IFC можуть втрачатися окремі об’єкти та геометрія, наприклад, зафіксовано пропуск об’єктів, а в деяких тестах — втрату частин сходів, даху, вікон та інших елементів [186; 218].

Систематичний аналіз HBIM-підходів для реставраційних проєктів документує типові помилки під час конвертації з Revit у IFC: втрату параметричних зв’язків, некоректну геолокацію, спрощення геометрії складних криволінійних поверхонь [200]. Рекомендується застосовувати відкритий інструмент IfcOpenShell для перевірки якості IFC-файлів перед передачею іншим учасникам проєкту.

Порівняльне дослідження інтеграції лазерного сканування з BIM аналізує підтримку формату E57 (стандартний формат зберігання хмар точок) у різних платформах [212]. Autodesk Revit підтримує E57 лише через ReCap Pro як проміжний крок, тоді як Trimble RealWorks, Scalypso Modeller, Bentley MicroStation та Leica Cyclone Publisher мають нативну підтримку цього формату. Для відкритих рішень підтримку E57 забезпечують бібліотека libE57 та відповідні модулі в CloudCompare.

Семантична інтероперабельність розглядається як окрема від геометричної проблема, для розв'язання якої пропонується використання онтологій Heritage Building Ontology (HBO) і Building Topology Ontology (BOT) для стандартизованого представлення знань про пам'ятки в машиночитному форматі [230]. Це дасть змогу забезпечити справжню інтероперабельність між різними HBIM-платформами на рівні семантики, а не лише на рівні геометрії.

Сталий менеджмент спадщини вимагає не лише технічної сумісності форматів, а й організаційних протоколів обміну даними – Employer Information Requirements (EIR) і BIM Execution Plan (BEP), адаптованих до специфіки проєктів охорони пам'яток [225]. Пропонується методологічне підґрунтя для розроблення таких протоколів на національному рівні.

Розв'язання проблем інтероперабельності та стандартизації обміну даними є необхідною умовою для масштабування HBIM-практик. Водночас ці технічні питання розвиваються в ширшому контексті загальних тенденцій цифрової трансформації галузі охорони спадщини, пов'язаних зі штучним інтелектом, хмарними обчисленнями та IoT-сенсорикою. Тому завершальним кроком є узагальнення перспектив розвитку HBIM-технологій і формулювання висновків щодо порівняння платформ.

Аналіз сучасного стану розвитку HBIM-технологій свідчить про те, що ця сфера перебуває на порозі якісного переходу від інструменту документування до повноцінної платформи управління знаннями про спадщину. Цьому сприяє конвергенція кількох технологічних напрямів: штучного інтелекту та машинного навчання, хмарних обчислень, IoT-сенсорики та стандартів семантичного інформаційного простору.

У підсумках огляду HBIM-фреймворків підкреслюється, що майбутнє HBIM пов'язане з переходом до хмарних платформ, де модель доступна всім учасникам проєкту одночасно та оновлюється в режимі реального часу [193]. Прогнозується, що відкриті платформи (BIMserver, OpenBIM) з часом наздоженуть комерційні за функціональністю завдяки спільноті розробників, що зростає, і підтримці з боку buildingSMART International.

Інтеграція великих мовних моделей у робочі процеси HBIM може суттєво знизити поріг входу для менших реставраційних організацій і муніципальних управлінь культурної спадщини, яким бракує як кваліфікованих BIM-фахівців, так і фінансових ресурсів для впровадження дорогих комерційних платформ [8].

Для успішного збереження архітектурної спадщини через HBIM необхідна тісна міждисциплінарна співпраця IT-фахівців, архітекторів, реставраторів, істориків та представників органів охорони пам'яток [231]. Технологія сама по собі не є панацеєю – вирішальними є якість організаційних процесів і наявність чіткої стратегії управління даними протягом усього життєвого циклу об'єкта архітектурної спадщини.

Висновки до розділу 2

1. Концептуалізовано структурно-функціональну логіку побудови HBIM-моделі для об'єктів архітектурної спадщини. Доведено, що процес моделювання об'єктів культурної спадщини є послідовною, ієрархічно впорядкованою системою дій, де кожен клас вихідних даних має чітке призначення та інтегрується через спеціалізовані методи збору й оброблення інформації. Установлено, що в сучасному розумінні HBIM виходить за межі статичної 3D-візуалізації та виступає як динамічна інформаційно-аналітична платформа. Поєднання геометричної достовірності з комплексним семантичним, історико-часовим та функціональним наповненням забезпечує фахову підтримку наукового аналізу, обґрунтування реставраційних рішень, моніторингу технічного стану та комплексного управління об'єктом архітектурної спадщини на всіх етапах його життєвого циклу.

2. Обґрунтовано необхідність запровадження багатовимірної системи рівнів деталізації (LOD) і функціонально орієнтованого підходу до моделювання. Виявлено, що наявні міжнародні стандарти (AIA/BIMForum, ISO 19650, UNI 11337) не задовольняють повністю специфічних потреб у сфері охорони культурної спадщини. Аргументовано доцільність розмежування рівнів деталізації на щонайменше три незалежні виміри: геометричну точність (LOG),

семантичну насиченість (LOI) та достовірність даних (LOK), а також введення додаткових вимірів для специфічних типів об’єктів (періодичного в часі LOD_T – для фортифікаційних та культових споруд тощо, структурного SLD – для інженерних систем та будівельних конструкцій). Доведено, що ефективне управління деталізацією має спиратися на матрицю потреб у рівнях деталізації в межах BIM Execution Plan, де вимоги до кожного елемента визначаються конкретними управлінськими та реставраційними завданнями.

3. Визначено технологічні особливості процесу Scan-to-HBIM та специфіку застосування програмного забезпечення. Установлено, що основним механізмом практичного нарощування рівнів деталізації є технологія Scan-to-HBIM, ефективність якої значно підвищується за рахунок автоматизації сегментації хмар точок та класифікаційно орієнтованого моделювання. Порівняльний аналіз BIM-платформ показав відсутність універсального програмного рішення: вибір середовища має базуватися на типології об’єкта, завданнях проєкту та наявних ресурсах. При цьому доведено, що для довгострокового збереження даних про об’єкти архітектурної спадщини стратегічно важливими є відкриті платформи (FreeCAD/BlenderBIM, IfcOpenShell) та підтримка відкритих форматів (IFC), що унеможливлює залежність від комерційних ліцензій.

4. Запропоновано напрями нормативної адаптації методології HBIM до умов України. З огляду на відсутність сучасної цифрової документації для більшості вітчизняних об’єктів архітектурної спадщини обґрунтовано, що пріоритетним завданням для України є не вибір комерційної платформи, а розроблення загальнодержавної методології та нормативної бази на принципах відкритих стандартів сумісності. Як основу для подальшого формування національного нормативного документа у сфері HBIM-документування запропоновано авторську шестирівневу класифікацію (LOD 100–500), яка повністю враховує чинні вимоги українського містобудівного та реставраційного законодавства (ДБН А.2.2-3:2014, ДБН А.2.2-14:2016).

РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ, ПОШКОДЖЕНОГО ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

3.1. Визначення додаткових HBIM-параметрів для об'єктів архітектурної спадщини, пошкоджених внаслідок воєнних дій

Додаткові HBIM-параметри потрібні для перетворення геометричної фіксації пошкодженого об'єкта архітектурної спадщини на керовану інформаційну модель. Їх склад визначено за результатами аналізу воєнних руйнувань, вимог реставраційного проєктування, технічної безпеки й довгострокового моніторингу.

Параметри організовано за принципом розділення ознак: характеристики воєнного впливу й ступеня деструкції; технічна безпека та ризик; документовані історико-архітектурні й автентичнісні характеристики; життєвий цикл відновлення. Така структура не створює нової класифікації цінності об'єктів архітектурної спадщини, а забезпечує перенесення чинних експертних оцінок до HBIM із фіксацією джерела.

Основною вимогою є простежуваність: кожний параметр має визначену одиницю, перелік допустимих значень, просторову прив'язку, автора, дату та рівень достовірності. Це робить можливим порівняння станів і подальшу автоматизацію без підміни фахового рішення алгоритмом (рис. 3.1).

3.1.1. Параметри пошкоджень (Damage-related параметри)

В межах дослідження систематизовано функціональний блок параметрів пошкоджень, придатний для опису об'єкта, його елемента або просторово визначеної зони. Авторський внесок полягає не у створенні нової класифікації технічного стану, а у формалізації в HBIM п'яти взаємопов'язаних груп відомостей: типу і причини впливу, ступеня деструкції, локалізації, механізму руйнування та достовірності фіксації. Для воєнних пошкоджень цей блок доповнено атрибутами події й виду бойового впливу; вони не підміняють інженерного висновку про технічний стан, а доповнюють його.



Рис. 3.1 Класифікація функціональних блоків HBIM параметрів

Тип пошкодження є основним атрибутом, який необхідно фіксувати під час оцінювання руйнувань. У випадку воєнних руйнувань важливо чітко розмежовувати характер впливу: вибухова хвиля, уламкове ураження, пожежа, прогресуюче руйнування (зокрема, обвал суміжних конструкцій) та механічне руйнування внаслідок зіткнення. Кожен із зазначених типів визначає специфічний механізм деградації матеріалів і конструкцій, що безпосередньо впливає на вибір подальших реставраційних рішень. Встановлено, що наявні HBIM-протоколи рідко виділяють тип бойового впливу як окремий параметр, тоді як для постконфліктного відновлення в Україні ця характеристика є критично важливою категорією [236; 237].

Ступінь деструкції фіксується за прийнятою в дослідженні операційною шкалою 0–5 та, за наявності вимірюваних даних, орієнтовною часткою ураження елемента або зони у відсотках [30, 31]. Шкала спирається на принцип градації видимих пошкоджень EMS, але адаптована для HBIM-документування воєнних руйнувань і не є заміною нормативної категорії технічного стану [235; 238]. Відсоток відображає геометричну або матеріальну частку ураження, тоді як рівень 0–5 узагальнює наслідки для цілісності та безпеки; обидва значення зберігаються окремо.

Локалізація пошкодження розглядається як атрибут, що в умовах авторської концепції виходить за межі стандартного геометричного опису. Пропонується здійснювати її фіксацію на декількох рівнях: поверх будівлі, конструктивний елемент (стіна, перекриття, колона, арка), зона фасаду (цоколь, основний ярус, аттик, карниз), зона даху (схил, гребінь даху, карнизний звис), а також зона перекриття. Принципово новим є запропоноване автором використання додаткового геометричного bounding box (рис. 3.2) – спрощеної тривимірної обмежувальної рамки, що охоплює групу пошкоджених елементів або зону руйнувань. Такий підхід не потребує детального моделювання пошкоджень на початковому етапі, натомість дає змогу швидко позначити зону ризику в BIM-просторі.

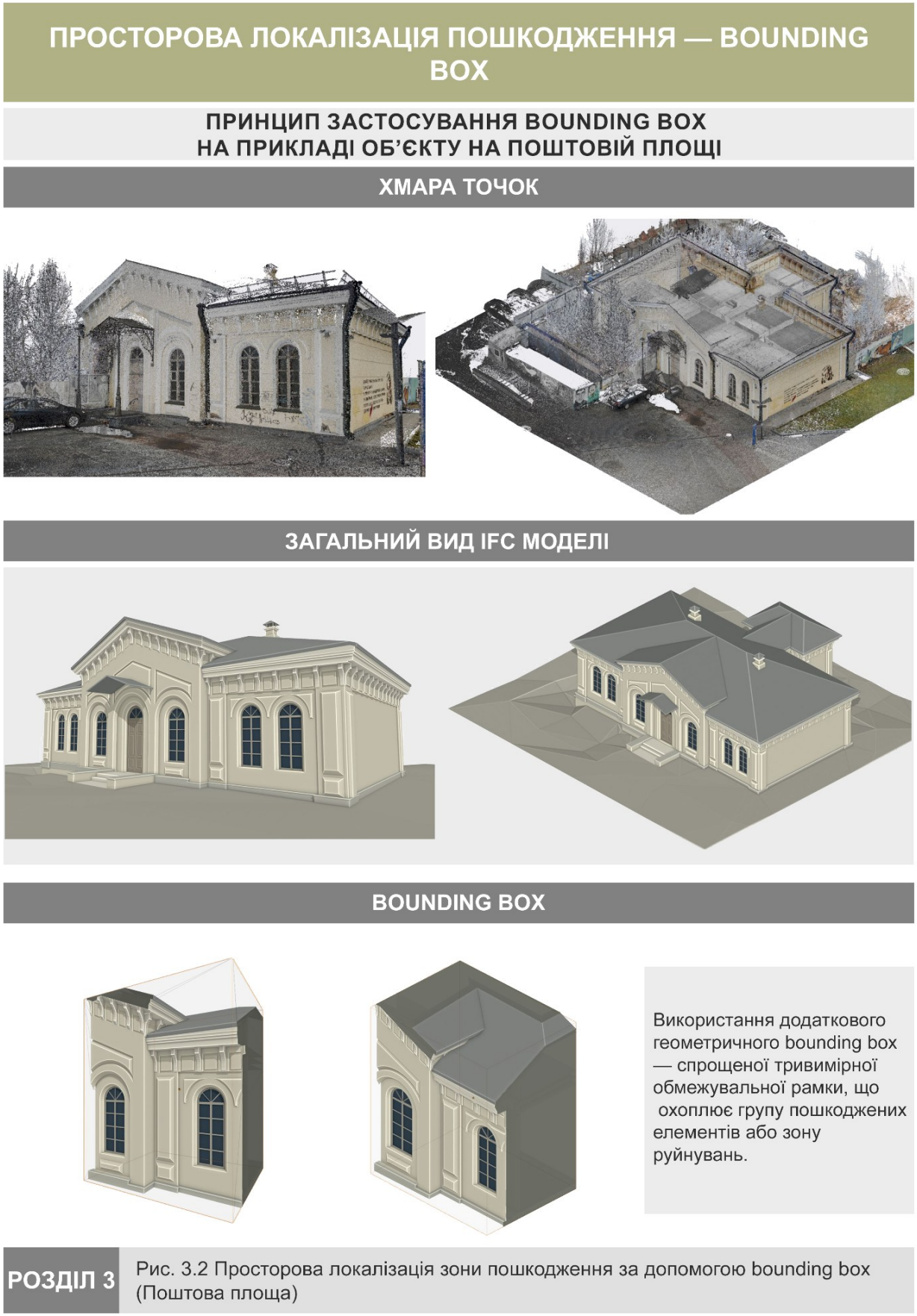


Рис. 3.2 Просторова локалізація зони пошкодження за допомогою Bounding box

Такий спосіб призначений для подальшого автоматизованого оброблення за допомогою штучного інтелекту. Bounding box визначається через координати мінімальних та максимальних кутів (x_min, y_min, z_min; x_max, y_max, z_max) і може автоматично генеруватися алгоритмами комп'ютерного зору на основі даних лазерного сканування або супутникових знімків. Ця пропозиція становить оригінальний внесок у методологію HBIM-документування воєнних руйнувань і є перспективною основою для створення автоматизованих рішень для виявлення пошкоджень [239; 240].

Механізм руйнування визначає характер деградації несучої системи: згин, зсув, втрата опору (несучої здатності), локальний обвал. Цей параметр є ключовим для конструктивної діагностики та безпосередньо впливає на вибір типу тимчасового підсилення і остаточної реставраційної технології [235; 241].

Рівень достовірності фіксації визначають джерело та метод отримання даних про пошкодження: натурний огляд (найвищий рівень достовірності), лазерне сканування, фотограмметрія, дані дистанційного зондування або гіпотетичні оцінки на основі архівних матеріалів (найнижчий рівень). Включення цього атрибута до HBIM-моделі дає змогу керувати якістю даних і коректно інтерпретувати результати аналізу залежно від надійності вихідної інформації [209, 242].

3.1.2. Параметри конструктивної безпеки та ризику

Запропонований у цьому дослідженні блок параметрів конструктивної безпеки та ризику відрізняється від існуючих підходів тим, що він зосереджується не лише на описі поточного технічного стану конструкції, а й на підтримці управлінських рішень: від негайного реагування на надзвичайні ситуації до довгострокового планування відновлення.

Кожен із чотирьох параметрів цього блоку розглядається як інструмент, що безпосередньо впливає на подальші управлінські дії щодо об'єкта.

Поточний рівень несучої здатності елемента може фіксуватися в якісній формі (достатній / знижений / критичний) або у відсотковому вираженні. Цей атрибут є базою для визначення SDI та безпосередньо корелює з категорією

небезпеки об’єкта. Систематичний аналіз застосування BIM у сфері управління ризиками та надзвичайними ситуаціями показав, що врахування несучої здатності в складі BIM-параметрів підвищує ефективність координації аварійного реагування [243].

Категорія загрози поділяється на чотири рівні: відсутня загроза / локальна загроза / загроза прогресуючого обвалу / загроза повного знищення. Запропонована чотириступенева шкала, сформована на основі узагальнення міжнародного досвіду оцінювання постконфліктних руйнувань [238; 244], дає змогу визначати пріоритетність об’єктів за критерієм безпеки, що є критично важливим в умовах активних або нещодавно завершених бойових дій.

Потреба в тимчасовому підсиленні фіксується у бінарному вигляді (так/ні) з обов’язковим уточненням типу заходів: встановлення підпірних конструкцій, виконання розвантажувальних робіт, часткове розбирання нестабільних елементів або монтаж захисного екрана. Цей параметр безпосередньо ініціює реалізацію аварійних заходів і є важливим елементом BIM-координації польових робіт [241; 244].

Реставраційний потенціал елемента фіксується як результат фахового висновку: можлива цілісна реставрація / можлива фрагментарна реставрація / потрібні протиаварійні або консерваційні заходи до прийняття проєктного рішення / рішення не визначено через недостатність даних. Для об’єкта архітектурної спадщини цей параметр не може автоматично означати повну заміну чи реконструкцію; допустимий метод і прийоми встановлюються науково-проєктною документацією з урахуванням предмета охорони, історико-архітектурної цінності, автентичності, ступеня деструкції та технічної безпеки [201; 245].

3.1.3. Параметри історико-культурної цінності та автентичності

Параметри історико-культурної цінності та автентичності сформульовано з урахуванням положень українського законодавства про охорону спадщини та міжнародних стандартів її збереження. Важливим авторським нововведенням є параметр «зв’язок з воєнними подіями», який розглядає пошкоджений об’єкт

архітектурної спадщини як матеріального «свідка» воєнного злочину та визначає окремі підходи до ухвалення рішень щодо її збереження.

Цей блок не встановлює нової класифікації культурної спадщини. Він призначений для інформаційного відображення результатів історико-архітектурної, пам'яткоохоронної та реставраційної оцінки, виконаної уповноваженими фахівцями й зафіксованої в обліковій або науково-проєктній документації. Для кожного значення в HBIM зберігаються джерело, автор, дата і статус верифікації. Авторським параметром у межах цього блоку є «зв'язок із подіями війни», що фіксує документальне значення слідів воєнного впливу.

Ключовими незалежними показниками для обґрунтування втручання є документований ступінь історико-архітектурної цінності та ступінь деструкції елемента або зони. Категорія пам'ятки – національного чи місцевого значення – належить об'єкту в цілому і зберігається в параметрі HeritageStatus. Композиційна роль, значення у структурі міста, належність до ансамблю і зв'язок із предметом охорони фіксуються окремими дескрипторами; вони не утворюють спільної шкали. Підхід відповідає принципу Н. А. Лещенко щодо окремого зіставлення цінності та ступеня порушення цілісності, адаптованому тут із містобудівного рівня до елемента й зони HBIM [30, 31].

Автентичність подається не через взаємовиключний перелік «оригінальний – частково замінений – сучасний», а через розклад складу елемента: частка автентичної субстанції, частка пізніших історичних нашарувань, частка сучасних вставок і частка втрати. Для кожної складової зазначають джерело, метод, дату та рівень достовірності оцінки. Якісний висновок про автентичність вноситься лише з облікової або науково-проєктної документації [233, 236].

Параметр InterventionMethod не є наперед заданою шкалою. У ньому після фахового погодження фіксують визначені науково-проєктною документацією реставраційні методи – консервацію, реставрацію, реабілітацію, музеєфікацію або пристосування – та конкретні прийоми їх реалізації. Наприклад, анастилоз розглядається як реставраційний прийом реінтеграції оригінальних фрагментів,

а не як окремий рівень значущості чи універсальний сценарій. HBIM зіставляє історико-архітектурну цінність, предмет охорони, автентичність, ступінь деструкції й безпеку, але не приймає рішення про метод втручання автоматично [173; 201].

Пов’язаність із подіями війни (матеріальний «свідок») є авторським параметром, що відображає, чи виступає елемент або об’єкт безпосереднім матеріальним свідченням воєнного злочину або подій збройного конфлікту. Присвоєння такого статусу передбачає особливий підхід до консервації. У цьому випадку пошкодження або сліди ураження можуть самі по собі мати культурну та документальну цінність і не підлягати повному усуненню до моменту належного юридичного та наукового документування. Зазначений параметр відсутній у відомих HBIM-стандартах і є оригінальним внеском цього дослідження, що відображає специфіку руйнувань архітектурної спадщини під час воєнних конфліктів.

3.1.4. Параметри життєвого циклу відновлення

Блок параметрів життєвого циклу відновлення розроблено як динамічний управлінський інструмент, що супроводжує об’єкт від моменту фіксації пошкоджень до завершення відновлювальних робіт і подальшої передачі на моніторинг. На відміну від статичних описів технічного стану, цей блок орієнтований на підтримку управлінських рішень у реальному часі та забезпечення безперервності переходу між різними стадіями відновлення.

Пріоритет відновлення визначається за п’ятибальною шкалою – невідкладний, високий, підвищений помірний або низький, як управлінський результат зіставлення ступеня деструкції, структурної небезпеки, документованого ступеня історико-архітектурної цінності, зв’язку з предметом охорони, невідкладності консервації та ресурсних можливостей. Жодна з цих ознак окремо не є достатньою підставою для вибору методу втручання [243; 244].

МАТРИЦЯ ПРІОРИТЕТНОСТІ ТА ДОПУСТИМИХ ВТРУЧАНЬ

Документована історико-архітектурна цінність V × ступінь деструкції D

Матриця визначає базову пріоритетність і початковий вид реагування. Автентичність, предмет охорони та технічна безпека уточнюють остаточне рішення.

СТУПІНЬ ДЕСТРУКЦІЇ D →

ДОКУМЕНТОВАНА ІСТОРИКО-АРХІТЕКТУРНА ЦІННІСТЬ V	D1 Незначна	D2 Локальна	D3 Помірна	D4 Значна	D4 Критична
V5	P2 ПК	P3 КР	P4 КР	P5 СТ	P5 IP
V4	P2 ПК	P3 КР	P4 КР	P4 СТ	P5 IP
V3	P1 M	P2 ПК	P3 КР	P4 СТ	P5 IP
V2	P1 M	P2 ПК	P2 КР	P4 СТ	P5 IP
V1	P1 M	P1 M	P2 ПК	P4 СТ	P5 IP

КОЛІР КЛІТИНКИ: БАЗОВА ПРІОРИТЕТНІСТЬ

P1 НИЗЬКА | P2 ПОМІРНА | P3 ПІДВИЩЕНА | P4 ВИСОКА | P5 НЕВІДКЛАДНА

КОД У КЛІТИНЦІ: ПОЧАТКОВИЙ ВИД РЕАГУВАННЯ

M	ПК	КР	СТ	IP
моніторинг і документування	превентивна консервація	консерв. або реставр. заходи	стабілізація та протиавар.заходи	стабілізація й інд. рішення

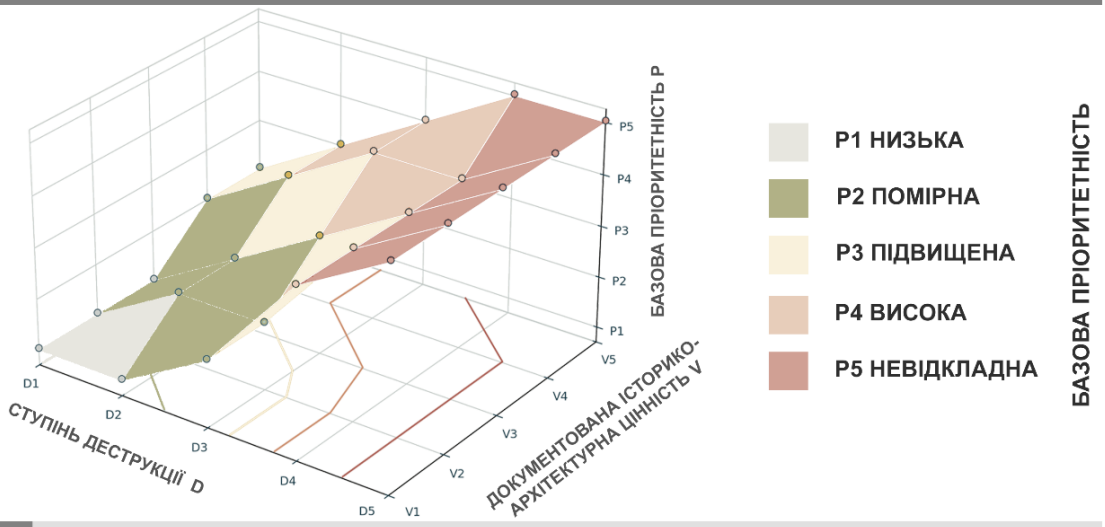
ДВА ЕТАПИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ 1 (P_e^0, I_e^0) = M(V_e, D_e) 2 (P_e, I_e) = C(P_e^0, I_e^0; A_e, O_e, S_e)

A_e = автентичність O_e = зв'язок із предметом охорони S_e = технічна безпека

Матриця задає базове рішення. A, O і S можуть змінити пріоритетність та звужують множину допустимих втручань.

IP не означає автоматичну реконструкцію: вид робіт потребує окремого науково-проєктного, експертного та правового обґрунтування.

ГРАФІК ЗАЛЕЖНОСТІ ПРІОРИТЕТУ ВІД ЦІННОСТІ ТА ДЕСТРУКЦІЇ



РОЗДІЛ 3 Рис. 3.3 Матриця пріоритетності та допустимих втручань і графік залежності пріоритету від цінності та деструкції

Рис. 3.3 Матриця пріоритетності та допустимих втручань

Стадія опрацювання в межах проєкту фіксується через послідовність статусів: зафіксовано, обстежено, рішення прийнято, виконано, проконтрольовано. Такий підхід трансформує BIM-модель на інструмент управління життєвим циклом проєкту та забезпечує відстеження прогресу відновлення в режимі реального часу для кожного окремого елемента будівлі [191; 244].

У параметрі «Параметри життєвого циклу відновлення» (рис.3.4), як «заплановані реставраційні методи і прийоми», фіксуються рішення, визначені затвердженою науково-проєктною документацією. Наведений нижче перелік є авторською систематизацією прийомів:

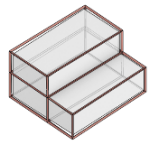
- консервація поверхні – нанесення захисних складів (просочення, гідрофобізація, біоцидна обробка), спрямоване на запобігання подальшій деградації автентичних матеріалів без зміни їхнього зовнішнього вигляду;
- ін’єктування – введення зміцнювальних розчинів (цементних, епоксидних, вапняних сумішей) у тріщини, порожнини та зони розшарування кладки або монолітних конструкцій;
- реінтеграція (анастилоз) – повернення на місце точно ідентифікованих оригінальних фрагментів із мінімально необхідним доповненням для їх закріплення ;
- розчинне замурування – заповнення тріщин і порожнин вапняними або гідравлічними розчинами з мінімальним втручанням у первинну структуру;
- армування конструкцій – встановлення металевих або композитних елементів (стрижнів, хомутів, анкерів) для відновлення несучої здатності пошкоджених частин;
- тимчасове підсилення (укріплення) – монтаж тимчасових підпірних систем (стійок, підкосів, ферм) для стабілізації конструкцій до виконання повноцінних реставраційних робіт;
- фрагментарне або цілісне відтворення втрачених частин у межах реставраційного рішення – лише за достатньої доказової бази, відповідно до предмета охорони та затвердженої науково-проєктної документації;

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ HBIM-ПАРАМЕТРІВ ТА РЕСТАВРАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

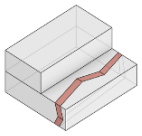
Для пошкоджених об'єктів архітектурної спадщини

РЕСТАВРАЦІЙНІ ПРИЙОМИ

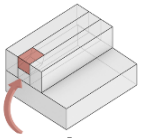
Консервація поверхні 01
Просочення, гідрофобізація, захисна обробка.



