

МИСТЕЦТВОЗНАВСТВО

УДК 069:004.9:621.865.8:502.51

DOI <https://doi.org/10.24919/2308-4863/79-2-5>

Віра МИКОЛАЙЧУК,

orcid.org/0000-0002-2532-5771

докторка філософії,

асистентка кафедри мережесих та Інтернет технологій

Київського національного університету імені Тараса Шевченка

(Київ, Україна) *viramykolaichuk@knu.ua*

Антоніна МИКОЛАЙЧУК,

orcid.org/0000-0002-3536-7262

докторка філософії,

доцентка кафедри мистецтвознавчої експертизи

Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв

(Київ, Україна) *a.mykolaichuk@dakkkim.edu.ua*

Ірина МАРЧЕНКО,

orcid.org/0009-0009-9365-8090

кандидат історичних наук,

доцентка кафедри мистецтвознавчої експертизи

Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв

(Київ, Україна) *imarchenko@dakkkim.edu.ua*

ІНТЕГРАТИВНИЙ ПІДХІД ДО МУЗЕЙНОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ ТА РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ЯК ІНСТРУМЕНТИ ПРЕВЕНТИВНОЇ КОНСЕРВАЦІЇ

Стаття досліджує інтеграцію Інтернету речей (IoT) та роботизованих систем для забезпечення ефективного моніторингу та збереження об'єктів культурної спадщини. В умовах постійно змінюваних факторів навколишнього середовища, які можуть негативно впливати на стан артефактів, поєднання цих передових технологій дозволяє створювати автоматизовані системи контролю, що здатні забезпечити своєчасне виявлення загроз та адаптивне реагування на них. IoT-системи забезпечують безперервний збір даних про мікрокліматичні умови, такі як температура, вологість, освітленість і вібрація, що дозволяє контролювати умови збереження артефактів у режимі реального часу та підтримувати оптимальні умови. Роботизовані системи моніторингу, використовуючи методи навчання з підкріпленням, можуть динамічно адаптувати свої дії відповідно до змін у середовищі, підвищуючи загальну ефективність процесу моніторингу.

Методологія дослідження включає використання алгоритму для оптимізації дій роботизованих систем на основі зібраних за допомогою IoT даних. Інтегрована система забезпечує підвищену точність виявлення потенційних загроз, автоматизацію процесів моніторингу та значно знижує ризики людських помилок. Особлива увага приділяється етичним та технічним викликам, пов'язаним з інтеграцією IoT та роботизованих систем, зокрема питанням безпеки даних та необхідності подальшого вдосконалення алгоритмів машинного навчання. Стаття також висвітлює перспективи застосування таких технологій для покращення процесів збереження культурних об'єктів не лише у музейних середовищах, але й у ширших галузях охорони культурної спадщини.

Інтеграція таких систем, як IoT і роботизовані технології з використанням методів навчання з підкріпленням, дозволяє забезпечити більш ефективний контроль за станом пам'яток мистецтва і швидше та більш ефективно реагувати на можливі зміни умов. У результаті загальна ефективність превентивної консервації значно покращується, що відкриває нові можливості для розвитку та застосування сучасних технологій збереження культурної спадщини.

Ключові слова: превентивна консервація, моніторинг мікроклімату, культурна спадщина, Інтернет речей (IoT), роботизовані системи, навчання з підкріпленням.

Vira MYKOLAICHUK,
orcid.org/0000-0002-2532-5771

PhD,
Lecturer at the Department of Network and Internet Technologies
Taras Shevchenko National University of Kyiv
(Kyiv, Ukraine) viramykolaichuk@knu.ua

Antonina MYKOLAICHUK,
orcid.org/0000-0002-3536-7262

PhD,
Associate Professor at the Department of Art Studies
National Academy of Culture and Arts Management
(Kyiv, Ukraine) a.mykolaichuk@dakkim.edu.ua

Iryna MARCHENKO,
orcid.org/0009-0009-9365-8090

Candidate of Historical Sciences,
Associate Professor at the Department of Art Studies
National Academy of Culture and Arts Management
(Kyiv, Ukraine) imarchenko@dakkim.edu.ua

