

Аналіз сучасних технологій інструментального обстеження: переваги, ризики та перспективи впровадження в Держспецтрансслужбі

Assessment of Modern Instrumental Inspection Technologies for the State Special Transport Service of Ukraine

Сергій Попрієнко

Corresponding author: науковий співробітник науково-дослідного відділу, e-mail: centrd@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-8517-1045>

Євген Хоменко

аспірант, начальник Науково-дослідного центру, e-mail: centrd@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-7006-3439>

Роман Краснов

кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідного відділу, e-mail: r.krasnov@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-8889-1868>

Олег Буданов

науковий співробітник науково-дослідного відділу, e-mail: centrd@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1105-4245>

Сергій Ільїн

інженер науково-дослідного відділу, e-mail: ilyin.sergiy@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-1066-4891>

Ігор Светлічний

аспірант, старший науковий співробітник науково-дослідного відділу, e-mail: centrd@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7328-548X>

Serhii Popriienko

Corresponding author: Research Associate of the Scientific Research Department, e-mail: centrd@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-8517-1045>

Yevhen Khomenko

PhD student, Head of the Research Center, e-mail: centrd@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-7006-3439>

Roman Krasnov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Research Department, e-mail: r.krasnov@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-8889-1868>

Oleg Budanov

Research Associate of the Scientific Research Department, e-mail: centrd@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1105-4245>

Serhiy Ilyin

Engineer of the Scientific Research Department, e-mail: ilyin.sergiy@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-1066-4891>

Igor Svetlichnyi

PhD student, Senior Researcher of the Scientific Research Department, e-mail: centrd@dsst.gov.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7328-548X>

Науково-дослідний центр Державної спеціальної служби транспорту, м. Дніпро, Україна

Research Center of the State Special Transport Service, Dnipro, Ukraine

Received: March 21, 2026 | Revised: April 18, 2026 | Accepted: April 30, 2026

UDC 620.179:355 + 69.059.2:004.9

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.16.2.24>

Мета роботи. Аналіз можливостей сучасних технологій інструментального обстеження об'єктів, визначення їх переваг, ризиків і недоліків, а також оцінка перспектив практичного впровадження в діяльність Державної спеціальної служби транспорту.

Метод дослідження. Методологічну основу дослідження становлять аналіз, синтез, дедукція та порівняльний аналіз. Аналіз наукових джерел, нормативно-технічної документації й технічних характеристик застосовано для визначення сучасних підходів до обстеження об'єктів транспортної та інженерної інфраструктури. Синтез і дедукцію використано для узагальнення отриманих даних та формулювання висновків щодо перспектив впровадження відповідних технологій у діяльність Держспецтрансслужби. Порівняльний аналіз використано для оцінювання функціональних можливостей, переваг, недоліків і обмежень сучасних технологій інструментального обстеження. Як предмет спеціального аналізу розглянуто фотограмметричний метод створення карт і 3D-моделей, аерозйомку, тривимірне лазерне сканування, георадарний метод, магнітокоерцитивний та акустикоemisійний методи неруйнівного контролю.

Результати. Встановлено, що сучасні технології інструментального обстеження суттєво розширюють можливості виявлення дефектів, оцінювання стану об'єктів і прогнозування

Purpose. To analyse the capabilities of modern instrumental inspection technologies, identify their advantages, risks, and disadvantages, and assess the prospects for their practical implementation within the State Special Transport Service.

Methodology. The methodological framework of the study is based on analysis, synthesis, deduction, and comparative analysis. Analysis of scientific sources, regulatory and technical documentation, and the technical characteristics of inspection tools was used to identify current approaches to the inspection of transport and engineering infrastructure facilities. Synthesis and deduction were used to generalize the obtained data and to formulate conclusions regarding the prospects for implementing the relevant technologies in the activities of the State Special Transport Service. Comparative analysis was used to assess the functional capabilities, advantages, disadvantages, and limitations of modern instrumental inspection technologies. The following were considered as the subject of special analysis: the photogrammetric method for creating maps and 3D models, aerial surveying, three-dimensional laser scanning, the ground-penetrating radar method, and magnetocoercive and acoustic emission methods of non-destructive testing.

Results. It has been established that modern instrumental inspection technologies significantly enhance defect detection, object characterisation, damage documentation, and prediction of

технічного ресурсу конструкцій. Обґрунтовано доцільність їх застосування Держспецтрансслужбою. Водночас впровадження обмежується потребою у підготовці персоналу, витратами на техніку і ПЗ, залежністю від умов експлуатації та необхідністю вдосконалення нормативного забезпечення.

Практична цінність дослідження. Результати можуть бути використані для обґрунтування вибору технологій обстеження, планування технічного оснащення, підвищення якості діагностування та прийняття рішень у Держспецтрансслужбі й інших складових сил оборони України. Розвинуто підходи до вибору технологій із урахуванням програмно-технічних і нормативних чинників.

Тип статті. Аналітична, концептуальна (з елементами прикладного проектування).

structural technical condition. However, their implementation requires specialised personnel training, investment in equipment and software, consideration of operational constraints, and improvement of regulatory and organisational frameworks.

Practical Value. The findings can be used to justify the selection of appropriate inspection technologies, plan the technical equipping of units, enhance diagnostic quality, and improve decision-making processes within the State Special Transport Service and other components of the Defence Forces of Ukraine.

Type of Article. Analytical, conceptual (with elements of applied design).

Ключові слова: інструментальне обстеження; оцінка технічного стану; критична інфраструктура; неруйнівний контроль; Сили оборони України.

Key words: Instrumental Inspection; Technical Condition Assessment; Critical Infrastructure; Non-Destructive Testing; Defense Forces of Ukraine.

Вступ

Обґрунтування необхідності інструментальних обстежень об'єктів. З початку повномасштабного вторгнення противник концентрує свої зусилля не тільки на суто військових діях, але й намагається за будь яку ціну нанести критичних вражень як воєнній, так і цивільній інфраструктурі України. Тому підтримка стійкого функціонування об'єктів критичної інфраструктури, контроль їх технічного стану, своєчасна відбудова та ліквідація наслідків ворожих атак є надважливими задачами. У дослідженні вперше здійснено комплексний порівняльний аналіз сучасних технологій інструментального обстеження об'єктів транспортної та інженерної інфраструктури з позицій їх придатності до застосування. На відміну від наявних досліджень, у яких переважно розглядаються окремі технології або окремі сфери їх цивільного застосування, у роботі системно зіставлено виокремлені методи за критеріями функціональних можливостей, переваг, обмежень, ризиків і умов практичного впровадження.

Державна спеціальна служба транспорту (далі – Держспецтрансслужба, ДССТ) при виконанні покладених на неї Законом України “Про Державну спеціальну службу транспорту” (2004, зі змінами) завдань стикається з необхідністю у стислі терміни проводити:

обстеження технічного стану значної кількості об'єктів єдиної транспортної системи (ЄТСУ);
аналіз дефектів та пошкоджень будівель, споруд та інженерних конструкцій, спричинених ворожими атаками;

обстеження та картографування (складання 3-D моделей, оцінка властивостей ґрунтів, тощо) земельних ділянок, з метою визначення їх придатності для будівництва нових об'єктів та комунікацій;

дослідження визначених територій та акваторій на наявність вибухонебезпечних предметів.

