

# Використання цифрових технологій при забезпеченні пожежної та екологічної безпеки в установах зберігання документів, культурних та історичних цінностей

## Using Digital Technologies to Ensure Fire and Environmental Safety in Document Storage, Cultural and Historical Value Institutions

**Валентина Лобойченко<sup>A</sup>**

**Corresponding author:** доктор технічних наук, професор, професор кафедри цивільної безпеки, e-mail: vloboichm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5188-6479

**Ювіта Колошко<sup>B</sup>**

викладач кафедри охорони праці та екологічної безпеки, e-mail: yuvita.75@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6806-6538

**Валерія Груздова<sup>A</sup>**

членкиня-еколог, e-mail: mega\_valeriya1401@ukr.net, ORCID ID: 0009-0007-4995-1009

**Ірина Самчук<sup>C</sup>**

кандидат геологічних наук, доцент кафедри фундаментальної та прикладної геології, e-mail: vloboichm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8117-6117

**Юлія Погрібна<sup>B</sup>**

Здобувач наукового ступеня, e-mail: pohribna.yuliia\_2025phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0007-2746-6459

**Роман Шевченко<sup>B</sup>**

доктор технічних наук, професор, заступник начальника центру - начальник відділу організації науково-дослідної діяльності, e-mail: shevchenko\_roman@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9634-6943

**Valentyna Loboichenko<sup>A</sup>**

**Corresponding author:** Dr of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Civil Security, e-mail: vloboichm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5188-6479

**Yuvita Koloshko<sup>B</sup>**

Lecturer of the Department of Occupational Health and Environmental Safety, e-mail: yuvita.75@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6806-6538

**Valeria Hruzdova<sup>A</sup>**

Environmentalist member, e-mail: mega\_valeriya1401@ukr.net, ORCID ID: 0009-0007-4995-1009

**Iryna Samchuk<sup>C</sup>**

Candidate of Geological Sciences, Associate Professor of the Department of Fundamental and Applied Geology, e-mail: vloboichm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8117-6117

**Yuliia Pohrebna<sup>B</sup>**

PhD student, e-mail: pohribna.yuliia\_2025phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0007-2746-6459

**Roman Shevchenko<sup>B</sup>**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Center – Head of the Department for the Organization of Scientific and Research Activities, e-mail: shevchenko\_roman@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9634-6943

<sup>A</sup> Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

<sup>B</sup> Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

<sup>C</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

<sup>A</sup> Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

<sup>B</sup> National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

<sup>C</sup> V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Received: November 29, 2025 | Revised: December 16, 2025 | Accepted: December 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.19>

**Мета роботи.** Розробка підходів, спрямованих на попередження надзвичайних ситуацій в установах зберігання документів, культурних та історичних цінностей, що базуються на використанні цифрових технологій для забезпечення їх пожежної та екологічної безпеки.

**Метод дослідження.** Аналітичний підхід, що базується на огляді сучасних наукових джерел з питань цифровізації цивільного захисту, систем виявлення пожеж, інтернету речей та новітніх технологій моніторингу середовища.

**Результати дослідження.** Розроблено вдосконалений алгоритм реагування на надзвичайні ситуації, що базується на оперативному зборі даних з мережі датчиків (температурних, вологісних, акустичних), інтегрованих через інтернет речей. Запропоновано інструменти онлайн-навчання персоналу та внутрішніх комунікацій, які підвищують рівень готовності співробітників до дій у разі інцидентів. Сформовано комплексну систему запобігання, виявлення та локалізації пожеж і екологічних загроз у закладах зберігання культурних та історичних цінностей.

**Теоретична цінність дослідження.** Дослідження розширює теоретичні підходи до забезпечення пожежної та екологічної безпеки шляхом інтеграції концепцій інтернету речей, цифрового моніторингу та інтелектуальних платформ. Обґрунтовано

**Purpose.** The purpose of this work is to develop approaches aimed at preventing emergencies in institutions responsible for storing documents, cultural, and historical assets, based on the use of digital technologies to ensure their fire and environmental safety.

**Method.** An analytical approach based on a review of modern scientific sources related to the digitalization of civil protection, fire detection systems, the Internet of Things, and advanced environmental monitoring technologies.

**Findings.** An improved emergency response algorithm has been developed based on rapid data acquisition from interconnected sensors (temperature, humidity, acoustic) via the Internet of Things. Tools for online staff training and internal communication are proposed, increasing personnel awareness and readiness for incident response. A comprehensive system has been formed to enhance the prevention, detection, and localization of fires and environmental threats in institutions preserving cultural and historical assets.

**Theoretical implications.** The study extends theoretical approaches to fire and environmental safety by integrating IoT concepts, digital monitoring, and intelligent platforms. It substantiates the

можливість поєднання сучасних цифрових технологій з чинними вимогами цивільного захисту, що формує основу для подальших наукових досліджень цифрових систем безпеки у соціально значущих установах.

**Практична цінність дослідження.** Запропоновані рішення можуть бути впроваджені у музеях, бібліотеках, архівах та інших установах культурної спадщини. Вони є доступними, оскільки ґрунтуються на недорогих датчиках, відкритих платформах і популярних месенджерах. Реалізація підходів забезпечує покращення моніторингу, оперативну взаємодію відповідальних осіб, підвищення кваліфікації персоналу та створення альтернативних каналів оповіщення у разі відсутності мобільного зв'язку.

**Цінність дослідження.** Вперше запропоновано комплексний підхід, що поєднує IoT-технології, акустичне пожежогашіння, цифровий екологічний моніторинг та онлайн-освітні інструменти для персоналу установ культурної спадщини. Оригінальність підходу полягає у синергії технічних і комунікаційних рішень, спрямованих на підвищення рівня безпеки в умовах обмежених ресурсів і підвищених ризиків.

**Обмеження дослідження.** Запропоновані рішення потребують адаптації до різних архітектурних і технічних умов та не мають експериментальної перевірки у реальних установах. Перспективними напрямками подальших досліджень є створення та тестування прототипів IoT-систем, розробка рекомендацій щодо оновлення нормативної бази, інтеграція штучного інтелекту для прогнозування ризиків і оцінка економічної ефективності цифрових екосистем безпеки.

**Тип статті:** Оглядовий.

compatibility of modern digital technologies with civil protection regulations, providing a foundation for further research on digital safety systems in socially and culturally significant institutions.

**Practical implications.** The proposed solutions are applicable in museums, libraries, archives, and similar institutions. Their accessibility is ensured through the use of low-cost sensors, open platforms, and widely used messaging tools. Implementation improves environmental and fire monitoring, accelerates coordination among responsible staff, enhances personnel competence, and enables alternative alert channels when conventional mobile communication is unavailable.