INTEGRATIVE APPROACH TO MUSEUM PRESERVATION: INTERNET OF THINGS AND ROBOTIC SYSTEMS AS TOOLS FOR PREVENTIVE CONSERVATION

The article explores the integration of the Internet of Things (IoT) and robotic systems to ensure effective monitoring and preservation of cultural heritage objects. In the context of constantly changing environmental factors, which can negatively affect the condition of artifacts, the combination of these advanced technologies allows for the creation of automated control systems capable of ensuring timely threat detection and adaptive responses. IoT systems provide continuous data collection on microclimatic conditions such as temperature, humidity, lighting, and vibration, allowing for real-time monitoring and the maintenance of optimal preservation conditions for artifacts. Robotic monitoring systems, using reinforcement learning methods, can dynamically adapt their actions according to environmental changes, enhancing the overall efficiency of the monitoring process.

The research methodology includes the use of an algorithm to optimize the actions of robotic systems based on data collected through IoT. The integrated system improves the accuracy of threat detection, automates monitoring processes, and significantly reduces the risk of human error. Special attention is given to the ethical and technical challenges associated with the integration of IoT and robotic systems, particularly in regard to data security and the need for further refinement of machine learning algorithms. The article also highlights the potential application of such technologies to improve preservation processes not only in museum environments but also in broader areas of cultural heritage preservation.

The integration of systems like IoT and robotic technologies using reinforcement learning methods allows for more effective control over the condition of cultural artifacts and enables faster and more efficient responses to potential changes in environmental conditions. As a result, the overall effectiveness of preventive conservation is greatly improved, opening up new opportunities for the development and application of modern cultural heritage preservation technologies.

Key words: preventive conservation, microclimate monitoring, cultural heritage, Internet of Things (IoT), robotic systems, reinforcement learning.

Постановка проблеми. Сучасні інформаційні технології відіграють дедалі важливішу роль у різних сферах людської діяльності, включаючи превентивну консервацію культурної спадщини (Антонова & Гололобов, 2023) та забезпечення безпеки. Однією з провідних технологій, що активно використовується в обох сферах, є Інтернет речей (IoT), який дозволяє здійснювати безперервний моніторинг та управління станом об'єктів за допомогою мережі сенсорів. Це стає надзвичайно важливим у контексті швидких змін у навколишньому

середовищі та умовах, що можуть спричиняти пошкодження культурних об'єктів або загрожувати їхньому збереженню.

Паралельно з цим, у сфері безпеки активно розвиваються роботизовані системи моніторингу, здатні ефективно взаємодіяти з інтелектуальними динамічними об'єктами, що демонструють непередбачувану поведінку. Ці системи, що використовують методи навчання з підкріпленням, дозволяють здійснювати автономний контроль та оперативно реагувати на змінювані умови.

Аналіз сучасних досліджень показує, що превентивна консервація є ключовим підходом до збереження культурної спадщини (Preventive, 2022; Тимченко & А. Миколайчук, 2024) та все частіше ґрунтується на використанні IoT для постійного моніторингу стану культурних об'єктів (Lerario, 2020; Lerario & Varasano, 2020; Nisiotis et al., 2020; Pretelli et al., 2023). Технології IoT дозволяють автоматизувати процеси контролю за мікрокліматом, вібраціями, забрудненням повітря та іншими факторами, що впливають на стан культурних цінностей (Pretelli et al., 2023; Perles et al., 2024). На сайті Інституту сталого спадку UCL Університетського коледжу Лондона представлені цифрові інструменти для превентивної консервації, зокрема IMPACT 2.0 (UCL, 2024), який допомагає оцінювати концентрацію забруднювачів у приміщеннях. Також корисними є розробки для аналізу температури та вологості (психрометрична діаграма) та моделі для дослідження залежності депозиції пилу від розміру частинок та руху повітря в кімнаті, що дозволяє оцінити покриття площі та час до досягнення неприпустимих рівнів (UCL, 2024).

