

How to cite: Kliuiev, V. (2024). Application of Drone Technology to Identify Damage to Buildings. *World conference on future innovations and sustainable solutions*. Futurity Research Publishing. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14228443>

Application of Drone Technology to Identify Damage to Buildings

Vasyl Kliuiev

*Postgraduate student of the Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, v.klyuyev@nubip.edu.ua,
<https://orcid.org/0009-0001-7982-8075>*

Accepted: October 23, 2024 | **Published:** November 1, 2024 | **Language:** Ukrainian

Abstract: The study explores modern methods for identifying damage and hazards to buildings, focusing on monitoring their condition, including during wartime. It emphasizes unmanned aerial technologies (UAVs), Building Information Modeling (BIM), machine learning, and sensor networks for structural damage assessment. UAVs collect high-resolution data, analyzed with machine learning and BIM frameworks, while sensor networks provide real-time monitoring. The results confirm the effectiveness of these technologies in detecting and predicting damages, reducing time and costs compared to traditional methods. These approaches enhance building safety, particularly in natural disasters or military conflicts. The study highlights their potential for improving infrastructure safety, resource optimization, and disaster response strategies, with broader applications in urban planning and risk management.

Keywords: unmanned aerial vehicles, building information modeling, structural damage assessment.

Вступ

Сучасний розвиток технологій відкриває нові можливості для ефективного управління будівельною інфраструктурою, особливо в умовах надзвичайних ситуацій, таких як, природні катастрофи, техногенні аварії чи воєнні конфлікти. У цьому контексті методи дослідження передбачають використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для обстеження будівель та



збору високоточних даних, інтеграцію цих даних у системі інформаційного моделювання будівель (BIM) для візуалізації та аналізу, а також застосування алгоритмів комп'ютерного навчання для прогнозування та оцінювання пошкоджень. Сучасний розвиток технологій є особливо важливим для України, яка зараз активно відновлює свою будівельну інфраструктуру після значних руйнувань. Інтеграція цифрових технологій, таких як геоінформаційні системи та системи моніторингу, дозволяють швидше оцінювати масштаби пошкоджень і планувати ремонтно-відновлювальні роботи. Використання дронів і супутникових даних полегшує управління великими проектами та знижує ризики в небезпечних зонах. Крім того, впровадження інноваційних технологій, наприклад, BIM (інформаційного моделювання будівель), сприяє підвищенню ефективності проектування та будівництва. Україна має великий потенціал для використання цих технологій у забезпеченні стійкості інфраструктури та підвищенні її безпеки в умовах зовнішніх викликів. Сенсорні мережі можуть забезпечувати безперервний моніторинг структурного стану будівельних об'єктів в реальному часі. Поєднання БПЛА, BIM і машинного навчання дозволяє не лише оперативно виявляти пошкодження, але й ефективно аналізувати і прогнозувати їх розвиток, значно скорочуючи час і витрати в порівнянні з традиційними методами. Це підтверджує ефективність таких підходів у забезпеченні безпеки інфраструктури в умовах екстремальних ситуацій. Потенціал таких технологій для вдосконалення систем управління ризиками, оптимізації ресурсів та швидке реагування на надзвичайні ситуації є критично важливим як у цивільному, так і у військовому контексті.

Мета дослідження – аналіз сучасних методів ідентифікації пошкоджень і ризиків руйнування об'єктів будівництва, з акцентом на моніторинг їхнього стану в умовах воєнного часу.