**Originality.** This study is the first to propose an integrated approach combining IoT technologies, acoustic fire suppression, digital environmental monitoring, and online educational tools for cultural heritage institutions. The originality lies in the synergy of technical and communication solutions, forming a flexible and cost-effective safety system suitable for high-risk and resource-constrained environments.

**Research limitations.** The solutions require adaptation to diverse architectural and technical conditions and lack experimental validation in real institutions. Future research should focus on developing and testing IoT prototypes, updating regulatory frameworks, integrating artificial intelligence for risk prediction, and assessing the economic feasibility of digital safety ecosystems.

**Paper type.** Review.

**Ключові слова:** цивільний захист, цифрові технології, попередження надзвичайних ситуацій.

**Key words:** Civil Protection, Digital Technologies, Emergency Prevention.

## Вступ

Сучасний етап розвитку цифрових технологій, зокрема Інтернету речей, штучного інтелекту та роботизованих систем, демонструє суттєве розширення можливостей цивільного захисту щодо запобігання надзвичайним ситуаціям. Особливо актуальною ця тема є для України, де військовий конфлікт спричинив значне зростання пожежних та екологічних ризиків у закладах культури, архівах, музеях та бібліотеках. Традиційні системи пожежного захисту та нормативні вимоги не повною мірою відповідають сучасним викликам і не враховують можливостей цифрових технологій. Тому актуальною є розробка альтернативних рішень, що інтегрують інтелектуальні сенсорні системи, інтернет-ресурси та мобільні платформи для підвищення рівня пожежної та екологічної безпеки.

## Теоретичні основи дослідження

Впровадження цифрових технологій дозволяє отримувати інформацію в режимі реального часу, оптимізувати та коригувати роботу. Ці технології знайшли своє відображення в концепції smart technology ("розумні технології") – Smart City [14], Smart Home [15] тощо. Ці технології також використовуються для візуалізації інформації, створення цифрових двійників, зберігання та розповсюдження інформації [16, 17] – створення так званого цифрового простору.

Останній підхід активно застосовується для зберігання та поширення культурної та історичної інформації, відтворення документів. Зокрема, багато музеїв, галерей, бібліотек, архівів мають як безпосередньо свої представництва в мережі Інтернет, так і спеціалізовані віртуальні тури для відвідування онлайн. Можна відзначити такі музеї як Musee du Louvre (Лувр, Париж, Франція), Musei Vaticani (Ватикан, Рим, Італія), British Museum (Британський музей, Лондон, Велика Британія), the Metropolitan Museum of Art (Музей Метрополитен, Нью-Йорк, США), (Museo Nacional del Prado (Музей Прадо, Мадрид, Іспанія), які є найвідомішими музеями світу та мають свої представництва онлайн. Як оригінальні музеї можна відзначити Музей "Біосфера" (Монреаль, Канада), присвячений довкіллю і водним ресурсам Канади [18], музей вторинної сировини в Києві (Україна) [19], всі експонати якого виготовлені з вторинної сировини, Музей картоплі фрі в Брюселі [20], музей водовідних споруд в Монреалі [21] та ін.

До одного з найбільших музеїв України відноситься Харківський історичний музей імені М. Ф. Сумцова, який є провідним культурним центром Слобожанщини та Східної України, обласним науково-методичним музейним центром [22]. Всі вони містять загальну інформацію, відцифровані колекції [23], онлайн тури [24], і навіть навчальні програми [25]. Бібліотеки та архіви також мають свої онлайн представництва. Так, до найбільших бібліотек нашої держави можна віднести Національну бібліотеку України імені В. І. Вернадського [26], Харківську державну наукову бібліотеку імені В. Г. Короленка [27], Національну бібліотеку України імені Ярослава Мудрого [28]. Вони також надають різноманітні послуги читачам щодо пошуку та використання літератури. Архіви займаються зберіганням документації та наданням необхідної інформації щодо них. Можна відзначити як окремі архіви (Центральний державний кінофотофоноархів України ім. Г. С. Пшеничного [29], Центральний державний науково-технічний архів України (ЦДНТА України) [30] та інш.), так і цифрове архівне середовище, що об'єднує інформацію (пошук) з декількох архівів [31].

В той же час, окрім створення цифрової екосистеми, що забезпечує надання інформації користувачам, всі ці установи та заклади мають фізичні (матеріальні) локації, де зберігаються оригінали - цінні експонати, книги та документи, що дозволяють відтворювати та підтверджувати чинність цифрових копій. Відповідно, для таких закладів необхідно забезпечувати захист від надзвичайних ситуацій на фізичному рівні, з підтримкою задовільного рівня пожежної та екологічної безпеки.

Враховуючи цінність та ламкість матеріалів та експонатів, що зберігаються, для таких закладів зазвичай використовуються газові системи пожежогасіння [32], хоча ДБН В.2.5-56:2014 "Системи протипожежного захисту" [33] вказують на можливості застосування й інших видів пожежогасіння. Правила пожежної безпеки для архівних установ України [34], в свою чергу, регламентують загальні правила пожежної безпеки для цих установ. Слід відзначити, що ДБН В.2.5-56:2014 регламентує обладнання музеїв, архівів та бібліотек лише димовими та (або) комбінованими оповіщувачами. Причому останні, зазвичай, складаються з оповіщувачів диму та тепла. Цей ДБН також відзначає, що автоматична система пожежогасіння для бібліотек з фондом зберігання до 500 тис. умовних одиниць обладнується в приміщеннях сховищ бібліотек, архівів, комор, ремонтних майстерень, палітурно-брошурувальних, збирання та оброблення макулатури, розташовані в будинках з умовною висотою 26,5 м і більше, а також у будинках державних органів влади, виконкомів рад народних депутатів областей, міст, районів, а архіви площею менше 400 м<sup>2</sup> взагалі нею не обладнуються. Це створює додаткові ризики з пожежної небезпеки для цих приміщень. Питання екологічної безпеки для вищезазначених закладів взагалі не розглядаються, крім вимог до світильників, що повинні відповідати вимогам чинних норм з екології [34].