Для складання проектної документації з будівництва або відновлення об'єктів, споруд, будівельних конструкцій, інженерних мереж та систем, їх елементів і вузлів потрібно виконати певну кількість робіт та досліджень, порядок, об'єм та методики яких регламентовані постановами Кабінету міністрів та наказами відповідних міністерств (Порядок, 2017; Про затвердження, 2022). В той же час методи досліджень, тобто безпосереднє збирання, впорядкування та обробка даних про фізичні властивості різноманітних об'єктів постійно вдосконалюються.

Запропоновані в статті методи інструментального обстеження та діагностування конструкцій, за умови їх впровадження в діяльність Держспецтрансслужби, забезпечують значне підвищення ефективності проектних і вишукувальних робіт, точну оцінку технічного стану металоконструкцій та скорочення строків підготовки проектної документації. Вибір саме цих методів обумовлений їх потенційною здатністю вирішувати поставлені завдання швидко,

з нормованою точністю, знизити сумарні затрати як на підготовку до самих робіт зі збирання інформації, так і в цілому на весь комплекс робіт з обстеження.

Вибір технологій, що аналізуються, обумовлений метою дослідження та специфікою завдань технічного обстеження об'єктів транспортної й інженерної інфраструктури. До аналізу включено ті технології, які у сукупності забезпечують вирішення основних діагностичних завдань: дистанційне візуальне обстеження, просторову фіксацію й моделювання об'єктів, високоточне визначення геометричних параметрів, виявлення прихованих дефектів і неруйнівний контроль металоконструкцій. Їх добір здійснено з урахуванням критеріїв оперативності, точності, інформативності, безпечності застосування, придатності до роботи у складних умовах та практичної релевантності.

Для підвищення аналітичної обґрунтованості результатів у дослідженні використано спрощену багатокритеріальну модель оцінювання придатності технологій інструментального обстеження до практичного застосування в діяльності Держспецтрансслужби. Модель базується на зваженому врахуванні шести критеріїв: оперативності отримання даних, точності й деталізації результатів, інформативності щодо технічного стану об'єкта, здатності виявляти приховані дефекти, безпечності та придатності до роботи у складних умовах, а також ресурсної доступності впровадження (вартість обладнання, програмного забезпечення, потреба у спеціальній підготовці персоналу).

Інтегральний показник придатності технології визначається за формулою:

$$K_j = \sum w_i \cdot b_{ij},$$

де K_j – інтегральна оцінка j -ї технології;

w_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію;

b_{ij} – оцінка j -ї технології за i -м критерієм за п'ятибальною шкалою (1 – низька придатність, 5 – висока придатність).

Ваги критеріїв визначено експертно з урахуванням пріоритетності для завдань Держспецтрансслужби. Система критеріїв та їх ваги наведені в таблиці 1.

Таблиця 1: Критерії оцінювання та їх вагові коефіцієнти

Критерій	Позначення	Вага
Оперативність отримання даних	C_1	0,20
Точність і деталізація результатів	C_2	0,20
Інформативність щодо технічного стану	C_3	0,20
Виявлення прихованих дефектів	C_4	0,15
Безпечність у складних умовах	C_5	0,15
Ресурсна доступність впровадження	C_6	0,10

Джерело: підготовлено авторами

Застосування зазначеної моделі дає змогу формалізувати порівняння технологій і визначити пріоритетність їх практичного впровадження на основі об'єктивних, кількісно визначених показників.

Згідно Порядку проведення обстеження прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва (2017) для складання проектної документації з відновлення, після проведення аналізу дефектів і пошкоджень, а також визначення фактичних експлуатаційних навантажень і впливів на будівельні конструкції, проводяться наступні види робіт:

детальні вимірювання необхідних геометричних параметрів об'єкта, будівельних конструкцій, інженерних мереж і систем, їх елементів і вузлів;

виявлення змін характеристик основи фундаменту та розвитку небезпечних процесів і явищ шляхом виконання контрольних інженерних робіт на земельній ділянці та прилеглих до об'єкта ділянках за наявності небезпечних процесів і явищ;

інструментальне визначення параметрів дефектів і пошкоджень, фотофіксація, складення схем їх розташування, а також їх прив'язки в натурі;

проведення перевірочних розрахунків основних несучих будівельних конструкцій, інженерних мереж і систем, основ фундаментів та об'єкта в цілому;

проведення аналізу причин виникнення дефектів і пошкоджень;

узагальнення інформації про технічний стан будівельних конструкцій, мереж і систем об'єкта;

розроблення рекомендацій щодо можливості подальшої експлуатації об'єкта, проведення наступного обстеження, конструктивних рішень про відновлення та підсилення окремих будівельних конструкцій, загальні висновки.

Етапи, особливості та обсяг обстеження плануються виконавцем згідно з Методикою проведення обстеження та оформлення його результатів (Методика, 2022). Обсяг і послідовність робіт (від підготовки та візуального огляду до детального інструментального обстеження, перевірочних розрахунків і складання висновків) встановлюються в технічному завданні залежно від мети обстеження, стану конструкцій та необхідності оцінки надійності й безпеки об'єкта.

Огляд літератури

Виконання технічної частини збирання даних, їх обробка, систематизація, складання схем і 3-D моделей об'єктів є найбільшим за трудомісткістю етапом виконання робіт з обстеження. Сучасний стан розвитку технологій в поєднанні з засобами штучного інтелекту (далі – ШІ) дозволяє частково або повністю автоматизувати збір даних, а також зробити ці дані більш достовірними і точними. Нижче проаналізовано можливості деяких методів, їх переваги і недоліки відповідно до завдань і потреб підрозділів Держспецтрансслужби.

Сучасний розвиток технологій обстеження та діагностування будівельних конструкцій характеризується переходом від традиційних ручних методів до високотехнологічних автоматизованих рішень, що поєднують тривимірне лазерне сканування (лідар), фотограмметрію, аерозйомку, георадарні (радіолокаційні) дослідження, неруйнівний контроль та елементи ШІ для обробки великих обсягів даних (Дорожинський, 2008; Малов, 2011; Бутенко, 2025).

Найбільш трудомістким етапом традиційного обстеження залишається збір, обробка та систематизація первинних даних, а також створення схем, планів і 3D-моделей об'єктів за відповідними методиками (Методика, 2022; Порядок, 2017). Цей етап часто становить понад 60–70 % загальних витрат часу та ресурсів (Бутенко, 2025), що набуває особливого значення в умовах обмежених строків, зумовлених відбиттям широкомасштабної агресії рф, враховуючи завдання Держспецтрансслужби, в значній частині пов'язані з оперативним відновленням і технічним прикриттям критичної транспортної інфраструктури.

Огляд літератури дозволяє виділити чотири основні тематичні кластери: автоматизоване розпізнавання дефектів і класифікація пошкоджень на основі даних лазерного сканування та фотограмметрії з використанням конволюційних нейронних мереж; семантична сегментація 3D-хмар точок для швидкого створення цифрових двійників об'єктів; комбіноване застосування георадарів і ШІ для неінвазивного виявлення внутрішніх дефектів ґрунтів і конструкцій; обробка даних аерозйомки з елементами машинного навчання для моніторингу змін стану споруд у реальному часі. Однак практичне впровадження цих технологій у діяльності підрозділів Держспецтрансслужби в умовах підвищеної небезпеки вимагає комплексного аналізу не лише можливостей, а й технічних та нетехнічних ризиків,

включаючи доцільність їх використання в середньо та короткостроковій перспективі (Шумлянський, 2025).