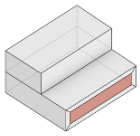
Ін'єктування 02
Цементні / епоксидні, вапняні суміші в тріщини.



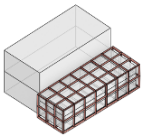
Реінтеграція (Анастилоз) 03
Відтворення з оригінальних залишків.



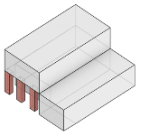
Розчинне замурування 04
Вапняні розчини з мінімальним втручанням.



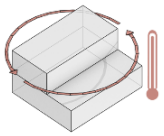
Армування конструкцій 05
Металеві / композитні стрижні, хомути, анкери.



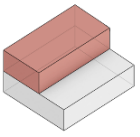
Тимчасове підсилення 06
Зворотні стійки, підпори, ферми на час робіт.



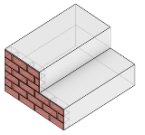
Мікролімат контроль 07
Регульована температура й вологість; превентивна.



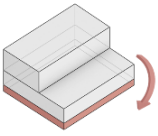
Відтворення 08
(Фрагментарне або цілісне)
Відтворення втрачених частин у межа х реставраційного рішення.



Хімічна консолідація 09
Зміцнення деградованого каменю, цегли, штукатурки.



Десолінізація 10
Видалення розчинних солей із кладки промиванням.



Цифрове документування 11
Лазерне сканування як форма збереження для реконструкції.



Інші прийоми реставрації +
Перелік не вичерпний — реставратори можуть доповнити

?

8	11 +	IFC	IoT+BIM
технології формування	реставраційних технологій	стандарт обміну	Smart Heritage

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ HBIM-ПАРАМЕТРІВ

ТЕХНОЛОГІЯ	АБРЕВ.	РОЛЬ У ФОРМУВАННІ HBIM-ПАРАМЕТРІВ	ОХОПЛЕННЯ
Лазерне 3D-сканування	LiDAR / MVS	Точна геометрія та координати; об'єм зруйнованого матеріалу.	Об'єкт / фрагмент
Фотограмметрія	SfM / MVS	Текстурована 3D-модель поверхні; площа пошкоджень; деталізація.	Фасад / елемент
Супутник + Deep Learning	SAR / DL	Автоматична класифікація пошкоджень на рівні кварталу; ДЗЗ.	Місто / квартал
IoT-сенсори / SHM	LVDT / ACC	Динамічне вимірювання деформацій, тріщин, вібрацій, напружень.	Елемент / вузол
ГІС-інтеграція	GIS / QGIS	Просторове прив'язування BIM-об'єкта до міського контексту.	Регіон / місто
Глибоке навчання	CNN / NN	Автоматизоване збагачення HBIM класифікацією семантичних ознак.	Гнучке
Великі дані	Big Data	Аналіз масивів пошкоджень, прогнозування ризиків, закономірності.	Міжоб'єктне
BIM-сервери / Хмара	IFC / OpenBIM	Централізоване зберігання, оновлення й відкритий доступ.	Мережевий

РОЗДІЛ 3 Рис. 3.4 Реставраційні прийоми і технологічне забезпечення HBIM параметрів

Рис. 3.4 Реставраційні прийоми і технологічне забезпечення HBIM параметрів

- хімічна консолідація – зміцнення деградованих матеріалів (каменю, цегли, штукатурки) шляхом просочення спеціальними складами (силікатними, акрилатними тощо);
- десолінізація – видалення розчинних солей із кладки та облицювання методом компресів або промивання;
- мікроклімат-контроль і превентивна консервація – регулювання температурно-вологісного режиму з метою уповільнення природних процесів деградації;
- цифрове документування – фіксація фактичного стану лазерним скануванням, фотограмметрією та пов’язаними метаданими як інформаційна форма збереження; воно не є реставраційним прийомом і саме по собі не надає правової підстави для робіт з об’єктом архітектурної спадщини.

Заплановані сенсори/моніторинг є атрибутом, що описує наявність систем структурного моніторингу (SHM), тип використовуваних сенсорів (тензодатчики, акселерометри, датчики розкриття тріщин, датчики вологості) та періодичність вимірювань (безперервний моніторинг, щомісячне обстеження або разова фіксація). Дослідження HBIM-платформ з інтегрованими сенсорними системами підтверджують, що стандартизоване відображення параметрів моніторингу безпосередньо в BIM-атрибутах забезпечує безперервність контролю стану об’єкта архітектурної спадщини в часі [193; 236].

3.1.5. Систематизований перелік додаткових HBIM-параметрів

Систематизація додаткових HBIM-параметрів, необхідних для пошкоджених об’єктів архітектурної спадщини, ґрунтується на їхньому поділі за функціональними групами. Кожна з таких груп об’єднує атрибути, що характеризують окремі аспекти стану об’єкта – від геометричних параметрів руйнувань до управлінських рішень щодо пріоритетності відновлення. У таблиці 3.1 подано узагальнений перелік головних груп параметрів і відповідних атрибутів, що рекомендовані для інтеграції до HBIM-моделей пошкоджених об’єктів архітектурної спадщини.

Таблиця 3.1

Систематизований перелік додаткових BIM-параметрів для пошкоджених об’єктів архітектурної спадщини

Група параметрів	**Параметр / атрибут**	**Джерело**
Геометрія та морфологія пошкоджень	Просторове положення зони руйнування визначається через координати (*x*, *y*, *z*) разом із її фактичними розмірами, що дає змогу точно локалізувати пошкодження в структурі об’єкта	[6; 13]
	Характер деформації описується як локальний (обмежений окремими елементами) або глобальний (такий, що впливає на всю конструкцію)	[6; 5]
	Об’єм втрат матеріалу (у м³) використовується як кількісний показник інтенсивності руйнування	[5; 21]
	Площа пошкодженої поверхні (у м²) дає уявлення про масштаб ураження конструкції	[18; 17]
	Просторові межі пошкодження можуть задаватися через bounding box – обмежувальну рамку, що охоплює групу уражених елементів (авторський підхід)	[авторська пропозиція]
Класифікація ступеня руйнувань	Ступінь деструкції фіксується за операційною шкалою 0–5, адаптованою для HBIM-документування; він не замінює нормативної категорії технічного стану	[6; 10]
Класифікація ступеня руйнувань	Категорія небезпеки (A–D) відображає потенційний рівень загрози для експлуатації об’єкта чи перебування людей	[13; 16]
Класифікація ступеня руйнувань	Індекс структурної вразливості (SDI) інтегрує різні чинники та характеризує стійкість конструкції до пошкоджень	[6]
Класифікація ступеня руйнувань	Ризик обвалення визначається як низький, середній або критичний залежно від стану конструкції	[10; 16]
Фізичний стан конструктивних елементів	Матеріал несучих елементів аналізується з урахуванням його стану до та після пошкодження для оцінки залишкової міцності	[5; 3]
Фізичний стан конструктивних елементів	Клас міцності після пошкодження відображає, наскільки знизились механічні властивості матеріалу внаслідок руйнування	[13; 6]
Фізичний стан конструктивних елементів	Фіксується наявність тріщин, розшарувань і деформацій, що дає змогу деталізувати характер і глибину пошкоджень	[5; 21]
Damage-related параметри	Тип пошкодження уточнює природу впливу (вибух, уламкове ураження, пожежа або прогресуюче руйнування)	[8; 9]
	Механізм руйнування описує головний процес втрати цілісності конструкції (згин, зсув, втрата несучої здатності чи обвал)	[6; 13]
	Рівень достовірності фіксації показує, наскільки надійними є отримані дані (наприклад, за результатами візуального огляду чи інструментальних методів)	[3; 14]

Група параметрів	Параметр / атрибут	Джерело
Параметри конструктивної безпеки	Поточна несуча здатність оцінюється якісно або у відсотках і відображає залишкову здатність конструкції сприймати навантаження	[15; 10]
Параметри конструктивної безпеки	Категорія загрози характеризує рівень небезпеки – від її відсутності до ризику прогресуючого обвалу чи безпосередньої загрози людям	[10; 16]
Параметри конструктивної безпеки	Визначається потреба в тимчасовому підсиленні конструкції, включаючи доцільність і тип таких заходів	[13; 16]
Параметри конструктивної безпеки	Реставраційний потенціал фіксується як цілісна або фрагментарна реставрація, потреба у протиаварійний/консерваційний стабілізації чи невизначений стан; рішення вноситься з фахового висновку	[17; 18]
Історико-архітектурна цінність	Охоронний статус визначає рівень офіційного визнання об’єкта – від включення до списків ЮНЕСКО до національних або місцевих реєстрів	[1; 7]
Історико-архітектурна цінність	Автентичність подається розкладом часток автентичної субстанції, історичних нашарувань, сучасних вставок і втрат із посиланням на джерело оцінки.	[4; 8]
Історико-архітектурна цінність	Документований ступінь історико-архітектурної цінності вноситься з облікової або науково-проєктної документації із зазначенням джерела. HeritageStatus, композиційна роль, значення у структурі міста та зв’язок із предметом охорони зберігаються окремо.	[7; 19; 84]
Історико-архітектурна цінність	Погоджений реставраційний метод і конкретні прийоми - вносяться з науково-проєктної документації; HBIM не визначає їх автоматично.	[17; 19]
Історико-архітектурна цінність	Пов’язаність із подіями війни розглядається як окремий критерій, що підкреслює значення об’єкта як матеріального свідка історичних подій	[авторська пропозиція]
Параметри життєвого циклу відновлення	Пріоритет встановлюється як управлінський результат зіставлення деструкції, безпеки, документованої цінності, предмета охорони та невідкладності заходів.	[15; 16]
Параметри життєвого циклу відновлення	Стадія опрацювання відображає, на якому етапі проєктування або відновлення перебуває об’єкт	[1; 16]
Параметри життєвого циклу відновлення	Заплановані реставраційні методи і прийоми фіксуються відповідно до затвердженої науково-проєктної документації.	[авторська систематизація; 8]
Параметри життєвого циклу відновлення	Передбачені системи сенсорів і моніторингу забезпечують подальше спостереження за станом об’єкта після втручання	[20; 8]
Моніторингові дані та датчики	Ідентифікатор сенсора та тип вимірювань дають змогу відстежувати конкретні параметри стану конструкції в процесі експлуатації	[20; 2]
Моніторингові дані та датчики	Дата та час вимірювання фіксують момент отримання даних, що є важливим для відстеження динаміки змін стану об’єкта	[8; 20]

Група параметрів	Параметр / атрибут	Джерело
Дані дистанційного зондування	Ідентифікатор знімка містить інформацію про джерело (супутник) та дату зйомки, що забезпечує просторово-часову прив'язку даних	[11; 22]
Дані дистанційного зондування	Клас пошкодження, визначений за результатами дистанційного зондування, дає змогу оцінити ступінь ураження території або об'єкта	[12; 11]
Управлінські параметри	Пріоритет консервації задається за шкалою (1–5) і відображає черговість проведення заходів зі збереження	[15; 16]
Управлінські параметри	Кошторисна вартість відновлення (у UAH або EUR) дає змогу оцінити необхідні фінансові ресурси для реалізації відновлювальних робіт	[16; 23]

Джерело: складено автором на основі [1;3–23]

Практичним результатом систематизації є правило: у HBIM окремо зберігаються тип небезпечного впливу, його джерело, дата, координатна прив'язка, ступінь деструкції та спосіб верифікації. Воєнне походження не визначається лише за геометрією дефекту, оскільки подібні наслідки можуть спричиняти землетруси, техногенні аварії або пожежі; висновок про причину має спиратися на сукупність доказових джерел.

3.1.6. Технологічне забезпечення формування HBIM-параметрів

Для забезпечення ефективного управління процесами реставрації об'єкта архітектурної спадщини критично важливим є інтегрування до HBIM-моделі параметрів, що відображають технологічні аспекти збору вихідних даних. Різні методи фіксації та опрацювання інформації про пошкодження формують атрибути з різним рівнем точності, повноти та актуальності, що має бути належним чином відображено в метаданих відповідних HBIM-елементів. На рис.3.4 подано порівняльний огляд основних технологій, які застосовуються для формування BIM-параметрів пошкоджених об'єктів архітектурної спадщини.

Порівняння показує взаємодоповнюваність технологій: лазерне сканування забезпечує метричну точність, фотограмметрія – текстуру, дистанційне зондування – масштаб території, а сенсорні мережі – часову динаміку. У HBIM разом із результатом зберігаються метод, дата, точність і зона покриття; автоматично розпізнані атрибути мають статус попередніх до фахової перевірки.

3.1.7. Класифікація ступеню деструкції та рекомендовані HBIM-дії

Для HBIM-документування прийнято єдину шкалу ступеня деструкції 0–5. Вона узагальнює видимі наслідки для цілісності об’єкта, елемента або зони та супроводжується орієнтовною часткою ураження у відсотках. Межі інтервалів є авторськими операційними правилами структурування даних, а не нормативними категоріями технічного стану; остаточна інженерна оцінка виконується за чинними нормами. У таблиці на рис. 3.5 для кожного рівня визначено склад першочергових HBIM-дій.

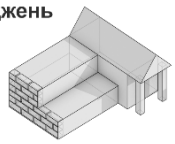
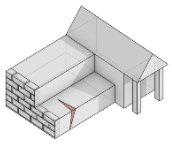
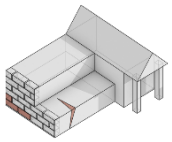
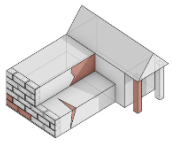
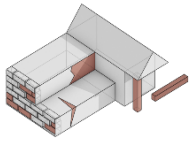
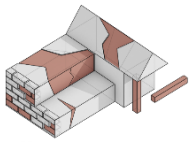
Представлена класифікація базується на узагальненні міжнародних підходів і враховує специфіку архітектурної спадщини, для якої навіть поверхневі пошкодження (ступінь 1) можуть призводити до незворотних втрат автентичності та культурної цінності об’єкта. Це суттєво відрізняє об’єкти архітектурної спадщини від звичайних будівель, де незначні косметичні дефекти зазвичай не потребують негайного реагування. Для об’єктів архітектурної спадщини навіть мінімальні пошкодження декоративного оздоблення чи автентичних матеріалів мають бути задокументовані з максимальною деталізацією, оскільки вони є невід’ємним складником культурно значущого контексту

Відсотковий інтервал визначається за виміряною часткою ураженої площі, об’єму або кількості елементів у межах чітко заданої одиниці оцінювання. Як показано у дослідженнях Н. А. Лещенко, ступінь порушення цілісності необхідно порівнювати з окремо визначеною цінністю [30, 31]; у цій роботі той самий принцип реалізовано на рівні HBIM-елемента та зони.

КЛАСИФІКАЦІЯ РІВНІВ ПОШКОДЖЕННЯ ТА ТИПІВ БОЙОВОГО ВПЛИВУ

Шкали, механізми та рекомендовані HBIM-дії

ШЕСТИРІВНЕВА КЛАСИФІКАЦІЯ ПОШКОДЖЕНЬ

РІВЕНЬ	ОПИС	РЕКОМЕНДОВАНІ HBIM-ДІЇ	ПРИМІТКА
Без пошкоджень 0 	Конструкція збережена повністю, видимі дефекти відсутні.	Фіксація вихідного стану, базова HBIM-модель.	Основа для оцінювання майбутніх втрат автентичності.
Незначні 1 	Тріщини до 1 мм, косметичні дефекти, відшарування оздоблення.	Актуалізація атрибутів пошкоджень, детальна фотофіксація.	Обов'язкова фіксація стану HBIM.
Помірні 2 	Структурні тріщини 1–5 мм, локальне руйнування цегляної кладки.	SDI-параметр, Bounding Box зони пошкодження.	Початок параметризації, визначення механізму руйнування.
Суттєві 3 	Втрата несучої здатності окремих елементів, обвалення оздоблення.	Оновлення моделі, розрахунок категорії небезпеки, аварійні заходи.	Обов'язкове тимчасове підсилення, фіксація сліду впливу.
Критичні 4 	Часткове обвалення конструкцій, загроза повного руйнування.	BIM-координація аварійних заходів, DES-верифікація, SHM-моніторинг.	Дистанційна верифікація (супутник + Deep Learning) + BIM.
Повне 5 	Об'єкт фізично знищений або не підлягає консервації в первісному вигляді.	Цифрова реконструкція, архівна HBIM-модель, цифрова консервація.	HBIM на основі архівних даних, фотографій, креслень / аналога.

ТИПИ БОЙОВОГО ВПЛИВУ

* окремий BIM-атрибут — відсутній у стандартних HBIM-протоколах



Вибухова хвиля
Надлишковий тиск; руйнування перегородок і заповнення прорізів.

Уламкове ураження
Локальні пробоїни; поверхнева ерозія; вторинні тріщини.

Пожежа
Термічна деградація; розшарування кладки; втрата дерев'яних конструкцій.

Прогресуюче руйнування
Обвал суміжних конструкцій; навантаження на вцілілі.

Механічний удар
Пряме зіткнення; локальна деформація; відколювання декору.

ШКАЛА ДОСТОВІРНОСТІ ФІКСАЦІЇ ПОШКОДЖЕНЬ

1 Натурний огляд
2 Лазерне сканування
3 Фотограмметрія SfM
4 Дистанційне зондування
5 Архівні джерела

РОЗДІЛ 3 Рис. 3.5 Класифікація ступенів деструкції і типів бойового впливу

Рис. 3.5 Класифікація ступенів деструкції і типів бойового впливу

Результат оцінювання зберігається разом із геометричною межею зони, методом вимірювання, датою, автором і показником достовірності. За неповних або дистанційних даних рівень має статус попереднього й підлягає уточненню після безпечного натурного обстеження.

3.1.8. Приклад застосування параметрів на рівні елемента (стіна)

Для перевірки логічної повноти структури виконано авторський демонстраційний модельний приклад для зовнішньої несучої стіни об’єкта архітектурної спадщини. Значення в таблиці 3.2 є умовними та показують взаємозв’язок полів; вони не подаються як результати натурного обстеження конкретного об’єкта. Для емпіричної апробації на реальному об’єкті ці поля мають бути заповнені за матеріалами його облікової документації, інженерного обстеження та HBIM-моделі

Таблиця 3.2

Демонстраційний набір HBIM-параметрів для елемента «Зовнішня несуча стіна»

Блок	**Параметр**	**Значення (приклад)**
Geometry & ID	Унікальний ідентифікатор	Елемент ідентифікується як WALL-03-S-004, що забезпечує його однозначне розпізнавання в моделі
	Поверх	Розташований на четвертому поверсі будівлі
	Орієнтація	Орієнтований на південний фасад
	Розміри (Д×В×Т)	Геометричні параметри становлять 8,40 × 4,20 × 0,80 м
	Матеріал	Виконаний із цегляної кладки XIX століття
	Bounding box зони пошкоджень	Межі пошкодженої ділянки задані в координатах: *x*: 12,4–15,8; *y*: 0,0–0,8; *z*: 0,0–2,5 м
Heritage	Охоронний статус	Об’єкт має статус пам’ятки – об’єкта архітектури місцевого значення
Heritage	Рівень значущості	Належить до характерних елементів
Heritage	Ступінь автентичності	Близько 85 % становить оригінальна кладка, тоді як приблизно 15 % припадає на ремонтні втручання 1970-х років
Heritage	Пов’язаність із подіями війни	Зафіксовані сліди уламкового ураження, які розглядаються як матеріальне свідчення воєнних подій
Heritage	Погоджений реставраційний метод	Застосування анастилотичної реставрації
Damage	Тип пошкодження	Поєднання уламкового ураження та впливу вибухової хвилі
Damage	Ступінь деструкції	Оцінюється як ступінь 2 (>10–30 % заданої зони)

Блок	Параметр	Значення (приклад)
Damage	Дата фіксації	Дані зафіксовано 14.03.2024 року
Damage	Джерело даних	Інформація отримана на основі натурного обстеження та фотограмметричних методів
Damage	Механізм пошкодження	Пошкодження проявляється у вигляді локального розкришення кладки з додатковою поверхневою відшарованістю матеріалу
Damage	Рівень достовірності	Дані отримано в результаті натурного обстеження, що відповідає найвищому рівню достовірності
Safety & Risk	Поточна несуча здатність	Залишкова несуча здатність оцінюється приблизно на рівні 55 % від проєктного значення
Safety & Risk	Категорія загрози	Стан конструкції класифікується як локально небезпечний
Safety & Risk	Ризик обвалення	Існує середній ризик подальшого руйнування або часткового обвалення
Safety & Risk	Потреба в тимчасовому підсиленні	Рекомендовано встановлення тимчасових підпірних стійок із боку приміщення
Safety & Risk	Придатність до реставрації	Можлива фрагментарна реставрація
Intervention Plan	Вид втручання	Передбачається реставрація з частковим доповненням втрачених фрагментів
Intervention Plan	Технологія	Заплановано використання ін’єктування, доповнення втрачених ділянок та консервації поверхні
Intervention Plan	Пріоритет	Роботи мають високий пріоритет виконання
Intervention Plan	Стадія	Об’єкт пройшов стадію обстеження, рішення щодо втручання вже ухвалено
Monitoring	Тип сенсора	Використовується датчик розкриття тріщин (LVDT) для контролю деформацій
	ID сенсора	Сенсор ідентифікується як SHM-WALL-03-CR-01
	Графік обстеження	Передбачено безперервний інструментальний моніторинг у поєднанні з регулярними щомісячними візуальними оглядами
	Контрольний показник	Критичним порогом вважається додаткове розкриття тріщини понад 0,5 мм, у разі перевищення якого формується сигнал тривоги

Джерело: авторська розробка модельного прикладу

Приклад перевіряє наявність зв’язків між ідентифікацією елемента, пошкодженням, безпекою, зовнішньою експертною оцінкою цінності, запланованими реставраційними прийомами та моніторингом. Він підтверджує внутрішню узгодженість структури даних, але не замінює натурну апробацію, інженерний висновок або затверджену науково-проєктну документацію (рис. 3.6 та 3.7). Така ж зональна і елементна параметризація була апробована автором і на інших об’єктах архітектурної спадщини (рис. 3.8)

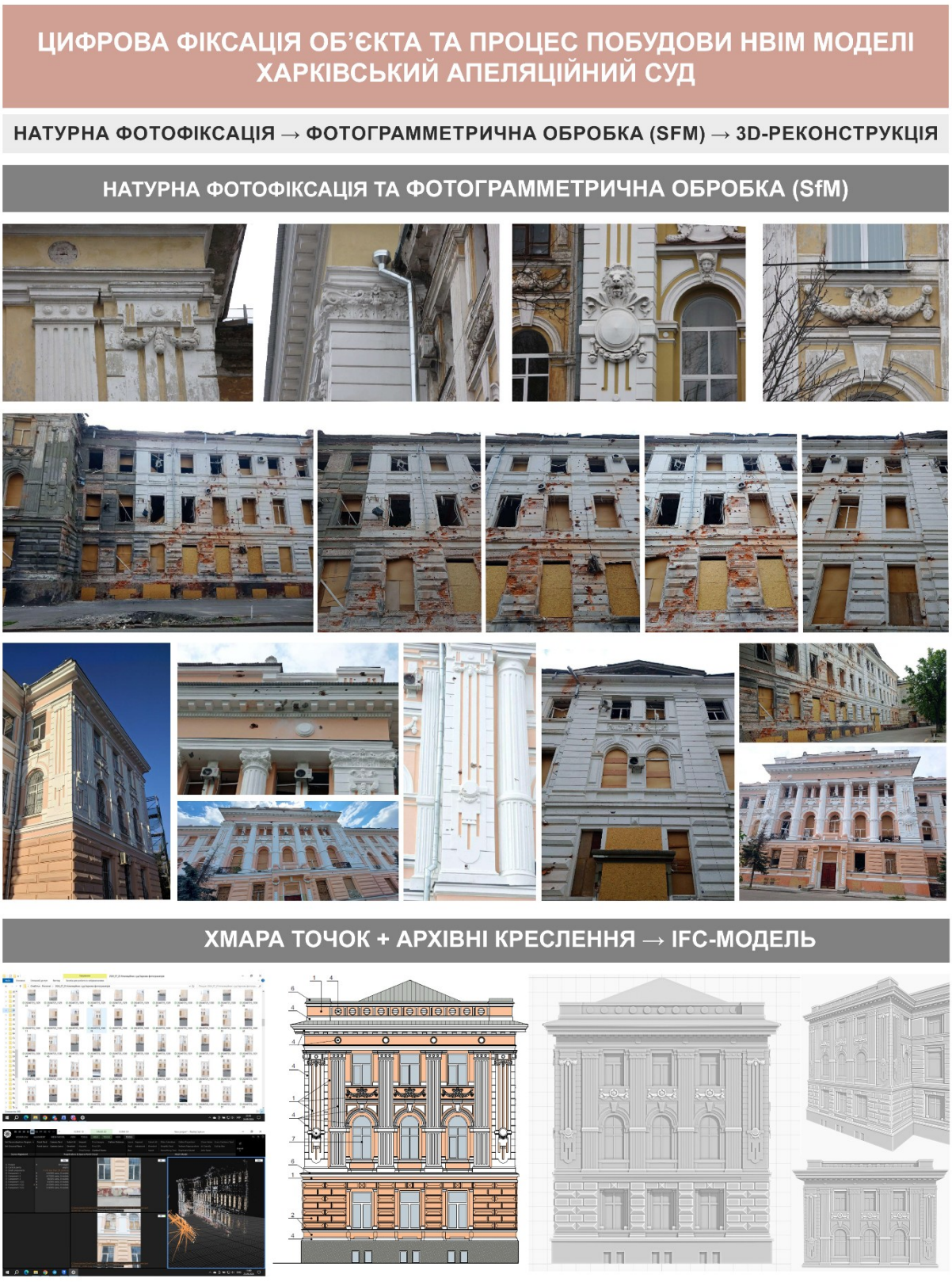


Рис. 3.6 Цифрова фіксація та процес побудови HBIM моделі об’єкта архітектурної спадщини (Харківський апеляційний суд)

