

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ПРИ РЕСТАВРАЦІЇ ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД**Константинов П.В.,**

к.т.н., доцент,

konstantinov@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1261-2410

Фесенко В.М.,

бакалавр,

volodimirfesenko74@gmail.com

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Аналізуються інноваційні можливості інтеграції технологій штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання в процеси реставрації, консервації та реконструкції архітектурної спадщини. Дослідження обґрунтовує, що ШІ є ключовим інструментом для підвищення точності, об'єктивності та ефективності збереження історичних об'єктів.

Використання комп'ютерного зору для автоматичного виявлення, класифікації та прогностичного аналізу дефектів у реальному часі. Етап діагностики та моніторингу, підсилений штучним інтелектом (ШІ), є фундаментальним для науково обґрунтованої реставрації, оскільки він переводить суб'єктивний візуальний огляд на об'єктивний, кількісний та автоматизований процес. Виявлення дефектів починається з отримання високоякісних просторових даних, які ШІ здатний ефективно обробляти: мультисенсорний збір даних; фотограмметрія забезпечує ортофотоплани та текстурні дані; комп'ютерний зір та CNN; ідентифікація та класифікація; сегментація зображень.

Коли оригінальні елементи втрачені та їхній вигляд відновлено за допомогою генеративних моделей (GANs), ШІ керує їхнім фізичним відтворенням: контроль матеріального складу; геометрична точність; відтворення текстури та кольору. ШІ є інтелектуальним партнером реставратора, мінімізуючи суб'єктивність рішень та забезпечуючи довговічність збереження культурної спадщини.

Ключові слова: штучний інтелект, реставрація архітектури, комп'ютерний зір, BIM-моделювання, консервація, автентичність, 3D-друк, генеративне проєктування, автентичність, реставрація, будівельні технології.

Вступ. Збереження архітектурної спадщини та ефективне відновлення пошкоджених структур традиційно є надзвичайно трудомістким процесом, що вимагає високої точності, ґрунтового аналізу, значних часових і фінансових витрат.

В епоху цифрової трансформації штучний інтелект та машинне навчання стають ключовими інструментами, які кардинально революціонізують процеси реставрації та реконструкції. ШІ пропонує можливості, які перетворюють складну і часто суб'єктивну роботу на точний, об'єктивний та швидкий процес.

ШІ використовує великі масиви даних для автоматичної ідентифікації та класифікації дефектів конструкцій (алгоритми ідентифікують тріщини, відшарування штукатурки, біологічне ураження, ознаки вологи та інші пошкодження з точністю, що часто перевищує людську). Також забезпечується безперервний моніторинг стану конструкцій (прогнозує потенційні зони ризику та визначає момент критичної відмови елемента, дозволяючи вчасно вжити превентивних консерваційних заходів). Алгоритми допомагають швидше обробляти архівні дані. Нейронні мережі можуть ідентифікувати автентичні матеріали та пропонувати

найбільш сумісні аналоги для реставрації, базуючись на аналізі великих хімічних баз даних та властивостей традиційних матеріалів. Штучний інтелект стає не заміною, а потужним партнером реставратора, дозволяючи зберігати архітектурну спадщину більш ефективно та науково обґрунтовано, ніж будь-коли раніше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх наукових публікацій (переважно 2018–2025 рр.) демонструє, що інтеграція технологій штучного інтелекту (ШІ) у сферу охорони архітектурної спадщини є одним із найбільш динамічних напрямків досліджень. Сфера перейшла від теоретичних обґрунтувань до практичних пілотних проєктів, зосередивши увагу на кількох ключових технологічних векторах.