Використання технічних засобів на засадах штучного інтелекту, інтернету речей та цифрового простору виступає важливим елементом функціонування систем детектування пожеж та систем пожежогасіння. Відмічається, що цифровізація, використання мережі Інтернет та впровадження Штучного Інтелекту (Artificial Intellect- AI) на сьогодні є як частиною цивільного захисту загалом [35, 36], так і окремих його напрямків, наприклад, протимінної діяльності [37], пожежогасіння [38], детектування пожеж [39], ліквідації наслідків [40] тощо. Активно розробляються напрямки віддаленого моніторингу та ліквідації пожеж з використанням роботизованих механізмів [41, 42, 43], застосування новітніх технологій детектування та гасіння пожеж, пов'язаних з акустичною технологією (в тому числі, й для об'єктів культурної та історичної спадщини) [44, 45], комп'ютерним зором [46, 47], Інтернетом речей [48, 49], машинним навчанням та штучним інтелектом [50, 51], або поєднанням цих напрямків. Наприклад, для музеїв пропонується використовувати поєднання акустичного пожежогасіння (fire suppression) та IoT [52]. Для детектування пожеж використовують різноманітний набір сенсорів - термічні, газові, димові, акустичні, ті, що застосовують системи

штучного зору тощо [53, 54]. В їх основі лежать різні фізичні чи хімічні явища, але вони всі дозволяють детектувати пожежу.

Для відстежування стану екологічної безпеки середовища також використовуються різноманітні датчики, які надалі з використанням інтернету речей дозволяють оптимізувати процеси моніторингу [55], відстежувати якість стану повітря у внутрішніх приміщеннях [56], через спеціальний додаток сповіщувати персонал [57].

Таким чином, можна відзначити, що наявні нормативні вимоги з пожежної безпеки архівів, музеїв, бібліотек не враховують останні технологічні досягнення, як в частині цифрових технологій, так й технологій детектування та гасіння пожеж. В умовах сучасних небезпек, пов'язаних з військовими конфліктами, терористичними актами, стихійними лихами та природними катаклізмами важливо також мати альтернативні системи забезпечення пожежної та екологічної безпеки цих закладів, які, з одного боку, містять цінні матеріали, а з іншого, - не є об'єктами критичної інфраструктури.

### **Постановка проблеми**

Міста на сьогодні є осередком ділового, культурного, наукового, економічного та соціального життя населення багатьох країн. Розвиток технологій та перехід суспільства до Індустрії 5.0 сприяють появі різноманітних засобів, приладів та концепцій, що включають застосування Інтернету речей ( Internet of Things – IoT) та розвиток цифрового середовища [1, 2]. Сучасні цифрові впровадження відбуваються як на рівні міста [3], так і окремих будинків [4], промислових напрямків [5, 6] чи систем, наприклад, пожежогасіння [7]. З іншого боку, наявність різноманітних ситуацій, які безпосередньо негативно впливають на населення та території, мають додаткові наслідки від каскадних ефектів [8] та відстрочені опосередковані впливи [9, 10] , що підкреслює важливість варіабельності застосування інструментаріїв та підходів для їх попередження та мінімізації наслідків.

Слід відмітити, що умовах військового конфлікту, який триває в Україні з 2022 р., спостерігається зростання втрат серед населення України [11], збільшення рівня економічних та екологічних збитків [12, 13]. В той же час, порушення роботи критичної та цивільної інфраструктури внаслідок обстрілів чи їх наслідків, першочерговість безпекових питань в цих випадках, значно ускладнюють запобігання, детектування та попередження потенційних надзвичайних ситуацій в будівлях. Це стосується, в тому числі, й місць зберігання документів, культурних, матеріальних та історичних цінностей. Відповідно, можна констатувати, що актуальним питанням є потреба в сучасних підходах, які б дозволяли ефективно забезпечувати пожежну та екологічну безпеку будівель, особливо в умовах впливу внутрішніх та зовнішніх факторів небезпек.

### **Методологія дослідження**

Метою роботи є розробка підходів, спрямованих на попередження надзвичайних ситуацій в установах зберігання документів, культурних та історичних цінностей, що базуються на використанні цифрових технологій для забезпечення їх пожежної та екологічної безпеки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку завдань:

запропонувати алгоритм реагування на надзвичайні ситуації для працівників цих установ; розробити варіанти запобігання надзвичайним ситуаціям (інцидентам) та реагування на них із застосуванням месенджерів та інтернет-ресурсів.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення пожежної та екологічної безпеки в установах зберігання документів, культурних та історичних цінностей.

Предметом дослідження є цифрові технології, інтернет-ресурси, системи інтернету речей, месенджери та інші сучасні технічні рішення, що застосовуються для запобігання, детектування та реагування на надзвичайні ситуації в музеях, архівах та бібліотеках.

## Результати

В роботі запропоновано низку підходів, що враховують сучасний технічний розвиток в сфері детектування пожеж та стану навколишнього середовища, та які використані для підвищення ефективності запобігання, детектування, попередження пожеж та покращення стану екологічної безпеки. Підходи базуються на застосуванні доступних месенджерів (WhatsApp, Telegramm тощо) та платформ (он-лайн ресурсів) – Kahoot, Google Form тощо, що пов'язані з системою Інтернет.

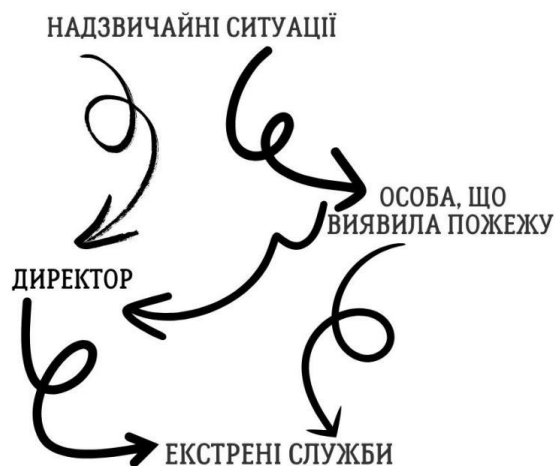
Вирішення першого завдання пропонується шляхом впровадження системи інтернету речей, що базується на системі датчиків раннього детектування пожеж та моніторингу стану навколишнього середовища.

В архівах, бібліотеках, та деяких музеях, що містять значну кількість паперових носіїв інформації, критично важливим є підтримання (та моніторинг) задовільного стану вологи та температури в приміщеннях. Він також повинен відстежуватись відповідальними працівниками цих установ. Відповідно, система датчиків має містити датчики вологи та температури.

Додатково пропонується обладнувати приміщення акустичними датчиками для раннього детектування пожеж.

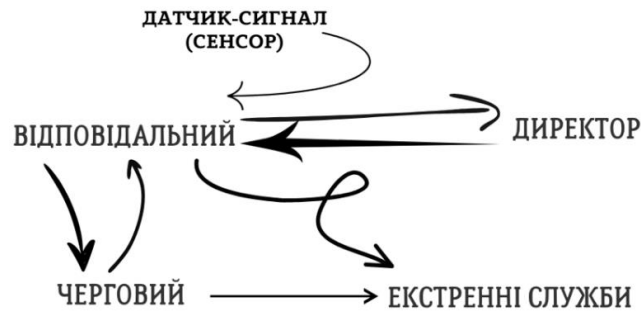
У якості системи автоматичного пожежогасіння в роботі рекомендовано застосовувати систему, що базується на акустичній технології, що є досить економічною, екологічно дружньою та неруйнівною порівняно з водними, газовими та пінними системами [44].