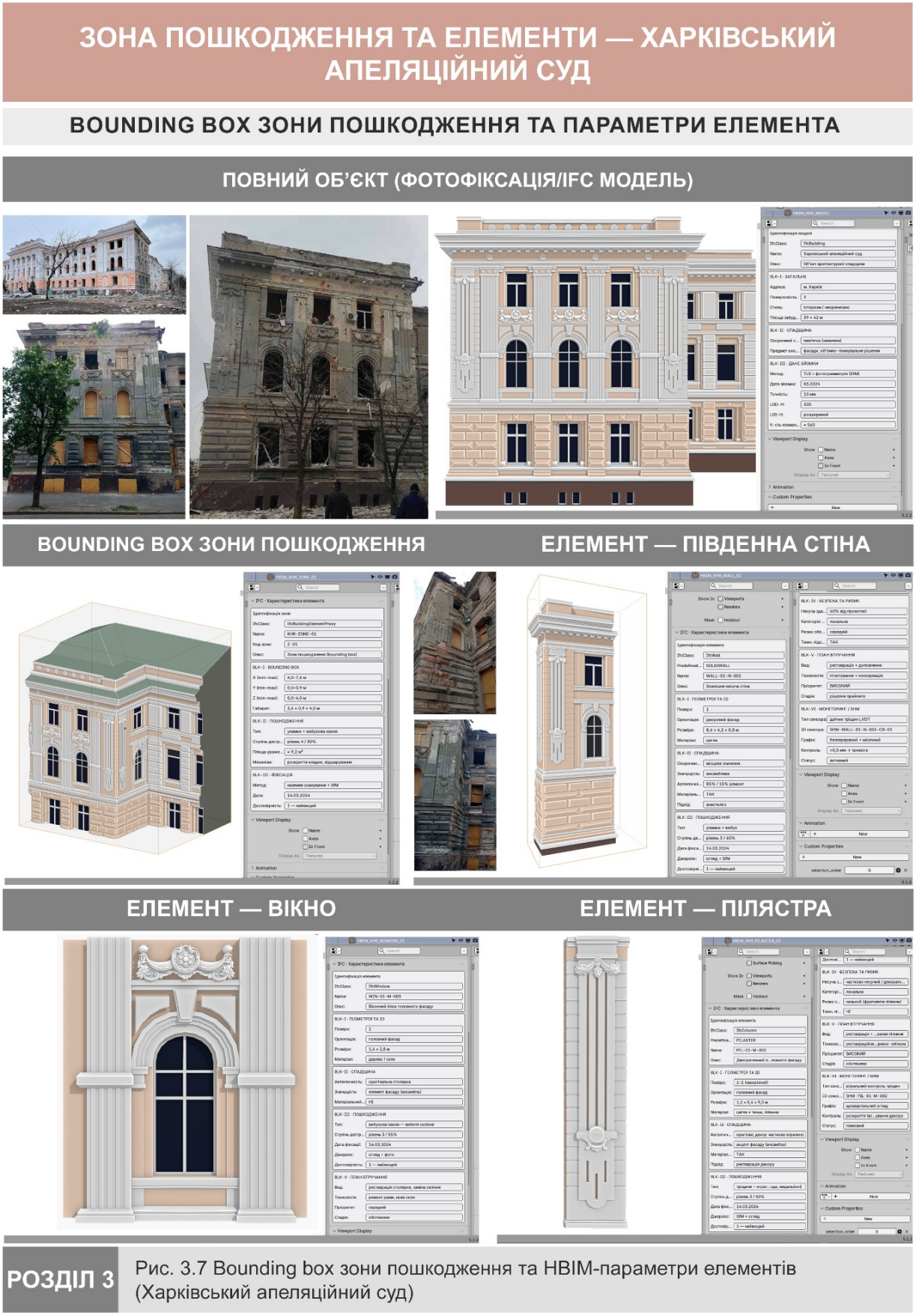


Рис. 3.7 Bounding box зони пошкодження та HBIM параметри елементів

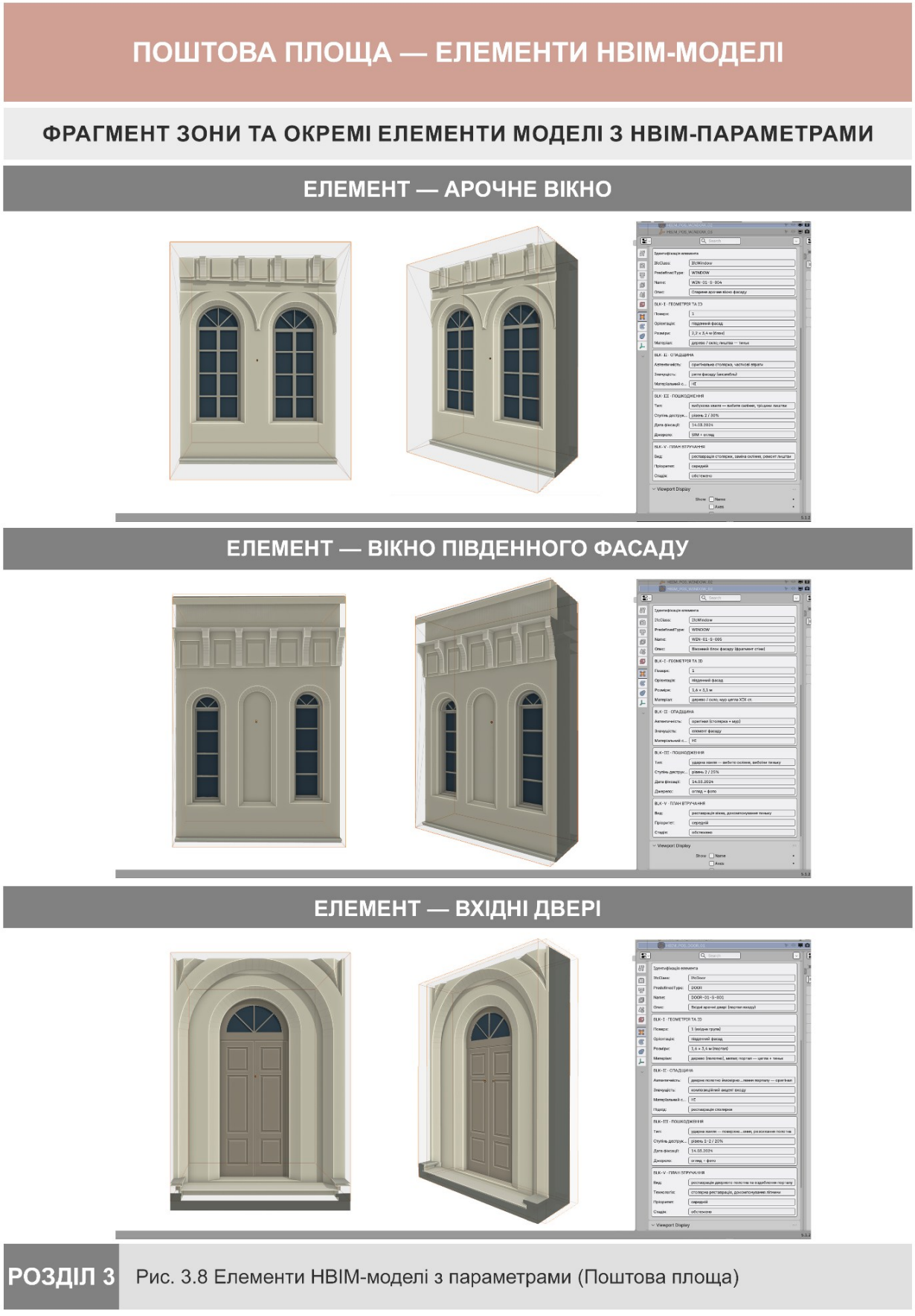


Рис. 3.8. Елементи НВІМ-моделі з параметрами (Поштова площа)

3.2 Створення шаблону HBIM-процесу побудови цифрової моделі для об’єктів архітектурної спадщини, пошкоджених внаслідок воєнних дій

У підрозділі подано практичну послідовність створення HBIM-моделі об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій. Шаблон охоплює підготовчий етап і шість основних етапів, для кожного з яких визначено вхідні дані, дії, відповідальних фахівців, критерій завершення та інформаційний результат.

Незмінною є послідовність «вихідні дані → LOD-H/LOI-H → програмні засоби → параметри → реставраційні рішення → експлуатація». Варіативними є методи фіксації, глибина геометричного опрацювання та склад інформації; правила їх добору конкретизовано матрицею у підрозділі 3.3.

Підготовчий етап (0). Стратегічне планування HBIM-проєкту

Цей етап передбачає стратегічне планування та визначення ключових параметрів проєкту цифрового моделювання. На ньому визначають цілі проєкту, які можуть варіюватися від екстреної фіксації поточного стану об’єкта до документування пошкоджень для реставрації чи формування інформаційної бази для довгострокового моніторингу архітектурної спадщини. Чітке визначення цілей має вирішальне значення, оскільки воно зумовлює всі подальші етапи роботи, зокрема вибір технічних засобів, рівень деталізації моделі та структуру збирання даних.

Вибір відповідних рівнів деталізації, як геометричного (рівень деталізації, LOD), так і інформаційного (рівень інформації, LOI), має вирішальне значення у стратегічному плануванні. Ці рівні, адаптовані до контексту HBIM та позначені як LOD-Heritage та LOI-Heritage [251], визначаються на основі поточної фази проєкту, доступних ресурсів, часових обмежень і конкретних вимог. На етапі документування аварійної ситуації LOD-H 100–200 достатньо для загального розуміння геометрії будівлі. Натомість, для детальної документації пошкоджень та складних архітектурних елементів рекомендується LOD-H 300–400. На цьому

етапі також визначаються формати даних для зберігання та обміну інформацією, зокрема IFC (Industry Foundation Classes), CityGML для інтеграції з міськими моделями та ГІС-формати для просторового аналізу.

Стратегічне планування також вимагає координації з усіма зацікавленими сторонами, зокрема з органами охорони культурної спадщини, органами муніципального самоврядування та фахівцями з реставрації. На цьому етапі встановлюються обмеження, пов'язані з охоронними зонами, режимами використання об'єкта та правовими аспектами документування пошкоджень. Врахування цих обмежень на початку проєкту допомагає запобігти конфліктам на наступних етапах і забезпечує дотримання всіх відповідних стандартів і норм.

Етап 1. Збирання та валідація вхідних даних

На цьому етапі здійснюється систематичне збирання та попередній аналіз усієї доступної інформації про об’єкт до початку інструментальних обстежень. Це створює основу для подальших робіт, дозволяючи ідентифікувати релевантну інформацію для моделювання. Процес включає пошук і систематизацію наявних креслень, архітектурних планів, фасадів і розрізів з різних джерел, зокрема архівів проєктних організацій, органів охорони спадщини, архітектурних бібліотек та інших установ.

Паралельно зі збиранням креслень здійснюється пошук архівних матеріалів, а саме історичних документів, фотографій, описів будівель, відомостей про попередні реставраційні роботи та дослідження. Ці матеріали формують підґрунтя для розуміння будівлі як історичного об’єкта та дають змогу визначити зміни й модифікації, що могли відбутися з часом. Одночасно здійснюється аналіз нормативних обмежень, охоронного статусу, охоронних зон і режимів використання об’єкта. Це особливо важливо для будівель, пошкоджених внаслідок воєнних дій, адже охоронний статус і можливості реставрації можуть істотно змінюватися.

Принципово важливим на цьому етапі є визначення прогалин у наявних даних і з’ясування того, яка додаткова інформація потрібна для адекватного

документування об’єкта. Це робить можливим оптимізацію плану інструментальних досліджень на наступному етапі та забезпечує ефективне використання ресурсів для збору найважливішої інформації. На завершення першого етапу здійснюється попередня фіксація об’єкта на картографічній основі географічної інформаційної системи (GIS) для забезпечення просторового контексту та зв’язку інформаційної моделі з GIS задля подальшого просторового аналізу й управління даними.

Етап 2. Польове обстеження та інструментальна фіксація

Цей етап є головною частиною процесу збирання первинної інформації про об’єкт за допомогою інструментальних обстежень і польових робіт. Для об’єктів, пошкоджених внаслідок воєнних дій, цей етап є особливо важливим, оскільки забезпечує об’єктивну фіксацію поточного стану будівлі та рівня пошкоджень. Основним методом обстеження є лазерне сканування, що дозволяє отримати детальну хмару точок для відтворення тривимірної геометрії об’єкта. У надзвичайних ситуаціях, коли об’єкт частково зруйнований або недоступний, обсяг сканування визначається умовами на місці та вимогами безпеки.

Фотограмметрія слугує важливим доповненням до лазерного сканування, зокрема для документування пошкоджень та архітектурних деталей [252]. Фотографічне знімання здійснюється як із землі, так і за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що дає змогу отримувати детальну зйомку фасадів, дахів та інших важкодоступних частин будівель. Знімання з БПЛА є особливо цінним для об’єктів, на яких традиційний доступ небезпечний або неможливий. Окрім того, здійснюються ручні геодезичні вимірювання в тих зонах, де застосування автоматизованих методів є неможливим, зокрема в складних внутрішніх просторах, прихованих архітектурних елементах і зонах із потенційною небезпекою.

Окремо від загального обстеження фахівці документують небезпечні зони та тимчасові підсилення, встановлені для стабілізації пошкоджених частин будівлі. Така інформація є важливою для розуміння поточного стану конструкцій

і планування подальших реставраційних робіт. На цьому етапі фіксуються не лише геометричні характеристики, а й видимий стан матеріалів, наявні тріщини та деформації. З огляду на це, формується комплексна характеристика технічного стану будівлі на момент обстеження.

Етап 3. Побудова HBIM-моделі базової геометрії

Цей етап передбачає трансформацію отриманих на попередніх етапах даних у формалізовану HBIM-модель із базовою геометрією [175]. Процес розпочинається з реєстрації та опрацювання хмар точок, отриманих в результаті лазерного сканування. Реєстрацію спрямовано на об’єднання окремих сканів у єдину координатну систему та вирівнювання різних наборів даних для формування цілісної хмари точок. Цей процес потребує ретельної роботи та нерідко, передбачає ручну корекцію для досягнення необхідної точності, особливо для складних будівель із багатьма сегментами.

Наступною стадією є генерація концептуальної та узагальненої геометрії на основі опрацьованої хмари точок. На цій стадії не всі деталі хмари точок відтворюються як окремі геометричні об’єкти. Замість цього формується узагальнена модель, яка відображає основні архітектурні елементи на відповідному рівні деталізації (LOD-H 100-200 залежно від цілей проєкту). Процес зазвичай виконується напівавтоматично: автоматизовані інструменти створюють базову структуру, після чого фахівець здійснює перегляд, уточнення та вдосконалення моделі.

Важливою стадією є логічна організація моделі шляхом поділу на зони та блоки. Цей поділ може включати розмежування за конструктивними системами (несучі стіни, перекриття, дахи), фасадами, внутрішніми просторами (кімнати, зали, коридори) та спеціалізованими системами (розміщення дверей, вікон, сходів). Він не лише підвищує читабельність і керованість моделі, а й готує її до наповнення інформацією та параметризації (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Рівні деталізації та інформації HBIM-моделей для об’єктів архітектурної спадщини

Рівень деталізації	Опис геометрії	Інформаційний рівень	Застосування
LOD-H 100	Обриси будівлі	LOI-H 1: назва, призначення	Екстрена фіксація
LOD-H 200	Макроелементи (стіни, перекриття)	LOI-H 2: функція, матеріал	Документування пошкоджень
LOD-H 300	Архітектурні деталі (вікна, двері)	LOI-H 3: конструкція, стан	Реставраційні роботи
LOD-H 400	Усі елементи та внутрішнє обладнання	LOI-H 4: докладні дані, історія	Довгостроковий моніторинг

Джерело: розробка автора

В результаті здійснюється первинне наповнення базовими параметрами LOI-Heritage, зокрема, функціональним призначенням елементів, інформацією про конструктивні системи та матеріали, визначеними візуально або під час обстеження.

Етап 4. Інтеграція даних про пошкодження

Цей етап спрямований на документування та інтеграцію інформації про пошкодження в HBIM-модель. Він є унікальним для архітектурної спадщини, що постраждала внаслідок воєнних дій, оскільки систематичне й деталізоване документування пошкоджень має істотне значення для подальшої реставрації та відновлення [201]. На цьому етапі зони руйнування, визначені за результатами фотограмметрії та оглядів об’єкта, накладаються на інформаційну модель з відповідною георефернціацією та просторовою точністю. Це робить можливим встановлення просторових зв’язків між пошкодженнями та архітектурними елементами, що є вирішальним для розуміння обсягу й характеру пошкоджень.

Для систематизованого документування пошкоджень створюються спеціалізовані елементи моделі – так звані damage-елементи [253] – або модифікуються параметри наявних елементів для врахування інформації про пошкодження. Такі елементи можуть бути структуровані як окремі об’єкти, поєднані з архітектурними елементами, або як параметри цих елементів. Кожне пошкодження класифікується за систематичною схемою, що охоплює тип

пошкодження (тріщина, обвал, деформація тощо), його розташування, форму та обсяг (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Класифікація та методи документування пошкоджень у HBIM-моделях

Категорія	Приклади проявів	Способи документування в HBIM
Конструктивні пошкодження	Обвали, переломи конструктивних елементів, деформації	Окремі damage-елементи, параметри деформацій, 3D-геометрія втрат
Матеріальні пошкодження	Опіки, вибухові дефекти, корозія металу, пошкодження кам'яних поверхонь	Параметри матеріальних змін, фотографічна фіксація, текстури в моделі
Функціональні втрати	Втрата дверей, вікон, внутрішніх перегородок, елементів обшиття	Видалення елементів із моделі чи позначення як видалених, параметри відновлення

Джерело: розробка автора

Паралельно з класифікацією для кожного пошкодження визначається рівень достовірності даних, що відображає джерело інформації, а саме: результати натурного обстеження, аналіз лазерного сканування, а також дані, отримані з архівних матеріалів або фотодокументації.

Зазначений рівень достовірності має значення для планування робіт, оскільки інформує фахівців про те, яка саме інформація потребує додаткової верифікації на місці. Так, у разі виявлення пошкодження виключно за результатами аналізу лазерного сканування без його візуального підтвердження, таке пошкодження класифікується як таке, що потребує додаткової верифікації. Інтеграція даних про пошкодження в HBIM-модель робить можливим формування комплексної характеристики стану будівлі на момент обстеження та слугує підґрунтям для аналізу масштабу руйнувань і планування обсягу й типу реставраційних робіт.

Етап 5. Формування варіантів реставраційних рішень

Етап 5 передбачає інформаційну підтримку реставраційних рішень, а не автоматичний вибір виду втручання. У паралельних версіях або фазах HBIM відображають лише ті варіанти консервації, реставрації, реабілітації, музеєфікації чи пристосування, які опрацьовані фахівцями та є допустимими для

конкретного об’єкта архітектурної спадщини відповідно до предмета охорони і законодавчих вимог [169; 254].

Кожний варіант містить посилання на вихідні дані й авторів рішення, перелік збережених, реінтегрованих або доповнених фрагментів, матеріали й прийоми, вплив на автентичну субстанцію, вимоги безпеки, послідовність виконання та критерії контролю. Ступінь історико-архітектурної цінності і ступінь деструкції зіставляються як незалежні осі; жодна з них окремо не визначає рішення.

Етап 6. Підготовка даних для подальшої експлуатації та моніторингу

На цьому етапі здійснюється підготовка HBIM-моделі та пов’язаних з нею даних для довгострокового використання у системах управління активами та моніторингу будівель. Визначаються стандарти та норми для атрибутів моделі, що забезпечують її узгодженість і сумісність з іншими системами управління, зокрема з WebGIS-платформами для просторового управління даними та спеціалізованими системами управління активами культурної спадщини. [255]. Стандартизація атрибутів забезпечує те, що інформація в HBIM-моделі буде зрозумілою не лише первісним розробникам моделі, а й іншим фахівцям і системам, які працюватимуть з цими даними в майбутньому.

На завершення цього етапу встановлюються зв’язки між HBIM-моделлю та іншими системами даних і моніторингу, зокрема, підключаються датчики для моніторингу деформацій, вологи та інших параметрів, важливих для оцінювання стану будівлі. Налаштовуються бази даних обстежень, у яких зберігаються результати періодичних оглядів об’єкта, а також встановлюються зв’язки з системами аналітики великих даних (Big Data), що дозволяють аналізувати збережені дані для виявлення тенденцій і прогнозування потенційних проблем. HBIM-модель трансформується з інструмента первинної документації в динамічну систему управління інформацією, що супроводжує об’єкт упродовж усього його життєвого циклу (рис. 3.9).

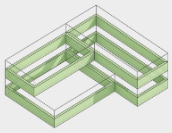
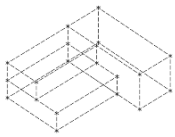
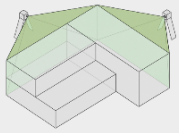
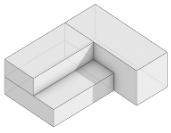
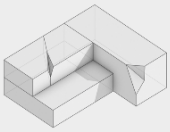
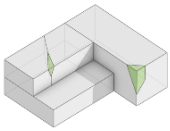
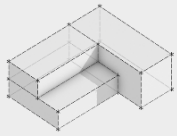
НВЕР · ПЛАН ВИКОНАННЯ НВІМ-ПРОЄКТУ

AIR
Вимоги до інформації активу — що потрібно власнику пам'ятки.

EIR
Вимоги до обміну інформацією — що передають виконавці.

BEP
План виконання НВІМ — як реалізується процес (нижче).

СІМ ЕТАПІВ НВІМ-ПРОЦЕСУ

ЕТАП	ГОЛОВНІ ЗАВДАННЯ	ГОЛОВНІ ІНСТРУМЕНТИ	ОЧІКУВАНИЙ РЕЗУЛЬТАТ
I Стратегічне планування	 Планування цілей, LOD/LOI, форматів	Брифінги, координація, нормативи	План проєкту
II Збирання вхідних даних	 Збирання креслень, архівів, нормативів	Архіви, GIS, реєстри пам'яток	База даних джерел
III Польове обстеження	 Обстеження, лазерне сканування, фотограмметрія	Лазерний сканер, БПЛА, камери	Хмара точок і фотограмметричні знімки
IV Побудова базової геометрії	 Опрацювання хмари точок, генерація геометрії	BIM-ПЗ, Revit, CloudCompare	НВІМ-модель базової геометрії
V Інтеграція пошкоджень	 Класифікація та інтеграція пошкоджень	BIM-ПЗ, класифікаційні схеми	Модель з даними про пошкодження
VI Варіанти реставрації	 Моделювання варіантів реставрації	BIM-ПЗ, фази, параметри вартості	Альтернативні сценарії з оцінками
VII Експлуатація та моніторинг	 Стандартизація, інтеграція з системами	WebGIS, IoT-сенсори, Big Data	Система моніторингу й управління

РОЗДІЛ 3 Рис. 3.9 НВЕР - План виконання НВІМ проєкту

Рис. 3.9 НВЕР - План виконання НВІМ проєкту

3.3 Практична адаптація HBIM-шаблону за ступенем деструкції та повнотою вихідних даних

У цьому підрозділі визначається не новий шаблон, а правило вибору параметрів його виконання за двома основними осями: ступенем деструкції 0–5 та повнотою вихідних даних. Режим роботи – оперативна фіксація, уточнювальне обстеження, реставраційне проєктування або експлуатаційний моніторинг – є третім сценарним шаром.

Матриця (рис. 3.10) не встановлює нових ступенів пошкодження. Вона прямо використовує шкалу ступенів деструкції 0–5 з рис. 3.5 і показує, які джерела, методи та критичні параметри слід залучати за певної комбінації стану й доступності даних. Незаповнені комбінації не домислюються: вони позначаються як інформаційна прогалина та формують завдання наступного обстеження.

Матрицю застосовують окремо до об’єкта, конструктивного елемента або зони пошкодження. Для ансамблю чи міського фрагмента кожен об’єкта архітектурної спадщини оцінюється окремо, а просторові зв’язки зберігаються на рівні GIS/HBIM; це є масштабом моделювання, а не «типом пам’ятки».

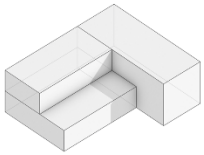
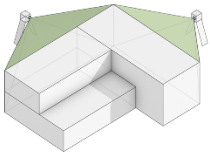
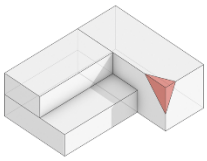
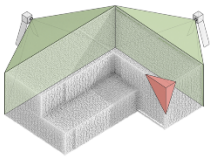
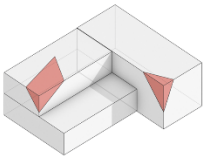
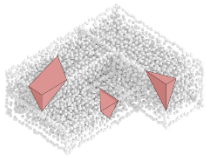
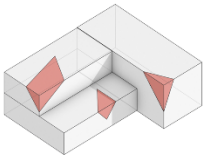
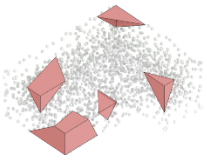
На першому кроці встановлюють одиницю оцінювання і ступінь деструкції 0–5. Рівень супроводжується відсотковою часткою ураження, джерелом і статусом достовірності. За дистанційної оцінки без натурної перевірки він залишається попереднім.

На другому кроці визначають повноту даних: повний перевірений пакет; лише актуальна польова фіксація; лише архівні або дистанційні джерела; відсутність достатніх даних. Повнота джерел не підвищується штучно через деталізацію геометрії: гіпотетичні елементи маркуються окремо.

На третьому кроці задають режим роботи. Він визначає мінімально достатній LOD-H/LOI-H і склад результату, але не змінює фактичний ступінь деструкції. Для оперативної фіксації пріоритетом є локалізація та доказовість; для реставраційного проєктування – матеріали, конструкції, автентичність і предмет охорони; для експлуатації – версійність та динаміка показників.

МАТРИЦЯ ПРАКТИЧНОЇ АДАПТАЦІЇ HBIM-ШАБЛОНУ

ЗА ШКАЛОЮ ДЕСТРУКЦІЇ І ДОСТУПНІСТЮ ДАНИХ

СТУПІНЬ ДЕСТРУКЦІЇ		ДОСТУПНІСТЬ ДАНИХ	РЕЖИМ РОБОТИ	РЕКОМЕНДОВАНІ МЕТОДИ	КРИТИЧНІ ПАРАМЕТРИ
0–1		Повний перевірений пакет	Планова фіксація	Архівні матеріали + контрольне знімання	Базовий стан; локальні дефекти; автентична субстанція
0–1		Лише актуальна польова фіксація	Оперативна фіксація	Фотофіксація / наземнесканування за доступністю	Координатна прив'язка; джерело; достовірність
2		Повний перевірений пакет	Уточнювальне обстеження	Сканування + фотограмметрія + матеріали обстеження	Матеріали; деформації; локалізація; технічний стан
2		Лише польові дані	Оперативна фіксація	Наземне знімання + БПЛА за безпечних умов	Межі втрат; небезпечні зони; прогалини даних
3		Повний перевірений пакет	Реставраційне проєктування	Сканування + фотограмметрія + архівні й лабораторні дані	Конструкції; автентичність; предмет охорони; деструкція
3–4		Лише архівні / дистанційні джерела	Дистанційне документування	Архівні джерела + дистанційне зондування	Рівень невизначеності; межі гіпотез; завдання верифікації
4		Повний перевірений пакет	Протиаварійна фіксація	Дистанційні методи + безпечне локальне обстеження	Збережені фрагменти; ризики; підсилення; обмеження доступу
5		Лише архівні джерела	Документування втрати	Архівні матеріали + GIS/HBIM	Підтверджений довоєнний стан; джерела; достовірн.; прогалини

РОЗДІЛ 3 Рис. 3.10 Матриця практичної адаптації HBIM-шаблону за шкалою деструкції і доступністю даних

Рис.3.10 Матриця практичної адаптації HBIM-шаблону за шкалою деструкції і доступністю даних

Рекомендовані в таблиці методи є мінімальним набором. Їх уточнюють за умовами безпечного доступу, конструктивною системою, складністю геометрії та наявністю попередніх досліджень. Результатом застосування матриці є не готове реставраційне рішення, а план збирання і структурування перевірюваних даних.

Відповідність сценаріїв рівням LOD-H/LOI-H наведено в таблиці на рис. 3.11. Час виконання не нормується універсальними строками: готовність визначається досягненням інформаційного результату та проходженням контролю якості.

Після вибору сценарію формується картка інформаційних вимог: обов’язкові елементи і зони, параметри, джерела, допустима точність, відповідальні за внесення та перевірку, а також критерій приймання. Різні частини одного об’єкта можуть мати різний LOD-H/LOI-H, якщо це прямо обґрунтовано завданням і доступністю даних.

Інформаційна невизначеність відображається атрибутами SourceID, CaptureMethod, CaptureDate, Accuracy, ConfidenceLevel і VerificationStatus. Архівна гіпотеза та виміряний фактичний стан зберігаються в різних часових шарах і не зливаються в одну геометрію без позначення походження.

Для ступенів деструкції 4–5 першочергово документуються збережені фрагменти, межі небезпечних зон, тимчасові підсилення й умови доступу. Якщо об’єкт недоступний або втрачений, HBIM фіксує підтверджений обсяг знань і прогалини; цифрове відтворення за архівами має статус дослідницької гіпотези, а не проєктного рішення.