Численні дослідники вивчали проблеми застосування технології дронів для виявлення пошкоджень будівель. Зокрема, Донець (2024) розглядав характеристики будівель із різними конструктивними системами, пошкодженими внаслідок воєнних дій. Автор досліджував специфічні типи пошкоджень, що виникають в будівлях залежно від матеріалів та систем конструкцій, з особливою увагою до впливу збройних конфліктів на їх цілісність. Це дослідження допомагає зрозуміти вразливості різних типів будівель під час війни та може сприяти розробленню стратегій для підвищення їх стійкості в майбутньому. Проблеми людського фактора в безпілотних системах досліджували Myhal & Protasenko (2022), розглядаючи роль операторів безпілотників в їх успішному застосуванні й роботі та відокремлюючи такі проблеми, як помилки операторів, обмеження систем та потреби в покращенні тренувальних і контрольних механізмів. Автори вивчають можливі розв'язання цих проблем з метою оптимізації ефективності роботи безпілотних технологій у різних сферах. Abdalrahman, Rayan & Rwaed (2022) вивчали шляхи використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для фотограмметрії та дистанційного зондування. У дослідженні продемонстровано застосування дронів для збору геопросторових даних, що допомагає у вивченні та картографуванні археологічних об'єктів, що є важливим для збереження культурної спадщини. До прикладу, Falorca та ін. (2021) з'ясували новітні тенденції візуального інспектування будівель і споруд із використанням безпілотників. Дрони, оснащені високоякісними камерами та сенсорами, є надзвичайно ефективними для виявлення таких дефектів будівель, як тріщини, корозія металевих елементів, зсуви конструкцій та деформації покрівель. Завдяки здатності здійснювати огляд в важкодоступних або небезпечних ділянок,



дрони можуть виявляти навіть мікроскопічні пошкодження, які важко помітити за допомогою традиційних методів. Застосування БПЛА дозволяє значно скоротити час на технічне обстеження будівель, покращуючи точність і частоту моніторингу. Порівняно з традиційними методами, як-от ручні перевірки чи використання підйомників, дрони забезпечують більш детальний та об'єктивний огляд, знижуючи ризики для людей. Результати досліджень показують, що БПЛА можуть виявити пошкодження на ранніх стадіях їх утворення, що дозволяє своєчасно вжити заходів для попередження критичних аварій та зменшити витрати на ремонт. Основні проблеми, що виникають під час реконструкції та будівництва військових містечок в умовах війни, вивчали Фролов та його співавтори (2024), приділяючи увагу розробленню нових підходів до проєктування та будівництва з метою підвищення стійкості та ефективності об'єктів в умовах воєнних конфліктів. Guan et al. (2022) розглядали віддалені технології на основі безпілотних літальних апаратів, які застосовуються в будівництві та цивільних інженерних роботах. Автори провели огляд наявних методів і технологій, що використовуються для моніторингу стану будівель і споруд, а також оцінили перспективи їх впровадження в майбутньому. Перспективи використання дистанційних технологій для моніторингу будівельних конструкцій є надзвичайно обнадійливими, оскільки вони дозволяють проводити обстеження навіть у важкодоступних чи небезпечних зонах, що суттєво знижує ризики для персоналу. Поєднання БПЛА, фотограмметрії та LiDAR-технологій дозволяє отримувати високоточні дані про стан будівельних об'єктів, що значно покращує ефективність технічних оглядів і знижує людський фактор у процесі збору інформації. Дистанційні технології також відкривають нові можливості для автоматизації процесу виявлення дефектів, використовуючи алгоритми машинного навчання для оброблення великих обсягів даних. Це дозволяє швидше і точніше діагностувати проблеми, що підвищує безпеку та довговічність будівельних конструкцій. Крім того, інтеграція цих технологій у BIM-системи дозволяє створювати детальні моделі об'єктів у реальному часі, що сприяє більш точному плануванню та управлінню процесами технічного обслуговування. Трегуб (2023) розглядає правові аспекти управління відходами від руйнування будівель і споруд, що стали результатом воєнних дій. Дослідник аналізує законодавчі норми щодо утилізації та перероблення таких відходів, підкреслюючи важливість ефективного правового регулювання в умовах війни для зменшення екологічного впливу та забезпечення відновлення інфраструктури.

Результати проаналізованих джерел підтверджують ефективність використання новітніх технологій, зокрема БПЛА, для моніторингу будівельних конструкцій, що суттєво підвищує точність і швидкість виявлення дефектів. Поєднання фотограмметрії та LiDAR-технологій дозволяє компенсувати обмеження кожного методу окремо, забезпечуючи більш детальний і всебічний огляд об'єктів. Це сприяє розробленню більш надійних та економічних підходів до оцінювання стану будівель, що особливо важливо для великих інфраструктурних проєктів. Використання машинного навчання в процесі моніторингу дозволяє автоматизувати виявлення дефектів та прогнозувати розвиток потенційних небезпек руйнування. Загалом, ці результати можуть надати допомогу в дослідженні покращення методів технічного обстеження та забезпечити більш ефективну експлуатацію будівель.