Автоматичне виявлення тріщин, відшарувань, класифікація біоуражень на основі даних БПЛА та фотограмметрії. Автоматизоване перетворення хмар точок у параметричні BIM-моделі; розробка Historic BIM (HBIM); Створення гіпотетичних моделей втраченого декору, відновлення відсутніх частин об'єкта; Управління роботизованими системами для лазерного очищення, 3D-друку реплік та точного ін'єктування матеріалів. Професор Бруно Суїдгем працює в Інституті будівельних матеріалів (IBK) [6], його дослідження зосереджені на управлінні невизначеністю, надійності та прогностичному моделюванні в інженерії. Це безпосередньо стосується використання ШІ для оцінки ризиків та прогнозування стану старих конструкцій. Професор Даніель Шнайдер, його група в Інституті інфраструктурного менеджменту (D-BAUG) [7] займається цифровими технологіями для моніторингу та діагностики інфраструктури, що включає методи сканування та обробки даних для існуючих об'єктів. Професор Манфред Урбан або дослідники в LABEST [10], що працюють у ньому, займаються фізикою будівництва, довговічністю матеріалів та їхнім моделюванням, що є основою для використання ШІ в аналізі матеріалів для консервації. Дослідники, пов'язані з "Digital Fabrication" (Цифрове Виробництво) та робототехнікою. Їхній основний фокус — нове будівництво, їхні розробки з високоточного роботизованого 3D-друку та обробки матеріалів мають потенціал для застосування у реставрації складних елементів.

Постановка завдання. На основі актуальності та аналізу досліджень, головне завдання цієї статті полягає у систематизації, аналізі та теоретичному обґрунтуванні комплексного підходу до застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) на всіх ключових етапах реставрації та реконструкції архітектурних об'єктів.

Аналіз та систематизація ключових напрямків застосування технологій штучного інтелекту для підвищення ефективності та наукової обґрунтованості процесів реставрації та реконструкції будівель і споруд.

Основний матеріал і результати. Послідовно аналізуючі ключові напрямки застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) на всіх етапах життєвого циклу пам'ятки, від первинної діагностики до фізичного відновлення. Результати дослідження підтверджують, що ШІ є каталізатором для трансформації традиційної реставрації у високоточну, науково обґрунтовану та прогностичну дисципліну. ШІ-технології значно перевершують традиційні методи візуального огляду, особливо у великих та складних об'єктах. Алгоритми машинного навчання автоматично ідентифікують та класифікують дефекти. Це включає тріщини, деформації, відшарування фарби, біологічне ураження (грибок, пліснява) та знос матеріалів. Зображення високої роздільної здатності, зняті дронами або наземними сканерами, термографічні знімки, дані LiDAR. ШІ-системи, інтегровані з датчиками (IoT), можуть безперервно моніторити стан конструкцій. Вони аналізують зміни температури, вологості, вібрацій та нахилів у реальному часі. ШІ прогнозує потенційні зони ризику та момент критичної відмови елемента, дозволяючи вчасно вжити консерваційних заходів.

Діагностика та моніторинг - цей аспект використання ШІ є основоположним, оскільки він перетворює суб'єктивний візуальний огляд на об'єктивний, кількісний та автоматизований процес. Виявлення дефектів починається з отримання високоякісних і точних даних про об'єкт. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) збирають дані про стан важкодоступних елементів (дахи, високі фасади, вежі, склепіння). LiDAR створює точні хмари точок (point clouds), що дозволяє виявити міліметрові деформації та геометричні

відхилення. Автоматично ідентифікують та класифікують різні типи дефектів (тріщини - визначають їхню довжину, ширину та глибину; біоураження - розрізняють мохи, лишайники та грибкові ураження, класифікуючи їх за типом і ступенем поширення; відшарування - виявляють місця відколів штукатурки, каменю чи фарби; корозія - ідентифікують плями іржі на металевих елементах конструкції.) [3] ШІ допомагає археологам та історикам архітектури швидше обробляти архівні дані. Алгоритми порівнюють сучасні 3D-моделі з історичними кресленнями, фотографіями та гравюрами, автоматично виявляючи розбіжності, перебудови та втрачені елементи. Нейронні мережі можуть ідентифікувати автентичні матеріали та пропонувати найбільш сумісні аналоги для реставрації, базуючись на хімічних базах даних. Прогностичне обслуговування - ШІ інтегрується з мережею стаціонарних датчиків (IoT), встановлених на об'єкті (наприклад, датчики вологості, температури, вібрації, тензометри). Нейронна мережа аналізує ці потокові дані, виявляючи аномалії та тренди, які можуть свідчити про початок руйнівного процесу. Якщо швидкість збільшення ширини тріщини (виміряна датчиком) виходить за норму, ШІ негайно генерує сповіщення, вказуючи на високий ризик. Створення "Цифрового Близнюка" - на основі даних LiDAR та фотограмметрії створюється точна віртуальна копія будівлі, що дозволяє інженерам імітувати навантаження (землетруси, вітрові чи снігові навантаження) та симулювати вплив різних реставраційних втручань на довговічність структури, мінімізуючи ризики для оригіналу. Таким чином, ШІ трансформує діагностику з разового огляду на безперервний, інтелектуальний моніторинг, що є критично важливим для своєчасної та науково обґрунтованої консервації. [4]