Отже, практична адаптація полягає у керованій зміні обсягу робіт усередині незмінного семиетапного процесу. Це забезпечує простежуваний перехід від стану й доступних джерел до конкретних інформаційних вимог моделі.

РІВНІ ДЕТАЛІЗАЦІЇ HBIM-МОДЕЛІ ТА КРИТЕРІЇ ГОТОВНОСТІ

ДЛЯ РІЗНИХ СЦЕНАРІЇВ РОБОТИ З ПОШКОДЖЕНИМИ ОБ'ЄКТАМИ АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ

СЦЕНАРІЙ РОБОТИ	LOD-H	LOI-H	КРИТЕРІЙ ПРИЙМАННЯ	ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ
Оперативна фіксація	100–200	Мінімальний (базова геометрія + дефекти)	Усі доступні зони прив'язані; джерело й достовірність зазначені	Локалізація, площа пошкодження, тип дефекту
Невідкладна реставрація	200–250	Базовий (геометрія+ структурні пошкодження)	Геометрія узгоджена з обстеженням; прогалини та небезпечні зони позначені	Тривимірні контури, видимість руйнувань
Планова реставрація	300–400	Розширений (конструктивні елементи + матеріали + втручання)	Дані простежувані; варіанти пов'язані з науково-проєктною документацією	Деталізація, технології, історія, матеріали
Моніторинг, експлуатація	500	Повний (геометрія + конструкції + сенсори + історія)	Базовий стан прийнято; регламент оновлення, ролі й пороги затверджено	Усі параметри, зокрема датчики деформацій

РОЗДІЛ 3 Рис. 3.11 Рівні деталізації HBIM-моделі та критерії готовності для різних сценаріїв роботи з пошкодженими об'єктами архітектурної спадщини

Рис. 3.11 Рівні деталізації HBIM-моделі та критерії готовності для різних сценаріїв роботи

3.4 Формулювання пропозицій щодо застосування HBIM-моделі в процесі подальшої експлуатації об’єктів архітектурної спадщини

Цей розділ логічно продовжує попередні етапи дослідження, у межах яких визначено додаткові HBIM-параметри для пошкоджених будівель (підрозділ 3.1), сформовано шаблон побудови цифрової моделі об’єкта архітектурної спадщини (підрозділ 3.2) і уточнено його структуру (підрозділ 3.3). На відміну від попередніх етапів, присвячених побудові моделі, цей підрозділ зосереджено на її використанні під час експлуатації об’єкта архітектурної спадщини.

Після завершення первинної фіксації та реставраційних робіт HBIM-модель переходить в експлуатаційний режим. Її практичними функціями є ведення базового стану, планування оглядів, реєстрація дефектів і втручань, контроль ризиків, формування завдань з утримання та оновлення цифрового паспорта.

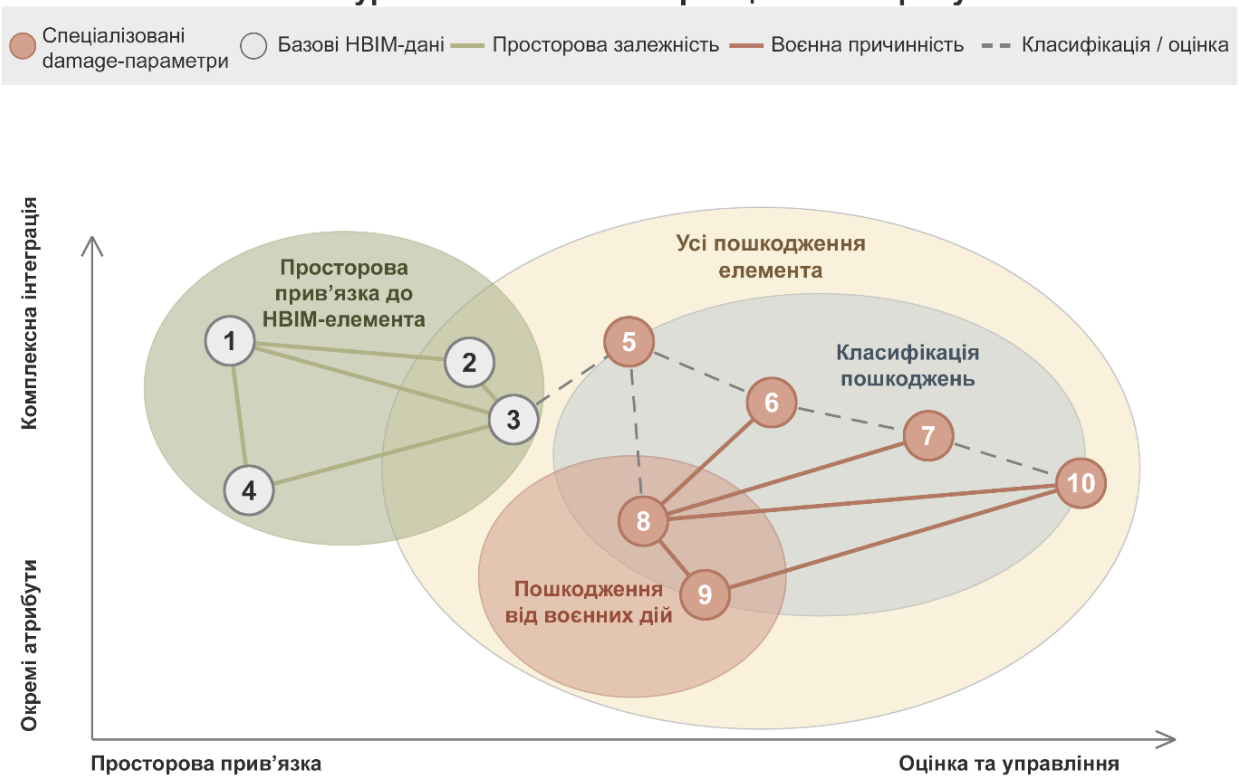
Кожний запис експлуатаційного циклу повинен мати ObjectID/ElementID, дату, виконавця, метод і точність, просторову прив’язку, вихідний файл або документ, статус верифікації та зв’язок із попередньою версією. Так утворюється порівнюваний ряд станів, а не набір непов’язаних звітів.

Періодичність оглядів і порогові значення не задаються універсально. Їх встановлює затверджена програма моніторингу з урахуванням матеріалів, конструктивної схеми, ступеня деструкції, попередньої динаміки й умов експлуатації. Автоматичний сигнал сенсора створює завдання на перевірку, але не замінює інженерного або реставраційного висновку.

Експлуатаційне рішення реєструється разом з обґрунтуванням, погодженням, відповідальними особами, матеріалами, строками, результатами контролю якості й позначенням фактичного виконання. Запроєктований і реалізований стани зберігаються окремими версіями.

ПРОСТІР ПЕРЕТИНУ ДАНИХ У HBIM-МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ

Приклади взаємозв'язків між геометрією елементів, зонами пошкоджень, воєнними ураженнями та класифікаційними атрибутами



1	Геометрія елемента (стіна, склепіння, перекриття)	6	Тип пошкодження (тріщина, скол, деформація, обвал)
2	Bounding box зони пошкодження	7	Ступінь пошкодження (шкала 0–5 / 0–100%)
3	Центр bounding box має бути в межах геометрії елемента	8	Воєнне походження (вибухова хвиля, уламкове ураження, пожежа)
4	Локалізація: поверх, фасад, дах, перекриття	9	Автентичність фрагмента та пов'язаність із подіями війни
5	Площа пошкодженої поверхні та об'єм втрат матеріалу	10	Категорія загрози, ризик обвалення, пріоритет втручання

КЛЮЧОВИЙ ПЕРЕТИН

Ядром інтеграції є просторовий зв'язок між HBIM-елементом і Damage-областю: зона пошкодження повинна бути геометрично прив'язана до конкретного елемента, а воєнні ушкодження становлять підмножину всіх пошкоджень та доповнюються атрибутами походження, автентичності, ризику й відновлення.

РОЗДІЛ 3 Рис. 3.12 Простір перетину даних у HBIM-моделі об'єкта архітектурної спадщини

Рис. 3.12 Простір перетину даних у HBIM моделі

Для об’єктів, пошкоджених війною, додатково зберігаються відомості про подію, тип і механізм впливу, доказовий статус матеріалів та обмеження доступу. Геометричні, технічні, історико-архітектурні й правові дані поєднуються через ідентифікатори, але не підміняють один одного. (рис. 3.12)

Практичний склад експлуатаційних даних наведено в таблиці 3.5. Для кожного виду моніторингу в моделі задаються не лише метод і періодичність, а й контрольований показник, подія-тригер та результат реагування.

Таблиця 3.5.

Інтеграція даних моніторингу в HBIM-модель

Тип даних моніторингу	Методи збирання	Періодичність / подія-тригер	Контрольований результат у HBIM
Геометричні деформації	Наземне лазерне сканування, тахеометрія	Безперервно або серіями за програмою	Порівняння поверхонь/точок; карта зміщень; статус верифікації
Вологість і температура	IoT-датчики, гігротермографи	За програмою; у разі прискорення змін	Часовий ряд; перевищення індивідуального порога; завдання на огляд
Динаміка тріщин	Маячки, тріщиноміри, фотограмметрія	За програмою або після виявлення дефекту	Розкриття/довжина; тренд; прив’язка до елемента; сигнал перевірки
Стан матеріалів	Неруйнівні та лабораторні методи	Планово; після події або звернення	Протокол дослідження; точка відбору; висновок; зв’язок із матеріалом
Видимі пошкодження	Огляд, фото- і відеофіксація	За програмою; після ударного/сейсмічного впливу	Версія дефекту; локалізація; масштаб; відповідальний; рішення
Коливання конструкції	Акселерометри, вібромонітори	За програмою; після небезпечного впливу	Часовий ряд; відхилення від базового стану; завдання на інженерну перевірку

Джерело: розробка автора.

Прив’язка сенсорів і засобів автоматичного моніторингу до конструктивних елементів забезпечує безперервне відстеження деформацій, змін параметрів середовища та динаміки роботи конструкцій. IoT-пристрої (датчики вологості й температури, акселерометри, тензодатчики) у поєднанні з HBIM-моделлю формують систему раннього виявлення критичних змін технічного стану будівлі. Для об’єктів архітектурної спадщини, розташованих у сейсмічно активних районах або поблизу зони бойових дій, така система дає змогу своєчасно реагувати на загрозу обвалу чи втрати опорної здатності конструкцій [256; 257].

Методи аналізу великих даних (Big Data) дають змогу виявляти тенденції розвитку пошкоджень і прогнозувати зміну стану конструкцій на основі накопичених спостережень. Для об’єктів, пошкоджених внаслідок воєнних дій, це дає змогу розрізняти активні процеси руйнування від стабілізованих дефектів і визначати пріоритети консерваційних заходів. Методи машинного навчання застосовуються для розпізнавання типів пошкоджень на зображеннях і автоматизації оцінки їхнього ступеня, що скорочує час аналізу та зменшує суб’єктивність експертних висновків [243].

Дані моніторингу порівнюються з базовим і попереднім станами. Якщо показник перевищує встановлену для конкретного об’єкта межу або демонструє стійку негативну динаміку, HBIM формує запис про відхилення, пов’язане завдання на позапланове обстеження та перелік зон, доступ до яких слід обмежити.

Для підтримки реагування в експлуатаційній моделі зберігаються сценарії небезпечних впливів (табл. 3.6). Вони не прогнозують подію автоматично, а визначають, які елементи, маршрути, датчики й документи мають бути доступні відповідальним особам у разі її настання

На основі опрацьованих наукових джерел, аналізу практик застосування HBIM та з урахуванням обмежень, виявлених у попередніх розділах,

сформульовано низку авторських пропозицій. Кожне положення доповнене обґрунтуванням і практичними рекомендаціями щодо його реалізації.

Таблиця 3.6.

Сценарії небезпечних впливів під час експлуатації та функції HBIM для моніторингу і реагування

Сценарій небезпечного впливу	Критичні точки контролю в BIM	Моделювання наслідків	Функції HBIM для підтримки реагування	Системи моніторингу
Вибухові навантаження	Опорні конструкції, з'єднання	Розподіл навантажень, ризик обвалу	Визначення критичних зон, оцінювання доступності, планування тимчасового підсилення та безпечних маршрутів	Вібромонітори, тахеометрія
Пожежа	Матеріали, перекриття, шахти	Поширення вогню, слабкі місця	Аналіз шляхів поширення пожежі, визначення зон ризику та шляхів доступу/евакуації	Теплокамери, датчики диму
Землетрус	Фундамент, стійкість конструкцій	Деформації, резонанс	Визначення найбільш уразливих елементів та зон обмеження доступу	Акселерометри, GPS
Паводок	Підвал, нижні рівні, вентиляція	Затоплення, корозія	Визначення зон поширення води, пріоритизація захисних і відновлювальних заходів	Датчики води, насоси
Нестійкий стан окремих елементів (ризик падіння/обвалення)	Карнизи, парапети, декор	Можлива траєкторія падіння та межі небезпечної зони	Обмеження доступу, завдання на перевірку та тимчасове закріплення	Фотограмметрія, маячки

Джерело: розробка автора.

Пропозиція 1. Багаторівнева структура HBIM-моделі з функціональним розмежуванням рівнів (рис. 3.13).

HBIM-модель об’єкта архітектурної спадщини доцільно вибудовувати як ієрархічну систему, у якій кожен рівень має визначений масштаб, набір даних і сферу застосування. Така організація дає змогу застосовувати одну модель для різних потреб – від управлінських до реставраційних – без її постійної перебудови під кожен окремий випадок.

Пропонована структура передбачає кілька взаємопов’язаних рівнів.

Рівень 0 (1:10 000, міський або ландшафтний контекст), на якому фіксується положення об’єкта в структурі міста або території: зв’язки з іншими об’єктами архітектурної спадщини, транспортною та інженерною інфраструктурою, природним середовищем. Модель використовується для аналізу архітектурних ансамблів, планування розвитку територій та взаємодії з державними органами. Основні дані – географічні координати, адміністративна належність, охоронний статус.

Рівень 1 (1:5000, безпосереднє оточення) охоплює територію в радіусі приблизно 200–300 м довкола об’єкта архітектурної спадщини: прилеглу забудову, вуличну мережу, потенційні джерела ризику (інженерні мережі, промислові об’єкти). Модель на цьому рівні дає змогу оцінити вплив середовища на технічний стан об’єкта та планувати захисні заходи. Тут фіксуються особливості рельєфу, умови огляду об’єкта та експозиції.

Рівень 2 (1:500, загальна геометрія будівлі) відображає об’ємно-просторову структуру: габарити, висоти, основні конструктивні схеми, поверховість, а також узагальнені пошкодження. Застосовується для документування стану та первинної оцінки, зокрема на рівні управлінських рішень. Дані подаються з точністю, достатньою для загального аналізу (до сантиметрів).

Рівень 3 (1:100, архітектурна деталізація) містить фасади, планувальну структуру, основні декоративні елементи, великі конструктивні вузли. Призначений для архітектурного та інженерного аналізу, підготовки проєктних рішень та оцінки культурної цінності окремих частин об’єкта. На цьому рівні уточнюються матеріали, композиційні особливості та розміщення інженерних систем.

Рівень 4 (1:20–1:10, деталі та пошкодження) – найвищий рівень деталізації, де опрацьовуються окремі елементи: фрагменти кладки, дерев’яні конструкції, деталі декору. Тут фіксуються конкретні дефекти: тріщини, втрати матеріалу, відшарування. Модель застосовується для контролю виконання робіт і планування точкових консерваційних заходів. Дані мають максимальну точність і мають інформацію про стан матеріалів та попередні втручання.

Запропонована структура дає змогу розмежувати задачі за рівнями та не перевантажувати модель зайвою деталізацією там, де вона не потрібна. Управлінські рішення ухвалюють на узагальнених даних, тоді як детальне опрацювання залишається доступним для фахівців у межах нижчих рівнів. Це спрощує роботу з моделлю і водночас зберігає повноту інформації.

Пропозиція 2. Реалізувати рольову матрицю доступу до експлуатаційних даних (рис. 3.13).

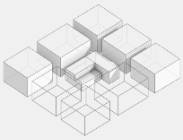
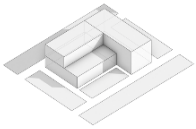
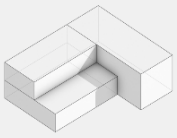
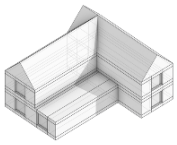
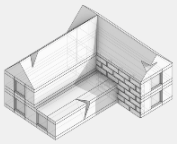
Публічний рівень містить перевірені історичні відомості, узагальнений стан і безпечні візуальні матеріали. Професійний рівень містить повну геометрію, результати обстежень, параметри матеріалів, реставраційні рішення й журнали робіт. Обмежений рівень охоплює вразливі конструктивні зони, охоронні системи, маршрути реагування та доказові матеріали з установленими правами доступу.

Матриця повинна задавати права перегляду, редагування, погодження й експорту для кожної ролі. Усі дії з моделлю реєструються в журналі; відкритість даних про спадщину поєднується із захистом технічно та безпеково чутливої інформації.

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ BIM-МОДЕЛІ

ТРИ ПРОПОЗИЦІЇ · БАГАТОРІВНЕВА СТРУКТУРА · РОЛЬОВИЙ ДОСТУП · ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ ПРОФІЛЬ І ОБМІН

ПРОПОЗИЦІЯ 1 · БАГАТОРІВНЕВА СТРУКТУРА BIM-МОДЕЛІ

РІВЕНЬ 0	МІСТО / ЛАНДШАФТ		1:10 000	- Положення в структурі міста - Зв'язки з іншими пам'ятками - Транспортна й інженерна мережа - Природне середовище
РІВЕНЬ 1	ОТОЧЕННЯ		1:5000 200–300м	- Прилегла забудова - Вулична мережа - Джерела ризику (мережі, промзони) - Планування захисних заходів
РІВЕНЬ 2	ЗАГАЛЬНА ГЕОМЕТРІЯ		1:500	- Габарити, висоти, поверховість - Конструктивні схеми - Узагальнені пошкодження
РІВЕНЬ 3	АРХІТЕКТУРНА ДЕТАЛІЗАЦІЯ		1:100	- Фасади, планувальна структура - Декоративні елементи - Конструктивні вузли - Матеріали
РІВЕНЬ 4	ДЕТАЛІ ТА ПОШКОДЖЕННЯ		1:20 – 1:10	- Фрагменти кладки, декор - Дерев'яні конструкції - Тріщини, втрати, відшарування

ПРОПОЗИЦІЯ 2 · РОЛЬОВА МАТРИЦЯ ДОСТУПУ ДО ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДАНИХ

ПУБЛІЧНИЙ
Громадськість, освіта, медіа

- Перевірені історичні відомості
- Узагальнений стан об'єкта
- Безпечні візуальні матеріали

ПРОФЕСІЙНИЙ
Архітектори, інженери, реставратори

- Повна геометрія моделі
- Обстеження, параметри матеріалів
- Реставраційні рішення, журнали робіт

ОБМЕЖЕНИЙ
Цивзахист, держуправління

- Вразливі конструктивні зони
- Охоронні системи, маршрути реагування
- Доказові матеріали

ПРОПОЗИЦІЯ 3 · МІНІМАЛЬНИЙ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ ПРОФІЛЬ HBIM І ПРАВИЛА ОБМІНУ

ОБОВ'ЯЗКОВИЙ ПРОФІЛЬ

- ID об'єкта та елемента
- Правовий статус, предмет охорони
- Матеріал, ступінь деструкції
- Історико-архітект. цінність, джерело
- Історія втручань, моніторинг, версії

ВІДКРИТІ ФОРМАТИ ОБМІНУ

- IFC — об'єктно-параметрична структура
- CityGML / GIS — територіальний контекст
- CIDOC CRM — семантичні зв'язки
- Перевірка ID, одиниць, СК, повноти полів

ОБМІН З ДЕРЖ / МУНІЦ. СИСТЕМАМИ

- До держреєстру / GIS — лише верифіковані поля
- HBIM не замінює облікової документації
- Дозвільна й науково-проєктна — окремо

РОЗДІЛ 3 Рис. 3.13 Формулювання пропозицій щодо застосування BIM-моделі в подальшій експлуатації об'єктів архітектурної спадщини

Рис. 3.13 Формулювання пропозицій щодо застосування HBIM моделі

Пропозиція 3. Установити мінімальний експлуатаційний профіль HBIM і правила обміну з державними та муніципальними системами (рис. 3.13).

Обов'язковий профіль охоплює ідентифікатор об'єкта й елемента, правовий статус, предмет охорони, матеріал, фактичний технічний стан, ступіньдеструкції, документовану історико-архітектурну цінність, джерело й достовірність оцінки, історію втручань, програму моніторингу та журнал версій.

Обмін виконується у відкритих форматах: IFC – для об'єктно-параметричної структури, CityGML/GIS – для територіального контексту, CIDOC CRM – для семантичних зв'язків із культурними джерелами. Перед прийманням перевіряються ідентифікатори, одиниці, координатна система, повнота обов'язкових полів і збереження користувацьких властивостей після тестового експорту.

До державного реєстру або муніципальної GIS передаються лише верифіковані поля відповідного рівня доступу. HBIM залишається інформаційним джерелом і не замінює облікової, дозвільної чи науково-проєктної документації.

Пропозиція 4. Формувати й вести цифровий паспорт об'єкта архітектурної спадщини на основі HBIM.(рис. 3.14)

Цифровий паспорт визначається як версійне інформаційне середовище, просторовим ядром якого є HBIM-модель. Він не замінює облікової картки, паспорта пам'ятки, акта технічного стану або науково-проєктної документації, а пов'язує перевірені відомості з їх першоджерелами й забезпечує повторне використання даних [84]. Методика передбачає шість послідовних стадій.

Стадія 1 – ідентифікація та правова прив'язка. Фіксуються унікальний ідентифікатор, назви, адреса, координати, вид і категорія об'єкта, охоронний номер, рішення про взяття на облік або занесення до Реєстру, предмет охорони, режими використання та посилання на чинну документацію. Статус пам'ятки зберігається окремо від оцінки елементів.

Стадія 2 – збирання й валідація джерел. Архівні креслення, фотографії, описи, матеріали обстежень, сканування, фотограмметрії, лабораторних аналізів

і реставраційних робіт реєструються із зазначенням автора, дати, методу, точності, прав доступу та статусу перевірки. Суперечливі відомості не усереднюються, а зберігаються як альтернативні версії з поясненням.

Стадія 3 – формування просторового ядра та параметризація. Геометрія створюється на рівні LOD-H, достатньому для поставленого завдання, і пов'язується з LOI-H. На рівні об'єкта, елемента й зони вносяться матеріали, часові стани, технічний стан, параметри воєнного впливу, ступінь деструкції, документована історико-архітектурна цінність, автентичність, виконані й заплановані втручання.

Стадія 4 – формування тематичних блоків паспорта. Дані організовуються за блоками: ідентифікація і правовий статус; історія та джерела; геометрія й конструкції; матеріали та дослідження; пошкодження і ризики; реставраційні втручання; поточний стан і моніторинг; план утримання; доступ, версії та архівування. Кожний блок має відповідального за внесення й перевірку.

Стадія 5 – відображення полів для Облікової картки. Із верифікованих записів формується структурована вибірка відомостей про найменування, місце розташування, датування, авторство, вид, категорію, опис, технічний стан, предмет охорони, фото- й графічні матеріали та джерела. Вибірка використовується для підготовки або актуалізації Облікової картки уповноваженим виконавцем; перед поданням вона проходить фахову й правову перевірку та не вважається автоматично затвердженою документацією.

Стадія 6 – приймання, оновлення і довгострокове зберігання. Перевіряються повнота обов'язкових полів, простежуваність джерел, геометрично-атрибутивна узгодженість, права доступу та якість експорту. Зміни вносяться версіями із журналом авторства; зберігаються робоча, архівна й резервна копії у відкритих довготривалих форматах. Періодичність актуалізації визначається подіями – новим обстеженням, пошкодженням, втручанням або зміною правового статусу.

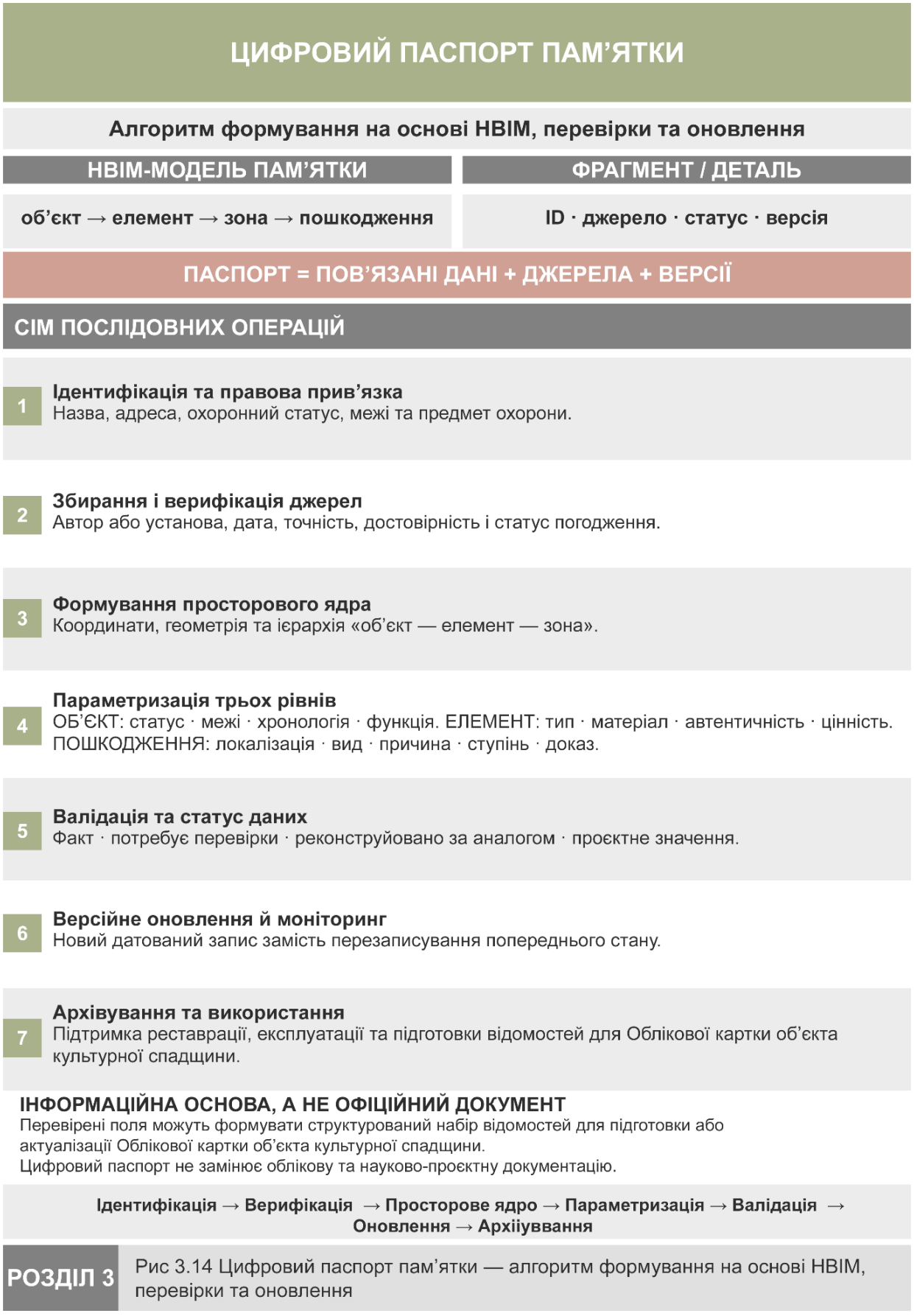


Рис.3.14 Цифровий паспорт об'єкта архітектурної спадщини

Пропозиція 5. Міжнародна інтеграція BIM-моделей для залучення донорських ресурсів. (рис. 3.15)

Інтеграція українських BIM-моделей у міжнародні цифрові платформи є одним з основних механізмів для залучення фахової підтримки та фінансування відновлення пошкоджених об’єктів. Це дає змогу вийти за межі обміну даними, забезпечивши повноцінну інтеграцію об’єктів у глобальне інформаційне середовище культурної спадщини [36; 244].