Практичні приклади використання таких систем у музеях, таких як Лувр (TrZE, 2021) або Музей історії мистецтв у Відні, демонструють ефективність IoT для підтримки стабільних умов зберігання артефактів. Однак, ці системи переважно використовуються для моніторингу мікроклімату, і їхній потенціал для інтеграції з роботизованими системами для більш складних завдань ще не повністю досліджений.

Роботизовані системи, зокрема ті, що працюють із методами навчання з підкріпленням, відіграють ключову роль у моніторингу динамічних об'єктів та забезпеченні швидкої реакції на зміни середовища. Дослідження (Pang et al., 2017; Pretelli et al., 2023) показують, що ці технології можуть значно підвищити ефективність спостереження за об'єктами, що змінюють своє розташування або ухиляються від виявлення. Такі системи, як роботизовані засоби моніторингу, особливо корисні в умовах, де потрібна швидка реакція на змінювані умови, як це спостерігається у військових або природоохоронних зонах.

Незважаючи на значний потенціал інтеграції IoT та роботизованих систем, наявні дослідження часто розглядають ці технології окремо (Яцко & Миколайчук, 2023; Nisiotis et al., 2020). Основними викликами, які постають перед науковцями, є технічна складність інтеграції (Pretelli et al., 2023), зокрема з урахуванням безпеки даних і захисту приватності, а також необхідність адап-

тації різних алгоритмів для ефективної роботи у комплексних системах (Perles et al., 2024).

Зважаючи на це, необхідність подальших досліджень є очевидною. Особливу увагу слід приділити розробці нових алгоритмів, що використовують методи навчання з підкріпленням, для адаптації систем до динамічних умов. Використання таких алгоритмів дозволить інтегрованим системам не лише швидко реагувати на зміни, але й прогнозувати загрози за допомогою штучного інтелекту, що зробить ці технології надзвичайно корисними для превентивної консервації.

Мета цієї статті – об'єднати дві згадані технології та дослідити можливості інтеграції IoT-систем із роботизованими засобами моніторингу для забезпечення ефективної превентивної консервації культурних об'єктів та управління динамічними загрозами. Такий підхід сприяє не лише своєчасному виявленню проблем, а й їхньому попередженню за допомогою сучасних технологій штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження можливостей інтеграції IoT і роботизованих систем моніторингу інтелектуальних динамічних об'єктів з метою превентивної консервації культурних пам'яток у музейному середовищі, було розроблено багатоступеневу методологію, що включає кілька основних етапів:

Перший етап – вибір і налаштування IoT-систем. IoT-системи використовуються для безперервного моніторингу мікрокліматичних умов і фізичних характеристик культурних об'єктів. Вибір технологічних рішень ґрунтувався на аналізі успішних проєктів із використання IoT у музеях та архівах. Були обрані системи, здатні здійснювати постійний моніторинг температури, вологості, рівня забруднення повітря і вібрацій, що є ключовими факторами для збереження об'єктів культурної спадщини.

Для кожного типу об'єктів були встановлені оптимальні параметри моніторингу, і розгорнута мережа сенсорів, яка передає дані в реальному часі на центральний сервер для подальшого аналізу. Зокрема, використовувалися технології хмарних обчислень для обробки та зберігання великих обсягів даних, зібраних IoT-сенсорами (Chaves et al., 2024), що дозволило здійснювати автоматичний контроль параметрів середовища та оперативно реагувати на відхилення.

Другий етап – інтеграція роботизованих систем з методами навчання з підкріпленням. Роботизовані системи моніторингу, що використовують методи навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning – далі RL), були інтегровані в систему

для управління інтелектуальними динамічними об'єктами. Методи RL дозволяють роботизованим засобам навчатися на основі взаємодії з середовищем та об'єктами, адаптувати свою поведінку в реальному часі та приймати рішення щодо оптимальних дій.

Основним етапом було створення моделі роботизованих систем, яка включає такі компоненти: 1) стан середовища (S): дані про поточний стан об'єктів, зібрані за допомогою IoT-сенсорів; 2) дії (A): можливі дії роботизованої системи в залежності від стану середовища; 3) політика (π): стратегія вибору дій роботизованою системою на основі поточних умов; 4) функція винагороди (R): оцінка результатів дій для досягнення цілей, таких як наближення до об'єкта або запобігання його пошкодженню.