У сучасних зарубіжних дослідженнях (Ghadarah & Ayre, 2023) простежується тенденція до інтеграції дистанційних, геофізичних і неруйнівних методів контролю для підвищення достовірності оцінювання технічного стану інфраструктурних об'єктів. Зокрема, фотограмметричні технології розглядаються як ефективний інструмент моніторингу складних споруд. Георадарні методи активно застосовуються для виявлення внутрішніх дефектів. Акустикоемісійний контроль у сучасній науковій літературі (Tonelli, Luchetta, Rossi, Migliorino & Zonta, 2020) визначається як перспективний метод структурного моніторингу мостових конструкцій.

Водночас проведений огляд літератури виявив певну дослідницьку прогалину (research gap): попри наявність потужного арсеналу сучасних методів інструментального обстеження та їх автоматизації за допомогою штучного інтелекту, комплексний аналіз переваг, ризиків і перспектив застосування цих технологій (включно з інтеграцією нормативної бази та стандартів включно з інтеграцією в національну нормативну базу та сумісністю зі стандартами НАТО (STANAG) у контексті діяльності Держспецтрансслужби досі залишається недостатньо дослідженим. Запропонована робота частково заповнює зазначену прогалину.

Бібліографічний та наукометричний аналіз вітчизняних і зарубіжних джерел, зокрема з баз Scopus і Web of Science, свідчить про значне зростання кількості публікацій за 2022–2025 роки, присвячених сучасним технологіям інструментального обстеження та впровадженню елементів штучного інтелекту в процеси автоматизації геодезичних і діагностичних робіт. Водночас вищеозначені тематичні кластери – фотограмметричний метод створення карт і 3-D моделей (семантична сегментація 3D-хмар точок), радіолокаційне сканування ґрунту (георадарний метод), магнітокоерцитивний і акустикоемісійний методи неруйнівного контролю металоконструкцій (автоматизоване розпізнавання дефектів і класифікація пошкоджень), а також обробка масивів даних (з елементами машинного навчання) залишаються малодослідженими саме в контексті специфіки завдань Держспецтрансслужби та вимог національної нормативної бази (Про Державну, 2004; Методики, 2022).

Використані в роботі технічні описи (характеристики) від виробників, веб-ресурси та інші неакадемічні джерела мають допоміжний характер. Їх перевагою є актуальність технічних характеристик, прикладів практичного застосування та відомостей про наявні програмно-апаратні рішення. З огляду на це такі джерела використані переважно для уточнення функціональних параметрів окремих засобів і ілюстрації, тоді як узагальнені висновки ґрунтуються на нормативних документах і наукових публікаціях.

Український контекст. Динамічний розвиток технологічних рішень у військовій сфері України створює сприятливі передумови для впровадження таких інноваційних технологій та окремих технологічних рішень у діяльність усіх складових Сил оборони України. Парадокс полягає в тому, що стрімкий розвиток технологій суттєво випереджає їхнє практичне закріплення в нормативних документах, які регулюють процеси обстеження. Водночас більшість проєктів обстеження та/або відновлення об'єктів носять виразно реактивний характер, тому що зосереджені переважно на оперативному усуненні наслідків руйнувань та швидкому відновленні функціональності об'єктів без врахування комплексної (системної) довгострокової стратегії адаптації до майбутніх викликів (Шумлянський, 2025; Leica, 2025).

Досвід російсько-української війни засвідчує, що навіть високотехнологічні системи оброблення даних аерозйомки та лазерного сканування можуть істотно втрачати ефективність під впливом зовнішніх чинників, включаючи необхідність протидії засобам радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ), погодні умови, обмежена видимість, пошкодження обладнання (Leica, 2025).

Водночас у наукових джерелах підкреслюється, що використання зазначених технологій забезпечує прискорення процесу обстеження у 5–10 разів порівняно з

традиційними методами, з точністю до 1–5 мм, що критично важливо для швидкого планування відновлення пошкодженої інфраструктури (Safe, 2025; Leica, 2025). За даними аналітичних звітів (2023-2025), безпілотні літальні апарати (БПЛА, дрони) нині забезпечують близько 70 % усіх бойових втрат на фронті та є основним інструментом для швидкої аерозйомки та фіксації пошкоджень інфраструктури в реальному часі. Однак у 70–80 % випадків БПЛА та розвідувальні дрони (крім керованих по оптоволокну) втрачають ефективність саме через радіоелектронну боротьбу, що є одним із суттєвих ризиків при застосуванні аерозйомки для обстеження (Andrijanič, 2025; Safe, 2025).

Матеріали та методи

Фотограмметричний метод складання планів місцевості і 3-D моделей об'єктів.

Фотограмметрія (від грецьких слів *φωτός* – світло, запис, зображення, *μετρέω* – виміряти) – науково-технічна дисципліна, що займається визначенням форми, розмірів, положення та інших характеристик об'єктів за їх фотознімками.

Теоретичні основи даної концепції (художня перспектива) були закладені задовго до винайдення фотографії, провідні художники середньовіччя вже знали її основи і використовували для створення картин (Леонардо да Вінчі, Альбрехт Дюрер). В 1725 році швейцарець Моріц Антон Каппелер (1685–1769) вперше опублікував роботу “Пілатус”, де застосував метод фотограмметричної засічки для створення геодезичної карти. Хоча термін «фотограмметрія» з'явився значно пізніше, Каппелер фактично першим застосував її математичний принцип. Використовуючи два перспективні малюнки як стереопару, він за допомогою геометричних побудов (перетину променів з двох точок) визначив координати та висоти вершин гори. У 1759 році швейцарський математик Йоганн Генріх Ламберт (1728-1777) опублікував працю “Вільна перспектива”, в якій розвинув теорію перспективи та показав, як можна з перспективних зображень відновити форму об'єкта.

Метод аерофотознімання місцевості для картографування був винайдений у 1858 році французьким фотографом і повітроплавцем Феліксом Надаром (1820-1910), як поєднання двох найпередовіших на той час технологій – фотографії і повітроплавання на аеростатах (Рис.1). Як і всі новинки цей спосіб отримав поширення завдяки інтересу до нього воєнних відомств держав, які готувалися або вели активні бойові дії. Складання карт місцевості, оборонних ліній, інженерних споруд – вже під час першої світової війни аерофотознімання, а точніше вже аеророзвідка, широко застосовувалося всіма сторонами, одночасно інженери всебічно модернізували як апаратуру для знімання, так і способи її проведення.

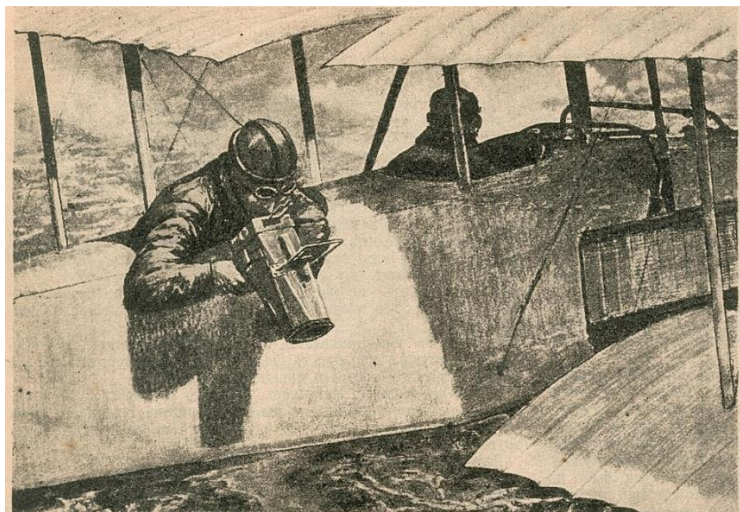


Рисунок 1: Аерофотознімання з літака. Перша світова війна

Джерело: (Журнал Нива, 1916)

В якості носіїв застосовували повітряні кулі, повітряні змії, аеростати, аероплани, які робили спеціалізованими для встановлення фотообладнання. Існували навіть доволі екзотичні рішення – мініатюрні фотокамери встановлювали на поштових голубів для проведення фоторозвідки над територією ворога (Рис.2), як зазначає Popular Mechanics Magazine (1942, с. 33).