Згідно Правил [34] будь яким працівником передбачається сповіщення підрозділу оперативно-рятувальної служби цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС України) та керівника (відповідної особи) та (або) та чергового на об'єкті, а керівник повинен проконтролювати виклик представників ДСНС України (рис. 1.).



**Рисунок 1** – Запропонований алгоритм реагування на надзвичайні ситуації для працівників установ, що розглядаються, згідно Правил пожежної безпеки для архівних установ України

В запропонованому нами варіанті (рис. 2.) передбачається передача сигналу від відповідного датчика (термодатчик, датчик вологості, акустичний датчик) щодо перевищення (порушення) певних порогових значень. Такими датчиками, будемо вважати, обладнані всі приміщення установи.



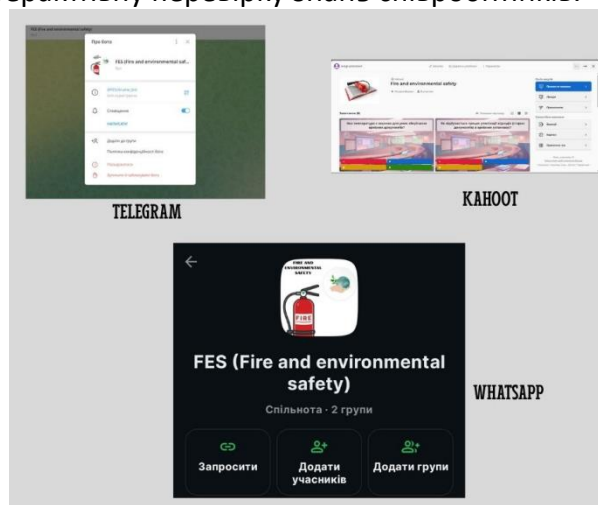
**Рисунок 2** – Запропонований алгоритм реагування на надзвичайні ситуації для працівників установ, що розглядаються

Відповідальний, за необхідності, перевіряє цю інформацію та повідомляє про ситуацію директорові зручним способом (безпосередньо, мобільний або інтернет-зв'язок (через месенджери)). В залежності від прийнятого рішення може йти (або ні) посилання до екстрених служб (ремонтні служби, представники ДСНС України). У разі відсутності на об'єкті відповідального (вихідні, святкові дні, консервація об'єкта, коли присутній лише черговий), то черговий, за необхідності, також перевіряє стан приміщення, місце, звідки поступив сигнал, та також, за результатами взаємодії з відповідальним та екстреними службами.

В зазначених умовах відсутня потреба у присутності на об'єкті, відповідальна особа за стан пожежної та екологічної безпеки приміщень може отримувати ситуацію в режимі реального часу та оперативно реагувати на неї, що підвищує ефективність забезпечення задовільного рівня пожежної та екологічної безпеки.

Для вирішення другого завдання пропонується застосувати різні додатки та месенджери (рис. 3.).

Зокрема, для запобігання надзвичайних ситуацій (наприклад, пожеж) запропоновано створювати на базі додатку Kahoot опитувальник для перевірки знань у формі вікторин (квізів), щоб співробітники бачили свої результати на своїх головних екранах. Google Forms також можна використати для перевірки знань співробітників (наприклад, анкетування) в структурованій та легкій формі. Створення відповідного чат-боту в Telegram дозволяє забезпечити навчання та інтерактивну перевірку знань співробітників.



**Рисунок 3** – Запропоновані варіанти запобігання надзвичайним ситуаціям (інцидентам) та реагуванням на них із застосуванням месенджерів та інтернет-ресурсів

Перевагами запропонованих варіантів є зручність, мобільність (потрібен будь-який мобільний прилад (смартфон, планшет, ноутбук і т.п.), можливість проходити навчання у зручний час. Підвищення рівня обізнаності працівників з питань пожежної та екологічної безпеки сприятиме підвищенню її рівня в установі, і, як очікується, забезпечить її запобігання.

Канал WhatsApp (Telegram або інш.) пропонується для односпрямованого розсилання інформації (новин, інструкцій, попереджень), в також для обговорення й обміну інформацією між співробітниками, що також забезпечить оперативність зв'язку, особливо в умовах відсутності мобільного зв'язку, підвищить інформованість працівників. В умовах розвитку надзвичайної ситуації (інциденту) використання такого альтернативного способу зв'язку також може забезпечити попередження її розвитку та (або) її швидку локалізацію.

### **Висновки**

Таким чином, в роботі відмічено масштабне застосування цифрових технологій в життєдіяльності сучасного соціуму. Розглянуто сучасний стан розвитку цифрових технологій в цивільному захисті. Показано застосування Інтернету речей, штучного інтелекту, роботизованих систем та нових (акустичних) технологій в детектуванні та гасінні пожеж. Відмічена недосконалість нормативного регулювання пожежної та екологічної безпеки установ, що зберігають документи, цінні історичні та культурні матеріали.

Розроблено алгоритм реагування на надзвичайні ситуації для працівників таких установ, що базується на інтернеті речей з використанням груп датчиків для детектування змін стану довкілля та оперативній взаємодії відповідальних осіб та екстрених служб.

Розроблено варіанти запобігання надзвичайним ситуаціям (інцидентам) та реагуванням на них із застосуванням різноманітних месенджерів та інтернет-платформ як альтернативу відомим способам.

Передбачається, що розроблені підходи є зручними, безпечними, екологічними, сприятимуть підвищенню обізнаності співробітників установ, оперативності реагування. Це, в свою чергу, забезпечить ефективне запобігання, детектування та попередження пожеж та інших інцидентів, і, надалі, мінімізують рівень пожежної та екологічної небезпеки.

### **Фінансування**

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

### **Конкуруючі інтереси**

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

### **Список використаних джерел**

1. Yu, D., Tao, Q., Liu, Q., Jin, Y., Sun, Y., Fu, P. Lifecycle management of urban renewal enabled by internet of things: Development, application, and challenges. Results in Engineering, 2025, 105706. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105706>.
2. Oladimeji, D., Gupta, K., Kose, N. A., Gundogan, K., Ge, L., Liang, F. Smart Transportation: An Overview of Technologies and Applications. Sensors, 2023, 23(8), 3880. <https://doi.org/10.3390/s23083880>.
3. Duque, J. The IoT to Smart Cities - A design science research approach. Procedia Computer Science, 2023, 219, 279–285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.291>.
4. Smart Home Automation and security using Raspberry Module. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 2024. <https://doi.org/10.56726/irjmet48848>.
5. Ferrisi, S. Sustainability Awareness in Manufacturing: A Review of IoT Audio Sensor Applications in the Industry 5.0 Era. Sensors, 2025, 25, 3041. <https://doi.org/10.3390/s25103041>.