Третій етап – експериментальна модель моніторингу. Для перевірки інтеграції IoT та роботизованих систем, була розроблена експериментальна модель, яка включає декілька сценаріїв моніторингу культурних об'єктів у складних умовах. Модель передбачає безперервне збирання даних про стан об'єктів і середовища та одночасну реакцію роботизованих систем на змінювані умови. Ця модель дозволяє роботу навчатися на основі зворотного зв'язку і постійно оптимізувати свою стратегію моніторингу об'єктів.

Реалізація цих сценаріїв передбачала симуляцію ситуацій, коли об'єкти знаходяться під загрозою пошкодження через зовнішні впливи, та інтерактивні дії роботизованих систем для їх збереження. Основна увага приділялася інтеграції даних із сенсорів IoT і алгоритмів RL для підвищення ефективності моніторингу.

Четвертий етап – оцінка ефективності. Після реалізації моделі проводилася оцінка ефективності запропонованої системи на основі таких критеріїв, як точність прогнозування змін у стані об'єктів, швидкість реакції роботизованих систем на зміни, рівень збереження об'єктів у порівнянні з традиційними методами моніторингу, економічна ефективність та зниження витрат на утримання системи.

Таким чином, запропонована методологія дозволяє комплексно підходити до моніторингу культурної спадщини та динамічних об'єктів, використовуючи новітні технології IoT та роботизованих систем.

Результати дослідження свідчать про високий потенціал інтеграції IoT-систем і роботизованих технологій для поліпшення якості превентивної консервації та моніторингу, спрямованих на збереження культурних об'єктів і управління дина-

мічними інтелектуальними загрозами. Система безперервного моніторингу, заснована на IoT-сенсорах, налаштована на високу точність у виявленні змін мікрокліматичних умов. Зокрема, сенсори спрямовані забезпечити точне відстеження таких параметрів, як температура, вологість, освітленість і вібрації. Оперативність реагування системи здатна виявляти відхилення від встановлених параметрів у реальному часі та передавати дані на центральний хмарний сервер для подальшого аналізу. Завдяки використанню IoT-систем є можливість забезпечити стабільні умови зберігання об'єктів, що суттєво знижує ризики їх пошкодження через раптові зміни мікроклімату.

Роботизовані системи, що використовують методи навчання з підкріпленням, продемонстрували високу адаптивність до змін у середовищі та здатність ефективно взаємодіяти з інтелектуальними динамічними об'єктами. Роботизовані засоби моніторингу змогли адаптувати свої стратегії дій у відповідь на зміну поведінки динамічних об'єктів, які ухилялися від виявлення. Використання методів навчання з підкріпленням дозволило системам самонавчатися та поліпшувати свої дії в реальному часі, що також сприяло підвищенню ефективності прогнозування. Роботизовані системи змогли ефективно прогнозувати майбутні зміни поведінки об'єктів, що дало змогу знизити ризик невиявлення загроз.

Інтеграція IoT-систем з роботизованими засобами є надзвичайно ефективною для вирішення завдань превентивної консервації та моніторингу. Об'єднання IoT та роботизованих систем дозволяє здійснювати повністю автоматизований контроль за станом об'єктів, зменшуючи потребу в людському втручанні. Завдяки одночасному використанню сенсорів IoT і роботизованих систем забезпечується висока швидкість і точність реагування на потенційні загрози, що значно покращило якість реагування. Хоча впровадження таких систем потребує значних початкових інвестицій, довгострокова експлуатація IoT і роботизованих систем дозволяє суттєво знизити витрати на ручний моніторинг і ремонт пошкоджених об'єктів, що робить їх економічно ефективними рішеннями для збереження культурної спадщини.

Таким чином, результати дослідження показують, що інтеграція IoT та роботизованих систем є перспективним напрямком для превентивної консервації культурних об'єктів і моніторингу динамічних загроз. Вона забезпечує високу ефективність, точність та економічну доцільність, що може значно покращити процеси збереження та управління культурною спадщиною.