Результати дослідження



БПЛА забезпечують унікальні можливості для збору даних із важкодоступних або небезпечних зон, де традиційні методи моніторингу є недоцільними чи занадто дорогими. Завдяки оснащенню високоякісними камерами та сенсорами безпілотики здатні фіксувати навіть найменші дефекти, таких як тріщини, корозія металевих елементів чи зсуви конструкцій. Для моніторингу цілісності будівель використовуються різноманітні типи датчиків, серед яких найбільш поширеними є датчики для вимірювання деформацій, температури, вологи, а також акселерометри та гіроскопи для виявлення коливань. Ці датчики можуть бути встановлені безпосередньо на конструкціях або інтегровані в систему моніторингу через безпілотні літальні апарати. БПЛА оснащені камерами, тепловізорами та лазерними сканерами LiDAR, що дозволяють отримувати високоточні дані про стан будівель. Зібрана таким чином інформація інтегрується в систему BIM (Building Information Modeling), де за допомогою спеціального програмного забезпечення проводиться аналіз даних, створення 3D-моделей та оцінювання стабільності конструкцій у реальному часі. Це забезпечує точне відображення актуального стану будівель та дозволяє своєчасно виявляти дефекти або потенційні загрози руйнування.

Для ефективного виявлення пошкоджень за допомогою безпілотних літальних апаратів використовуються сучасні алгоритми машинного навчання, глибокого навчання та оброблення зображень. Алгоритм YOLO (You Only Look Once) є потужним інструментом для виявлення тріщин та дефектів, що дозволяє швидко і точно ідентифікувати навіть найдрібніші пошкодження на бетонних або асфальтових поверхнях. Конволюційні нейронні мережі (CNN) застосовуються для розпізнавання складніших дефектів, таких як, корозія металевих елементів, плями вологості чи ознаки структурного зсуву, завдяки високій точності аналізу зображень. Серед алгоритмів оброблення зображень популярним є Canny Edge Detection, який використовується для ідентифікації країв та меж пошкоджень, наприклад, тріщин у стінах або розривів у покриттях. Morphological Image Processing застосовується для виділення характерних контурів дефектів, зокрема вибоїн або деформацій матеріалів. Використання таких алгоритмів дозволяє БПЛА виявляти специфічні патерни пошкодження, наприклад, тріщини, корозію, зсуви конструкцій та сліди фізичних навантажень, навіть у важкодоступних чи небезпечних зонах. Це підвищує ефективність моніторингу, мінімізує похибки людського фактору і забезпечує більш детальний аналіз стану об'єктів, уникаючи значних витрат на традиційні методи досліджень. В умовах воєнного стану БПЛА виявилися особливо корисними для швидкого оцінювання пошкоджень після обстрілів або авіаударів, що дозволяє оперативно приймати рішення щодо подальшої експлуатації чи ремонту об'єктів будівництва. BIM-технології забезпечують створення тривимірних цифрових моделей будівель, що включають візуалізацію зібраних даних та їх інтеграцію в єдину інформаційну систему. Завдяки цьому можна легко ідентифікувати уразливі місця, аналізувати рівень пошкоджень та моделювати можливі сценарії розвитку руйнівних тенденцій. Результати дослідження показали, що інтеграція даних, отриманих за допомогою БПЛА, у BIM-систему дозволяє значно зменшити час, необхідний для аналізу та надання оцінки стану об'єктів, а також забезпечує більш структуровану та доступну інформацію для прийняття рішень.

Інтеграція машинного навчання в процес моніторингу будівельних конструкцій дозволяє автоматизувати аналіз великих обсягів даних, отриманих через датчики, UAV, фотограмметрію



та LiDAR. Алгоритми машинного навчання здатні виявляти аномалії, класифікувати такі дефекти, як тріщини або корозія, а також прогнозувати потенційні ризики, підвищуючи точність і ефективність моніторингу. Наприклад, нейронні мережі аналізують зображення для автоматичного виявлення пошкоджень, а методи глибокого навчання обробляють динамічні дані від вібрації. Інтеграція з BIM дозволяє автоматично порівнювати фактичний стан конструкції з її моделлю, виявляючи розбіжності, що можуть сигналізувати про структурні зміни і прогнозувати необхідність технічного обслуговування.