6. Ortiz, J.S., Quishpe, E.K., Sailema, G.X., Guamán, N.S. Digital Twin-Based Active Learning for industrial process control and supervision in industry 4.0. *Sensors*, 2025, 25, 2076. <https://doi.org/10.3390/s25072076>.
7. Pan, G., Xie, Y., Yang, Q. IoT-based cloud monitoring system for building fires. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2025, Vol. 16, P. 1. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2024020>.
8. Огляд методів і технологій сценарного аналізу каскадних ефектів / В. Р. Сенченко та ін. Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2024, Т. 26, № 1, С. 24–54. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.1.308506>.
9. Лобойченко В., Груздова Ю., Колошко В., Стрілець О., Мирошник О. Розробка механізмів екологізації процесів поводження з відходами в повоєнній Україні як складова підвищення стану її цивільної безпеки. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація, 2023, 7(2), С. 152–164.
10. Mojabi, N.S.M., Ghourchi, M., Feizi, F. Adverse consequences of conflicts and wars on environment and public health. 2010 International Conference on Environmental Engineering and Applications, Singapore, 2010, С. 125–129. <https://doi.org/10.1109/iceea.2010.5596109>.
11. Україна подій 2024 року. URL: <https://www.hrw.org/uk/world-report/2025/country-chapters/ukraine>.
12. Hetmanenko, O. Macroeconomic Implications of the War in Ukraine: An In-Depth Analysis. *Economics: time realities*, 2025, 3(79), 58–65. <https://doi.org/10.15276/etr.03.2025.6>.
13. Світлана Гринчук: Збитки довіллю від війни вже сягають 108 млрд євро – відновлення є питанням не лише національної безпеки, але й безпеки всього континенту. 11.07.2025. URL: <https://mepr.gov.ua/svitlana-grynychuk-zbytky-dovkillyu-vid-vijny-vzhe-syagayut-108-mlrd-yevro-vidnovlennya-ye-pytannjam-ne-lyshe-natsionalnoyi-bezpeky-ale-i-bezpeky-vsogo-kontynentu/>.
14. Reddy, R.A., Ravindar, B., Mateti, J. Research Mapping in Smart Cities: A scientometric study on IOT and AI applications. In: *Communications in Computer and Information Science*, 2025, P. 313–324. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-00983-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-032-00983-8_24).
15. Tippe, M., Wigger, H., Brand-Daniels, U. et al. Operationalising user behaviour: a study on the life cycle assessment of smart home technologies. *Energy Sustainability Society*, 2025, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-024-00506-8>.
16. Barbone, A., Biccocchi, N., Martinelli, M., Morandi, R., Picone, M. On-Device AI and Digital Twins: a synergistic approach to intelligent Cyber-Physical systems. *Future Generation Computer Systems*, 2025, 108068. <https://doi.org/10.1016/j.future.2025.108068>.
17. Xu, Y., Huang, W., Xiao, J., Shan, J., Liu, M., Guo, W., Zhu, Y., Zhang, J., Yan, Y. A WebGIS-based digital twin platform for intelligent operation and maintenance of rail transit infrastructure. *Expert Systems With Applications*, 2025, 296, 129180. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129180>.
18. Biosphère. URL: <https://www.parcjeandrapeau.com/fr/biosphere-musee-de-environnement-montreal/>.
19. Музей вторинної сировини. URL: <https://ksandraowlet.wixsite.com/kyiv-musei/muzej-vtorinnoyi-sirovini>.
20. Frietmuseum Brussels. URL: <https://www.frietmuseum-brussels.be/eng/home>.
21. The Waterworks Museum. URL: <https://waterworksmuseum.org/>.
22. Харківський історичний музей ім. М. Ф. Сумцова. URL: <https://museum.kh.ua/about/>.
23. British Museum. URL: <https://www.britishmuseum.org/>.
24. Louvre. Virtual tours. URL: <https://www.louvre.fr/en/online-tours#tabs>.
25. Education. Waterworks Museum. URL: <https://waterworksmuseum.org/education/>.
26. Національна бібліотека імені В. І. Вернадського. URL: <http://www.nbuv.gov.ua/node/4445>.
27. Харківська державна наукова бібліотека імені В. Г. Короленка. URL: <https://korolenko.kharkov.com/>.