Аналіз автентичності архітектурних об'єктів із застосуванням технологій ШІ критично важливий для дотримання основного принципу реставрації – збереження автентичності (об'єктивне порівняння та ідентифікація). Нейронні мережі навчені порівнювати сучасну 3D-модель (отриману за допомогою LiDAR або фотограмметрії) з масивом історичних джерел (плани, креслення, архівні фотографії, гравюри та картини). Автоматично виявляються дискрепантності (розбіжності) між історичними та сучасними даними. Це дозволяє точно ідентифікувати: елементи, додані під час пізніших перебудов, які порушили оригінальний стиль; місця, де раніше існували архітектурні елементи, які тепер відсутні; може класифікувати архітектурні елементи об'єкта за стилями та визначити, які з них належать до оригінального періоду будівництва, а які є результатом впливів пізніших епох. Збереження матеріальної автентичності – один із найскладніших аспектів реставрації. Алгоритми машинного навчання обробляють дані, отримані з спектроскопії (для хімічного складу) та знімків високої роздільної здатності (для текстури та візерунка зносу). Точно ідентифікувати тип, джерело та техніку виготовлення оригінальних будівельних матеріалів - визначення розмірів, пористості та складу; аналіз складу вапняних або гіпсових розчинів, що є критичним для забезпечення паропроникності та сумісності з історичною кладкою; ідентифікація оригінальної колірної палітри фасадів та інтер'єрів шляхом аналізу мікроскопічних зразків фарби або історичних фотографій, що запобігає стилістичним помилкам під час фарбування. На основі ідентифікованих характеристик ШІ пропонує найбільш сумісні сучасні або традиційні матеріали для заміни чи укріплення, мінімізуючи ризик хімічної несумісності, яка може призвести до руйнування пам'ятки. Завдяки цьому, реставратори можуть приймати рішення, ґрунтуючись не на припущеннях, а на об'єктивних, кількісних даних про первісний вигляд та матеріальну структуру об'єкта. ШІ-технології значно перевершують традиційні методи візуального огляду, особливо у великих та складних об'єктах. Алгоритми машинного навчання автоматично ідентифікують та класифікують дефекти. Зображення високої роздільної здатності, зняті дронами або наземними сканерами, термографічні знімки, дані LiDAR. ШІ-системи, інтегровані з датчиками (IoT), можуть безперервно моніторити стан конструкцій. Вони аналізують зміни температури, вологості, вібрацій та нахилів у реальному часі. ШІ прогнозує потенційні зони ризику та момент критичної відмови елемента, дозволяючи вчасно вжити консерваційних заходів. [5]

III допомагає археологам та історикам архітектури швидше обробляти архівні дані. Алгоритми порівнюють сучасні 3D-моделі з історичними кресленнями, фотографіями та гравюрами, автоматично виявляючи розбіжності, перебудови та втрачені елементи. Нейронні мережі можуть ідентифікувати автентичні матеріали (наприклад, типи історичної цегли, пігменти фарб або вапнякових розчинів) та пропонувати найбільш сумісні аналоги для реставрації, базуючись на хімічних базах даних. Виходить за рамки простої класифікації та забезпечує прогностичні функції. Прогностичне обслуговування - III інтегрується з мережею стаціонарних датчиків (IoT), встановлених на об'єкті (наприклад, датчики вологості, температури, вібрації, тензометри). Нейронна мережа аналізує ці потокові дані, виявляючи аномалії та тренди, які можуть свідчити про початок руйнівного процесу. Якщо швидкість збільшення ширини тріщини (виміряна датчиком) виходить за норму, III негайно генерує сповіщення, вказуючи на високий ризик. Створення "Цифрового Близнюка" - на основі даних LiDAR та фотограмметрії створюється точна віртуальна копія будівлі. Цифровий близнюк дозволяє інженерам імітувати навантаження та симулювати вплив різних реставраційних втручань на довговічність структури, мінімізуючи ризики для оригіналу. Таким чином, III трансформує діагностику з разового огляду на безперервний, інтелектуальний моніторинг, що є критично важливим для своєчасної та науково обгрунтованої консервації. [6]