Рисунок 2: Поштовий голуб з камерою. Друга світова війна
Джерело: (Popular Mechanics Magazine, 1942)

Використання аерофотознімання давало великі переваги в оцінюванні оперативної обстановки, що підштовхнуло до швидкого розвитку апаратури, технологій обробки, розшифровки і адаптації для використання аерофотознімків. Ортофотоплани місцевості (полігони зі знімків, орієнтованих вертикально вниз з перекриттям і приведенням до одного масштабу) почали використовуватися як основа для складення топографічних карт, так і самостійно. Фотограмметрія як самостійна галузь науки набула швидкого розвитку з 1901 року з винайденням стереокомпаратора німецьким фізиком Карлом Пульфріхом (1858–1927). Підвищення точності вимірів до 0,01 мм дало можливість використовувати фотознімки для вирішення задач, які до цього потребували тільки натурних вимірів (геодезія, точна топографія). В 1903 році німець Теодор Шаймпфлюг (1865-1911) сформулював принцип, за яким стало можливим знімання поверхні під кутом до вертикалі, з додержанням різкості по всій площині знімка. Також він сформулював оптичні та геометричні умови фототрансформування.

Незважаючи на високу складність і вартість обладнання, фотограмметричний метод став в 30-50 роки минулого сторіччя основним методом картографування завдяки зменшенню затрат часу на проведення робіт. Складання топографічних карт проводилося в три етапи – спершу створювалась контурна основа на фототрансформаторі, потім рисували рельєф за допомогою стереометра, і з допомогою оптичного проектора горизонталі наносилися на фотоплан. Згодом з розвитком космічних апаратів цей метод став єдиним можливим для створення рельєфних карт інших планет.

З появою електронно-обчислювальної техніки одразу виникла ідея частково або повністю автоматизувати процес обробки фотознімків. З 80 років минулого сторіччя розвиток цифрових фотометричних станцій (ЦФС) досяг рівня, достатнього для розв'язання основних задач фотограмметрії: створення ортофотопланів, фотосхем, каталогізації координат точок фототріангуляції, створення цифрових моделей об'єктів і місцевості тощо. Спочатку

оцифрування зображень проводили на фотосканерах, згодом розвиток цифрових камер обумовив повний перехід на пряме знімання в цифровій формі (Дорожинський, 2008).

Наразі на ринку представлені сучасні рішення ЦФС (Рис. 3, Рис. 4). Це вироби таких фірм як Leica Geosystems (Швейцарія), Intergraph/Hexagon (США), Vexcel Imaging (США), ДНВП “Геосистема”, Україна (Малов, 2011).



Рисунок 3: Аерофотокамера Intergraph®'s Z/I Imaging® Digital Mapping Camera (DMC®) на гіростабілізованій платформі в літаку.

Джерело: офіційна сторінка DMC®



Рисунок 4: Аерофотокамера 3-DAS-2 на гіростабілізованій платформі, виробництво ДНВП “Геосистема”, Україна

Джерело: матеріали з офіційного сайту ТОВ “Геосистема”

З розвитком безпілотних літальних апаратів вартість робіт з геофотознімання значно зменшилась, а роздільна здатність камер, що встановлюються на БПЛА, з кожним роком покращується. Провідні фірми, такі як Leica Geosystems, Trakka Systems, DJI з лінійкою продуктів Zenmuse, пропонують готові рішення у вигляді коптерних систем, обладнаних спеціальними камерами, лідарними системами, лазерними далекомірами, точними GNSS (GNSS+RTK) приймачами для координатної прив'язки. Дані системи дозволяють в автоматичному режимі виконувати польотне завдання по маршруту, обминати перешкоди,

вести зйомку і проводити захоплення координатних точок об'єкта, одночасно передаючи дані на сервер або в хмарне сховище. Системи відрізняються комплектацією, функціональними можливостями, роздільною здатністю (або GSD, Ground Sample Distance, відстань між центрами сусідніх пікселів, приведена до поверхні землі), швидкістю сканування. Параметри сучасних найпоширеніших фотограмметричних систем на основі БПЛА наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняння найбільш розповсюджених систем для фотограмметрії на основі БПЛА

Назва	Фірма-виробник	Країна	Тип камери	Роздільна здатність	Наявність лазерного далекоміру	Точність, мм
Trakka Cam/TrakkaMaps TM-100	Trakka Systems	Австралія/США	Мультиспектральна / Інфрачервона	HD 1080p	Опціонально	Немає даних
Leica Aibot	Leica Geosystems	Швейцарія	оптична+лідар	4K	Опціонально	40
LeicaBLK2FLY	Leica Geosystems	Швейцарія	Лідар	0.5 точок/см ²	Вбудований	<20 (40 без GNSS)
Zenmuse P1	DJI	КНР	Оптична	45MP	Опціонально	30 / 50 (гор/верт.)
Zenmuse L3	DJI	КНР	Оптична+лідар	100MP	Лідар	30 / 40 (гор/верт.)

Джерело: підготовлено авторами



Рисунок 5: Leica BLK2FLY – лазерний сканер з можливістю захвату до 420000 точок за секунду

Джерело: (Leica, 2025)



Рисунок 6: Безпілотний гелікоптер Skeldar V-200 від SAAB з встановленою оптичною системою Trakka Cam

Джерело: матеріали з офіційного веб-сайту TrakkaSystems

Програмне забезпечення (ПЗ) для обробки фотограмметричних даних розробляється як компаніями-виробниками обладнання, так і окремо. Широко використовуються інтегровані в ПЗ елементи ШІ, які дозволяють вирішувати задачі великої трудомісткості – приведення експозиції до єдиного зразка, зшивання, фототрансформацію (Бутенко, 2025). Так, наприклад програмний продукт BLK2FLY Live від Leica Geosystems забезпечує планування і проведення політних завдань, захоплення хмари точок з координатною прив'язкою, легку адаптацію до місцевості з можливістю ручкої корекції польотного завдання безпосередньо в польоті. Кінцевим результатом роботи програми є 3-D модель об'єкту з щільної хмари координатних точок.



Рисунок 7: Приклад створеної хмари координатних точок з допомогою лідарного сканера Leica BLK2FLY

Джерело: матеріали з офіційного веб-сайту Leica Geosystems

Програмний пакет PIXPRO (Литва) надає комплекс інструментів для обробки фотографій, створення на їх базі щільних хмар точок, карт висот і сіток, генерації 3-D моделей об'єктів, ортофотопланів, а також проведення точних вимірів на їх основі. Результатом роботи програми є цифрова модель рельєфу (DEM – Digital Elevation Model), що відображає “голу” поверхню землі, або цифрова модель поверхні (DSM – Digital Surface Model), що включає верхівки дерев, дахи будинків та інші перешкоди. Через планувальник польоту задається маршрут (орбіта, сітка), по якому коптер виконує обліт і знімання об'єктів, планувальник сумісний з усіма найбільш розповсюдженими системами комерційних БПЛА. Обробник зображень дозволяє проводити операції зі знімками по їх нормалізації, приведення до одного масштабу, фототрансформування, зшивання. Також пакет працює з усіма типами метаданих, підтримує функції калібрування по даним відомих типів камер і об'єктивів.