Обговорення. Результати проведених досліджень демонструють значний потенціал інтеграції IoT та роботизованих систем для забезпечення ефективного моніторингу і збереження культурної спадщини, а також управління інтелектуальними динамічними об'єктами. Водночас існує ряд важливих аспектів, які варто обговорити для подальшого вдосконалення системи.

Однією з головних переваг є автоматизація процесу моніторингу, що зменшує потребу в людських ресурсах і значно підвищує швидкість реагування на можливі загрози. IoT-сенсори дозволяють здійснювати безперервний контроль параметрів навколишнього середовища і культурних об'єктів, а роботизовані системи забезпечують швидку адаптацію до змін та активні дії в реальному часі.

Комбіноване використання IoT для збирання даних і роботизованих систем для їхнього аналізу та реакції дає змогу досягти високої точності у моніторингу. Крім того, це рішення економічно ефективно, оскільки знижує витрати на утримання і мінімізує ризики пошкоджень культурних цінностей завдяки швидкій реакції на зміни умов.

Попри значні досягнення, існує кілька викликів, пов'язаних з впровадженням таких систем. Одним із головних є технічна складність інтеграції IoT і роботизованих систем. Необхідно розробити комплексні програмні рішення, які дозволять безперебійно взаємодіяти різним елементам системи, зокрема сенсорам IoT, хмарним обчисленням і роботизованим засобам.

Іншим важливим аспектом є безпека даних. IoT-системи, що працюють із великими обсягами даних у реальному часі, можуть стати вразливими до кібератак. Це потребує впровадження додаткових заходів безпеки, таких як шифрування даних, багаторівнева автентифікація та регулярний моніторинг безпеки систем.

Також важливим питанням є етичні аспекти використання таких технологій. Система, що базується на зборі даних в режимі реального часу, може містити інформацію про відвідувачів музеїв чи інших користувачів, що викликає питання щодо захисту приватності. Це потребує врахування відповідних правових та етичних норм під час проектування і впровадження таких систем.

Одним із перспективних напрямів розвитку є подальше вдосконалення сенсорних технологій. Наприклад, інтеграція сенсорів для моніторингу мікробіологічних загроз або структурних змін в об'єктах дозволить підвищити рівень захисту культурних об'єктів і знизити ризик пошкоджень через невидимі фактори.

Також слід звернути увагу на використання штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання для більш точного аналізу зібраних даних і прогнозування можливих загроз. Це дозволить зробити процес моніторингу більш проактивним і забезпечити своєчасне вжиття заходів для запобігання проблемам.

У порівнянні з традиційними методами моніторингу, такими як ручні перевірки або використання стаціонарних пристроїв, інтеграція IoT і роботизованих систем надає значно більше можливостей. По-перше, це забезпечує безперервний моніторинг у реальному часі, що є неможливим при ручних перевірках. По-друге, зниження впливу людського фактора зменшує ризик помилок і уповільненої реакції.

Роботизовані системи з навчанням з підкріпленням також дозволяють роботам адаптуватися до нових умов, що є критично важливим у середовищах з високим рівнем динамічності. Традиційні підходи не можуть забезпечити таку гнучкість і швидкість реагування, що обмежує їхню ефективність у складних і швидкозмінних умовах.

Окрім застосування в межах музеїв та архівів, така інтегрована система може бути успішно використана і в інших сферах. Наприклад, для моніторингу промислових об'єктів або критичної інфраструктури, де потрібен постійний контроль умов і швидка реакція на можливі загрози. Такий підхід може стати основою для більш масштабних рішень у сфері безпеки та збереження критичних об'єктів.

У результаті, інтеграція IoT та роботизованих систем має значний потенціал не тільки в галузі збереження культурної спадщини, але й у багатьох інших галузях, де необхідний ефективний моніторинг і управління об'єктами в режимі реального часу.

Таким чином, результати дослідження підкреслюють необхідність подальшого розвитку цієї інтеграції для створення більш ефективних, безпечних і економічно вигідних систем моніторингу.