Для моніторингу структурної цілісності будівель із використанням безпілотних літальних апаратів і технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) застосовуються різні типи датчиків, кожен з яких виконує певні завдання для точного аналізу стану конструкцій. Високороздільні оптичні камери фіксують видимі дефекти, дозволяючи отримувати зображення високої якості для подальшого аналізу. Тепловізійні камери виявляють теплові аномалії, спричинені дефектами теплоізоляції, вологістю або тріщинами, що непомітні у видимому спектрі. Лазерні сканери (LiDAR) створюють тривимірні моделі будівель і дозволяють фіксувати зміни в геометрії конструкцій з високою точністю, що є особливо важливим для виявлення зсувів або деформацій. Ультразвукові датчики застосовуються для визначення внутрішніх дефектів у матеріалах, таких як порожнини або мікротріщини, забезпечуючи глибокий аналіз. Газові сенсори контролюють наявність шкідливих газів або зміну хімічного складу повітря, що може свідчити про корозійні процеси. Інтеграція цих датчиків у систему БПЛА здійснюється через спеціальні модулі, які забезпечують збирання та передачу даних у режимі реального часу. Інформація, отриману із сенсорів, синхронізується з BIM-моделлю об'єкта, що дозволяє візуалізувати результати моніторингу в цифровій тривимірній моделі будівлі. Це дає змогу не лише ідентифікувати проблемні зони, а й проводити прогноз-аналіз для планування ремонтних робіт. Використання БПЛА з датчиками і BIM дозволяє значно підвищити ефективність моніторингу, зменшити витрати та ризики, пов'язані з доступом до важкодоступних ділянок.

Сучасні методи моніторингу будівельних конструкцій з використанням безпілотних літальних апаратів забезпечують високу точність і ефективність завдяки використанню таких інноваційних технологій, як UAV-фотограмметрія та LiDAR (табл. 1). БПЛА, оснащені високоякісними камерами та сенсорами, дозволяють отримувати детальні дані про стан конструкцій навіть у важкодоступних чи небезпечних зонах, що особливо важливо в умовах обмеженого доступу або воєнних дій. UAV-фотограмметрія створює 3D-моделі з високою роздільною здатністю, але залежить від використання контрольних точок для точного геореференціювання, а також чутлива до освітлення та погодних умов. LiDAR-системи, базуючись на лазерному скануванні, забезпечують роботу в складних умовах, при слабкому освітленні чи нерівному рельєфу, але мають високу вартість і обмеження щодо щільності точкової хмари. Інтеграція даних, отриманих із цих двох технологій, дозволяє компенсувати їхні недоліки, забезпечуючи більш комплексний та точний аналіз стану будівельних конструкцій. Сенсорні мережі знаходять усе ширше застосування в реальних умовах для моніторингу та оцінювання стану будівельних конструкцій, оскільки вони здатні здійснювати постійний контроль за різними параметрами (вібрація, температура, деформації, корозія матеріалів). Завдяки інтеграції цих мереж із БПЛА та системами, що використовують LiDAR або фотограмметрію, можна отримати більш точні та



актуальні дані про стан об’єктів натеper. Сенсори виявляють навіть незначні зміни в конструкціях, що можуть сигналізувати про потенційні проблеми, дозволяючи здійснювати проактивне обслуговування і запобігати серйозним пошкодженням. У реальних умовах такі сенсорні мережі використовуються для обстеження інфраструктури мостів, тунелів, висотних будівель та інших складних об’єктів. Наприклад, під час моніторингу історичних будівель фотограмметрія використовується для відтворення кольору фасаду та візуальних елементів, а LiDAR дозволяє вимірювати мікродеформації в кам’яних стінах або перекриттях. У мостобудуванні фотограмметрія ефективно виявляє видимі пошкодження, наприклад, корозію металевих елементів, тоді як LiDAR аналізує зміну геометрії конструкції, зокрема прогини чи зміщення опор. У сфері промислового будівництва ці методи можуть використовуватися разом для оцінювання зношеності конструкцій резервуарів, трубопроводів або каркасів великих споруд, де необхідно враховувати як зовнішній стан, так і внутрішню стабільність. Така інтеграція дозволяє отримувати більш точні й надійні результати, підвищуючи ефективність моніторингу будівельних конструкцій (табл.1).