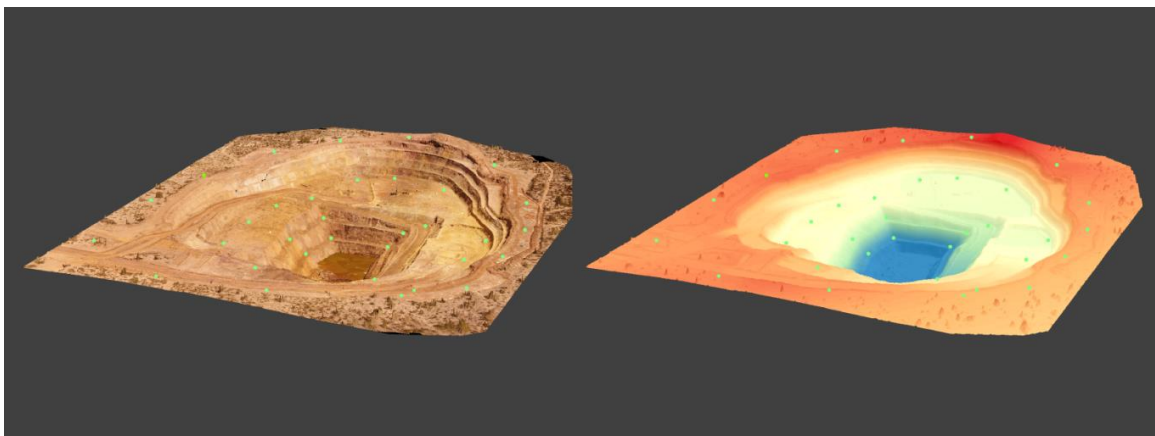


Рисунок 8: Приклад створеної в PIXPRO 3-D моделі кар'єру і гістограми DEM

Джерело: матеріали з офіційного веб-сайту PIXPRO

Китайський концерн DJI (виробник широкої лінійки спеціалізованих БПЛА) розробив програмний пакет DJI Terra як середовище для картографування і 3-D моделювання. За допомогою інструментів, що входять до пакету, можливо проведення всіх етапів створення карт: планування польоту, завантаження і обробка зображень, їх зшивання, прив'язка до контрольних точок, створення щільної хмари точок. Як результат користувач отримує ортофотоплан, мапу або 3-D модель об'єкта. Також підтримуються вимірювання (лінійні, площі, об'єму) та координатна прив'язка. Створення 2-D ортомозаїк місцевості можливе в автоматичному режимі вже під час польоту.

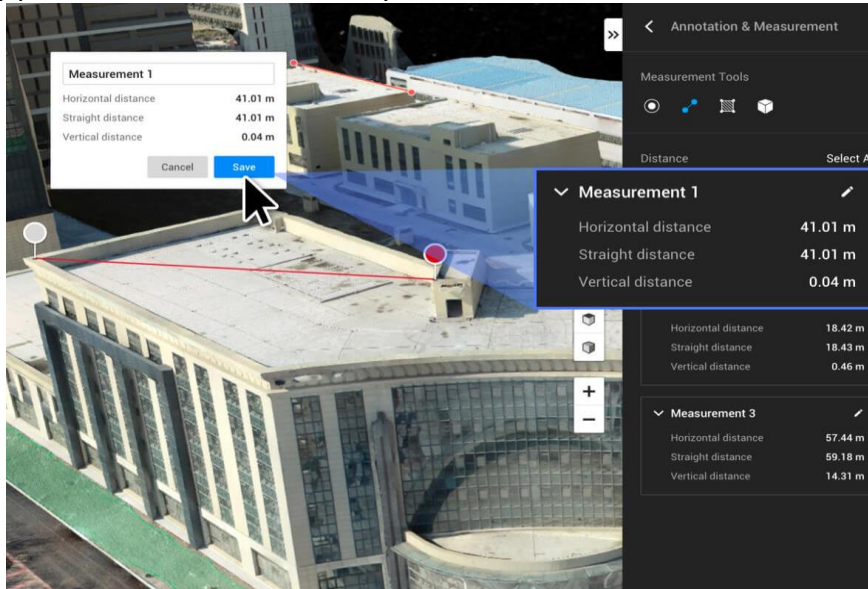


Рисунок 9: Приклад лінійних вимірювань на 3-D моделі будівлі в DJI Terra
Джерело: матеріали з офіційного веб-сайту DJI Terra

Швейцарська компанія Pix4D представляє на ринку однойменний програмний продукт, що спеціалізується на забезпеченні наземного і безпілотного картографування. Пакет забезпечує повний цикл обробки масивів зображень, створення на їх базі ортофотопланів, щільних хмар точок і 3-D моделей, підтримує широкий спектр вхідних даних, в тому числі термальні зображення. Вихідні дані можуть бути представлені у вигляді ортомозаїк, векторних карт, DSM/DEM, хмар точок або текстурованих моделей. Для обробки зображень використовуються методи комп'ютерного зору.



Рисунок 10: Приклад створеної за допомогою пакету Pix4D 3-D моделі, з текстурним заповненням

Джерело: матеріали з офіційного веб-сайту Pix4D

Використання систем безпілотної фотограмметрії дозволяє швидко вирішувати такі завдання, пов'язані з діяльністю Держспецтрансслужби: складання детальних карт місцевості з визначенням рельєфу та побудова тривимірних моделей місцевості для візуалізації існуючої на даний момент ситуації; складання тривимірних моделей об'єктів (мостів, естакад, будівель тощо) як основи для розробки проєктів з їх ремонту або реконструкції; проведення порівняльного моніторингу стану об'єктів за зміною взаємного положення контрольних точок (прогини мостів, зсув естакад, насипів, захисних споруд); документування місць пошкоджень об'єктів при первинних (попередніх) обстеженнях для визначення наступних етапів детального обстеження та фіксація небезпечних зон; контроль правильності виносу проєктних точок в натурне середовище; розрахунок об'ємів запасів сипучих матеріалів та розрахунки об'ємів земляних робіт при підготовці будівельних майданчиків; оперативний контроль на етапах проведення робіт з будівництва або відновлення об'єктів.

Основними проблемами, що виникнуть при впровадженні цього методу в діяльності Держспецтрансслужби, є наступні: недостатня кількість персоналу з необхідними компетенціями в роботі з фотограмметричним обладнанням і програмним забезпеченням; необхідність придбання обладнання і необхідного програмного забезпечення; відсутність нормативної і методичної бази для проведення робіт з застосуванням цього методу.

Застосування георадарів для вишукувальних робіт при проєктуванні будівництва і відновлення об'єктів. Проєктування і організація робіт з будівництва або відновлення об'єктів ЄТСУ пов'язана з інженерними вишукуваннями, які проводяться для вивчення природних і техногенних умов територій (ділянок) об'єктів будівництва, розроблення прогностів взаємодії об'єктів будівництва з навколишнім середовищем, розроблення всіх видів проєктів. Згідно державних будівельних норм А.2.1-1-2008 (ДБН, 2008) інженерні дослідження поділяються на такі види: інженерно-геодезичні; інженерно-геологічні; геотехнічні та інженерно-гідрогеологічні; інженерно-гідрометеорологічні; вишукування для раціонального використання та охорони навколишнього середовища; спеціалізовані.