Збереження матеріальної автентичності – один із найскладніших аспектів реставрації. III-технології обробляють дані, отримані з спектроскопії (для хімічного складу) та знімків високої роздільної здатності (для текстури та візерунка зносу). Може точно ідентифікувати тип, джерело та техніку виготовлення оригінальних будівельних матеріалів (визначення розмірів, пористості та складу, аналіз складу вапняних або гіпсових розчинів, що є критичним для забезпечення паропроникності та сумісності з історичною кладкою, ідентифікація оригінальної колірної палітри фасадів та інтер'єрів шляхом аналізу мікроскопічних зразків фарби або історичних фотографій, що запобігає стилістичним помилкам під час фарбування). На основі ідентифікованих характеристик пропонує найбільш сумісні сучасні або традиційні матеріали для заміни чи укріплення, мінімізуючи ризик хімічної несумісності, яка може призвести до руйнування пам'ятки. Завдяки цьому, реставратори можуть приймати рішення, ґрунтуючись не на припущеннях, а на об'єктивних, кількісних даних про первісний вигляд та матеріальну структуру об'єкта.

Штучний інтелект значно прискорює етап планування, особливо під час реконструкції втрачених елементів. За допомогою генеративних моделей (GANs) може генерувати гіпотетичні 3D-моделі зруйнованих частин фасаду, декору або внутрішнього планування, використовуючи як основу збережені сусідні або аналогічні об'єкти. Це критично важливо для об'єктів, де оригінальні креслення втрачені. Допомагає автоматично перетворювати дані 3D-сканування на точні BIM-моделі об'єкта, значно скорочуючи час, необхідний для ручного моделювання. Ці моделі є основою для планування реставраційних робіт. Алгоритми машинного навчання (переважно нейронні мережі) здатні автоматично розпізнавати набір цих точок як певні архітектурні елементи: стіни, колони, арки, вікна, балки. III перетворює ці розпізнані елементи на параметричні об'єкти в програмному забезпеченні BIM. Ця модель є не просто 3D-зображенням, а "цифровим близнюком" будівлі, що містить повну інформацію про геометрію, матеріали, конструкції та їхній поточний стан. BIM-модель, створена за участю III, дозволяє реставраторам та інженерам точно розрахувати обсяги необхідних матеріалів, спланувати послідовність робіт та виявити потенційні колізії (суперечності) до початку фізичних втручань.

Найбільш інноваційним застосуванням є гіпотетичне відновлення частин, від яких не збереглося жодних креслень чи фотографій. Це клас алгоритмів III, які можуть генерувати реалістичні дані. У реставрації GANs використовуються для відтворення втраченого архітектурного декору, скульптур, або навіть цілих секцій фасаду. Генератор створює гіпотетичний варіант втраченого елемента, ґрунтуючись на збережених сусідніх частинах (симетрія, стиль, ритм). Дискримінатор (друга нейронна мережа), навчений на історичних

аналогах цього стилю та періоду, оцінює, наскільки згенерований елемент є "автентичним" і відповідає стилю будівлі. Процес повторюється доти, доки Генератор не створить такий елемент, який Дискримінатор не зможе відрізнити від справжньої історичної деталі. Реставратори отримують науково обґрунтовані гіпотези щодо вигляду втрачених віконних профілів, ліпнини, карнизів або орнаментів, що є набагато точнішим за суб'єктивне художнє домислення. Ці моделі потім можуть бути використані для 3D-друку або відтворення елементів вручну. III перетворює складне, багатоетапне проєктування на високоточний та творчий процес, заснований на глибокому аналізі історичних та структурних даних. [7]