Таблиця 1

Порівняння методів моніторингу будівельних конструкцій з використанням БПЛА

Метод	Фотограмметрія (SFM)	LiDAR
Принцип роботи	Аналіз зображень для створення 3D-моделей	Використання лазерних імпульсів для вимірювань
Точність	Міліметрова-сантиметрова	Сантиметрова
Щільність даних	Висока	Середня
Вплив освітлення	Висока залежність	Незалежність
Вартість	Низька	Висока
Необхідність GCP	Так	Опціонально
Тривалість польоту	Довга	Коротка
Робота в умовах рослинності	Низька ефективність	Висока ефективність
Можливості інтеграції	Легке поєднання з іншими сенсорами	Складна інтеграція через різну природу даних
Типи завдань	Моніторинг стану поверхні, визначення прогресу робіт	Моделювання складного рельєфу, роботи під деревами

Джерело: складено автором на основі Wang & Ueda (2023).

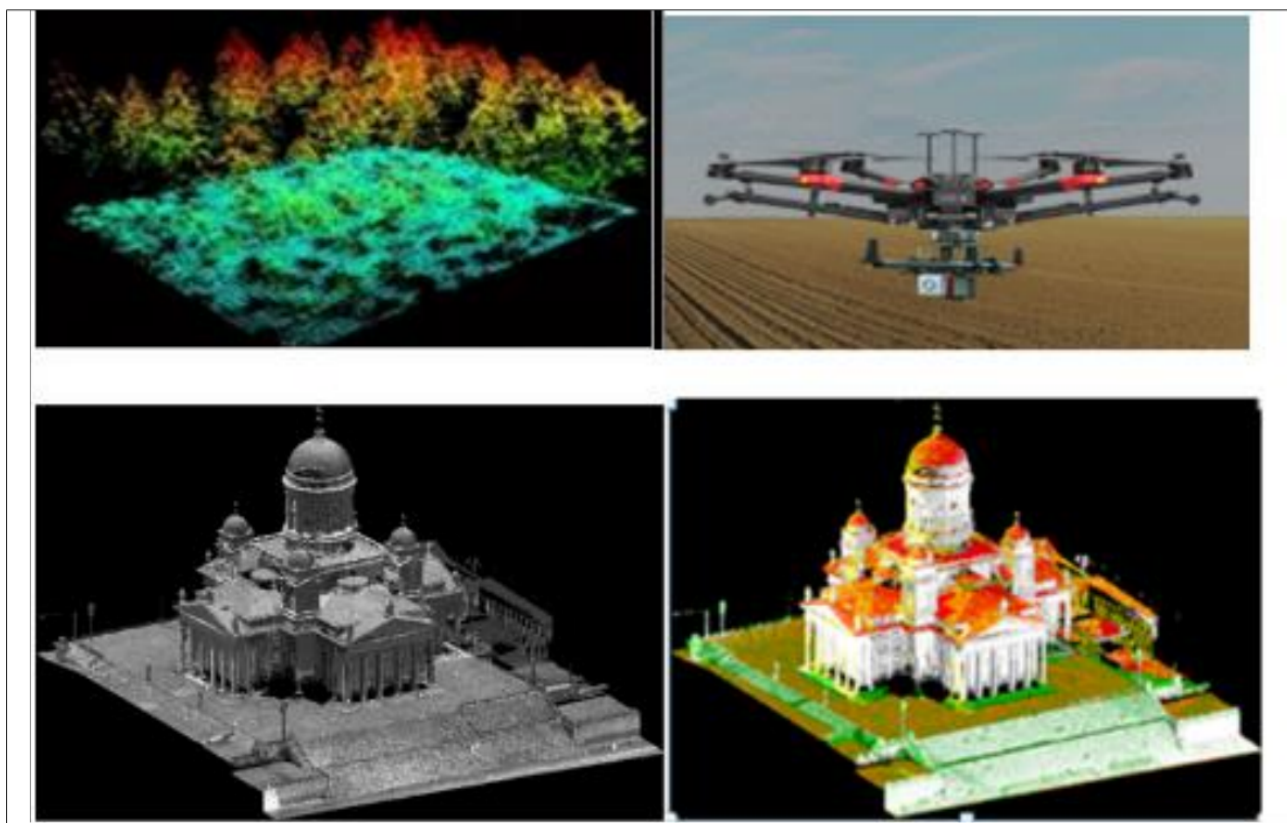
Використання алгоритмів машинного навчання дало змогу ефективно обробляти великі обсяги даних, зібраних за допомогою БПЛА. Моделі, розроблені в ході дослідження, навчені розпізнавати специфічні патерни пошкоджень, що дозволяє автоматично класифікувати типи дефектів та прогнозувати їх розвиток. Наприклад, алгоритми можуть визначати ризик збільшення тріщини в бетонній стіні або ймовірність обвалу конструкції за певних умов. Це забезпечує не лише високу точність, але й дозволяє скоротити витрати на експертну оцінку. Сенсорні мережі, інтегровані в досліджувані системи, продемонстрували свою ефективність для моніторингу структурної цілісності будівель у реальному часі. Такі датчики дозволяють відстежувати зміни параметрів конструкцій, таких як вібрація, деформація або температура. У