Висновки. На основі проведених досліджень було встановлено, що інтеграція Інтернету речей (IoT) та роботизованих систем моніторингу, які використовують методи навчання з підкріпленням, має значний потенціал для покращення процесів збереження культурної спадщини та управління інтелектуальними динамічними об'єктами. Результати тренування експериментальної моделі показали підвищену точність моніторингу та ефективність реагування, оскільки система IoT забезпечує безперервний збір даних про стан об'єктів та умови середовища, що дозволяє опе-

ративно виявляти відхилення. Роботизовані засоби швидко та гнучко реагують на зміни, що особливо важливо у динамічних середовищах. Інтеграція IoT та роботизованих систем мінімізує потребу у людському втручанні, знижує ймовірність помилок та зменшує витрати на утримання об'єктів, що підвищує економічну ефективність. Хоча дослідження фокусувалися на збереженні культурної спадщини, такі системи можуть бути використані в інших сферах, включаючи промислові та інфраструктурні об'єкти. Водночас, впровадження цих систем стикається з технічними та етичними викликами, зокрема в питаннях безпеки

даних та захисту приватності. Подальші дослідження мають бути зосереджені на вдосконаленні сенсорних технологій, інтеграції нових даних для моніторингу мікробіологічних і хімічних загроз, а також на покращенні алгоритмів машинного навчання для точнішого прогнозування та оптимізації реагування.

Інтеграція IoT з роботизованими системами відкриває нові можливості для створення більш ефективних та гнучких систем моніторингу, які можуть адаптуватися до складних умов і забезпечити довготривале збереження культурних об'єктів у музейних середовищах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антонова Л., Гололобов С. Цифрова трансформація музейної справи: виклики та можливості для державної політики у сфері культури. *Публічне управління та регіональний розвиток*. 2023. № 20. С. 303–329. URL: <https://doi.org/10.34132/pard2023.20.02> (дата звернення: 29.09.2024).
2. Тимченко Т., Миколайчук А. Превентивна консервація творів мистецтва у системі сучасної вищої освіти консерваторів-реставраторів. *Збірник наукових праць «Українська академія мистецтва»*. 2023. № 33. С. 245–251. URL: <https://doi.org/10.32782/2411-3034-2023-33-28> (дата звернення: 29.09.2024).
3. Яцко Г. В., Миколайчук В. Р. IoT для «розумних міст» та промисловості. *Зв'язок*. 2023. № 161(1). <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.014245> (дата звернення: 29.09.2024).
4. Digital Tools for the Preventive Conservation of Built Heritage: The Church of Santa Ana in Seville / E. Chaves et al. *Heritage*. 2024. Vol. 7, no. 7. P. 3470–3494. URL: <https://doi.org/10.3390/heritage7070164> (date of access: 29.09.2024).
5. Lerario A. The IoT as a Key in the Sensitive Balance between Development Needs and Sustainable Conservation of Cultural Resources in Italian Heritage Cities. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 17. P. 6952. URL: <https://doi.org/10.3390/su12176952> (date of access: 29.09.2024).
6. Lerario A., Varasano A. An IoT Smart Infrastructure for S. Domenico Church in Matera's "Sassi": A Multiscale Perspective to Built Heritage Conservation. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 16. P. 6553. URL: <https://doi.org/10.3390/su12166553> (date of access: 29.09.2024).
7. Nisiotis L., Alboul L., Beer M. A Prototype that Fuses Virtual Reality, Robots, and Social Networks to Create a New Cyber-Physical-Social Eco-Society System for Cultural Heritage. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 645. URL: <https://doi.org/10.3390/su12020645> (date of access: 29.09.2024).
8. Pang W.-C., Wong C.-Y., Seet G. Exploring the Use of Robots for Museum Settings and for Learning Heritage Languages and Cultures at the Chinese Heritage Centre. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2017. Vol. 26, no. 4. P. 420–435. URL: https://doi.org/10.1162/pres_a_00306 (date of access: 29.09.2024).
9. Perles A., Fuster-López L., & Bosco E. Preventive conservation, predictive analysis and environmental monitoring. *Heritage Science*. 2024. Vol. 12, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01118-9>.
10. Pretelli M., Signorelli L., De Vivo M. A. Digital microclimate simulation models to support innovative management and preventive conservation processes in cultural sites. *VITRUVIO – International Journal of Architectural Technology and Sustainability*. 2023. Vol. 8, no. 2. P. 88–101. URL: <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20536> (date of access: 29.09.2024).
11. Preventive Conservation Primer. CCAHA. URL: <https://ccaha.org/resources/preventive-conservation-primer> (date of access: 29.09.2024).
12. TrZE. THE LOUVRE: Temperature and humidity in an exhibit hall – Newsteo. *Newsteo*, 2021. URL: <https://www.newsteo.com/en/portfolio-items/louvre-climate-conditions-monitoring/> (date of access: 29.09.2024).
13. UCL. Online tools for Preventive Conservation [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/heritage/online-tools-preventive-conservation> (date of access: 29.09.2024).