Найбільш трудомісткими видами робіт є інженерно-геологічні (гідрогеологічні) і геотехнічні. Для проведення обстежень забезпечується доступ до геологічного масиву за допомогою улаштування траншей, шурфів, буріння свердловин з відбором зразків керну. Ці роботи проводяться для отримання інформації про склад ґрунтів і умови їх залягання, фізичні властивості ґрунту (щільність, схильність до просідання, вологість, питоме зчеплення, пластичність, плинність, межа міцності, пористість, кут внутрішнього тертя, модуль деформації, гранулометричні властивості тощо), глибину залягання ґрунтових вод, потужність водоносних горизонтів та їх хімічний склад, а також визначення наявності і складання схем комунікацій (якщо про них немає інформації). Мінімальна кількість гірничих виробок і їх глибина регламентується державними будівельними нормами (ДБН А.2.1-1, 2008) і збільшується з ростом розмірів будівлі, а також складності геологічних умов.

Розвиток електроніки дозволив створити апаратуру радіочастотного сканування ґрунту, більш відому як георадари, і дати поштовх для швидкого розвитку георадарного методу інженерно-геологічних досліджень. Перше застосування даного методу зафіксоване в 1920 роках для дослідження льодовиків в Альпах. В 50-60 роках минулого сторіччя підземна радіолокація досліджувалась як перспективний метод в арміях США, Німеччини та Великобританії. Практичне застосування зафіксоване також у війні у В'єтнамі в 1960 роках, для пошуку підземних тунелів і ходів. В 1970-х роках георадарний пошук застосовувався в цивільних сферах діяльності: археологія, геофізика, дослідження ґрунтів. В Україні цей метод вже у 2008 році рекомендується як допоміжний для проведення робіт для досліджень рельєфу покривлі скельних ґрунтів, встановлення меж між шарами різного літологічного стану, пошуку місць розташування, глибини залягання і форми локальних неоднорідностей типу зон тріщинуватості та тектонічних порушень, карстових порожнин і підземних виробок, льоду,

сильнольдистих ґрунтів, водяних лінз, комунікацій типу тунелів, труб, кабелів, підземних ходів і камер поховань (Левашов, 2011).

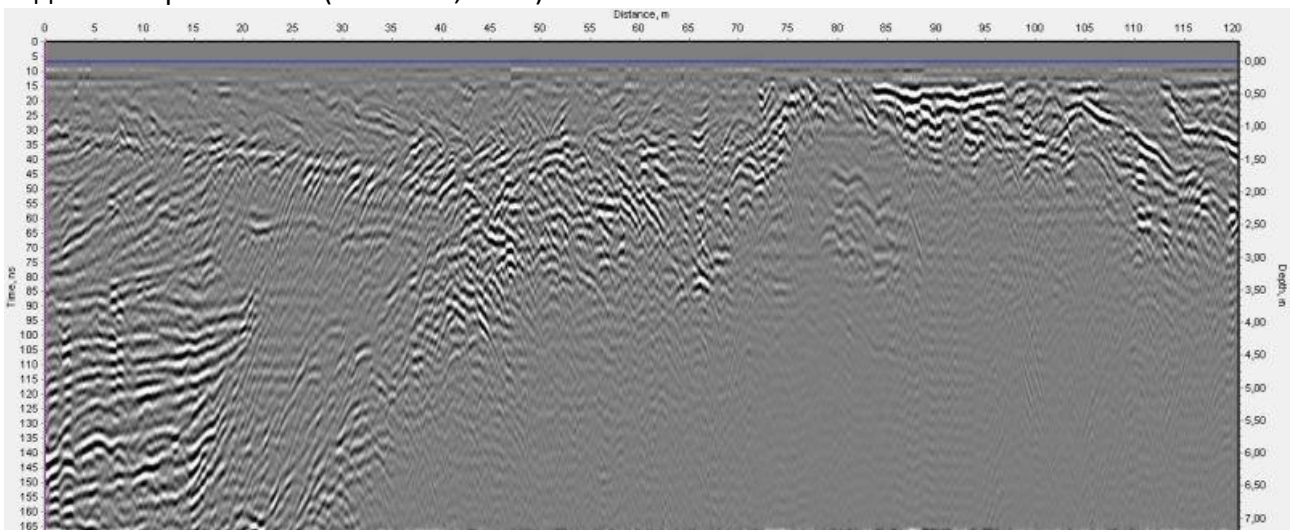


Рисунок 11: Приклад профілю сканування масиву з метою пошуку розшарування порід.
Георадар VIY5-125 (Україна)

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами вебсайту Transient Technologies

Фізичний принцип методу оснований на ефекті відбиття електромагнітних хвиль високої частоти від неоднорідностей масиву ґрунту. Робоча частота електромагнітних хвиль, що використовуються в георадарах, лежить в межах 50-1500 МГц. Найбільшу глибину проникнення мають георадари з низькими робочими частотами (до 30 м при 50-70 МГц), а з ростом частоти максимальна глибина зменшується до 0,5-1 м, але збільшується роздільна здатність, яка на максимальних глибинах становить 1,5-2 м, а на мінімальних 0,02-0,05 м. Передавальна антена випромінює короткі імпульси, які проникають в товщу масиву і відбиваються від всіх елементів, але відбиття від різних по щільності і електропровідності елементів відбувається з різною інтенсивністю. Крім того, відбувається поглинання і заломлення хвиль.

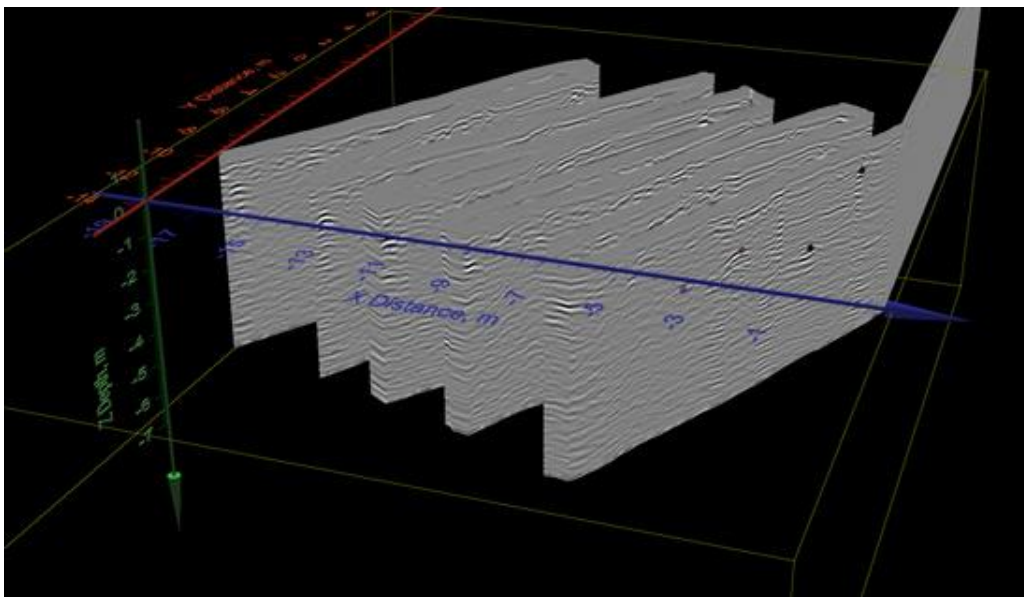


Рисунок 12: Приклад синтезування 3-D моделі масиву з розрізів

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами вебсайту Transient Technologies

Гомогенний масив відбиває радіохвилі однаково по всій товщині, і до приймальної антени доходять відбиті імпульси з рівномірним затуханням в часі, тобто по товщині масиву. При наявності неоднорідності відбитий від неї імпульс буде вищим за рівнем (або навпаки, меншим – при пустотах) від загального. Скануючі сигнали (“траси”) повторюються з частотою до 150 трас на секунду. При переміщенні датчика вздовж масиву сукупність відбитих зареєстрованих сигналів створює картину вертикального розрізу масиву. При зміщенні датчика вбік і повторенні сканування розрізи накопичуються і дають змогу створювати 3-D модель масиву ґрунту.