Стандартизовані протоколи обміну даними:

- Для архітектурної геометрії передбачено застосування формату ifcXML як розширюваного представлення IFC, що забезпечує технічну сумісність із сучасними HBIM-платформами.
- Культурознавча інформація структурується відповідно до CIDOC-CRM – міжнародної моделі, яка дає змогу уніфіковано описувати об’єкти культурної спадщини та інтегрувати їх у музейні та архівні системи.
- Для просторової взаємодії із GIS-середовищами застосовуються стандарти WMS і WFS, що дають змогу працювати з геоданими без необхідності передання повної тривимірної моделі.
- Семантичний рівень даних ґрунтується на RDF-моделі, яка дає змогу представляти інформацію у формі пов’язаних графів і забезпечує її машинну обробку в системах штучного інтелекту.

Платформи та партнери інтеграції:

UNESCO World Heritage Digital Library – для розміщення моделей об’єктів світової та потенційної світової спадщини, що формує міжнародну видимість проєктів відновлення.

Europeana – європейський цифровий простір культурної спадщини, придатний для поширення 2D та описових компонентів BIM-моделей.

OpenHERITAGE – професійне середовище обміну HBIM-рішеннями та методиками між фахівцями.

Wikimedia Commons – платформа для відкритого доступу до тривимірних моделей і візуальних матеріалів.



Рис.3.15 Міжнародна інтеграція HBIM для залучення донорських ресурсів

ICOMOS International – експертна мережа, що забезпечує методичний супровід складних реставраційних кейсів.

Механізми залучення донорської підтримки:

- відкриті BIM-моделі низького рівня деталізації забезпечують візуальну фіксацію масштабу руйнувань і формують аргументовану основу для фінансування відновлення;
- доступність структурованих даних створює умови для дистанційної участі міжнародних експертів у розробленні технічних рішень;
- регулярне оновлення моделей із фіксацією етапів реставрації забезпечує прозорість реалізації проєктів і підсилює довіру донорів;
- єдине цифрове середовище дає змогу координувати роботу міжнародних команд без необхідності постійної фізичної присутності.

Апробація в межах освітнього процесу КНУБА

Тематика проєкту студентів архітектурного факультету стосувалася актуальних питань відновлення селища Макарів після руйнувань, спричинених війною. У межах проєкту розглядалися реальні виклики, зокрема реконструкція пошкоджених будівель, створення соціально орієнтованого житла, формування безпечних громадських просторів, проєктування укриттів та організація логістичних процесів. Група студентів займалася проєктуванням реконструкції школи з урахуванням інтеграції історичної частини, ймовірно, елементів костелу.

На цьому етапі основним інструментом був формат IFC, який забезпечує інтероперабельність даних і збереження параметричних характеристик об’єктів під час їх інтеграції в єдину систему. Для досягнення цієї мети, разом із класичними класифікаторами для нового будівництва відповідно до BEP, застосовувалися класифікатори пошкоджень, що описують причину, вид і ступінь пошкодження кожного елемента. Отримана інформація надалі може використовуватися під час проєктування реставрації та експлуатації об’єкта (рис. 3.16).



Рис. 3.16 Історичний контекст та адаптація - школа в селищі Макарів

Висновки до розділу 3

У третьому розділі сформовано практичні компоненти інформаційної моделі об’єкта архітектурної спадщини пошкодженого внаслідок воєнних дій: систему додаткових параметрів, семиетапний HBIM-процес, матрицю його адаптації та регламент подальшої експлуатації. Одержані результати дають підстави для таких висновків:

1. Систематизовано чотири функціональні блоки HBIM-параметрів: пошкодження; конструктивна безпека і ризик; документована історико-архітектурна цінність та автентичність; життєвий цикл відновлення. Авторськими складовими є формалізація просторового класу пошкодження, атрибутів воєнного впливу, зв’язку з подіями війни і правил простежуваності. Статус об’єкта архітектурної спадщини, композиційна роль, значення у структурі міста й предмет охорони зберігаються як окремі зовнішні експертні відомості.

2. Уточнено операційну шкалу ступеня деструкції 0–5: кожний рівень пов’язано з орієнтовним відсотковим інтервалом ураження та складом BIM-дій. Відсоток описує частку ураженої площі, об’єму або елементів, а шкала 0–5 – наслідки для цілісності; обидва показники не підміняють нормативної категорії технічного стану. Історико-архітектурна цінність і ступінь деструкції зіставляються як незалежні осі.

3. Сформовано семиетапний практичний HBIM-процес: стратегічне планування; збирання і валідація джерел; польова фіксація; побудова базової геометрії; інтеграція пошкоджень; інформаційна підтримка реставраційних рішень; підготовка до експлуатації. Рішення про реставраційний метод вноситься з науково-проєктної документації та не генерується моделлю автоматично.

4. Розроблено матрицю практичної адаптації шаблону за двома основними осями – ступенем деструкції 0–5 і повнотою вихідних даних – та третім сценарним шаром, режимом роботи. Матриця визначає мінімально достатні

методи, LOD-H/LOI-H, критичні параметри і критерії готовності без запровадження додаткової шкали пошкодження або універсальних строків виконання.

5. Запропоновано експлуатаційний регламент HBIM: подієве версійне оновлення, порівняння станів, індивідуально встановлені пороги моніторингу, рольову матрицю доступу, відкриті формати обміну та методику цифрового паспорта. Демонстраційний приклад на елементі «зовнішня несуча стіна» перевіряє логічну узгодженість полів, але не подається як натурна апробація конкретного об’єкта архітектурної спадщини.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв’язано наукове завдання, що полягає в розробленні науково-методичних засад формування будівельної інформаційної моделі об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій, шляхом систематизації вихідних даних, адаптації рівнів геометричної та інформаційної деталізації, формування спеціалізованих HBIM-параметрів та побудови адаптивного інформаційного процесу, орієнтованого на документування пошкоджень, реставраційне проєктування, відновлення й подальшу експлуатацію об’єкта.

1. Узагальнено вітчизняний і закордонний досвід застосування BIM/HBIM до об’єктів культурної спадщини та систематизовано особливості роботи з архітектурною спадщиною, пошкодженою внаслідок воєнних дій. Встановлено, що специфіка таких об’єктів визначається не лише складністю й нерегулярністю історичної геометрії, а й необхідністю одночасного врахування історико-архітектурної, матеріальної, технічної, правової та ціннісної інформації. Цифрова фіксація в умовах воєнних руйнувань має поширюватися не лише на об’єкти архітектурної спадщини, внесені до Державного реєстру нерухомих пам’яток України, а й на щойно виявлені об’єкти культурної спадщини, що

зазнали пошкоджень. Узагальнення обмежене опрацьованими джерелами й типологіями.

2. Обґрунтовано доцільність застосування HBIM як інформаційно-аналітичної основи роботи з об’єктами архітектурної спадщини. Визначено, що HBIM доцільно розглядати не як цифрову тривимірну копію споруди, а як структуроване інформаційне середовище, у якому геометрія пов’язана з історичними, технічними, семантичними та експлуатаційними даними. Такий підхід забезпечує можливість використання моделі на різних стадіях життєвого циклу об’єкту – від фіксації та дослідження до реставраційного проєктування, моніторингу і подальшої експлуатації. Водночас установлено, що стандартні BIM-підходи, сформовані переважно для нового будівництва, потребують адаптації до інформаційної специфіки культурної спадщини. Кількісне оцінювання за економією часу, коштів і зменшенням кількості помилок потребує подальших досліджень на реальних проєктах.

3. Сформовано структуру вихідних даних для створення HBIM-моделі об’єкта архітектурної спадщини. Визначено п’ять взаємопов’язаних класів даних: геометричні; атрибутивні та семантичні; історико-архітектурні; матеріальні; функціональні. Для кожного класу визначено його роль у формуванні інформаційної моделі та способи інтеграції в BIM-середовище. Структуру вихідних даних доповнено нормативно-правовим блоком, обліковою документацією, журналом фіксації воєнних пошкоджень та параметром Heritage Status, що дає змогу пов’язати інформаційну модель із правовим статусом об’єкта культурної спадщини.

4. Розроблено адаптовану до завдань культурної спадщини систему рівнів деталізації LOD-H та інформаційного наповнення LOI-H. Запропонована шкала LOD-H100–LOD-H500 відображає послідовне нарощування геометричної й інформаційної повноти моделі: від концептуальної та екстреної фіксації до детального реставраційного проєктування й експлуатаційного моніторингу. Для кожного рівня LOD-H визначено відповідний склад LOI-H, який включає атрибутивні, нормативні та семантичні характеристики. Встановлено, що рівень

деталізації не може бути однаковим для всіх об’єктів архітектурної спадщини і має визначатися типом об’єкта, ступенем його збереженості, доступністю вихідних даних та завданнями конкретної стадії робіт.

5. За результатами порівняльного аналізу програмних засобів HBIM установлено відсутність універсальної програмної платформи, однаково придатної для всіх типів об’єктів архітектурної спадщини і всіх етапів роботи. Вибір інструментарію має визначатися типологією об’єкта, складністю його геометрії, характером вихідних даних, завданнями документування, реставраційного проєктування та моніторингу. Встановлено доцільність комбінування засобів роботи з 3D-скануванням і хмарами точок, алгоритмічного та параметричного моделювання, BIM-платформ і GIS, а для довгострокового збереження інформації – використання відкритих форматів, насамперед IFC.

6. Формалізовано систему додаткових HBIM-параметрів для об’єктів архітектурної спадщини, пошкоджених унаслідок воєнних дій. Авторські параметри описують просторовий клас пошкодження, тип, причину й механізм впливу, локалізацію, ступінь деструкції, достовірність, структурний ризик, зв’язок із подіями війни та життєвий цикл відновлення. Для обґрунтування втручань зіставляються дві незалежні осі – документований ступінь історико-архітектурної цінності та ступінь деструкції – з урахуванням автентичності й технічної безпеки. Запропоновано шестирівневу шкалу ступеня пошкодження 0–5 та спосіб просторової локалізації зон дефектів за допомогою геометричного bounding box, що створює основу для машинного опрацювання й подальшої автоматизації аналізу - цей прийом сформувався в процесі дослідження як додаткове рішення початкового завдання параметризації пошкоджень. Автоматизоване виявлення пошкоджень потребує окремої реалізації та перевірки.

7. Сформовано адаптивний шаблон HBIM-процесу створення цифрової моделі об’єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій. Шаблон охоплює 7 взаємопов’язаних етапів: стратегічне планування; збір і валідацію вихідних даних; інструментальну фіксацію; формування базової

геометрії; інтеграцію даних про пошкодження; опрацювання реставраційних рішень; підготовку інформації для експлуатації та моніторингу. Розроблено матрицю адаптації шаблону за трьома критеріями – ступенем пошкодження, доступністю вихідних даних і режимом роботи. Відповідно до мети застосування рекомендовано LOD-H100/200 для оперативної фіксації, LOD-H300/400 – для реставраційного проєктування, LOD-H500 – для довгострокового моніторингу та експлуатації.

8. Розроблено методику формування цифрового паспорта об'єкта архітектурної спадщини на основі HBIM. Вона охоплює ідентифікацію та правову прив'язку об'єкта, збирання й валідацію джерел, створення просторового ядра, параметризацію тематичних блоків, перевірку, версійне оновлення та довгострокове зберігання. Передбачено формування з верифікованих полів паспорта структурованого набору відомостей для підготовки або актуалізації Облікової картки об'єкта культурної спадщини. Встановлено, що цифровий паспорт є інформаційною основою і не замінює облікової та науково-проєктної документації, складеної й затвердженої в установленому порядку.

9. Логічну повноту запропонованої структури HBIM перевірено на демонстраційному модельному прикладі параметричного опису елемента «зовнішня несуча стіна». Приклад показав можливість взаємопов'язаного представлення даних про елемент, його пошкодження, безпеку, зовнішню експертну оцінку цінності, реставраційні прийоми та моніторинг. (рис. 3.15)

Таким чином, поставлену мету дослідження досягнуто шляхом формування цілісної методики створення HBIM-моделі об'єкта архітектурної спадщини, яка поєднує систематизований склад вихідних даних, адаптивні рівні LOD-H/LOI-H, спеціалізовану систему параметрів воєнних пошкоджень, структуровану послідовність BIM-процесу та можливість подальшого використання моделі як цифрової інформаційної основи реставрації, відновлення, моніторингу й експлуатації об'єкта культурної спадщини.



Рис. В.3 Основні результати дослідження

Список використаних джерел

1. ДСТУ ISO 19650-1:2020. Організація та оцифрування інформації щодо будівель і споруд, включно з будівельним інформаційним моделюванням (BIM). Управління інформацією з використанням BIM. Частина 1: Концепції та принципи. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=89571 (дата звернення: 09.08.2026).

2. Exchange Information Requirements (EIR). BIM Dictionary. URL: https://bimdictionary.com/uk/exchange-information-requirements/1 (дата звернення: 09.08.2026).

3. GIS. Cambridge Dictionary. URL: https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/gis (дата звернення: 09.08.2026).

4. GNSS (Global Navigation Satellite System). English Military Dictionary. URL: https://english-military-dictionary.org.ua/global-navigation-satellite-system-gnss (дата звернення: 09.08.2026).

5. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо запровадження будівельного інформаційного моделювання (BIM-технології) на всіх етапах життєвого циклу об’єктів : проєкт Закону України. Верховна Рада України. URL: https://itd.rada.gov.ua/billinfo/Bills/Card/38508 (дата звернення: 09.08.2026).

6. Computer-aided Design (CAD). BIM Dictionary. URL: https://bimdictionary.com/en/computer-aided-design/1 (дата звернення: 09.08.2026).

7. Heritage. Cambridge Dictionary. URL: https://dictionary.cambridge.org/uk/dictionary/english/heritage (дата звернення: 09.08.2026).

8. About ISO. International Organization for Standardization. URL: https://www.iso.org/ru/about (дата звернення: 09.08.2026).

9. Про затвердження Положення про Державний реєстр національного культурного надбання : постанова Кабінету Міністрів України від 12.08.1992 №

466. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/466-92-п (дата звернення: 09.08.2026).

10. Kumar A. Plane Table Surveying. Rajendra Prasad Central Agricultural University. URL: https://www.rpcau.ac.in/wp-content/uploads/2020/03/Plane-Table-Surveying.pdf (дата звернення: 09.08.2026).

11. HEMO – Ukrainian Heritage Monitoring Lab : вебсайт. URL: https://www.hemo.in.ua/ (дата звернення: 09.08.2026).

12. Російська агресія проти культури: росіяни пошкодили 1990 пам'яток культурної спадщини та 2625 об'єктів культурної інфраструктури. Міністерство культури України. URL: https://mincult.gov.ua/news/rosijska-agresiya-proty-kultury-rosiyany-poshkodyly-1990-pamyatok-kulturnoyi-spadshhyny-ta-2625-obyektiv-kulturnoyi-infrastruktury/ (дата звернення: 09.08.2026).

13. Про охорону культурної спадщини : Закон України від 08.06.2000 № 1805-III. Відомості Верховної Ради України. 2000. № 39. Ст. 333. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14 (дата звернення: 16.02.2026).

14. Запуск «єПам'ятки» впорядкує процес охорони культурних пам'яток в Україні та зробить його прозорим – Ростислав Карандєєв. Міністерство культури України. URL: https://mincult.gov.ua/news/ (дата звернення: 09.08.2026).

15. У Києві відбувся круглий стіл «Диджиталізація нерухомої спадщини: сканування та цифрова стандартизація об'єктів архітектури». Міністерство культури України. URL: https://mincult.gov.ua/news/ (дата звернення: 09.08.2026).

16. Про реалізацію експериментального проєкту щодо запровадження інформаційно-комунікаційної системи обліку нерухомих об'єктів культурної спадщини України «Державний реєстр нерухомих пам'яток України» : постанова Кабінету Міністрів України від 28.01.2026 № 93. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/93-2026-п (дата звернення: 09.08.2026).

17. Supporting the digital transformation of Ukraine in the field of culture. UNESCO. URL: https://www.unesco.org/en/culture-emergencies/heritage-emergency-fund/supporting-digital-transformation-ukraine-field-culture (дата звернення: 09.08.2026).

18. Міністерство культури України спільно з Google провело навчання для музейних працівників щодо користування платформою Google Arts & Culture. Міністерство культури України. URL: https://mincult.gov.ua/news/ (дата звернення: 09.08.2026).

19. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо здійснення тривимірного (3D) сканування, організації електронного документообігу та забезпечення цифрової стандартизації даних у процесах створення, оброблення, зберігання та використання інформації про об’єкти культурної спадщини : наказ Міністерства культури України від 10.07.2026 № 744. URL: https://mincult.gov.ua/wp-content/uploads/2026/07/744_.pdf (дата звернення: 09.08.2026).

20. Дьомін М. М., Габрель М. М., Косьмій М. М., Габрель Т. М. Теоретико-методичні основи ревіталізації та просторового розвитку поствоєнної України: нематеріальний контекст. Просторовий розвиток. 2024. № 10. С. 3–29. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.3-29.

21. Косаревський О. І., Товбич В. В. До проблеми удосконалення пам’яткоохоронного законодавства в сфері охорони архітектурної та містобудівної спадщини. Містобудування та територіальне планування. 2009. Вип. 32. С. 266–271. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/987654321/9226 (дата звернення: 19.08.2026).

22. Мещеряков В. М., Слєпцов О. С. Типи відтворення втрачених об’єктів культурної спадщини на прикладі відтворення Одеського кафедрального Спасо-Преображенського собору. Архітектурний вісник КНУБА. 2018. Вип. 14–15. С. 490–498. URL: https://drive.google.com/open?id=10Uw7PAnLG4CSnx-MZEup-rfWPx_u6f_N (дата звернення: 19.08.2026).

23. Івашко Ю. В., Орленко М. І. Lighting devices in the Secession as the component of «Gesamtkunstwerk» and the issues of restoration. Środowisko Mieszkaniowe. 2017. № 19. P. 150–156. URL: https://www.knuba.edu.ua/naukovi-praci-vikladachiv/ (дата звернення: 19.08.2026).

24. Орленко М. І. Проблеми та методи реставрації пам’яток архітектури України (XI – початок XX ст.) : автореф. дис. … д-ра архітектури : 18.00.01. Київ : КНУБА, 2018. 44 с. URL: https://uacademic.info/ua/document/0518U000112 (дата звернення: 24.08.2026).

25. Молочко В. О. Вплив російсько-української війни на зміну реставраційної і пам’яткоохоронної діяльності. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2024. Вип. 70. С. 269–279. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.70.269-279.

26. Лещенко Н. А. Комплексний процес реставраційно-реконструктивних трансформацій. Містобудування та територіальне планування. 2021. Вип. 76. С. 138–149. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.76.138-149.

27. Leshchenko N. Methods and techniques in the recovery of abandoned and destroyed historical buildings and territories in Kyiv. Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation. Warszawa, 2025. № 81. P. 102–111. DOI: https://doi.org/10.48234/WK81KYIV.

28. Leshchenko N., Busel A. Rebuilding of destroyed historical quarters of Kyiv: a theoretical model. Journal of Architecture and Urbanism. Vilnius, 2026. Vol. 50, № 1. P. 44–54. DOI: https://doi.org/10.3846/jau.2026.24719.

29. Leshchenko N., Gulei D. Complex revitalization of historically formed industrial territories in Kyiv in post-war recovery. Journal of Architecture and Urbanism. Vilnius, 2024. Vol. 48, № 1. P. 1–10. DOI: https://doi.org/10.3846/jau.2024.19337.

30. Лещенко Н. А., Кисельов М. Д. Ступені деструкції історичних замків і фортифікацій України – підоснова для комплексного процесу реставраційно-реконструктивних трансформацій в них. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2023. Вип. 65. С. 71–81. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.65.71-81.

31. Leshchenko N. Methodology of determining the degree of damage to a historical city center for its comprehensive restorative and reconstructive transformation. Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation.

Warszawa, 2023. № 76. P. 23–31. URL: https://www.scopus.com/pages/publications/85180478731 (дата звернення: 19.08.2026).

32. Гончаренко Т. А. Методологічні основи формування єдиного інформаційного середовища для автоматизації об’єктно-просторових систем в проєктах будівництва : дис. … д-ра техн. наук. Київ : КНУБА, 2024. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/10c9f8c6-ec09-4676-8171-34c81f45aa5d/content (дата звернення: 19.08.2026).

33. Кащенко О. В., Михайленко А. В., Кащенко Т. О., Антао А. Інформаційні технології в архітектурній освіті. Харків : Оперативна поліграфія, 2015. 120 с.

34. Левченко О. В., Михайленко А. В. Технології BIM та засоби обміну даних у форматі IFC. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2016. Вип. 44. С. 70–81. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/987654321/5215 (дата звернення: 24.08.2026).

35. Левченко О. В. BIM-технології в закладах вищої освіти рівня підготовки бакалавр та магістр. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2022. URL: https://archinform.knuba.edu.ua/article/view/255291 (дата звернення: 19.08.2026).

36. Іванова Л., Ботвіновська С., Левченко О., Косаревська Р. Використання технології Heritage Building Information Modelling у підготовці фахівців для роботи з пам’ятками архітектури. Інформаційні технології і засоби навчання. 2025. Т. 106, № 2. С. 35–57. DOI: https://doi.org/10.33407/itlt.v106i2.5896.

37. Rashkivskyi V., Demianenko R. Study of the adequacy of the BIM model in the survey of damaged building objects. 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), Astana, Kazakhstan, 2023. P. 314–317. DOI: https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223588.

38. Rashkivskyi V., Demianenko R., Ignatenko O., Zaiets Y. The system of filling the information model of construction structural elements. Transfer of

Innovative Technologies. 2024. Vol. 7, № 1. P. 60–68. DOI: https://doi.org/10.32347/tit.2024.71.02.08.

39. Shults R., Annenkov A. BIM and UAV photogrammetry for spatial structures sustainability inventory. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS. 2023. Vol. XLVIII-5/W2-2023. P. 99–104. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-99-2023.

40. Карпінський Ю. О., Лященко А. А., Окада Я. Склад і принципи розроблення національного профілю стандартів з географічної інформації. Інженерна геодезія. 2016. Вип. 63. С. 110–121. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/987654321/1769 (дата звернення: 24.08.2026).

41. Осипов О. Ф., Чебанов Л. С., Чебанов Т. Л., Осипов С. О. Реконструкція будівель і споруд. Проєктування технології влаштування підземної частини будівель та споруд : методичні рекомендації. Київ : КНУБА, 2025. 48 с. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/bitstreams/e6d825bd-029e-4f49-bf85-0dd4f2823f81/download (дата звернення: 19.08.2026).

42. Молодід О. С., Ковальчук О. Ю., Рашківський В. П., Плохута Р. О., Мусіяка І. В. Особливості обстеження будівель та споруд, що зазнали пошкоджень внаслідок воєнних дій. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : матеріали XI Міжнар. наук.-практ. конф., Чернігів, 26–27 трав. 2022 р. Чернігів, 2022. Т. 2. С. 94–96.

43. Прибєга Л. В. Архітектурна спадщина України: пам’яткоохоронний аспект : монографія. Київ : Інститут культурології НАМ України, 2016. 256 с. ISBN 978-966-2241-41-9.

44. Вечерський В. В. Спадщина містобудування України: теорія і практика історико-містобудівних пам’яткоохоронних досліджень населених місць. Київ : НДІТІАМ, 2003. 560 с. ISBN 966-7452-43-3.

45. Новгородов В. Є. Особливості реставрації архітектурних пам’яток 1920–1930-х років на прикладі будинку Державної промисловості в Харкові.

Баухауз – Запоріжжя. Запорізький модернізм і школа Баухауз. Проблеми збереження модерністської спадщини : зб. Харків : ТОВ «Діса Плюс», 2018. 511 с.

46. Осиченко Г. О. Реконструкція історичного середовища міста. Містобудування та територіальне планування. 2009. Вип. 35. С. 343–354. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2009_35_51 (дата звернення: 19.08.2026).

47. Древаль І. В. До питання розробки концепцій відродження міст України у повоєнний період. Міський розвиток та просторове планування. 2022. Вип. 81. С. 133–142. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.81.133-142.

48. Черкасова Е. Т., Лопатько В. М., Ломбардіні Н. Реновация и ревалоризация объектов архитектуры : учеб. пособие. Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2015. 120 с.

49. Лисенко В. А. Конструктивно-технологическая архитектоника уникальных общественных зданий конца XIX – начала XX века. URL: https://mx.odaba.edu.ua/bitstream/123456789/2633/1/ (дата звернення: 09.08.2026).

50. Раллєв О. Б. Оцінка архітектурного стилю з позиції розвитку світової архітектури. Проблеми теорії та історії архітектури України : зб. наук. праць. Одеса, 1999. С. 88–92.

51. Мещеряков В. М. Відтворення Одеського кафедрального Спасо-Преображенського собору : монографія. Одеса : Фенікс, 2017. 464 с.

52. Бевз М. В. Методологічні основи збереження і регенерації заповідних архітектурних комплексів історичних міст (на прикладі Західної України) : автореф. дис. … д-ра архітектури : 18.00.01. Харків, 2004. 32 с. URL: https://uacademic.info/ua/document/0504U000386 (дата звернення: 24.08.2026).

53. Могитич І. Пам’ятки західної України: охорона і реставрація за повоєнних часів. Пам’ятки України. 1997. № 1. С. 19–22. URL: https://elib.nlu.org.ua/object.html?id=11582 (дата звернення: 09.08.2026).

54. Рибчинський О. В. Формування і ревіталізація середмість історичних міст України : автореф. дис. … д-ра архітектури : 18.00.01. Львів : Нац. ун-т

«Львівська політехніка», 2017. 34 с. URL: https://uacademic.info/ua/document/0517U000384 (дата звернення: 24.08.2026).

55. Ревський С. Пам’ятка архітектури, предмет охорони пам’ятки, територія пам’ятки – формальна ясність і реальні парадокси у контексті охорони. Сучасні проблеми дослідження, реставрації та збереження культурної спадщини : зб. наук. пр. Київ : Хімджест, 2010. Вип. 7. 512 с. URL: https://elib.nlu.org.ua/object.html?id=2358 (дата звернення: 09.08.2026).

56. Ревський І. С. Інтерпретація як один з методологічних принципів історико-архітектурного дослідження площ класицизму з метою їх реконструкції. Сучасні проблеми дослідження, реставрації та збереження культурної спадщини. Київ : Фенікс, 2008. Вип. 5. С. 229–236.

57. Бажанова Т. Історія селища № 6 у Запоріжжі. Запорізька спадщина. URL: https://heritage.zp.ua/document/445-bazhanova-t-istoriya-selishcha-nomer-shist-u-zaporizhzhi (дата звернення: 19.08.2026).

58. Коротун І. В. Архітектурно-містобудівні основи створення буферних зон об’єктів Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО : автореф. дис. … д-ра архітектури : 18.00.01. Київ : КНУБА, 2017. 36 с. URL: https://uacademic.info/ua/document/0517U000359 (дата звернення: 21.08.2026).

59. Коротун І. В., Юрійчук Р. Д., Стоян С. Архітектурно-планувальні особливості дерев’яних православних храмів Буковини на прикладі Успенської церкви (вул. Новоушицька, 2, м. Чернівці) та сучасні методи їх дослідження. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2024. Вип. 69. С. 236–251. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.69.236-251.

60. Лесик О. Принципи реставрації пам’яток архітектури. Традиції та новаторство. Українська академія мистецтва. 2013. Вип. 21. С. 97–103. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uam_2013_21_13 (дата звернення: 24.08.2026).

61. Lukomska Z., Haydar V., Lukomska H. Innovative approaches to the process of revitalization of immovable cultural heritage (on the example of the Pototsky Palace complex in Ivano-Frankivsk). Current Issues in Research, Conservation and

Restoration of Historic Fortifications. 2022. Vol. 16. P. 22–32. DOI: https://doi.org/10.23939/fortifications2022.16.022.

62. Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації : розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 № 152-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-р (дата звернення: 09.08.2026).

63. BIM-технології в проєктуванні дизайн-об'єктів : силабус курсу / кафедра інформаційних технологій в архітектурі КНУБА ; уклад. О. В. Левченко. Київ, 2023. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/03/022_ITA_BK_06.01_5kDN_1s_BIM-технології_в_проектуванні_дизайн-обєктів-Левченко.pdf (дата звернення: 25.05.2026).

64. Будівельно-інформаційне моделювання – технологія BIM : силабус курсу / кафедра інформаційних технологій в архітектурі КНУБА ; уклад. О. В. Левченко. Київ, 2023. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/03/191_ITA_BK_06.07_5kABC_2s_Будівельно-інформаційне_моделювання-технологія_BIM-Левченко.pdf (дата звернення: 25.05.2026).

65. Про затвердження форм облікової картки та паспорта об'єкта культурної спадщини : наказ Міністерства культури і мистецтв України, Держ. комітету України з будівництва та архітектури від 13.05.2004 № 295/104. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0693-04 (дата звернення: 09.08.2026).

66. Волошин О. В. Європейський пам'яткоохоронний досвід XX століття. Розвиток поняття «пам'ятка архітектури». Комунальне господарство міст. 2018. Вип. 142. С. 183–189. URL: https://eprints.kname.edu.ua/49905/ (дата звернення: 09.08.2026).

67. Wieland C. A. Der Denkmal- und Heimatschutz in der Gesetzgebung der Gegenwart. 16 S. URL: https://books.google.com/books?id=raFYAAAAMAAJ (дата звернення: 09.08.2026).

68. Brown G. B. The Care of Ancient Monuments. Cambridge : Cambridge University Press, 1905. 110 p. DOI: https://doi.org/10.1017/CBO9780511710940.

69. Ancient Monuments Consolidation and Amendment Act 1913, 3 & 4 Geo. 5 c. 32. Parliament of the United Kingdom, 1913. URL: https://api.parliament.uk/historic-hansard/acts/ancient-monuments-consolidation-and-amendment-act-1913 (дата звернення: 25.05.2026).

70. Конвенція про охорону всесвітньої культурної і природної спадщини : прийнята в Парижі 16.11.1972. Охорона культурної спадщини : зб. міжнар. документів. Київ, 2002. 21 с. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_089 (дата звернення: 09.08.2026).

71. Convention for the Protection of the Architectural Heritage of Europe (ETS No. 121) : dated October 3, 1985. Council of Europe. Granada, 1985.

72. Міжнародна хартія з охорони й реставрації нерухомих пам’яток і визначних місць (Венеційська хартія), 1964. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_757 (дата звернення: 09.08.2026).

73. Хартія ЮНЕСКО про збереження цифрової спадщини. Вісник Книжкової палати. 2022. № 12. С. 3–9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vkp_2022_12_4 (дата звернення: 09.08.2026).

74. Культурна спадщина має значення для Європи : звіт експертної групи Європейської Комісії з питань культурної спадщини Horizon 2020. 2015. URL: http://blogs.encatc.org/culturalheritagecountsforeurope/wp-content/uploads/2018/12/e-version__CHCfE_Report_EXS_Ukraine.pdf (дата звернення: 09.08.2026).

75. Decision (EU) 2017/864 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2017 on a European Year of Cultural Heritage (2018). Official Journal of the European Union. 2017. L 131. P. 1–9. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2017/864/oj/eng (дата звернення: 24.08.2026).

76. European Commission. European Framework for Action on Cultural Heritage : Commission Staff Working Document SWD(2018) 491 final. Luxembourg

: Publications Office of the European Union, 2019. 32 p. DOI: https://doi.org/10.2766/949707.

77. Про охорону і використання пам’яток історії та культури : Закон УРСР від 13.07.1978 № 3600-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3600-09 (дата звернення: 09.08.2026).

78. Основи законодавства України про культуру : Закон України від 14.02.1992 № 2117-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2117-12 (дата звернення: 09.08.2026).

79. Конституція України : прийнята Верховною Радою України 28.06.1996 № 254к/96-ВР. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр (дата звернення: 09.08.2026).

80. Про охорону культурної спадщини : Закон України від 08.06.2000 № 1805-III : у редакції від 08.06.2000. Відомості Верховної Ради України. 2000. № 39. Ст. 333. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14/ed20000608 (дата звернення: 09.08.2026).

81. Про ратифікацію Конвенції про охорону всесвітньої культурної і природної спадщини : указ Президії Верховної Ради УРСР від 04.10.1988 № 6673-XI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/6673-11 (дата звернення: 09.08.2026).

82. Про приєднання України до Конвенції про охорону нематеріальної культурної спадщини : Закон України. Відомості Верховної Ради України. 2008. № 16. Ст. 153. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132-17 (дата звернення: 09.08.2026).

83. Про приєднання України до Другого протоколу до Гаазької конвенції про захист культурних цінностей у разі збройного конфлікту 1954 року : Закон України. Відомості Верховної Ради України. 2020. № 39. Ст. 293. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/585-20 (дата звернення: 09.08.2026).

84. Про внесення змін до Закону України «Про охорону культурної спадщини» : Закон України. Відомості Верховної Ради України. 2005. № 5. Ст.

114. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-15 (дата звернення: 09.08.2026).

85. Про архітектурну діяльність : Закон України від 20.05.1999 № 687-XIV. Відомості Верховної Ради України. 1999. № 31. Ст. 246. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/687-14 (дата звернення: 09.08.2026).

86. Про внесення змін до Кримінального, Кримінального процесуального кодексів України та інших законодавчих актів України щодо удосконалення видів кримінальних покарань : Закон України. Відомості Верховної Ради України. 2023. № 92. Ст. 356. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3342-20 (дата звернення: 09.08.2026).

87. Порядок визначення категорій пам’яток для занесення об’єктів культурної спадщини до Державного реєстру нерухомих пам’яток України : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 27.12.2001 № 1760. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1760-2001-п (дата звернення: 09.08.2026).

88. Mapping of Current Heritage Re-use Policies and Regulations in Europe : Complex Policy Overview of Adaptive Heritage Re-use. 2019. December. URL: https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/d_1.2_mapping_of_current_heritage_re-use_policies_and_regulations_in_europe.pdf (дата звернення: 09.08.2026).

89. Boeykens S., Himpe C., Martens B. A Case Study of Using BIM in Historical Reconstruction. Virtual Architecture. 2012. Vol. 1. P. 729–737. DOI: https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2012.1.729.

90. Boeykens S., Himpe C., Martens B. A Case Study of Using BIM in Historical Reconstruction: The Vinohrady Synagogue in Prague : conference paper. 2012. DOI: https://doi.org/10.13140/2.1.2997.0721.

91. Bruno N., Roncella R. A restoration oriented HBIM system for cultural heritage documentation: the case study of Parma cathedral. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. XLII-2. P. 171–178. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-171-2018.

92. Chiabrando F., Lo Turco M., Rinaudo F. Modeling of the decay in a HBIM starting from the 3D point clouds: a followed approach for cultural heritage knowledge.

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. XLII-2/W5. P. 605–612. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-605-2017.

93. Andriasyan M., Moyano J., Nieto-Julián J. E., Antón D. From Point Cloud Data to Building Information Modelling: An Automatic Parametric Workflow for Heritage. Remote Sensing. 2020. Vol. 12, No. 7. Article 1094. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12071094.

94. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. 34 p. URL: https://www.iso.org/standard/68078.html (дата звернення: 25.01.2026).

95. ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 2: Delivery phase of the assets. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/68079.html (дата звернення: 25.01.2026).

96. Abanda F. H., Balu B., Adukpo S. E., Akintola A. Decoding ISO 19650 through process modelling for information management and stakeholder communication in BIM. Buildings. 2025. Vol. 15, No. 3. Article 431. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15030431.

97. Lindholm J., Johansson P., Yitmen I. Toward a BIM information delivery framework based on common data environment. Construction Innovation. 2025. Vol. 25, No. 7. P. 139–157. DOI: https://doi.org/10.1108/CI-06-2024-0185.

98. Wang Y., Zhang L., Yu H., Tiong R. L. Detecting logical relationships in mechanical, electrical, and plumbing (MEP) systems with BIM using graph matching. Advanced Engineering Informatics. 2022. Vol. 54. Article 101770. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101770.

99. Liu H., Gan V. J., Cheng J. C., Zhou S. Automatic fine-grained BIM element classification using multi-modal deep learning (MMDL). Advanced Engineering Informatics. 2024. Vol. 61. Article 102458. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102458.

100. Banfi F. The evolution of interactivity, immersion and interoperability in HBIM: digital model uses, VR and AR for built cultural heritage. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10, No. 10. Article 685. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi10100685.

101. Azhar S., Khalfan M., Maqsood T. Building Information Modelling (BIM): now and beyond. Australasian Journal of Construction Economics and Building. 2012. Vol. 12, No. 4. P. 15–28. DOI: https://doi.org/10.5130/AJCEB.v12i4.3032.

102. Worrell L. L. Building information modeling (BIM): the untapped potential for preservation documentation and management : master's thesis. Clemson : Clemson University, 2015. URL: https://open.clemson.edu/all_theses/2146/ (дата звернення: 09.08.2026).

103. Arayici Y. Towards Building Information Modelling for existing structures. Structural Survey. 2008. Vol. 26, No. 3. P. 210–222. DOI: https://doi.org/10.1108/02630800810887108.

104. Angulo Fornos R. Construcción de la base gráfica para un sistema de información y gestión del patrimonio arquitectónico: Casa de Hylas. Arqueología de la Arquitectura. 2012. № 9. P. 11–25. URL: https://idus.us.es/handle/11441/57594 (дата звернення: 09.08.2026).

105. Baik A., Boehm J., Robson S. Jeddah historical building information modeling «JHBIM»: Old Jeddah, Saudi Arabia. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2013. Vol. XL-5/W2. P. 73–78. DOI: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-73-2013.

106. Volk R., Stengel J., Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – literature review and future needs. Automation in Construction. 2014. Vol. 38. P. 109–127. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023.

107. Logothetis S., Delinasiou A., Stylianidis E. Building Information Modelling for cultural heritage: a review. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. Vol. II-5/W3. P. 177–183. DOI: https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015.

108. Arias P., Armesto J., Di-Capua D., González-Drigo R., Lorenzo H., Pérez-Gracia V. Digital photogrammetry, GPR and computational analysis of structural damages in a mediaeval bridge. Engineering Failure Analysis. 2007. Vol. 14, No. 8. P. 1444–1457. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.02.001.

109. Williams J. NHSS report 2: the use of science to enhance our understanding of the past. National Heritage Science Strategy, 2009. URL: http://www.heritagesciencestrategy.org.uk (дата звернення: 09.08.2026).

110. Odgers D., Henry A. Practical building conservation: stone. Farnham : Ashgate ; English Heritage, 2012. 338 p. URL: https://historicengland.org.uk/images-books/publications/stone-conservation/ (дата звернення: 09.08.2026).

111. ICOMOS, ISCS. Illustrated glossary on stone deterioration patterns. Paris : ICOMOS, 2008. URL: https://www.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf (дата звернення: 25.05.2026).

112. Grau-Bové J., Mazzei L., Malki-Ephstein L., Thickett D., Strlič M. Simulation of particulate matter ingress, dispersion and deposition in a historical building. Journal of Cultural Heritage. 2016. Vol. 18. P. 199–208. DOI: https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.08.006.

113. Carpiceci M. Il rilievo dello spazio architettonico: principi geometrici e grafici. Roma : Edizioni Kappa, 2000. 64 p. URL: https://hdl.handle.net/11573/156377 (дата звернення: 09.08.2026).

114. Quattrini R., Malinverni E. S., Clini P., Nespeca R., Orlietti E. From TLS to HBIM: high quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. Vol. XL-5/W4. P. 367–374. DOI: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-367-2015.

115. Suwardhi D., Menna F., Remondino F., Hanke K., Akmalia R. Digital 3D Borobudur – integration of 3D surveying and modeling techniques. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. Vol. XL-5/W7. P. 417–423. DOI: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-417-2015.

116. Tang P., Huber D., Akinci B., Lipman R., Lytle A. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: a review of related techniques. Automation in Construction. 2010. Vol. 19, No. 7. P. 829–843. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007.

117. Fassi F., Fregonese L., Ackermann S., De Troia V. Comparison between laser scanning and automated 3D modelling techniques to reconstruct complex and extensive cultural heritage areas. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2013. Vol. XL-5/W1. P. 73–80. DOI: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-73-2013.

118. Garagnani S., Manferdini A. M. Parametric accuracy: building information modeling process applied to the cultural heritage preservation. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2013. Vol. XL-5/W1. P. 87–92. DOI: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-87-2013.

119. Industry Foundation Classes (IFC). buildingSMART International. URL: https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/ (дата звернення: 25.05.2026).

120. Oreni D., Brumana R., Banfi F., Bertola L., Barazzetti L., Cuca B. et al. Beyond crude 3D models: from point clouds to historical building information modeling via NURBS. Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection (EuroMed 2014, Limassol, Cyprus). Cham : Springer, 2014. P. 166–175. (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 8740). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-13695-0_16.

121. Barazzetti L., Banfi F., Brumana R., Gusmeroli G., Previtali M., Schiantarelli G. Cloud-to-BIM-to-FEM: structural simulation with accurate historic

BIM from laser scans. Simulation Modelling Practice and Theory. 2015. Vol. 57. P. 71–87. DOI: https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004.

122. Level of Development (LOD). BIM Dictionary. URL: https://bimdictionary.com/en/level-of-development/1 (дата звернення: 25.05.2026).

123. Level of Information (LOI). BIM Dictionary. URL: https://bimdictionary.com/en/level-of-information/1 (дата звернення: 25.05.2026).

124. Employer's Information Requirement (EIR). BIM Dictionary. URL: https://bimdictionary.com/en/employers-information-requirement/1 (дата звернення: 25.05.2026).

125. Level of detail for BIM. Designing Buildings Wiki. URL: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Level_of_detail_for_BIM (дата звернення: 25.05.2026).

126. PAS 1192-2:2013. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling. London : BSI, 2013. URL: https://knowledge.bsigroup.com/products/specification-for-information-management-for-the-capital-delivery-phase-of-construction-projects-using-building-information-modelling (дата звернення: 25.05.2026).

127. BIM Industry Working Group. A report for the Government Construction Client Group : building information modelling (BIM) working party strategy paper. March 2011. URL: https://www.cdbb.cam.ac.uk/news/2011BIMStrategyPaper (дата звернення: 09.08.2026).

128. Pocobelli D. P., Boehm J., Bryan P., Still J., Grau-Bové J. BIM for heritage science: a review. Heritage Science. 2018. Vol. 6, No. 1. Article 30. DOI: https://doi.org/10.1186/s40494-018-0191-4.

129. Vesho N., Guri M., Sava A. The use of numerical models within the BIM environment for the issue of cultural heritage restoration: buildings designed until 1940 in Albania. Architecture, Structures and Construction. 2023. Vol. 3. P. 511–525. DOI: https://doi.org/10.1007/s44150-023-00106-8.

130. Maxwell I. COTAC BIM4C: integrating HBIM framework report. Part 1: Conservation parameters. COTAC, 2016. URL: https://cotac.global/resources/HBIM-Framework-Part-1-February-2016.pdf (дата звернення: 25.05.2026).

131. Life Cycle. BIM Dictionary. URL: https://bimdictionary.com/en/life-cycle/1 (дата звернення: 25.05.2026).

132. Gunes A. E., Kovel J. P. Using GIS in emergency management operations. Journal of Urban Planning and Development. 2000. Vol. 126, No. 3. P. 136–149. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2000)126:3(136).

133. Barakat S. Housing reconstruction after conflict and disaster. Humanitarian Policy Group Network Papers. 2003. Vol. 43. P. 1–40. URL: https://odi.org/en/publications/housing-reconstruction-after-conflict-and-disaster/ (дата звернення: 09.08.2026).

134. Anilkumar S., Banerji H. An inquiry into success factors for post-disaster housing reconstruction projects: a case of Kerala, South India. International Journal of Disaster Risk Science. 2021. Vol. 12. P. 24–39. DOI: https://doi.org/10.1007/s13753-020-00309-3.

135. Ismail D., Majid T. A., Roosli R. Analysis of variance of the effects of a project's location on key issues and challenges in post-disaster reconstruction projects. Economies. 2017. Vol. 5, No. 4. Article 46. DOI: https://doi.org/10.3390/economies5040046.

136. Bilau A. A., Witt E., Lill I. Analysis of measures for managing issues in post-disaster housing reconstruction. Buildings. 2017. Vol. 7, No. 2. Article 29. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings7020029.

137. Nawari N. O., Ravindran S. Blockchain and building information modeling (BIM): review and applications in post-disaster recovery. Buildings. 2019. Vol. 9, No. 6. Article 149. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings9060149.

138. Про затвердження Порядку обліку об'єктів культурної спадщини : наказ Міністерства культури України від 11.03.2013 № 158. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0528-13 (дата звернення: 09.08.2026).

139. Державний реєстр нерухомих пам’яток України. Міністерство культури та стратегічних комунікацій України : вебсайт. URL: https://mcsc.gov.ua/kulturna-spadshchyna/derzhavnyy-reiestr-nerukhomykh-pam-iatok-ukrainy/ (дата звернення: 09.08.2026).

140. ДБН А.2.2-14:2016. Склад та зміст науково-проєктної документації на реставрацію, консервацію та ремонт пам’яток культурної спадщини. Київ : Мінрегіон України, 2016. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3879628947759039828 (дата звернення: 09.08.2026).

141. ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016. Настанова щодо виконання ремонтно-реставраційних робіт на пам’ятках архітектури та містобудування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/v0174858-16 (дата звернення: 09.08.2026).

142. Woodwark J. Reconstructing history with computer graphics. IEEE Computer Graphics and Applications. 1991. Vol. 11, No. 1. P. 18–20. DOI: https://doi.org/10.1109/38.67693.

143. Reilly P. Towards a virtual archaeology. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990 (CAA90) / eds. S. P. Q. Rahtz, K. Lockyear. Oxford : Tempus Reparatum, 1991. P. 132–139. DOI: https://doi.org/10.30861/9780860547136.

144. Forte M., Siliotti A. (eds.). Virtual archaeology: re-creating ancient worlds. London : Thames and Hudson, 1997. URL: https://archive.org/details/virtualarchaeolo00maur (дата звернення: 09.08.2026).

145. Pinto Puerto F. et al. Using BIM and GIS to research and teach architecture. Architectural Draughtsmanship. Cham : Springer, 2017. P. 699–711. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-58856-8_55.

146. Nawari N. O. BIM standardization and wood structures. Computing in Civil Engineering 2012. Reston : ASCE, 2012. P. 293–300. DOI: https://doi.org/10.1061/9780784412343.0037.

147. Saeed Z. O., Almukhtar A., Abanda H., Tah J. BIM applications in post-conflict contexts: the reconstruction of Mosul City. Buildings. 2021. Vol. 11, No. 8. Article 351. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings11080351.

148. Altah H., Hajismail S. Architectural heritage in medium and small Syrian cities: management advanced strategies for post-war recovery. A+Arch Design: International Journal of Architecture and Design. 2022. Vol. 8, No. 1. P. 51–65. DOI: https://doi.org/10.17932/IAU.ARCH.2015.017/arch_v08i1003.

149. Madrigal A. C. The images that could help rebuild Notre-Dame Cathedral. The Atlantic. 2019. 16 April. URL: https://www.theatlantic.com/technology/archive/2019/04/laser-scans-could-help-rebuild-notre-dame-cathedral/587230/ (дата звернення: 09.08.2026).

150. Melendez S. How digital modeling plays a key role in restoring the Notre Dame Cathedral. Fast Company. 2023. 14 April. URL: https://www.fastcompany.com/90881189/digital-modeling-restoring-notre-dame-cathedral (дата звернення: 09.08.2026).

151. Nace T. We have beautiful 3-D laser maps of every detail of Notre Dame. Forbes. 2019. 16 April. URL: https://www.forbes.com/sites/trevornace/2019/04/16/we-have-beautiful-3d-laser-maps-of-every-detail-of-notre-dame/ (дата звернення: 09.08.2026).

152. Restoring the Notre Dame Cathedral: a digital project. Frontier Enterprise. URL: https://www.frontier-enterprise.com/restoring-the-notre-dame-cathedral-a-digital-project/ (дата звернення: 14.02.2024).

153. Hussein K. A., Ismaeel E. H. State-of-the-art of historic building information modelling – HBIM trends in the built heritage: review paper. Diyala Journal of Engineering Sciences. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 77–90. DOI: https://doi.org/10.24237/djes.2020.13308.

154. Dakhil A., Alshawi M. Client’s role in building disaster management through building information modelling. Procedia Economics and Finance. 2014. Vol. 18. P. 47–54. DOI: https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00912-5.

155. Kim J.-E., Hong C.-H. A study on the application service of 3D BIM-based disaster integrated information system management for effective disaster response. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society. 2018. Vol. 19, No. 10. P. 143–150. DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.10.143.

156. Wang B., Li H., Rezgui Y., Bradley A., Ong H. N. BIM based virtual environment for fire emergency evacuation. The Scientific World Journal. 2014. Article 589016. DOI: https://doi.org/10.1155/2014/589016.

157. Boguslawski P., Mahdjoubi L., Zverovich V., Fadli F., Barki H. BIM-GIS modelling in support of emergency response applications. Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations. Southampton : WIT Press, 2015. Vol. 149. P. 381–392. DOI: https://doi.org/10.2495/BIM150321.

158. Sertyesilisik B. Building information modeling as a tool for enhancing disaster resilience of the construction industry. Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Safety Engineering Series. 2017. Vol. 12, No. 1. P. 9–18. DOI: https://doi.org/10.1515/tvsbses-2017-0002.

159. Kermanshachi S., Rouhanizadeh B. Feasibility analysis of post-disaster reconstruction alternatives using automated BIM-based construction cost estimation tool. Proceedings of the CSCE 6th International Disaster Mitigation Specialty Conference (Fredericton, NB, Canada, 13–16 June 2018). Montreal : Canadian Society for Civil Engineering, 2018. URL: https://legacy.csce.ca/en/conferences-archive/?active=2018&context=papers (дата звернення: 09.08.2026).

160. Biagini C., Capone P., Donato V., Facchini N. Towards the BIM implementation for historical building restoration sites. Automation in Construction. 2016. Vol. 71. P. 74–86. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.003.

161. Brumana R., Della Torre S., Oreni D., Previtali M., Cantini L., Barazzetti L., Franchi A., Banfi F. HBIM challenge among the paradigm of complexity, tools and preservation: the Basilica di Collemaggio 8 years after the earthquake (L'Aquila). International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. XLII-2/W5. P. 97–104. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-97-2017.

162. Rad M. A. H., Jalaei F., Golpour A., Varzande S. S. H., Guest G. BIM-based approach to conduct life cycle cost analysis of resilient buildings at the conceptual stage. Automation in Construction. 2021. Vol. 123. Article 103480. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103480.

163. Li X., Teppati Losè L., Rinaudo F. Documentation for architectural heritage: a historical building information modeling data modeling approach for the Valentino Castle north wing. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2025. Vol. 14, No. 4. Article 139. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi14040139.

164. Skeiron. Відчуй Україну на дотик : проєкт. URL: https://www.skeiron.com.ua/ua/projects/b6534274-8f95-4d82-9a79-8c93d51dcd4f (дата звернення: 25.05.2026).

165. Заєць В. Pocket City AR : мобільний застосунок. App Store. URL: https://apps.apple.com/sa/app/pocket-city-ar/id1483985386 (дата звернення: 25.05.2026).

166. Museum 3D : вебсайт. URL: https://museum3d.com.ua/ (дата звернення: 25.05.2026).

167. Skeiron. Оцифровуємо минуле заради майбутнього : місія. URL: https://skeiron.com.ua/ua/mission (дата звернення: 25.05.2026).

168. Цифрова відбудова: як сучасні технології допоможуть зберегти архітектурну спадщину? Рубрика. 2023. 13 липня. URL: https://rubryka.com/article/3d-skanuvannya-arhitektury/ (дата звернення: 14.02.2024).

169. Lovell L. J., Davies R. J., Hunt D. V. L. The application of historic building information modelling (HBIM) to cultural heritage: a review. Heritage. 2023. Vol. 6, No. 10. P. 6691–6717. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage6100350.

170. Li K., Gan V. J., Li M., Gao M. Y., Tiong R. L., Yang Y. Automated generative design and prefabrication of precast buildings using integrated BIM and graph convolutional neural network. Developments in the Built Environment. 2024. Vol. 18. Article 100418. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100418.

171. He Z., Wang Y. H., Zhang J. Generative AIBIM: an automatic and intelligent structural design pipeline integrating BIM and generative AI. Information Fusion. 2025. Vol. 114. Article 102654. DOI: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102654.

172. Santos R., Costa A. A., Silvestre J. D., Vandenbergh T., Pyl L. BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe. Building and Environment. 2020. Vol. 169. Article 106568. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106568.

173. Al-Muqdadi F., Ahmed A. Applying heritage building information modelling (HBIM) to lost heritage in conflict zones: Al-Hadba' Minaret in Mosul, Iraq. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2022. Vol. XLIII-B2-2022. P. 753–760. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-753-2022.

174. Yang X., Grussenmeyer P., Koehl M., Macher H., Murtiyoso A., Landes T. Review of built heritage modelling: integration of HBIM and other information techniques. Journal of Cultural Heritage. 2020. Vol. 46. P. 350–360. DOI: https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008.

175. Puerto A., Castañeda K., Sánchez O., Peña C. A., Gutiérrez L., Sáenz P. Building information modeling and complementary technologies in heritage buildings: a bibliometric analysis. Results in Engineering. 2024. Vol. 22. Article 102192. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102192.

176. Перегінець І., Смірнов Ю. Цифрова трансформація будівельного виробництва об'єктів нерухомості на основі інформаційного моделювання. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2025. № 71. С. 130–139. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2025.71.130-139.

177. Терещук М. Деякі аспекти застосування геометричного моделювання для збереження та відновлення архітектурної спадщини України. Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2024. № 107. С. 162–171. DOI: https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.107.162-171.

178. Vitásek S. The use of the BIM method for sustainable care of historic buildings: methodological framework. SHS Web of Conferences. 2022. Vol. 132. Article 01023. DOI: https://doi.org/10.1051/shsconf/202213201023.

179. Annenkov A. Monitoring the deformation process of engineering structures using BIM technologies. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2022. Vol. XLVI-5/W1-2022. P. 15–21. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-15-2022.

180. Moyano J., Pili A., Nieto-Julián J. E., Della Torre S., Bruno S. Semantic interoperability for cultural heritage conservation: workflow from ontologies to a tool for managing and sharing data. Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 80. Article 107965. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107965.

181. Zhao N. Research on the management mode of EPC project of prefabricated building based on BIM technology. Open Access Library Journal. 2021. Vol. 8, No. 7. P. 85–98. DOI: https://doi.org/10.4236/oalib.1107616.

182. Цай М., Здрілько М. Інтегрована модель управління освітніми проєктами для сталого розвитку на основі штучного інтелекту та BIM-аналітики. Управління розвитком складних систем. 2025. № 62. С. 38–46. DOI: https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.62.38-46.

183. Albadrani M. A. Multivariate classification of heritage building materials for sustainable restoration and retrofit. Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 22. Article 12169. DOI: https://doi.org/10.3390/app152212169.

184. Shkromada O., Fotina T., Ivchenko V., Chivanov V., Sirobaba V., Shvets O., Pikhtirova A., Babenko O., Vorobiova I., Dychenko T. Determining the characteristics of concrete in a historical building under the influence of climatic and biological factors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 1, No. 6 (127). P. 39–46. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298565.

185. Banfi F., Liu W. The state of HBIM in digital heritage: a critical and bibliometric assessment of six emerging frontiers (2015–2025). Applied Sciences. 2026. Vol. 16, No. 2. Article 906. DOI: https://doi.org/10.3390/app16020906.