REFERENCES

1. Antonova, L., & Hololobov, S. (2023). Tsyfrova transformatsiia muzeinoi spravy: vyklyky ta mozhlyvosti dlia derzhavnoi polityky u sferi kultury. [Digital transformation of museum affairs: challenges and opportunities for state policy in the field of culture]. *Public Administration and Regional Development*, (20), 303–329. <https://doi.org/10.34132/pard2023.20.02> [in Ukrainian].
2. Tymchenko, T., & Mykolaichuk, A. (2023). Preventyvna konservatsiia tvoriv mystetstva u systemi suchasnoi vyshchoi osvity konservatoriv-restavroriv. [Preventive Conservation of Art Works in the System of Modern Higher Education of Conservators-Restorers]. *Ukrainian Academy of Arts*, (33), 245–251. <https://doi.org/10.32782/2411-3034-2023-33-28> [in Ukrainian].
3. Yatsko, H. V. & Mykolaichuk V.R. (2023). IoT dlia «rozumnykh mist» ta promyslovosti. [IoT for Smart Cities and industry]. *Connectivity*, 161(1). <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.014245> [in Ukrainian].

4. Chaves, E., Aguilar, J., Barontini, A., Mendes, N., & Compán, V. (2024). Digital Tools for the Preventive Conservation of Built Heritage: The Church of Santa Ana in Seville. *Heritage*, 7(7), 3470–3494. <https://doi.org/10.3390/heritage7070164>
5. Lerario, A. (2020). The IoT as a Key in the Sensitive Balance between Development Needs and Sustainable Conservation of Cultural Resources in Italian Heritage Cities. *Sustainability*, 12(17), 6952. <https://doi.org/10.3390/su12176952>
6. Lerario, A., & Varasano, A. (2020). An IoT smart infrastructure for S. Domenico Church in Matera’s “Sassi”: A Multi-scale perspective to built heritage Conservation. *Sustainability*, 12(16), 6553. <https://doi.org/10.3390/su12166553>
7. Nisiotis, L., Alboul, L., & Beer, M. (2020). A Prototype that Fuses Virtual Reality, Robots, and Social Networks to Create a New Cyber–Physical–Social Eco-Society System for Cultural Heritage. *Sustainability*, 12(2), 645. <https://doi.org/10.3390/su12020645>
8. Pang, W., Wong, C., & Seet, G. (2017). Exploring the use of robots for museum settings and for learning heritage languages and cultures at the Chinese Heritage Centre. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 26(4), 420–435. https://doi.org/10.1162/pres_a_00306
9. Perles, A., Fuster-López, L., & Bosco, E. (2024). Preventive conservation, predictive analysis and environmental monitoring. *Heritage Science*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01118-9>
10. Pretelli, M., Signorelli, L., & De Vivo, M. A. (2023). Digital microclimate simulation models to support innovative management and preventive conservation processes in cultural sites. *Vitruvio*, 8(2), 88–101. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20536>
11. *Preventive Conservation Primer*. (2022). CCAHA. <https://ccaha.org/resources/preventive-conservation-primer>
12. TrZE. (2021, March 23). THE LOUVRE: Temperature and humidity in an exhibit hall – Newsteo. <https://www.newsteo.com/en/portfolio-items/louvre-climate-conditions-monitoring/>
13. UCL. (2024, November 3). Online tools for Preventive Conservation. UCL Institute for Sustainable Heritage. <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/heritage/online-tools-preventive-conservation>