На даний час на ринку представлений доволі широкий ряд георадарних сканерів з різними характеристиками, і, відповідно, призначених для вирішення різних задач. Це вироби таких відомих фірм, як Leica Geosystems (Швейцарія), GSSI (Нью Гемпшир, США), Geoscanners (Швеція), MALA (Швеція), Geozondas (Литва), Transient Technologies (Україна), SPX (США), EasyRad (Україна). Дані найбільш поширених георадарів наведені в таблиці 3.

Таблиця 3: Порівняння основних технічних характеристик георадарів, доступних на ринку України

Назва	Виробник	Країна	Робоча частота, МГц	Глибина сканування, м	Роздільна здатність, мм	Вага датчика, кг
DS4000	Leica Geosystem	Швейцарія	200/900	4	>40	20
DS2000	Leica Geosystem	Швейцарія	250/700	2	20	27
3200MLF	GSSI	США	16-80	0-50	4000	23
3207F	GSSI	США	100	0-30	2000	26
62300XT	GSSI	США	2300	0-0,6	5	0,75
SPG2309	Geoscanners	Швеція	390	2,5/3,0	20	3,35
MIRA Compact	MALA	Швеція	500	3,0	20	42
VIY5-070	Transient Technologies	Україна	70	<30	<2000	36+36
VIY5-125	Transient Technologies	Україна	125	<15	900	22
VIY5-300	Transient Technologies	Україна	300	<8	300	8
VIY5-37	Transient Technologies	Україна	300/700	<8	120/300	20,5
VIY5-600	Transient Technologies	Україна	600	<3,5	140	1,8
VIY5-1500	Transient Technologies	Україна	1500	<0,5	30	0,6
RD1000	SPX	США	500	0-8	200	23
GPR20-400	EasyRad	Україна	20-400	24	100	1,5
GPR500	EasyRad	Україна	500	8	100	2,8

Джерело: підготовлено авторами

Найпоширенішими задачами, які ефективно вирішуються за допомогою георадарів: пошук та локалізація, складання схем комунікацій (кабельні лінії, трубопроводи, підземні колектори, підводні комунікації); пошук витоків в трубопроводах;

пошук та картування підземних споруд та заглиблених частин надземних будівель (розташування та глибина залягання фундаментів, паливних полів, підвалів, бункерів).

пошук неоднорідностей бетонних конструкцій (тріщин, проломів, промоїн дамб);

пошук пустот, промоїн, зменшень щільності, просідань ґрунту під спорудами, дорожнім полотном;

обстеження залізобетонних конструкцій (пошук і локалізація армуючих стрижнів, пошук тріщин і місць зменшення товщини бетону, розшарувань);

пошук і дослідження льодових прошарків, водяних пластів і лінз, обводнених ділянок;

дослідження властивостей ґрунту для проектування об'єктів будівництва (виміри товщини шару наносних порід, пошук неоднорідностей, залишків старих будівель, поховань);

гірничі дослідження (пошук та картування розташування пластів з неглибоким заляганням, пошук підземних водосховищ та водовмісних пластів, небезпечних зон;

спеціальні задачі (пошук поховань, схованок, незаконних врізок в трубопроводі тощо)

(Правда, 2015, с.49).

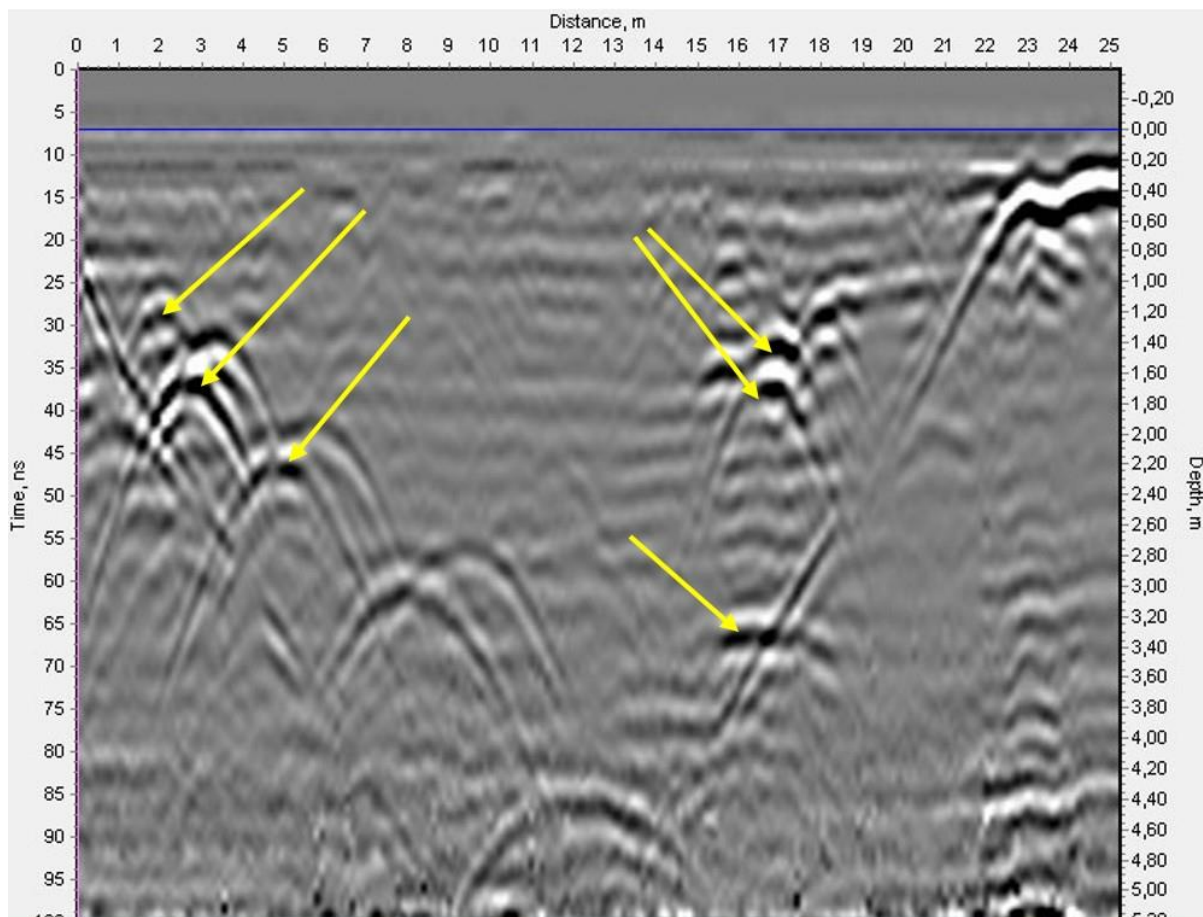


Рисунок 13: Приклад використання георадару для пошуку комунікацій.