28. Національна бібліотека України імені Ярослава Мудрого. URL: <https://nlu.org.ua/>.
29. Центральний державний кінофотофоноархів України ім. Г. С. Пшеничного. URL: <https://tsdkffa.archives.gov.ua/>.
30. Центральний державний науково-технічний архів України (ЦДНТА України). URL: <https://cdnta.archives.gov.ua/>.
31. Державна архівна служба України. URL: <https://searcharchives.net.ua/>.
32. Остапов К. М., Чаплигін О. С., Лісняк А. А., Грицина І. М., Шевченко С. М., Криворучко Є. М. (2024). Оптимізація складу нейтральних газів для пожежогасіння у фондосховищах музеїв. Проблеми надзвичайних ситуацій, 2, 99–112. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns\\_2024\\_2\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2024_2_10).
33. ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», затверджених наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 13.11.2014 № 312. Київ: Мінрегіон України, 2015. 127 с.
34. Про затвердження Правил пожежної безпеки для архівних установ України: Наказ Міністерства юстиції України від 27.11.2017 № 3790/5. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1446-17#Text>.
35. Лобойченко В. М., Дівізінюк М. М., Шевченко Р. І., Федорчук-Мороз В. І., Рашкевич Н. В. (2025). Методи попередження надзвичайних ситуацій техногенного та медико-біологічного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за використання ідентифікації водних розчинів: монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 324 с.
36. Подобед І. (2024). Цифровізація як сучасний тренд трансформації ресурсного механізму системи цивільного захисту. Науковий вісник: Державне управління, 1(15), 82–103. [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2024-1\(15\)-82-103](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2024-1(15)-82-103).
37. Павлів В., Букарева О., Михалюк А., Лобойченко В. М. (2023). Цифрові технології в забезпеченні мінної небезпеки в Україні. Студентський науковий вісник, 50, 246–252. Луцьк: Видавництво «Вежа-Друк».
38. AlQahtani A. A. S., et al. (2025). From Inception to Innovation: A Comprehensive Review and Bibliometric Analysis of IoT-Enabled Fire Safety Systems. Safety, 11(2), 41. <https://doi.org/10.3390/safety11020041>.
39. Wang Z., Wang Y., Liao M., Sun Y., Wang S., Sun X., Shi X., Kang Y., Tian M., Bao T., Lu R. (2024). FirESonic: Design and implementation of an Ultrasound Sensing-Based Fire Type Identification System. Sensors, 24, 4360. <https://doi.org/10.3390/s24134360>.
40. Лобойченко В., Колошко Ю., Груздова В., Хмирова А., Шевченко О., Шевченко Р. (2024). Застосування месенджерів для побудови архітектури системи збору будівельних відходів, що утворились внаслідок бойових дій. Комунальне господарство міст, 6(187), 266–277. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-266-277>.
41. Sumaiya M. N., Vineeth J., Sali P., Supreeth G. R., Supreeth R. (2023). Intelligent Autopilot Fire Extinguishing Robot. In Intelligent Edge Computing for Cyber Physical Applications. Elsevier, 129–149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99412-5.00002-2>.
42. Bogue R. (2020). The Role of Robots in Firefighting. Industrial Robot, 48, 174–178. <https://doi.org/10.1108/IR-10-2020-0222>.
43. Tan S. Q. Y., Karthik V. J., Govind A., Rajasree P. M. (2023). An Approach into Navigation and Vision for Autonomous Fire Fighting Robots. International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 10, 156–164. <https://doi.org/10.1504/IJAMECHS.2023.132522>.
44. Loboichenko V., Wilk-Jakubowski J. L., Levterov A., Wilk-Jakubowski G., Statyvka Y., Shevchenko O. (2024). Using the Burning of Polymer Compounds to Determine the Applicability of the Acoustic Method in Fire Extinguishing. Polymers, 16(23), 3413. <https://doi.org/10.3390/polym16233413>.
45. Rai S. K. (2024). IOT Based Portable Fire Extinguisher using Acoustic Setup. Panamerican Mathematical Journal, 33(4), 15–29. <https://doi.org/10.52783/pmj.v33.i4.889>.

46. Pincott J., Tien P. W., Wei S., Calautit J. K. (2022). Indoor Fire Detection Utilizing Computer Vision-Based Strategies. *Journal of Building Engineering*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105154>.
47. Carletti V., Greco A., Saggese A., Vento B. (2024). A Smart Visual Sensor for Smoke Detection Based on Deep Neural Networks. *Sensors*, 24, 4519. <https://doi.org/10.3390/s24144519>.
48. Kundu S., Dey S., Abdullha Md. M., Sen G., Gangopadhyay M. (2025). Designing and Implementing an IoT-Based Long-Distance Fire-Extinguishment System “Stationary 3-Axis Fire-Emergency Response Base”. *Proceedings of 8th International Conference on Electronics, Materials Engineering and Nano-Technology (IEMENTech 2025)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/iementech65115.2025.10959508>.
49. Shilpa K., Sangharsha M., Sujata T., Rakshanda P., Prof. S. M. (2020). Fire Extinguishing Robot using IoT. *Research and Reviews: Advancement in Robotics*, 3(1), 1–4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3731047>.
50. Ai D. H., Nguyen V. L., Luong K. T., Le V. T. (2025). Applications of Artificial Intelligence in Indoor Fire Prevention and Fighting. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 14, 2646–2654. <https://doi.org/10.11591/ijai.v14.i4.pp2646-2654>.
51. Bhattacharya D., Ali I. (2025). AI Enabled Swarm Application for Fire-Fighting Bots over Web-Bluetooth APIs. In *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 233–247. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-8355-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-97-8355-7_20).
52. Selvaraj K., Perumal M. K., Akash C. R., Kumar V. M., Sobika M., Suruthi S. (2025). Safeguarding Heritage: Acoustic Fire Suppression with IoT for Museum Applications. *Proceedings of the 3rd International Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems (ICSSAS 2025)*, 111–116. <https://doi.org/10.1109/icssas66150.2025.11080799>.
53. Khan F., Xu Z., Sun J., Khan F. M., Ahmed A., Zhao Y. (2022). Recent Advances in Sensors for Fire Detection. *Sensors*, 22(9), 3310. <https://doi.org/10.3390/s22093310>.
54. Wilk-Jakubowski J. L., Loboichenko V., Divizinyuk M., Wilk-Jakubowski G., Shevchenko R., Ivanov S., Strelets V. (2025). Acoustic Waves and Their Application in Modern Fire Detection Using Artificial Vision Systems: A Review. *Sensors*, 25(3), 935. <https://doi.org/10.3390/s25030935>.
55. Dera P., Talaśka T., Długosz R. (2025). A New, Cost-Efficient Modular Sensor Platform for IoT and Predictive Maintenance in Industrial Applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 473, 116777. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2025.116777>.
56. Chen J., González Ó., O’Connor D., Tallon L., Pilla F. (2025). Assessment of IoT Low-Cost Sensor Networks for Long-Term Outdoor and Indoor Air Quality Monitoring: A Case Study in Dublin. *Atmospheric Pollution Research*, 102651. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102651>.
57. Parkavi A., Sowmya B. J., Alex S. A., et al. (2025). Air Quality and Dust Level Monitoring Systems in Hospitals Using IoT. *Discover Internet of Things*, 5, 23. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00120-w>.

## References

1. Yu, D., Tao, Q., Liu, Q., Jin, Y., Sun, Y., Fu, P. Lifecycle management of urban renewal enabled by internet of things: Development, application, and challenges. *Results in Engineering*, 2025, 105706. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105706>.
2. Oladimeji, D., Gupta, K., Kose, N. A., Gundogan, K., Ge, L., Liang, F. Smart Transportation: An Overview of Technologies and Applications. *Sensors*, 2023, 23(8), 3880. <https://doi.org/10.3390/s23083880>.
3. Duque, J. The IoT to Smart Cities - A design science research approach. *Procedia Computer Science*, 2023, 219, 279–285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.291>.