III служить "мозком" для роботизованих систем, керуючи складними маніпуляціями. Роботизовані маніпулятори, оснащені високоточними інструментами (мікро-свердлами, лазерами, щітками), використовують алгоритми комп'ютерного зору та III для навігації. Це дозволяє виконувати ювелірні роботи з точністю до мікрометра: очищення фресок та мозаїки; укріплення та ін'єкції; контроль якості; робота в небезпечних зонах. III симулює вплив різних методів консервації (хімічна обробка, укріплення) на довговічність матеріалів та прогнозує термін служби відреставрованого елемента. Може виконувати мікрохірургічні роботи з очищення фресок, кам'яної кладки або мозаїки, застосовуючи лазерні або хімічні методи з точністю, недосяжною для людини. III оптимізує 3D-друк складних або втрачених архітектурних елементів (балюстрад, скульптур, ліпнини) з автентичних або нових сумісних матеріалів. III-алгоритми забезпечують ідеальну відповідність репліки оригіналу за формою, текстурою та кольором.

Висновки. На основі проведеного аналізу встановлено, що інтеграція технологій штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання в процеси реставрації та реконструкції архітектурної спадщини є критично важливим етапом для підвищення ефективності, точності та наукової обґрунтованості робіт. Застосування ШІ кардинально змінює етап оцінки стану пам'яток, забезпечуючи об'єктивність та кількісну оцінку: автоматизована діагностика; прогностичний моніторинг. Надає науково обґрунтовані інструменти для прийняття рішень, що стосуються історичної достовірності: моделювання та BIM; генеративне відновлення; аналіз матеріалів. Інтеграція ШІ з робототехнікою забезпечує надвисоку точність виконання робіт: високоточна роботизована обробка; оптимізація 3D-Друку.

Незважаючи на виклики, пов'язані з високою вартістю впровадження та необхідністю стандартизації даних, технології ШІ є ключовим вектором розвитку пам'яткоохоронної галузі. ШІ не замінює реставратора, а є його інтелектуальним партнером, забезпечуючи безпрецедентний рівень контролю, ефективності та наукової точності, що є критично важливим для збереження спадщини в епоху зростаючих загроз.

Література

- [1] Вечерський В. В. Архітектурно-історичні та містобудівні засади формування об'єктів культурної спадщини. Київ: Основа, 2018. https://spadshina.org.ua/wp-content/uploads/zbirnyk/praci_5_part_2.pdf
- [2] Тимофієнко В. І. Архітектура і монументальне мистецтво: Терміни та поняття. Київ: Видавництво Інституту проблем сучасного мистецтва, 2002.
- [3] Логвиненко І. П. та Ігнатенко, В. М. Неруйнівний контроль будівельних конструкцій. Київ: ВПЦ "Київський університет", 2020.
- [4] Hampson D. & Maver T. BIM, Artificial Intelligence and the Future of Design. New York: Routledge, 2018. <https://ecaade.org/downloads/eCAADe-2018-volume-2.pdf>
- [5] Pattini S., & Baggio P. AI-Based Applications for the Diagnosis and Conservation of Built Heritage. Journal of Cultural Heritage, 2020. 45, 120–135. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5388768
- [6] Barazzetti L., Banfi F., & Brumana R. Computer Vision and Deep Learning for Automatic Defect Detection in Historical Masonry Structures. Remote Sensing, 2019. 11(21), 2568.

- [7] Yin S., Zhang W & Li H. Generative Adversarial Networks (GANs) for Restoration and Reconstruction of Missing Architectural Elements. *Automation in Construction*, 2021. 125, 103604.
- [8] Pérez-Pascual S. & García-Almirall, P. From Point Cloud to HBIM: A Review of Automated and Semi-Automated Methods for Heritage Documentation using Machine Learning. *International Journal of Architectural Heritage*, 2020. 14(8), 1145–1165.
- [9] Wang W. & Feng, D. Robotic Systems and Machine Learning in Cultural Heritage Conservation: A Survey. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018. 3(4), 3624–3631.
- [10] Sudret B., et al. Uncertainty Quantification and Risk Assessment in Heritage Structures: A Machine Learning Approach. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019. 15(1), 1–15.