186. Parente M., Bruno N., Ottoni F. HBIM and information management for knowledge and conservation of architectural heritage: a review. Heritage. 2025. Vol. 8, No. 8. Article 306. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage8080306.

187. Cui H., Wu J. How architectural heritage is moving to smart: a systematic review of HBIM. Buildings. 2025. Vol. 15, No. 15. Article 2664. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15152664.

188. Dauda J. A., Bower N., Adebisi W. A., Saad A., Saka A. B., Kazemi H., Ajayi S. O. Exploring the application of heritage building information modelling (HBIM) for heritage conservation: insights from industry practitioners. Journal of Architectural Conservation. 2025. Vol. 31, No. 1–2. P. 99–112. DOI: https://doi.org/10.1080/13556207.2025.2518661.

189. Baik A. Three decades of innovation: a critical bibliometric analysis of BIM, HBIM, digital twins, and IoT in the AEC industry (1993–2024). Buildings. 2025. Vol. 15, No. 10. Article 1587. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15101587.

190. Lovell L. J., Davies R. J., Hunt D. V. L. A systems thinking approach to the development of historic building information modelling: Part 2 – definition of requirements. Heritage. 2025. Vol. 8, No. 3. Article 93. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage8030093.

191. Siewczyński B., Szot J. BIM goals and uses in the management, maintenance, and preservation of historic buildings: implementation characteristics of HBIM for improved documentation and lifecycle management. npj Heritage Science. 2025. Vol. 13. Article 103. P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1038/s40494-025-01588-z.

192. Lovell L. J., Davies R. J., Hunt D. V. L. A systems thinking approach to the development of HBIM: Part 1 – the problematic situation. Heritage. 2025. Vol. 8, No. 1. Article 21. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage8010021.

193. Fattore C., Buldo M., Priore A., Porcari S., Di Palo V. A comprehensive overview of heritage BIM frameworks: platforms and technologies integrating multi-scale analyses, data repositories, and sensor systems. Heritage. 2025. Vol. 8, No. 7. Article 247. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage8070247.

194. Salah R., Géczy N., Ajtayné Károlyfi K. Architectural heritage digitization: a classification-driven semi-automated scan-to-HBIM workflow. Buildings. 2026. Vol. 16, No. 1. Article 21. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings16010021.

195. Aricò M., Ferro C., La Guardia M., Lo Brutto M., Taranto G., Ventimiglia G. M. Scan-to-BIM process and architectural conservation: towards an effective tool for the thematic mapping of decay and alteration phenomena. Heritage. 2024. Vol. 7, No. 11. P. 6257–6281. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage7110294.

196. Angileri G., Cernaro A., Ferrero M., Fiandaca O. Learning by modelling in H-BIM environment to develop a framework for restoration: application to the stone cladding of Casa delle Armi of Luigi W. Moretti in Rome. Journal of Cultural Heritage. 2025. Vol. 73. P. 28–42. DOI: https://doi.org/10.1016/j.culher.2025.02.009.

197. Li B., Lim Y. L., Li W. Systematic review: a bibliometric analysis of building technology and its potential applications to artificial intelligence in the field of cultural heritage conservation from 2013 to 2023. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2026. Vol. 25, No. 2. P. 1021–1043. DOI: https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2467251.

198. Parrinello S., Pettineo A. Databases and information models for semantic and evolutionary analysis in fortified cultural heritage. Heritage. 2025. Vol. 8, No. 1. Article 29. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage8010029.

199. Cruz Y., Cabaleiro M., Conde B., Barros B., Riveiro B. Methodology for the integration of structural health assessment of masonry bridges into HBIM. International Journal of Architectural Heritage. 2025. Vol. 19, No. 9. P. 1362–1384. DOI: https://doi.org/10.1080/15583058.2024.2342950.

200. Moyano J., León J., Nieto-Julián J. E., Bruno S. Systematic approach to generate historical building information modelling (HBIM) in architectural restoration project. Automation in Construction. 2022. Vol. 143. Article 104551. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104551.

201. Alshawabkeh Y., Baik A., Miky Y. HBIM for conservation of built heritage. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2024. Vol. 13, No. 7. Article 231. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi13070231.

202. Almasoudi A., Bhatti A. Q., Alluqmani A. E. et al. Investigation of enhancing heritage preservation utilizing heritage building information modeling (HBIM). Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture. 2025. Vol. 16. P. 414–442. DOI: https://doi.org/10.1007/s43995-025-00116-1.

203. Xu L., Zhang Q., Li Y., Li Y., Ren J., Kong S., Ding D., Lin G., Giordano A. Historic building information modelling: history research hotspots and emerging trends. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2572487.

204. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проєктної документації на будівництво : затв. наказом Мінрегіону України від 04.06.2014 № 163. Київ : Мінрегіон України, 2014. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3022061165539755805 (дата звернення: 29.07.2026).

205. ДБН Б.2.2-3:2021. Склад, зміст, порядок розроблення, погодження та затвердження історико-архітектурного опорного плану населеного пункту. Київ : Мінрегіон України, 2021. URL: https://e-construction.gov.ua (дата звернення: 29.07.2026).

206. Про затвердження Порядку проведення інвентаризації земель та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України : постанова Кабінету Міністрів України від 05.06.2019 № 476. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/476-2019-п (дата звернення: 29.07.2026).

207. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98) : затв. наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру України від 09.04.1998 № 56. Київ, 1999. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0393-98 (дата звернення: 29.07.2026).

208. Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic building information modelling (HBIM). Structural Survey. 2009. Vol. 27, No. 4. P. 311–327. DOI: https://doi.org/10.1108/02630800910985108.

209. Penjor T., Banihashemi S., Hajirasouli A., Golzad H. Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: framework of challenges,

gaps, and existing limitations of HBIM. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage. 2024. Vol. 35. Article e00366. DOI: https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00366.

210. Diara F. Open source HBIM and OpenAI: review and new analyses on LLMs integration. Heritage. 2025. Vol. 8, No. 5. Article 149. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage8050149.

211. Arsalan H., Heesom D., Moore N. From heritage building information modelling towards an ‘echo-based’ heritage digital twin. Heritage. 2025. Vol. 8, No. 1. Article 33. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage8010033.

212. Borkowski A. S., Kubrat A. Integration of laser scanning, digital photogrammetry and BIM technology: a review and case studies. Eng. 2024. Vol. 5, No. 4. P. 2395–2409. DOI: https://doi.org/10.3390/eng5040125.

213. Antova G., Peev I. Comparison of commercial and free software for point cloud processing. Inżynieria Mineralna. 2024. Vol. 1, No. 1. P. 511–519. DOI: https://doi.org/10.29227/IM-2024-01-57.

214. Cruz Franco P. A., Rueda Márquez de la Plata A., Cruz Franco J. From the point cloud to BIM: methodology for the ideal reconstruction of a lost bastion of the Cáceres wall. Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No. 18. Article 6609. DOI: https://doi.org/10.3390/app10186609.

215. Ham N., Bae B.-I., Yuh O.-K. Phased reverse engineering framework for sustainable cultural heritage archives using laser scanning and BIM: the case of the Hwanggungwoo (Seoul, Korea). Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 19. Article 8108. DOI: https://doi.org/10.3390/su12198108.

216. Almukhtar A., Saeed Z. O., Abanda H., Tah J. H. M. Reality capture of buildings using 3D laser scanners. CivilEng. 2021. Vol. 2, No. 1. P. 214–235. DOI: https://doi.org/10.3390/civileng2010012.

217. Lawani K., Sadeghineko F., Tong M., Bayraktar M. Methodology for retrospectively developing a BIM model from point cloud scans using ongoing building project as case study. Journal of Engineering, Design and Technology. 2025. Vol. 23, No. 4. P. 1243–1261. DOI: https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2023-0325.

218. Noardo F., Krijnen T., Arroyo Ohori K., Biljecki F., Ellul C., Harrie L. et al. Reference study of IFC software support: the GeoBIM benchmark 2019 – Part I. Transactions in GIS. 2021. Vol. 25, No. 2. P. 805–841. DOI: https://doi.org/10.1111/tgis.12709.

219. Sibenik G., Kovacic I. Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis. Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 32. Article 101589. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101589.

220. Gerbino S., Cieri L., Rainieri C., Fabbrocino G. On BIM interoperability via the IFC standard: an assessment from the structural engineering and design viewpoint. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, No. 23. Article 11430. DOI: https://doi.org/10.3390/app112311430.

221. Tommasi C., Achille C., Fassi F. From point cloud to BIM: a modelling challenge in the cultural heritage field. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B5. P. 429–436. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-429-2016.

222. Mésároš P., Mandičák T., Čabala J., Kozlovská M. Use of a 3D scanner technology to create an information model of historic buildings – a case study. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 960. Article 042065. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/4/042065.

223. Gámez Bohórquez O., Derigent W., Bril El-Haouzi H. Parametric point-cloud slicing for facade retrofitting. International Journal of Architectural Computing. 2022. Vol. 20, No. 2. P. 434–452. DOI: https://doi.org/10.1177/14780771211029747.

224. Колчанов А. В. Комплексна реконструкція зруйнованих безкаркасних будівель із застосуванням новітніх технологій. Прикладні питання математичного моделювання. 2025. Т. 8, № 2. С. 129–143. DOI: https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-2-14.

225. Kuroczyński P., Argasiński K. Implementing HBIM for cultural heritage preservation – from documentation to sustainable management. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. Vol. X-M-

2-2025. P. 175–184. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-M-2-2025-175-2025.

226. Fortunato T., Bruno S., Fatiguso F., De Fino M. From GIS to HBIM and back: multiscale performance and condition assessment for networks of public heritage buildings and construction components. International Journal of Architectural Heritage. 2025. Vol. 19, No. 12. P. 3071–3095. DOI: https://doi.org/10.1080/15583058.2025.2482053.

227. Fernandes Dionizio R., Murphy M., Dezen-Kempter E. Multi-scale documentation of modern Brazilian architecture: an HBIM-HGIS approach. International Journal of Architectural Heritage. 2025. Vol. 19, No. 12. P. 3307–3324. DOI: https://doi.org/10.1080/15583058.2025.2492243.

228. Dionizio R. F., López-Chao V. Integrating HBIM and WebGIS for the documentation, visualization and management of modern architectural heritage sites. International Journal of Architectural Heritage. 2025. Vol. 19, No. 12. P. 3530–3549. DOI: https://doi.org/10.1080/15583058.2025.2502528.

229. Chorro-Domínguez F. J., Redweik P., Sanjosé-Blasco J. J. Integrating HBIM and GIS through object-relational databases for the conservation of rammed earth heritage: a multiscale approach. Heritage. 2025. Vol. 8, No. 8. Article 336. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage8080336.

230. Wang X., Wu C., Zhang X., Pan R. Bridging heritage knowledge and digital models: an HBIM integration framework. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. Vol. X-M-2-2025. P. 365–372. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-M-2-2025-365-2025.

231. Mazzetto S. Integrating emerging technologies with digital twins for heritage building conservation: an interdisciplinary approach with expert insights and bibliometric analysis. Heritage. 2024. Vol. 7, No. 11. P. 6432–6479. DOI: https://doi.org/10.3390/heritage7110300.

232. Vuoto A., Funari M. F., Lourenço P. B. On the use of the digital twin concept for the structural integrity protection of architectural heritage. Infrastructures. 2023. Vol. 8, No. 5. Article 86. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures8050086.

233. Приступа Д., Крижанівський О. Цифрові методи в реновації пам’яток архітектури: досвід застосування 3D-сканування та BIM у проєктуванні садиби Сангушків. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2025. № 74. С. 195–203. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2025.74.195-203.

234. Chelaru B. et al. Integration of point cloud, historical records, and condition assessment data in HBIM. Automation in Construction. 2024. Vol. 161. Article 105347. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105347.

235. Fernández-Mora V., Navarro I. J., Yepes V. Structural damage index evaluation in BIM environments. Structures. 2025. Vol. 74. Article 108544. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108544.

236. Kaplan Z., Abrishami S. Integrating HBIM and Big Data analytics for disaster risk management in cultural heritage conservation. Smart and Sustainable Built Environment. 2025. DOI: https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2024-0136.

237. González J. et al. Heritage BIM (HBIM) applied in emergency scenarios: a case study of the National Museum in Brazil. International Journal of Construction Management. 2025. Vol. 25, No. 11. P. 1239–1253. DOI: https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2408183.

238. Rezk J., Pons-Valladares O., Muñoz-Blanc C. Evaluating sustainability in post-conflict reconstruction: a case study of blast-damaged buildings without structural collapse risk in Syria. Buildings. 2025. Vol. 15, No. 3. Article 369. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15030369.

239. Braik A. M., Koliou M. Automated building damage assessment and large-scale mapping by integrating satellite imagery, GIS, and deep learning. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2024. Vol. 39, No. 15. P. 2389–2404. DOI: https://doi.org/10.1111/mice.13197.

240. Deng J. et al. An edge guidance and foreground enhancement network for building change detection in remote sensing imagery. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2025. Vol. 40, No. 6. P. 365–390. DOI: https://doi.org/10.1111/mice.70152.

241. Hryhorovskyi P. et al. A BIM-based method for structural stability assessment and emergency repairs of large-panel buildings damaged by military actions and explosions: evidence from Ukraine. Buildings. 2022. Vol. 12, No. 11. Article 1817. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings12111817.

242. Cil D. et al. Detecting damage to cultural heritage during armed conflict using the case of Ukraine. Nationalism and Ethnic Politics. 2025. Vol. 31, No. 2. P. 177–188. DOI: https://doi.org/10.1080/13537113.2024.2411794.

243. Wang J. et al. Applications of building information modeling (BIM) and BIM-related technologies for sustainable risk and disaster management in buildings: a meta-analysis (2014–2024). Buildings. 2025. Vol. 15, No. 13. Article 2289. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15132289.

244. Demian P. et al. BIM implementation in post-war reconstruction of Ukraine. Buildings. 2024. Vol. 14, No. 11. Article 3495. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings14113495.

245. Baik A., Alshawabkeh Y. Harnessing heritage BIM for enhanced architectural documentation of Ad Deir in Petra. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 11. Article 4562. DOI: https://doi.org/10.3390/app14114562.

246. Rubens T. et al. Digitalization based on high-resolution scanning and HBIM tools for damage assessment of the José de Alencar house. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 2023. Vol. 8, No. 1. Article 30. DOI: https://doi.org/10.1007/s41024-023-00275-5.

247. Yuan X. et al. Automated building segmentation and damage assessment from satellite images for disaster relief. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2021. Vol. XLIII-B3-2021. P. 741–748. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-741-2021.

248. Miky Y., Alshawabkeh Y., Baik A. Using deep learning for enrichment of heritage BIM: Al Radwan house in historic Jeddah as a case study. Heritage Science. 2024. Vol. 12, No. 1. Article 255. DOI: https://doi.org/10.1186/s40494-024-01382-3.

249. Ma H., Zhou Z., Wang Y. Digital preservation and development of architectural heritage from a virtual perspective: a systematic review. npj Heritage Science. 2025. Vol. 13, No. 1. DOI: https://doi.org/10.1038/s40494-025-02162-3.

250. Kaur R. et al. A comprehensive review on building information modelling (BIM), its implementations and applications. Discover Civil Engineering. 2025. Vol. 2, No. 1. DOI: https://doi.org/10.1007/s44290-025-00342-5.

251. Liu J., Li B. Heritage building information modelling (HBIM): a review of published case studies. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2024. Vol. XLVIII-1-2024. P. 387–393. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-387-2024.

252. Costa A. P., Cuperschmid A. R. M., Neves L. O. HBIM and BEM association: systematic literature review. Journal of Cultural Heritage. 2024. Vol. 66. P. 551–561. DOI: https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.008.

253. Escudero P. A. Scan-to-HBIM: automated transformation of point clouds into 3D BIM models for the digitization and preservation of historic buildings. VITRUVIO – International Journal of Architectural Technology and Sustainability. 2023. Vol. 8, No. 2. P. 52–63. DOI: https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20413.

254. Intrigila C. et al. HBIM for conservation and valorization of structural heritage: the Stylite Tower at Umm ar-Rasas, Jordan. Journal of Cultural Heritage. 2024. Vol. 70. P. 397–407. DOI: https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.10.010.

255. Zhang Z., Zou Y. Research hotspots and trends in heritage building information modeling: a review based on CiteSpace analysis. Humanities and Social Sciences Communications. 2022. Vol. 9. Article 394. DOI: https://doi.org/10.1057/s41599-022-01414-y.

256. Shang X., Guo M., Wang G. et al. Behavioral model construction of architectural heritage for digital twin. npj Heritage Science. 2025. Vol. 13. Article 129. DOI: https://doi.org/10.1038/s40494-025-01691-1.

257. Abdelalim M. Heritage preservation using laser scanning: architectural digital twins using Al-Mu’izz Street as a case study. Buildings. 2025. Vol. 15, No. 9. Article 1480. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15091480.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Білов В. Аналіз ефективності використання будівельного інформаційного моделювання в процесі відновлення та експлуатації історичних будівель. Grail of Science. 2023. № 34. Section Architecture and Construction C. 394–396. DOI: https://doi.org/10.36074/grail-of-science.08.12.2023.89

2. Bilov V., Goi V., Mamonov K., Tregub O., Levchenko O. Advantages of building information modeling (BIM) during the operational life. Amazonia Investiga. 2023. Vol. 12, no. 68. P. 346–363. DOI: https://doi.org/10.34069/AI/2023.68.08.32. *Особистий внесок здобувача: визначення переваг технології BIM на етапі проєктування моделі.*

3. Білов В., Левченко О. BIM як анатомія для будівлі. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2024. № 70. С. 32–45. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.70.32-45 . *Особистий внесок здобувача: постановка проблеми виявлення та формулювання повного обсягу та потенціалу BIM технології, основна частина і висновки*

4. Білов В. Класифікація пошкоджень архітектурних пам’яток, зокрема, через воєнні дії, у будівельному інформаційному моделюванні. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2026. № 75. С. 308–329. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2026.75.308-329

5. Білов В., Левченко О. Документування пошкоджень пам’яток культурної спадщини за BIM технологією. Вісник НАОМА. 2026. № 6. С.14-28. DOI: https://doi.org/10.32782/naoma-bulletin-2026-6-2. *Особистий внесок здобувача: постановка проблеми фіксації пошкоджень об'єктів архітектурної спадщини, основна частина і висновки*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Bilov V. The Use of Building Information Modeling Technologies in the Restoration and Further Operation of Architectural Monuments. Global

Innovations and Collaborative Solutions in Contemporary Science. *Futurity Research Publishing*, (Lodz, Poland, 15.12.2023) Лодзь, Республіка Польща, 2023. С. 153–157. URL: https://futurity-publishing.com/international_conference_3/ (дата звернення: 25.03.2026).

7. Білов В. А. Технології сканування пошкоджених об’єктів культурної спадщини. Архітектура, Будівництво, Дизайн: Технологія, Енергетика, Менеджмент: Міжнародний науково-технічний форум, КНУБА, м. Київ, 16–17 жовтня 2024 р., С.208-209 URL: https://drive.google.com/file/d/1TpA1Hh7c71ChP79W55YV0wPz_pUvVnWz/view (дата звернення: 23.01.2026)

8. Білов. В.А, Левченко О.В. Документування пошкоджень пам’яток культурної спадщини за BIM технологією. Матеріали XV Міжнародної наукової конференції «Проблеми дослідження, збереження та реставрації історичних фортифікацій», Львів – Івано-Франківськ, Україна, 18–19 вересня 2025. URL: https://lpnu.ua/news/xv-mizhnarodna-naukovo-praktychna-konferentsiia-problemy-doslidzhennia-zberezhennia-ta (дата звернення: 25.03.2026).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Pletsan, K., Havryliuk, A., Poberezhets, H., Yurova, T., Bilov, V., Polotnianko, O. Digital Transformation of Preservation and Restoration of Ukraine’s Cultural Heritage, Studies in Media and Communication, 2023. №11(7), С. 376. DOI: https://doi.org/10.11114/smc.v11i7.6514 *Особистий внесок здобувача: визначення проблеми 3D-моделювання об’єктів архітектурної спадщини*

10. Білов В. А. Інноваційні методи використання будівельного інформаційного моделювання (BIM) у процесі реставрації пам’яток архітектури, пошкоджених внаслідок воєнних дій. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2024. № 6. С. 230–239. DOI: https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.6.26

ДОДАТОК Б

Акти впровадження

МОН
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

просп. Повітряних Сил, 31,
м. Київ, 03037
тел.: +38 (044) 248-32-65,
e-mail: knuba@knuba.edu.ua,
web: knuba.edu.ua
ЄДРПОУ 02070909

КНУБА

ДОВІДКА
про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційного дослідження Білова Владислава Анатолійовича

Цією довідкою посвідчуємо, що окремі наукові висновки, результати та рекомендації дисертаційної роботи **Білова Владислава Анатолійовича** на тему **«Будівельна інформаційна модель об'єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій»** впроваджені у навчальний процес кафедри Інформаційних технологій в архітектурі архітектурного факультету, зокрема:

- в процесі підготовки студентської наукової роботи студентки 1 року навчання освітнього рівня магістр, групи АБСм25-7 Хартанович Ірини Русланівни, де В.А. Білов виступив в ролі наукового керівника. Зокрема, зроблено рекомендації щодо процесу аналізу й класифікації пошкоджень існуючої історичної частини проєкту нової молодшої школи, запропоновано нові підходи до збереження, які включають цифровізацію об'єкта та моніторинг історичного фрагмента за допомогою BIM-технологій. Студентська наукова робота «Сучасні підходи до організації навчального проєктування: досвід застосування та перспективи BIM-технологій» визнана переможцем Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей у 2025/2026н.р. (Протокол №4 конкурсної комісії від 28.05.2026).
- при розробці курсового проєкту дисципліни «Будівельне інформаційне моделювання - технології BIM» для студентів 1 року навчання освітнього рівня магістр, групи АБСм25-7 спеціальності G17 Архітектура та містобудування, де у навчальному процесі застосовано розроблений автором методологічний підхід до класифікації пошкоджень та інших параметрів моделі існуючої історичної частини проєкту нової молодшої школи.

Впровадження результатів наукової роботи В.А. Білова дозволило вдосконалити робочу програму навчальної дисципліни та сприяло набуттю теоретичних знань і практичних проєктних навичок студентами під час підготовки фахівців за спеціальністю G17 Архітектура та містобудування.

Проректор з НМР Андрій ШПАКОВ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ Ідентифікаційний код 02070909

№2797/52-21/3/26 від 09.09.2026

МАКАРІВСЬКА СЕЛИЩНА РАДА

вул. Димитрія Ростовського, 30, с-ще Макарів, Бучанський р-н, Київська обл., 08001
тел.097 8817402 e-mail:info@makariv-rada.gov.ua, www.makariv-rada.gov.ua
Код ЄДРПОУ 04362183

08.09.2026 № 03-23/2235 На № _____ від _____

У спеціалізовану вчену раду

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Білова Владислава Анатолійовича

Даним актом засвідчується, що окремі наукові висновки, результати та рекомендації дисертаційного дослідження Білова Владислава Анатолійовича на тему **«БУДІВЕЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ, ПОШКОДЖЕНОГО ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ»** впроваджені при розробці пропозицій та підготовці матеріалів концепції **«Проєкт інтегрованого просторового розвитку Макарова»**, презентація якої відбулася 29 травня 2026 року.

Зокрема, використано рекомендації щодо аналізу та класифікації пошкоджень існуючої історичної частини будівлі, передбаченої проєктом нової молодшої школи. Запропоновано нові підходи до збереження історичного фрагмента, що включають його цифровізацію та подальший моніторинг із використанням BIM-технологій, а також використання елементів сакральної архітектури в дизайні окремих фасадів і збереження частин оригінальної кладки у видимому стані в інтер'єрі без додаткового оздоблення.

Матеріали концепції та результати її презентації оприлюднено на офіційному вебсайті Макарівської селищної ради:https://new.makariv-rada.gov.ua/majbutnie-makarivshchyny-ochyma-molodykh-arkhitektoriv-ta-urbanistiv/.

Заступник селищного голови з питань діяльності виконавчих органів ради **Анатолій КАРБОВСЬКИЙ**

Україна Київська область Бучанський район Код ЄДРПОУ 04362183 Макарівська селищна рада

ФОП ХІЛЬКО НАТАЛІЯ ОЛЕКСІЇВНА

контактний телефон: +38 050 500 2663 Email: natali.arhitekt@gmail.com

Сертифікати: АА 002178, АА 004996

Вих. №_____

від «____»_____2026р.

У спеціалізовану вчену раду

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Білова Владислава Анатолійовича

Цим актом підтверджується, що окремі наукові положення та висновки дисертаційної роботи Білова Владислава Анатолійовича на тему:
«Будівельна інформаційна модель об'єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій»
змістовно корелюють із напрямами діяльності робочої групи, сформованої Офісом підтримки відновлення при Міністерстві культури та стратегічних комунікацій України, створеним UNESCO за фінансування Уряду Японії та імплементованим Громадською спілкою «Фонд підтримки реформ в Україні».

У період роботи зазначеної робочої групи у 2025–2026 рр., координацію якої здійснювала Менеджер проєктів Офісу підтримки відновлення Наталія Хілько, аспірант Білов Владислав Анатолійович брав участь у професійних обговореннях та консультаціях, пов'язаних із тематикою цифрової фіксації та документування об'єктів культурної спадщини. Така співпраця сприяла узгодженню окремих наукових положень дисертаційної роботи з практичними підходами, що опрацьовувалися робочою групою. Робочою групою було здійснено напрацювання, фахове обговорення та рецензування документу: «Методичні рекомендації щодо здійснення тривимірного (3D) сканування, організації електронного документообігу та забезпечення цифрової стандартизації даних у процесах створення, оброблення, зберігання та використання інформації про об'єкти культурної спадщини». Документ визначає концептуальні підходи до архітектури системи створення, збереження та використання цифрових копій об'єктів культурної спадщини України.

Тематика дисертаційного дослідження Білова В.А. «Будівельна інформаційна модель об'єкта архітектурної спадщини, пошкодженого внаслідок воєнних дій» є актуальною та узгоджується з концептуальними підходами, визначеними робочою групою, зокрема щодо цифрової фіксації, документування та стандартизації даних про об'єкти культурної спадщини, включно з тими, що зазнали пошкоджень унаслідок воєнних дій.