4. Smart Home Automation and security using Raspberry Module. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 2024. <https://doi.org/10.56726/irjmets48848>.
5. Ferrisi, S. Sustainability Awareness in Manufacturing: A Review of IoT Audio Sensor Applications in the Industry 5.0 Era. Sensors, 2025, 25, 3041. <https://doi.org/10.3390/s25103041>.
6. Ortiz, J.S., Quishpe, E.K., Sailema, G.X., Guamán, N.S. Digital Twin-Based Active Learning for industrial process control and supervision in industry 4.0. Sensors, 2025, 25, 2076. <https://doi.org/10.3390/s25072076>.
7. Pan, G., Xie, Y., Yang, Q. IoT-based cloud monitoring system for building fires. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2025, Vol. 16, P. 1. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2024020>.
8. Senchenko, V. R., et al. (2024). Ohliad metodiv i tekhnolohii tsenarnoho analizu kaskadnykh efektiv [Review of methods and technologies of scenario analysis of cascading effects]. *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*, 26(1), 24–54. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.1.308506>
9. Loboichenko, V., Hruzdova, Yu., Koloshko, V., Strilets, O., & Myroshnyk, O. (2023). Rozrobka mekhanizmiv ekolohizatsii protsesiv povodzhennia z vidkhodamy v povoiennii Ukraini yak skladova pidvyshchennia stanu yii tsyvilnoi bezpeky [Development of mechanisms for greening waste management processes in post-war Ukraine as a component of improving civil security]. *Nadzvychnai sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia*, 7(2), 152–164.
10. Mojabi, N.S.M., Ghourchi, M., Feizi, F. Adverse consequences of conflicts and wars on environment and public health. 2010 International Conference on Environmental Engineering and Applications, Singapore, 2010, C. 125–129. <https://doi.org/10.1109/iceea.2010.5596109>.
11. Human Rights Watch. (2025). *Ukraina podii 2024 roku [Ukraine: Events of 2024]*. <https://www.hrw.org/uk/world-report/2025/country-chapters/ukraine>
12. Hetmanenko, O. Macroeconomic Implications of the War in Ukraine: An In-Depth Analysis. *Economics: time realities*, 2025, 3(79), 58–65. <https://doi.org/10.15276/etr.03.2025.6>.
13. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2025, July 11). *Svitlana Hrynychuk: Zbytky dovkilliu vid viiny vzhe siahaiut 108 mlrd yevro...* [Svitlana Hrynychuk: Environmental damage from the war has already reached €108 billion...]. <https://mepr.gov.ua/svitlana-grynychuk-zbytky-dovkilliu-vid-viiny-vzhe-syagayut-108-mlrd-yevro-vidnovlennya-ye-pytanniam-ne-lyshe-natsionalnoyi-bezpeky-ale-i-bezpeky-vsogo-kontynentu/>
14. Reddy, R.A., Ravindar, B., Mateti, J. Research Mapping in Smart Cities: A scientometric study on IOT and AI applications. In: *Communications in Computer and Information Science*, 2025, P. 313–324. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-00983-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-032-00983-8_24).
15. Tippe, M., Wigger, H., Brand-Daniels, U. et al. Operationalising user behaviour: a study on the life cycle assessment of smart home technologies. *Energy Sustainability Society*, 2025, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-024-00506-8>.
16. Barbone, A., Bicocchi, N., Martinelli, M., Morandi, R., Picone, M. On-Device AI and Digital Twins: a synergistic approach to intelligent Cyber-Physical systems. *Future Generation Computer Systems*, 2025, 108068. <https://doi.org/10.1016/j.future.2025.108068>.
17. Xu, Y., Huang, W., Xiao, J., Shan, J., Liu, M., Guo, W., Zhu, Y., Zhang, J., Yan, Y. A WebGIS-based digital twin platform for intelligent operation and maintenance of rail transit infrastructure. *Expert Systems With Applications*, 2025, 296, 129180. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129180>.
18. Biosphère. <https://www.parcjemandrapeau.com/fr/biosphere-musee-de-environnement-montreal/>.
19. Muzei vtorynnoi syrovyny [Recycling Museum]. (n.d.). <https://ksandraowlet.wixsite.com/kviv-musei/muzej-vtorinnoyi-sirovini>
20. Frietmuseum Brussels. URL: <https://www.frietmuseum-brussels.be/eng/home>.
21. The Waterworks Museum. URL: <https://waterworksmuseum.org/>.

22. Kharkivskiyi istorychnyi muzei im. M. F. Sumtsova [Kharkiv Historical Museum named after M. F. Sumtsov]. (n.d.). <https://museum.kh.ua/about/>
23. British Museum. URL: <https://www.britishmuseum.org/>.
24. Louvre. Virtual tours. URL: <https://www.louvre.fr/en/online-tours#tabs>.
25. Education. Waterworks Museum. URL: <https://waterworksmuseum.org/education/>.
26. Natsionalna biblioteka Ukrainy imeni V. I. Vernadskoho [Vernadsky National Library of Ukraine]. (n.d.). <http://www.nbu.gov.ua/node/4445>
27. Kharkivska derzhavna naukova biblioteka imeni V. H. Korolenka [Kharkiv State Scientific Library named after V. H. Korolenko]. (n.d.). <https://korolenko.kharkov.com/>
28. Natsionalna biblioteka Ukrainy imeni Yaroslava Mudroho [Yaroslav the Wise National Library of Ukraine]. (n.d.). <https://nlu.org.ua/>
29. Tsentralnyi derzhavnyi kinofotofonoarkhiv Ukrainy im. H. S. Pshenychnoho [Central State CinePhotoPhono Archive of Ukraine]. (n.d.). <https://tsdkffa.archives.gov.ua/>
30. Tsentralnyi derzhavnyi naukovu-tekhnichnyi arkhiv Ukrainy [Central State Scientific and Technical Archive of Ukraine]. (n.d.). <https://cdnta.archives.gov.ua/>
31. Derzhavna arkhivna sluzhba Ukrainy [State Archival Service of Ukraine]. (n.d.). <https://searcharchives.net.ua/>
32. Ostapov, K. M., Chaplyhin, O. S., Lisniak, A. A., Hrytsyna, I. M., Shevchenko, S. M., & Kryvoruchko, Ye. M. (2024). Optyimizatsiia skladu neitralnykh haziv dlia pozhezhogasinnia u fondoskhovyshchakh muzeiv [Optimization of neutral gas composition for fire suppression in museum storage facilities]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2, 99–112. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns\\_2024\\_2\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2024_2_10)
33. Ministry of Regional Development of Ukraine. (2015). *DBN V.2.5-56:2014 Systemy protypozhezhnoho zakhystu [Fire protection systems]*. Kyiv: Minrehion Ukrainy.
34. Ministry of Justice of Ukraine. (2017). *Pro zatverdzhennia Pravyi pozhezhnoi bezpeky dlia arkhivnykh ustanov Ukrainy [On approval of fire safety rules for archival institutions of Ukraine]*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1446-17#Text>
35. Loboichenko, V. M., Diviziniuk, M. M., Shevchenko, R. I., Fedorchuk-Moroz, V. I., & Rashkevych, N. V. (2025). *Metody poperedzhennia nadzvychainykh sytuatsii tekhnohennoho ta medyko-biologichnoho kharakteru...* [Methods of preventing technogenic and medico-biological emergencies at critical infrastructure facilities] (Monograph). Lutsk: Vezha-Druk.
36. Podobied, I. (2024). Tsyfrovizatsiia yak suchasnyi trend transformatsii resursnoho mekhanizmu systemy tsyvilnoho zakhystu [Digitalization as a modern trend in transforming the resource mechanism of the civil protection system]. *Naukovyi visnyk: Derzhavne upravlinnia*, 1(15), 82–103. [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2024-1\(15\)-82-103](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2024-1(15)-82-103)
37. Pavliv, V., Bukareva, O., Mykhaliuk, A., & Loboichenko, V. M. (2023). Tsyfrovi tekhnolohii v zabezpechenni minnoi nebezpeky v Ukraini [Digital technologies in ensuring mine safety in Ukraine]. *Studentskyi naukovyi visnyk*, 50, 246–252.
38. AlQahtani A. A. S., et al. (2025). From Inception to Innovation: A Comprehensive Review and Bibliometric Analysis of IoT-Enabled Fire Safety Systems. *Safety*, 11(2), 41. <https://doi.org/10.3390/safety11020041>.
39. Wang Z., Wang Y., Liao M., Sun Y., Wang S., Sun X., Shi X., Kang Y., Tian M., Bao T., Lu R. (2024). FirESonic: Design and implementation of an Ultrasound Sensing-Based Fire Type Identification System. *Sensors*, 24, 4360. <https://doi.org/10.3390/s24134360>.
40. Loboichenko, V., Koloshko, Yu., Hruzdova, V., Khmyrova, A., Shevchenko, O., & Shevchenko, R. (2024). Zastosuvannia mesendzheriv dlia pobudovy arkhitektury systemy zboru budivelnykh vidkhodiv... [Use of messengers in designing an architecture for collecting construction waste generated by hostilities]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 6(187), 266–277. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-266-277>