поєднанні з БПЛА та BIM ці сенсори утворюють комплексну систему моніторингу, яка може працювати автономно навіть у складних умовах, таких як відсутність електропостачання чи пошкодження інфраструктури.

Інтеграція даних із фотограмметрії та LiDAR дозволяє отримати більш повну картину стану будівель. Таке поєднання допомагає компенсувати обмеження кожної з технологій окремо (рис. 1).

Рисунок 1

Результати обстежень LiDAR і фотограмметрії. Приклад хмар точок до і після додавання кольорових атрибутів



На рисунку 1 продемонстровано результати обстежень із використанням технологій LiDAR (Light Detection and Ranging) та фотограмметрії, що забезпечують високу точність у створенні тривимірних моделей місцевості. У першій частині рисунка представлено хмари точок, отримані під час сканування, які є базовим набором даних для подальшого оброблення. Ці хмари точок відображають геометричні параметри об'єктів, але не містять інформації про їхні кольорові характеристики. Друга частина рисунка – результати після додавання кольорових атрибутів, що було досягнуто за допомогою фотограмметрії. Цей процес включає інтеграцію фотографічних даних із геометричними, завдяки чому хмари точок набувають реалістичного вигляду та кольорів, відповідних реальним об'єктам. Такий підхід значно підвищує якість аналізу та деталізацію моделей, що є критично важливим для завдань, пов'язаних з реконструкцією, плануванням та моніторингом об'єктів. Цей приклад ілюструє переваги комплексного використання LiDAR і фотограмметрії, зокрема у створенні точних і візуально зрозумілих моделей, які сприяють більш ефективному прийняттю рішень у сфері будівництва та управління інфраструктурою (рис.2).

Рисунок 2

Деякі фоторезультати інспекції будівель та конструкцій



На рисунку 2 показано вибрані фоторезультати інспекції будівель та конструкцій, отримані під час обстежень. Зображення демонструють приклади ключових елементів конструкцій, їх стан та потенційні дефекти. Завдяки використанню сучасних технологій інспекції, як-от дрони, цифрові камери високої роздільної здатності та тепловізори, забезпечується висока деталізація й точність знімків.

Фотографії включають основні візуальні аспекти будівель, а саме тріщини, пошкодження фасадів, деформації матеріалів, а також ознаки корозії чи зношення конструктивних елементів. Подібний підхід дозволяє оперативно виявляти проблемні зони, які потребують ремонту або заміни. Ці фоторезультати слугують цінним інструментом для створення бази даних про стан будівель та конструкцій. Також вони підтримують прийняття рішень у контексті планування ремонтних робіт, оптимізації ресурсів і покращення загальної безпеки об'єктів. Використання таких зображень значно знижує необхідність у фізичному доступі до складних ділянок та мінімізує ризики для інспекторів.