Архітекторка *Наталія ХІЛЬКО*

ДОДАТОК В

Додаткові матеріали, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

участь у конференціях, міжнародних освітніх проєктах, курсах підвищення кваліфікації, воркшопах



Futurity Publishing

CERTIFICATE

OF APPRECIATION

Certificate provides at least a 1 ECTS credit to awarded participians for being involved

PROUDLY PRESENTED TO

Vladyslav Bilov

took part in the international conference
"**Global Innovations and Collaborative Solutions in Contemporary Science**"
held on December 15, 2023 by Futurity Research Publishing (30 hours)

Poland, Łódź, ul. Stefan Żeromski
number 53

Date: 20.11.2023

Public organization "Poland "Lodz" Public organization
Futurity Research Publishing
TAX NUMBER 0000981998

9072 456 48
3696 856 02
3579 972 97



КОМІТЕТ ВЕРХОВНОЇ РАДИ УКРАЇНИ З ПИТАНЬ ОРГАНІЗАЦІЇ ДЕРЖАВНОЇ ВЛАДИ, МІСЦЕВОГО САМОВРЯДУВАННЯ, РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ ТА МІСТОБУДУВАННЯ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД, ТЕРИТОРІЙ ТА ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ (КНУБА)
ДП НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА ІМЕНІ В.С. БАЛИЦЬКОГО (ДП «НДІБВ»)
АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА УКРАЇНИ (АБУ)
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МИСТЕЦТВ УКРАЇНИ
НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ІННОВАЦІЙНОГО БУДІВНИЦТВА (НДІ ІНБУД)
УНІВЕРСИТЕТ ПРИКЛАДНИХ НАУК (ЛЮБЕК НІМЕЧЧИНА)
БРАНДЕНБУРЗЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ (НІМЕЧЧИНА)
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ М. БРНО (ЧЕСЬКА РЕСПУБЛІКА)
СІЛЕЗЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (SUT)
КРАКІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМ. ТАДЕУША КОСТЮШКА (ПОЛЬЩА)
УКРАЇНСЬКО-КИТАЙСЬКИЙ ІНСТИТУТ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МАТЕРІАЛІВ (КИТАЙ)
ДЕПАРТАМЕНТ МІСТОБУДУВАННЯ ТА АРХІТЕКТУРИ КМДА
НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ТЕОРІЇ ТА ІСТОРІЇ АРХІТЕКТУРИ, МІСТОБУДУВАННЯ І ДИЗАЙНУ (НДІТІАМД)
ДП «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ПРОЕКТУВАННЯ МІСТ «ДІПРОМІСТО» ІМ. Ю.М.БІЛОКОНЯ
THE WALL UKRAINE

КНУБА

НДІБВ

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ФОРУМ
«Архітектура, Будівництво, Дизайн : Технологія, Енергетика, Менеджмент»

IX Міжнародна науково-технічна конференція «Ефективні технології в Будівництві»

X Міжнародна науково-технічна конференція «Архітектура історичного Києва. Синергія архітектури та дизайну»

XI Міжнародна науково-технічна конференція «Нові технології в Будівництві»

СЕРТИФІКАТ
підтверджує, що

БІЛОВ Владислав Анатолійович

брав(ла) участь у конференціях форуму
16-17 Жовтня 2024р. Київ, Україна

CERTIFICATE
confirms that

Vladyslav BILOV

has participated in the conferences forum
October 16-17, 2024 Ukraine, Kyiv

Rector of Kyiv National University of Construction and Architecture – the head of organizing committee ***Oleksii Dniprov***

партнери | partners

PERI MAPEI UGLA miyamoto.ukraine MUK AUTODESK Value Added Distributor Thermo ELF LIRALAND GROUP ALLBAU software THE WALL LIRA10 GRAPHISOFT Prof Build CENTER

TOTAL:
15 hours - 0,5 ECTS

Certificate No.
KNUCA-24-11-185

СЕРТИФІКАТ

Владислав Білов

доповідач
XV Міжнародної наукової конференції

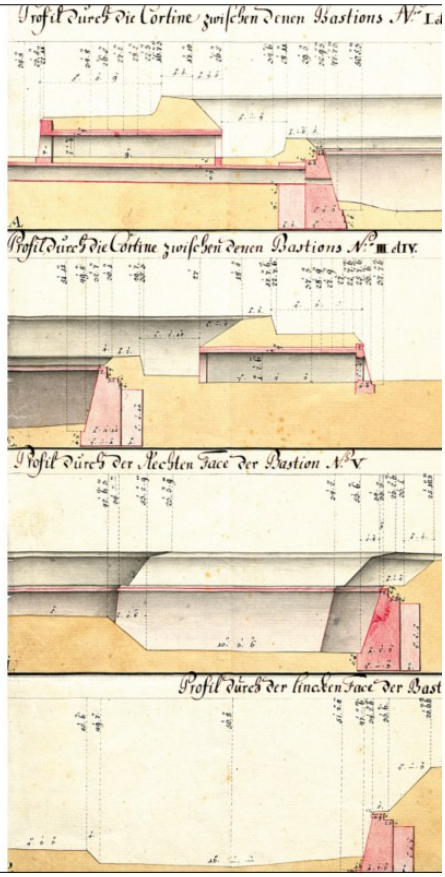
ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ, ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА РЕСТАВРАЦІЇ ІСТОРИЧНИХ ФОРТИФІКАЦІЙ

18-19 вересня
Львів - Івано-Франківськ, 2025

Проф., д. арх. Микола Бевз
завідувач кафедри архітектури
та реставрації НУ «Львівська політехніка»

маг. арх. Ілля Литвинчук,
науковий секретар конференції,
аспірант кафедри архітектури
та реставрації НУ «Львівська політехніка»

маг. арх. Анна Сербін,
науковий секретар конференції,
аспірант кафедри архітектури
та реставрації НУ «Львівська політехніка»



unesco

From
the People of Japan

CERTIFICATE OF PARTICIPATION

This is to certify that

Vladyslav Bilov

has participated in and completed the in-person training/course on 3D Laser Scanning and Photogrammetry for Post-Disaster Heritage Sites Documentation, organized by UNESCO, in the framework of its project "Preserving cultural heritage in Ukraine: Reinforcing monitoring, emergency response and preparedness at damaged cultural and natural heritage sites in Ukraine, including the World Heritage property 'The Historic Centre of Odesa' supported by UNESCO, and funded by the Japan.

Kyiv, 22-26 July 2024

Chiara Dezzi Bardeschi
Head of UNESCO Desk in Ukraine

buildingSMART International

Verify Authenticity
Code: KDII2E1MI3

Professional Certification
Foundation

This is to certify that

Bilov Vladyslav

has successfully passed the Professional Certification - Foundation exam.

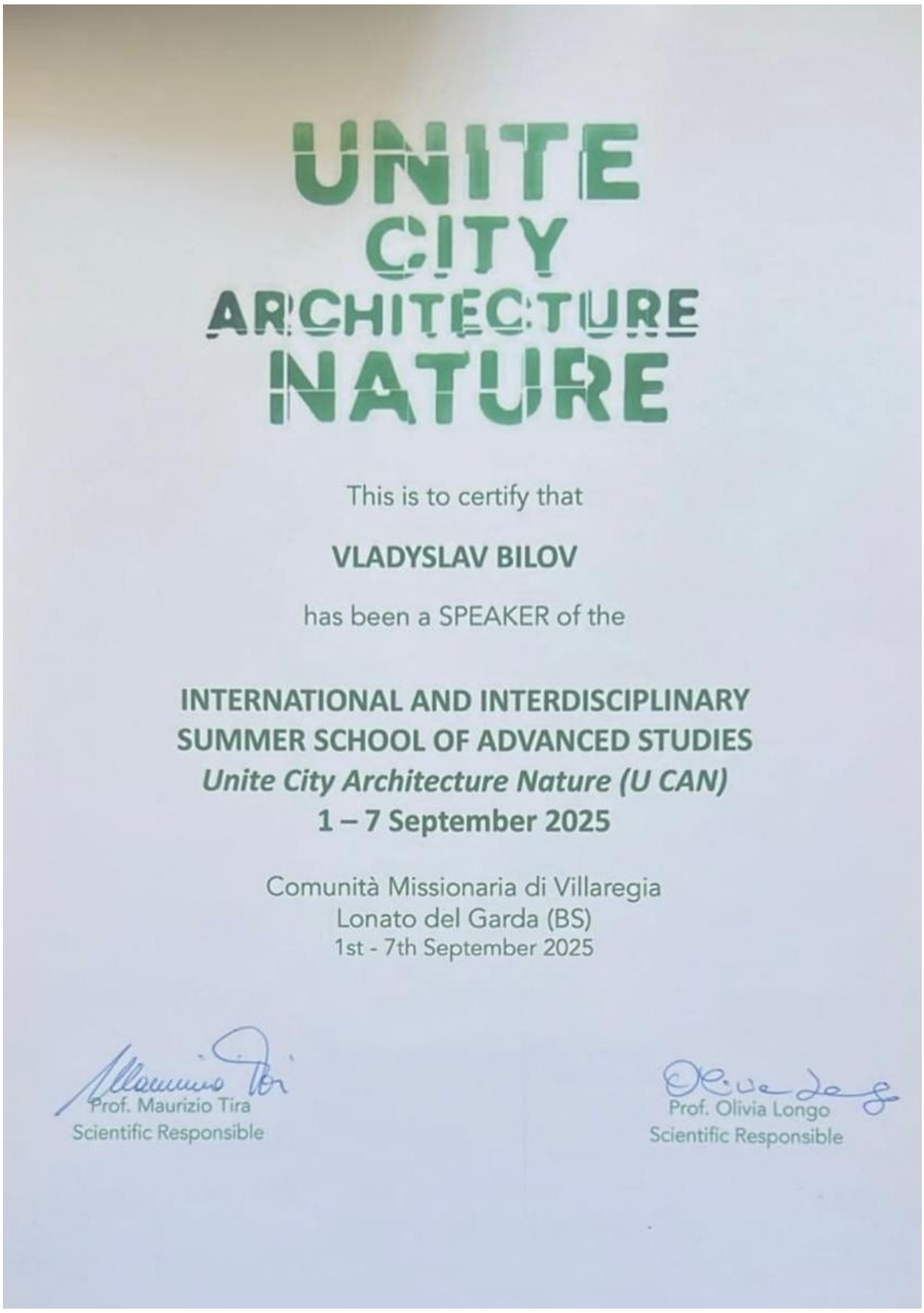
This certificate attests to the knowledge and comprehension of openBIM fundamentals for the named individual and to the level stated above, according to the buildingSMART International Professional Certification Program.

Date: 10 листопада 2024

Céline Bent,
Compliance Director
buildingSMART International

Program

buildingSMART Professional Certification



UNITE
CITY
ARCHITECTURE
NATURE

This is to certify that

VLADYSLAV BILOV

has been a SPEAKER of the

INTERNATIONAL AND INTERDISCIPLINARY SUMMER SCHOOL OF ADVANCED STUDIES
Unite City Architecture Nature (U CAN)
1 – 7 September 2025

Comunità Missionaria di Villaregia
Lonato del Garda (BS)
1st - 7th September 2025

Prof. Maurizio Tira
Scientific Responsible

Prof. Olivia Longo
Scientific Responsible

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КНУБА

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

СЕРТИФІКАТ

засвідчує, що

Владислав Білов,

аспірант КНУБА

здійснював наукове керівництво
студентської наукової роботи, що перемогла
у І турі Всеукраїнського конкурсу
студентських наукових робіт із галузей знань
і спеціальностей 2025/2026 н. р.,
за галуззю знань Інженерія, виробництво та будівництво

Ректор Олексій ДНІПРОВ



INFORMATION PLATFORM "CENTER FOR INNOVATIVE THINKING"
UKRAINIAN INSTITUTE OF SCIENTIFIC STRATEGIES
EUROPEAN UNION RESEARCH DEPARTMENT
SCIENTIFIC AND PUBLISHING CENTER "PROGRESS"

CERTIFICATE

is awarded to

Vladyslav Bilov

for being an active participant in International Scientific and Practical Conference
MODERN SCIENCE: CHALLENGES AND PERSPECTIVES

30 HOURS OF PARTICIPATION
(1 ECTS CREDIT)

September 28-30, 2026
Madrid, Spain
www.naukainfo.com

№ 160035

O. SOLOVIOV
Editor-in-Chief of the Proceedings of the Scientific and Practical Conference

V. HALENKO
Head of the Ukrainian Institute of Scientific Strategies



CERTIFICATE OF COMPLETION

THIS IS TO CERTIFY THAT

Vladyslav Bilov

HAS SUCCESSFULLY COMPLETED

Practical English

90 academic hours (3 ECTS credits)

ON

December 28, 2024

COURSE CERTIFIED

Mariupol University

Mykola Trofymenko, Rector

VERIFICATION: 5rHID4rqnDvw

ДОДАТОК Г

Джерела ілюстрацій

Ілюстрації, позначені як «авторська розробка», є оригінальними схемами, діаграмами, таблицями, 3D-моделями та піктограмами здобувача. Для запозичених зображень наведено джерело з електронною адресою та датою звернення.

Розділ 1

Рис. 1.1. Еволюція світового законодавства про пам’ятки – об’єкти архітектури (авторська схема). Факсиміле нормативних документів:

«Закон про художню пам’ятку» (Угорщина, 1881) – історичний законодавчий акт.

«Закон про давні пам’ятки» (Ancient Monuments Act, Велика Британія, 1913). URL: https://www.legislation.gov.uk (дата звернення 11.09.2026).

«Венеційська хартія» (1964) – ICOMOS. URL: https://www.icomos.org (дата звернення 11.09.2026).

«Конвенція про охорону всесвітньої культурної і природної спадщини» (1972) – ЮНЕСКО. URL: https://whc.unesco.org (дата звернення 11.09.2026).

«Хартія про збереження цифрової спадщини» (2003) – ЮНЕСКО. URL: https://www.unesco.org (дата звернення 11.09.2026).

Рис. 1.2. Історія поняття та класифікація об’єктів архітектурної спадщини (авторська схема). Факсиміле законодавчих актів:

Закон України «Про охорону і використання пам’яток історії та культури». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3600-09 (дата звернення 11.09.2026).

Конституція України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80 (дата звернення 11.09.2026).

Закон України «Про охорону культурної спадщини». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14 (дата звернення 11.09.2026).

Рис. 1.3. Актуальність та доцільність застосування BIM для об’єктів архітектурної спадщини – авторська розробка.

Рис. 1.4. Аналіз закордонного досвіду проєктів реновації об’єктів архітектурної спадщини (авторське компонування):

Синагога Vinohrady (Прага). Джерела зображень:

Креслення історичного головного фасаду Вільгельма Штіассні (угорі ліворуч): Smok M. Vinohrady, Prague: Forgotten in the midst of mass tourism. Jewish Heritage Europe. URL: https://jewish-heritage-europe.eu/focus/issues-2/vinohrady-prague-forgotten-in-the-midst-of-the-mass-tourism/ (дата звернення: 11.09.2026).

Архівна фотографія головного фасаду (велике фронтальне фото): Архів Єврейського музею в Празі; відтворено у проєкті Štětina M. Vinohradská synagoga – Vinohrady Synagogue (visualisation). ArtStation. URL: https://blax.artstation.com/projects/zA66Rq (дата звернення: 11.09.2026).

Сім фрагментів – модель фасаду (внизу ліворуч), історичне фото з вулиці, деталь модельованого фасаду, два зображення інтер’єру та два знімки екрана BIM-моделі: Boeykens S., Himpe C., Martens B. A Case Study of Using BIM in Historical Reconstruction – The Vinohrady Synagogue in Prague. Digital Physicality: Proceedings of the 30th eCAADe Conference. 2012. P. 729–737. Рис. 3, 4, 6. URL: https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/64032 (дата звернення: 11.09.2026).

Кольорова об’ємна модель екстер’єру: Štětina M. Vinohrady Synagogue – Vinohradská synagoga [3D-модель]. Sketchfab. URL: https://sketchfab.com/3d-models/vinohrady-synagogue-vinohradska-synagoga-aa141152c1cb412ea6878ad1f9b20922 (дата звернення: 11.09.2026).

Пармський собор (Парма). Джерела зображень:

Чотири фрагменти – аерофотознімок, план розташування станцій сканування, хмара точок та суміщення фасаду з історичним кресленням: Bruno N., Roncella R. A Restoration Oriented HBIM System for Cultural Heritage Documentation: The Case Study of Parma Cathedral. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. XLII-

2. P. 171–178. Рис. 2–5. URL: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-171-2018 (дата звернення: 11.09.2026).

Загальне фото фасаду і дзвіниці (велике вертикальне зображення): Mortel R. [Пармський собор; фотографія]. Відтворено у: Zomkovskyi Andrii. 20 пам'яток Парми, які варто подивитися. Trips. 31.01.2023. Фото з Flickr, використано фрагмент. URL: https://trips.com.ua/podorozhi/20-pam-yatok-parmy-yaki-varto-podyvytysya/ (дата звернення: 11.09.2026).

Фото інтер'єру: Pjt56. Parma-pjt4.jpg. 20.06.2018. Wikimedia Commons. CC BY-SA 4.0. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parma-pjt4.jpg (дата звернення: 11.09.2026).

Фото скульптурної капітелі: Sailko. Nicholaus e altre maestranze, capitelli del duomo di parma, 1106–1120 ca., 13 lotta di leoni e basilischi. 05.07.2017. Wikimedia Commons. CC BY 3.0. Використано фрагмент. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nicholaus_e_altre_maestranze,_capitelli_del_duomo_di_parma,_1106-1120_ca.,_13_lotta_di_leoni_e_basilischi.jpg (дата звернення: 11.09.2026).

Фото верхньої частини головного фасаду (праворуч угорі): Nagel N. Parma – Italy – July 7th 2013 – 07. 07.07.2013. Wikimedia Commons. CC BY-SA 3.0. Використано фрагмент. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parma_-_Italy_-_July_7th_2013_-_07.jpg (дата звернення: 11.09.2026).

Рис. 1.5. Аналіз закордонного досвіду проєктів реновації об'єктів архітектурної спадщини (авторське компонування):

Собор Паризької Богоматері (Париж). Джерела зображень:

Фото головного фасаду до пожежі: Haas P. (P e z i). Notre-Dame de Paris 2013-07-24. 24.07.2013. Wikimedia Commons. CC BY-SA 3.0. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Notre-Dame_de_Paris_2013-07-24.jpg (дата звернення: 11.09.2026).

Фото інтер'єру: Frantz R. A. (Tetraktys). Paris Notre-Dame cathedral interior nave east 01a. 2005. Wikimedia Commons. CC BY-SA 3.0. URL:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paris_Notre-Dame_cathedral_interior_nave_east_01a.jpg (дата звернення: 11.09.2026).

Хмара точок головного фасаду (нижнє зображення в центральній колонці): Art Graphique & Patrimoine. Notre-Dame [матеріали цифрової фіксації собору]. URL: https://artgp.fr/references/notre-dame/ (дата звернення: 11.09.2026).

Чотири зображення цифрової моделі – боковий вигляд, рознесена аксонометрія, візуалізація фасаду трансепту та знімок екрана Revit: Souza E. How Did BIM Help Notre-Dame Rise from the Ashes? ArchDaily. 21.01.2025. Ілюстрації галереї 10, 14, 19, 32. URL: https://www.archdaily.com/1025809/how-did-bim-help-notre-dame-rise-from-the-ashes (дата звернення: 11.09.2026).

Пальміра (Сирія). Джерела зображень:

Фото Тріумфальної арки й колонади (вгорі ліворуч): Argenberg V. Palmyra, Syria, Monumental Arch and Columns. 28.08.2008. Wikimedia Commons. CC BY 4.0. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Palmyra,_Syria,_Monumental_Arch_and_Columns.jpg (дата звернення: 11.09.2026).

Фото пошкодженого театру (невелике горизонтальне фото вгорі ліворуч): Oghanna A. [Римський театр у Пальмірі]. 21.02.2025. Фото для NPR. Відтворено у: Arraf J. Syria hopes tourists will return to Palmyra, a World Heritage Site ravaged by war. NPR / WBUR. 17.04.2025. URL: https://www.wbur.org/npr/g-s1-59683/palmyra-syria-heritage-sites-war-restoration (дата звернення: 11.09.2026).

Фото неушкодженої сцени театру (велике горизонтальне фото внизу ліворуч): [Театр у стародавній Пальмірі, Сирія]. iStock. Зображення № 499283936. URL: https://media.istockphoto.com/id/499283936/ru/фото/красивые-театр-в-древний-город-в-сирии-пальмира.jpg?s=612x612&w=0&k=20&c=L8fwywe3KCJfM291UL7F2V1iGyjEFIjxQS89BFqS-I8= (дата звернення: 11.09.2026).

Фото тетрапілона (вузький вертикальний фрагмент): [Тетрапілон у Пальмірі; фотографія]. Громадське радіо. Файл palmyra-13.jpg. Використано

фрагмент. URL: https://static.hromadske.radio/2016/04/palmyra-13.jpg (дата звернення: 11.09.2026).

Фото колонади з цитаделлю на тлі: Seux P. [Колонада Пальміри]. Hemis/Corbis. Відтворено у: How Ancient Palmyra, Now in ISIS's Grip, Grew Rich and Powerful. National Geographic. 26.08.2015. URL: https://www.nationalgeographic.com/history/article/150826-syria-palmyra-islamic-state-isis-archaeology-history (дата звернення: 11.09.2026).

Фотограмметрична модель храму Бела (нижній центральний фрагмент): Arc/k Project. Temple of Bel, Palmyra, Syria [3D-модель за фотографіями храму до руйнування]. Sketchfab. URL: https://sketchfab.com/3d-models/temple-of-bel-palmyra-syria-1defde599e0d423386134ed86b21b927 (дата звернення: 11.09.2026).

Два зображення реконструкції храму Бела – сіра модель та кольорова модель у дворі: Denker A. Rebuilding Palmyra virtually: recreation of its former glory in digital space. Virtual Archaeology Review. 2017. Vol. 8, no. 17. P. 20–30. URL: https://doi.org/10.4995/var.2017.5963 (дата звернення: 11.09.2026).

Кольорова модель храму Бела (праворуч угорі): #NEWPALMYRA. [Цифрова реконструкція храму Бела]. Відтворено у: Public Affairs. Marriage of technology and cultural heritage is fraught. Berkeley News. 06.05.2016. URL: https://news.berkeley.edu/2016/05/06/the-marriage-of-technology-and-cultural-heritage-is-fraught/ (дата звернення: 11.09.2026).

Рис. 1.6. Аналіз вітчизняного досвіду проєктів реновації об'єктів архітектурної спадщини (авторська схема). 3D-моделі об'єктів:

Проєкт SKEIRON:

Тягинська фортеця; Замок Любарта (м. Луцьк); Київський замок. URL: https://www.skeiron.com.ua/ua/publications/a052906f-a064-4b99-804a-ee94354501df (дата звернення 11.09.2026).

Музей Шухевича. URL: https://www.skeiron.com.ua/ua/publications/2cb732ce-bb25-4f0d-aec6-c84d641d8670 (дата звернення 11.09.2026).

Драматичний театр, м. Маріуполь. URL: https://www.facebook.com/photo?fbid=1549822713823627&set=pcb.1549822760490289 (дата звернення 11.09.2026).

Будинок Кричевського-Лебіщака. URL: https://www.facebook.com/photo?fbid=1539140514891847&set=pcb.1539140561558509 (дата звернення 11.09.2026).

Проєкт Scan UA:

Будинок на вул. Жилянській (наслідки удару БпЛА). URL: https://ua.scanua.com/drone_strike/ (дата звернення 11.09.2026).

Пожежна частина №4, м. Харків. URL: https://ua.scanua.com/firedepartment/ (дата звернення 11.09.2026).

Вознесенська церква, с. Лукашівка. URL: https://ua.scanua.com/church/ (дата звернення 11.09.2026).

Харківська школа №134. URL: https://ua.scanua.com/school/ (дата звернення 11.09.2026).

Зруйнована бібліотека юнацтва, м. Чернігів. URL: https://ua.scanua.com/library/ (дата звернення 11.09.2026).

Розділ 2

Рис. 2.1. Загальна методика дослідження – авторська розробка.

Рис. 2.2. Порівняння завдань на проєктування BIM та HBIM – авторська розробка.

Рис. 2.3. Методи збору та характеристика даних – авторська розробка.

Рис. 2.4. Класи даних HBIM-моделі об'єкта архітектурної спадщини – авторська розробка.

Рис. 2.5. Порівняння рівнів деталізації BIM та HBIM – авторська розробка.

Рис. 2.6. Класифікація рівнів деталізації HBIM – LOG та LOA – авторська розробка.

Рис. 2.7. Класифікація рівнів деталізації HBIM – LOK та LOI – авторська розробка.

Рис. 2.8. Порівняння підходу до рівнів деталізації у міжнародних стандартах – авторська розробка.

Рис. 2.9. Класифікаційна схема і типологічна диференціація рівнів деталізації (авторська схема). 3D-моделі прикладів за типами об'єктів:

Кам'янець-Подільська фортеця (фортифікаційна) – SKEIRON, Sketchfab. URL: https://sketchfab.com/3d-models/eac6ec68b8f94eb087918b79eb8c6dc6 (дата звернення 11.09.2026).

Церква св. Миколая (культова) – SKEIRON, Sketchfab. URL: https://sketchfab.com/3d-models/47865aac5d7f4c72932ded8ba171ea0f (дата звернення 11.09.2026).

Музей мистецтв Прикарпаття, м. Івано-Франківськ (цивільна) – SKEIRON, Sketchfab. URL: https://sketchfab.com/3d-models/fca48428795f4fb59e782ca7f349cb65 (дата звернення 11.09.2026).

Ірпінський міст (інженерна споруда) – Serhii Revenko, Sketchfab. URL: https://sketchfab.com/3d-models/irpen-bridgewar-consequences-b16674e4b1894253ba0389e0307d1ea4 (дата звернення 11.09.2026).

Колишній робітничий гуртожиток, м. Ізюм (промислова) – SKEIRON, Sketchfab. URL: https://sketchfab.com/3d-models/e37ff70c5f3647f680f725fb4810e263 (дата звернення 11.09.2026).

Успенський собор Києво-Печерської лаври (ансамбль) – SKEIRON, Sketchfab. URL: https://sketchfab.com/3d-models/93af92eac5704eb49c234585ecb294ef (дата звернення 11.09.2026).

Рис. 2.10. Порівняння BIM-платформ для об’єктів архітектурної спадщини (авторська схема). Логотипи програмних платформ (офіційні джерела):

Autodesk Revit. URL: https://www.autodesk.com (дата звернення 11.09.2026).

Archicad (Graphisoft). URL: https://graphisoft.com (дата звернення 11.09.2026).

Allplan (Nemetschek). URL: https://www.allplan.com (дата звернення 11.09.2026).

Trimble RealWorks; Trimble Business Center. URL: https://www.trimble.com (дата звернення 11.09.2026).

Bentley OpenBuildings. URL: https://www.bentley.com (дата звернення 11.09.2026).

Rhinoceros + Grasshopper. URL: https://www.rhino3d.com (дата звернення 11.09.2026).

FreeCAD. URL: https://www.freecad.org (дата звернення 11.09.2026).

Bonsai (Blender). URL: https://bonsaibim.org (дата звернення 11.09.2026).

Розділ 3

Рис. 3.1. Класифікація функціональних блоків BIM параметрі – авторська розробка.

Рис. 3.2. Просторова локалізація зони пошкодження за допомогою bounding box (Поштова площа) – авторська розробка.

Рис. 3.3. Матриця пріоритетності та допустимих втручань – авторська розробка.

Рис. 3.4. Реставраційні прийоми і технологічне забезпечення HBIM параметрів – авторська розробка.

Рис. 3.5 Класифікація ступенів деструкції і типів бойового впливу – авторська розробка.

Рис. 3.6. Цифрова фіксація та процес побудови HBIM моделі обєкта архітектурної спадщини (Харківський апеляційний суд) – авторські світлини і розробка.

Рис. 3.7. Bounding box зони пошкодження та HBIM-параметри елементів (Харківський апеляційний суд) – авторська розробка.

Рис. 3.8. Елементи HBIM-моделі з параметрами (Поштова площа) – авторська розробка.

Рис. 3.9. План виконання HBIM проєкту – авторська розробка.

Рис. 3.10. Матриця практичної адаптації BIM-шаблону за шкалою деструкції і доступністю даних – авторська розробка.

Рис. 3.11. Рівні деталізації HBIM-моделі та критерії готовності для різних сценаріїв роботи – авторська розробка.

Рис. 3.12. Простір перетину даних у HBIM-моделі об’єкта архітектурної спадщини – авторська розробка.

Рис. 3.13. Формулювання пропозиції щодо застосування BIM-моделі в подальшій експлуатації об’єктів – авторська розробка.

Рис. 3.14. Цифровий паспорт пам’ятки – алгоритм формування на основі HBIM, перевірки та оновлення – авторська розробка.

Рис. 3.15. Міжнародна інтеграція BIM-моделей для залучення донорських ресурсів (авторська схема). Логотипи організацій (офіційні джерела):

UNESCO World Heritage. URL: https://whc.unesco.org (дата звернення 11.09.2026).

Europeana. URL: https://www.europeana.eu (дата звернення 11.09.2026).

OpenHERITAGE. URL: https://openheritage.eu (дата звернення 11.09.2026).

Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org (дата звернення 11.09.2026).

ICOMOS. URL: https://www.icomos.org (дата звернення 11.09.2026).

Рис. 3.16. Історичний контекст та адаптація школи в с. Макарів – від виявлення до пристосування об’єкта – авторська розробка; фотографії автора.