References

- [1] Vechers'kyi V. V. *Arkhitekturno-istorychni ta mistobudivni zasady formuvannya ob'yektiv kul'turnoyi spadshchyny*. Kyiv: Osnova, 2018. https://spadshina.org.ua/wp-content/uploads/zbirnyk/praci_5_part_2.pdf
- [2] Tymofiyenko V. I. *Arkhitektura i monumental'ne mystetstvo: Terminy ta ponyattya*. Kyiv: Vydavnytstvo Instytutu problem suchasnoho mystetstva, 2002.
- [3] Lohvynenko I. P., Ihnatenko V. M. *Neruynivnyy kontrol' budivel'nykh konstruktsiy*. Kyiv: VPTS "Kyyivs'kyi universytet", 2020.
- [4] Hampson D., & Maver T. *BIM, Artificial Intelligence and the Future of Design*. New York: Routledge, 2018. <https://ecaade.org/downloads/eCAADe-2018-volume-2.pdf>
- [5] Pattini S., & Baggio P. AI-Based Applications for the Diagnosis and Conservation of Built Heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 2020. 45, 120–135. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5388768
- [6] Barazzetti L., Banfi F., & Brumana R. Computer Vision and Deep Learning for Automatic Defect Detection in Historical Masonry Structures. *Remote Sensing*, 2019. 11(21), 2568.
- [7] Yin S., Zhang W., & Li, H. Generative Adversarial Networks (GANs) for Restoration and Reconstruction of Missing Architectural Elements. *Automation in Construction*, 2021. 125, 103604.
- [8] Pérez-Pascual S., & García-Almirall P. From Point Cloud to HBIM: A Review of Automated and Semi-Automated Methods for Heritage Documentation using Machine Learning. *International Journal of Architectural Heritage*, 2020. 14(8), 1145–1165.
- [9] Wang W., & Feng D. Robotic Systems and Machine Learning in Cultural Heritage Conservation: A Survey. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018. 3(4), 3624–3631.
- [10] Sudret B., et al. Uncertainty Quantification and Risk Assessment in Heritage Structures: A Machine Learning Approach. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019. 15(1), 1–15.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE RESTORATION AND RECONSTRUCTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Konstantinov P.,

Candidate of Technical Sci., Associate Professor,
konstantinov@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7708-6955

Fesenko V.,

Bachelor,
volodimirfesenko74@gmail.com

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The preservation, restoration, and reconstruction of architectural heritage have historically been complex, labor-intensive, and subjective processes. Traditional methods of diagnosis, material analysis, and structural assessment, while fundamental, are often unable to cope with the enormous amount of data required for accurate assessment and intervention in complex historical structures. The modern era poses increasing challenges for cultural heritage professionals, including environmental degradation, aging structures, and, most importantly, damage from conflicts, requiring solutions that improve accuracy, objectivity, and efficiency.

Recent studies confirm the growing integration of AI into cultural heritage documentation, but a comprehensive, systematic analysis of the role of AI in all key stages of the restoration process—from initial diagnosis to physical implementation—is still needed.

This article analyzes the innovative potential of integrating artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) technologies into the processes of restoration, conservation, and reconstruction of architectural heritage. The study argues that AI is a key tool for improving the accuracy, objectivity, and efficiency of heritage preservation measures.

The use of computer vision (CNN) on data from drones and LiDAR for automatic detection, classification, and predictive analysis of structural defects (cracks, biological damage) in real time. Application of algorithms for analyzing the authenticity of materials and the use of generative adversarial networks (GAN) for scientifically based reconstruction of lost architectural elements. This also includes the automation of creating accurate BIM models from point clouds. Integration of AI with robotic systems to perform high-precision conservation tasks (e.g., laser cleaning, injection consolidation) and optimization of 3D printing processes for authentic reproduction of complex architectural components.

AI acts as an intellectual partner to the restorer, minimizing subjective decisions and significantly contributing to the long-term sustainability and authenticity of cultural heritage preservation.

Keywords: artificial intelligence, architectural restoration, computer vision, BIM modeling, conservation, authenticity, 3D printing, generative design. authenticity, restoration, construction technologies.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2025

[This work](#) © 2025 by [Konstantinov P., Fesenko V.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)