41. Sumaiya M. N., Vineeth J., Sali P., Supreeth G. R., Supreeth R. (2023). Intelligent Autopilot Fire Extinguishing Robot. In *Intelligent Edge Computing for Cyber Physical Applications*. Elsevier, 129–149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99412-5.00002-2>.
42. Bogue R. (2020). The Role of Robots in Firefighting. *Industrial Robot*, 48, 174–178. <https://doi.org/10.1108/IR-10-2020-0222>.
43. Tan S. Q. Y., Karthik V. J., Govind A., Rajasree P. M. (2023). An Approach into Navigation and Vision for Autonomous Fire Fighting Robots. *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*, 10, 156–164. <https://doi.org/10.1504/IJAMECHS.2023.132522>.
44. Loboichenko V., Wilk-Jakubowski J. L., Levterov A., Wilk-Jakubowski G., Statyvka Y., Shevchenko O. (2024). Using the Burning of Polymer Compounds to Determine the Applicability of the Acoustic Method in Fire Extinguishing. *Polymers*, 16(23), 3413. <https://doi.org/10.3390/polym16233413>.
45. Rai S. K. (2024). IOT Based Portable Fire Extinguisher using Acoustic Setup. *Panamerican Mathematical Journal*, 33(4), 15–29. <https://doi.org/10.52783/pmj.v33.i4.889>.
46. Pincott J., Tien P. W., Wei S., Calautit J. K. (2022). Indoor Fire Detection Utilizing Computer Vision-Based Strategies. *Journal of Building Engineering*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105154>.
47. Carletti V., Greco A., Saggese A., Vento B. (2024). A Smart Visual Sensor for Smoke Detection Based on Deep Neural Networks. *Sensors*, 24, 4519. <https://doi.org/10.3390/s24144519>.
48. Kundu S., Dey S., Abdullha Md. M., Sen G., Gangopadhyay M. (2025). Designing and Implementing an IoT-Based Long-Distance Fire-Extinguishment System “Stationary 3-Axis Fire-Emergency Response Base”. *Proceedings of 8th International Conference on Electronics, Materials Engineering and Nano-Technology (IEMENTech 2025)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/iementech65115.2025.10959508>.
49. Shilpa K., Sangharsha M., Sujata T., Rakshanda P., Prof. S. M. (2020). Fire Extinguishing Robot using IoT. *Research and Reviews: Advancement in Robotics*, 3(1), 1–4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3731047>.
50. Ai D. H., Nguyen V. L., Luong K. T., Le V. T. (2025). Applications of Artificial Intelligence in Indoor Fire Prevention and Fighting. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 14, 2646–2654. <https://doi.org/10.11591/ijai.v14.i4.pp2646-2654>.
51. Bhattacharya D., Ali I. (2025). AI Enabled Swarm Application for Fire-Fighting Bots over Web-Bluetooth APIs. In *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 233–247. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-8355-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-97-8355-7_20).
52. Selvaraj K., Perumal M. K., Akash C. R., Kumar V. M., Sobika M., Suruthi S. (2025). Safeguarding Heritage: Acoustic Fire Suppression with IoT for Museum Applications. *Proceedings of the 3rd International Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems (ICSSAS 2025)*, 111–116. <https://doi.org/10.1109/icssas66150.2025.11080799>.
53. Khan F., Xu Z., Sun J., Khan F. M., Ahmed A., Zhao Y. (2022). Recent Advances in Sensors for Fire Detection. *Sensors*, 22(9), 3310. <https://doi.org/10.3390/s22093310>.
54. Wilk-Jakubowski J. L., Loboichenko V., Divizinyuk M., Wilk-Jakubowski G., Shevchenko R., Ivanov S., Strelets V. (2025). Acoustic Waves and Their Application in Modern Fire Detection Using Artificial Vision Systems: A Review. *Sensors*, 25(3), 935. <https://doi.org/10.3390/s25030935>.
55. Dera P., Talaška T., Długosz R. (2025). A New, Cost-Efficient Modular Sensor Platform for IoT and Predictive Maintenance in Industrial Applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 473, 116777. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2025.116777>.
56. Chen J., González Ó., O’Connor D., Tallon L., Pilla F. (2025). Assessment of IoT Low-Cost Sensor Networks for Long-Term Outdoor and Indoor Air Quality Monitoring: A Case Study in Dublin. *Atmospheric Pollution Research*, 102651. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102651>.
57. Parkavi A., Sowmya B. J., Alex S. A., et al. (2025). Air Quality and Dust Level Monitoring Systems in Hospitals Using IoT. *Discover Internet of Things*, 5, 23. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00120-w>.