В умовах сучасної повномасштабної війни в Україні використання фоторезультатів інспекції будівель та конструкцій, зокрема представлених на рисунку 2, є критично важливим для відновлення пошкодженої інфраструктури. Технології інспекції дають змогу швидко оцінювати стан об'єктів, визначати рівень пошкоджень і пріоритетність ремонтних робіт. Це особливо актуально для відновлення житлових будинків, промислових підприємств, мостів, доріг і систем життєзабезпечення, які постраждали внаслідок обстрілів чи бойових дій. Зібрані дані дозволяють створювати точні цифрові моделі об'єктів для подальшого аналізу та планування відновлення. Такий підхід мінімізує ризики для працівників, забезпечує економію ресурсів і пришвидшує процес реконструкції. Крім того, ці методи сприяють прозорості й ефективності використання міжнародної гуманітарної допомоги та державних коштів, спрямованих на відновлення інфраструктури. Застосування фоторезультатів інспекції також допомагає формувати комплексну базу даних про пошкодження, яка може бути використана як доказова база для міжнародних судів щодо компенсації збитків, завданих війною. Таким чином, ці



технології є важливим елементом інтегрованого підходу до відбудови України в умовах повномасштабної війни та після її завершення.

Висновки

Дослідження підтвердило ефективність поєднання сучасних технологій у сфері моніторингу стану будівель. Використання БПЛА, ВІМ, машинного навчання та сенсорних мереж не лише підвищує точність і швидкість обстежень, але й забезпечує значну економію ресурсів. У контексті України ці технології мають значний потенціал для забезпечення безпеки інфраструктури, особливо в умовах надзвичайних ситуацій. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розробленні інтегрованих систем моніторингу, які враховують специфіку місцевих умов та потреб.

Література

Донец, Т. (2024). Характеристика пошкоджень будівель з різними конструктивними системами внаслідок воєнних дій. *Наука та будівництво*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-6>

Фролов, О., Булгаков, Р., Прогульний, В., & Рабочая, Т. (2024). Виявлення основних проблем, а також розробка пропозицій та рекомендацій щодо модернізації існуючих та будівництва нових будівель та споруд військових містечок з урахуванням досвіду широкомасштабної збройної агресії російської федерації. *Journal of Scientific Papers Social Development & Security*, 14(4), 115-123. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.4.9>

Лобанов, Л., Стельмах, Д., Савицький, В., Діадін, В., Шуткевич, О., & Шкурат, І. (2024). Виявлення пошкоджень та аналіз із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та методу фотограмметрії. *Procedia Structural Integrity*, 59, 43-49. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624003184>

Михаль, Г., & Протасенко, О. (2022). Безпілотні системи: проблеми людського фактора. *Вісник Національного технічного університету "КПІ"*, 4(14), 46-52. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.04.07>

Трегуб, О. (2023). Екологічне та земельне право: Правові аспекти поводження з відходами від руйнування будівель і споруд внаслідок воєнних дій. *Екологічне та земельне право*, 4(3). <https://doi.org/10.32782/LST/2023-4-3>

Abdallah, R. Q., Rayan, G. T., & Rwaed, M. M. (2022). UAVs/drones for photogrammetry and remote sensing: Nineveh archaeological region as a case study. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2, 359-367. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.14.3.0539>

Falorca, J. F., Miraldes, J. P. N. D., & Lanzinha, J. C. G. (2021). New trends in visual inspection of buildings and structures: Study for the use of drones. *Open Engineering*, 11, 734-743. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0071>



Guan, S., Zhu, Z., & Wang, G. (2022). A review on UAV-based remote sensing technologies for construction and civil applications. *Drones*, 6. <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/5/117>

Surojaya, A., Zhang, N., Bergado, J. R., & Nex, F. (2024). Towards fully autonomous UAV: Damaged building-opening detection for outdoor-indoor transition in urban search and rescue. *Electronics*, 13(3), 558. <https://doi.org/10.3390/electronics13030558>

Wang, J., & Ueda, T. (2023). Application of unmanned aerial vehicle (UAV) technology on damage inspection of reinforced concrete structures. In *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient* (pp. 1461-1470). https://www.researchgate.net/publication/371188110_Application_of_Unmanned_Aerial_Vehicle_UAV_Technology_on_Damage_Inspection_of_Reinforced_Concrete_Structures