Стрілками показані місця характерних сигналів від труб

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами вебсайту [Transient Technologies](http://www.transienttechnologies.com)

Поєднання георадарних технологій пошуку з безпілотними апаратами (БПЛА, НРК) дає нові можливості для проведення досліджень. Істотними є такі переваги, як безпека оператора, швидкість і стабільність маршруту сканування. Додається така можливість використання, як безпечний для оператора пошук ВВП, в тому числі з неметалевим корпусом, і автоматичне складання карт мінних полів з координатною прив'язкою.



Рисунок 14: Приклад встановлення георадарного модуля MALA на гексакоптер
Джерело: за матеріалами вебсайту MALA

Відповідно до завдань Держспецтрансслужби можливі наступні варіанти використання технологій георадарного пошуку.

Стосовно відбудови об'єктів єдиної транспортної структури України:

обстеження з метою встановлення реального технічного стану існуючих об'єктів (стан фундаментів, цілісність бетонних конструкцій, відсутність пустот і просідань під шляховим полотном, промії дамб);

обстеження земельних ділянок під будівництво об'єктів на етапі проектування з метою зменшення об'ємів інженерно-геологічних і геотехнічних вишукувань;

неруйнівний контроль на етапах проведення робіт (вимірювання товщин баластного шару і глибини залягання конструкцій, якості ущільнення ґрунту і баласту під дорожнім полотном і фундаментами);

пошук арматури в залізобетонних конструкціях і вимір кроку її закладення.

Стосовно капітального будівництва і реконструкції об'єктів і споруд загальновійськового та спеціального призначення:

обстеження і картування земельних ділянок, із зазначенням літологічних особливостей, дослідження ділянок зі складними геологічними умовами для встановлення можливості будівництва, оцінка несучої спроможності ґрунту, збирання даних для проектування фундаментів;

складання або уточнення схем підземних комунікацій на існуючих ділянках і об'єктах, пошук і трасування комунікацій, на які документація відсутня;

обстеження існуючих об'єктів з метою визначення несучої спроможності і можливості проведення реконструкції;

контроль на етапах проведення робіт.

Стосовно виявлення та/або очищення об'єктів та місцевості (водних акваторій) від вибухонебезпечних предметів:

безпосереднє застосування георадарів для пошуку ВВП на місцевості, в тому числі у виконанні з неметалевим корпусом;

створення пошуково-тральних апаратів для дистанційного пошуку з одночасним знешкодженням ВВП;

повітряне зондування місцевості за допомогою георадарів, встановлених на БПЛА. Автоматичне картографування мінних полів з координатною прив'язкою;

пошук глибинних вибухових закладок, прихованих тунелів, схронів зі зброєю.

Стосовно виконання інших завдань:

пошук місць поховань, знищених фортифікаційних споруд, засипаної або затопленої техніки;

пошук водоносних пластів, що можуть потенційно використовуватися як джерела водопостачання.

Основна проблематика для початку використання даної технології в сфері діяльності Держспецтрансслужби:

недостатня кількість підготовлених фахівців з досвідом роботи;

значна вартість обладнання і програмного забезпечення;

на етапах інженерно-геологічних і геотехнічних вишукувань необхідність поєднання даної технології з традиційними методами, що створює ілюзію “непотрібності” даного методу, хоча зі збільшенням масштабів будівництва її переваги очевидні.

Застосування сучасних методів досліджень металокопункцій для обстеження об'єктів (мостів, вантажопідйомних механізмів) і прогнозування їхнього залишкового ресурсу. Проблематика визначення залишкового ресурсу металокопункцій, які працюють зі змінним навантаженням, стоїть перед інженерами і науковцями з тих часів, коли були побудовані перші споруди зі сталі і залізобетону.

Інфраструктура ЄТСУ складається з великої кількості мостів, естакад, шляхопроводів, які мають за основу металеві конструкції (МК). Крім того, в частинах Держспецтрансслужби перебуває велика кількість підйомної і спеціальної техніки, нормативний термін служби яких вплив або впливе найближчим часом. Подовження строку служби таких об'єктів вимагає проведення їх ретельного обстеження і складання висновку про можливість продовження експлуатації на визначений строк, проведення ремонту з метою відновлення заданих технічних характеристик або проведення демонтажу і утилізації, якщо ремонт з метою подовження строку служби є недоцільним. Порядок обстеження будівель та споруд регламентується (Порядок, 2017), а машин, механізмів і устаткування підвищеної небезпеки - Порядком проведення технічного огляду (Порядок проведення, 2004). В обох документах є вимоги проведення неруйнівного контролю (далі – НК) металокопункцій для визначення їх технічного стану. Методи НК розрізняються за фізичними принципами, на яких вони базуються, а також чутливістю (роздільною здатністю), складністю проведення і інтерпретації результатів.

Перелік методів НК з основними характеристиками наведений в таблиці 4.

Таблиця 4: Перелік методів неруйнівного контролю і їх основні характеристики

Назва методу, умовне позначення	Фізичний принцип	Застосування	Роздільна здатність	Особливості
Візуально-оптичний (візуально-вимірвальний), VT	Органолептичний, з використанням оптичних приладів	Пошук дефектів в металі і інших матеріалах. Тільки поверхові дефекти (тріщини, дефекти зварних швів, дефекти геометрії деталей, корозія). Первинне обстеження відповідальних деталей, обстеження невідповідальних вузлів і деталей	0,1-0,05 мм без оптичних приладів, до 1 мкм з оптичними приладами	Найпоширеніший метод. Недороге обладнання, простота застосування і інтерпретації результатів.
Ультразвуковий, UT	Реєстрація відбитих	Пошук дефектів в металах і неметалевих матеріалах,	0,01-0,001 мм	Широко поширений метод.

Назва методу, умовне позначення	Фізичний принцип	Застосування	Роздільна здатність	Особливості
	ультразвукових хвиль від неоднорідностей в металі	зварних швах. Поверхневі, підповерхневі і внутрішні дефекти (тріщини, каверни, несплавлення). Обстеження відповідальних деталей і з'єднань. Ультразвукова товщинометрія.		Помірна вартість обладнання. Середня складність інтерпретації.
Метод акустичної емісії, АТ	Реєстрація пружних хвиль, випромінюваних матеріалом при виникненні та розвитку в ньому дефектів (тріщин, пластичних деформацій)	Пошук дефектів в металах і неметалевих конструкціях. Обстеження трубопроводів, кранів, цистерн, складних об'єктів, з швидким пошуком місць локалізації дефектів. Можливість прогнозування залишкового ресурсу.	Пошук місць локалізації дефектів, $\pm 1-100$ мм	Висока вартість обладнання і ПЗ. Висока складність інтерпретації без спеціального ПЗ.
Капілярний, РТ	Проникнення в тріщини спеціального пенетранту з подальшим проявленням	Пошук тріщин поверхневого розташування в будь-яких матеріалах, будь-якої форми. Контроль зварних швів. Контроль труб і посудин під тиском.	0,1 мкм	Широко поширений метод. Низька вартість. Просте застосування і інтерпретація.
Рентгенографічний контроль, промисловий радіаційний контроль, РТ	Проникнення рентгенівських променів або потоку гамма-частинок через структуру матеріалу і реєстрація неоднорідностей на спеціальній плівці	Пошук тріщин і інших дефектів в зварних швах і тілі деталей. Контроль відповідальних вузлів і деталей.	1-2% Від товщини деталі	Широко поширений метод. Середня вартість. Проста інтерпретація. Небезпечна при застосуванні.
Вихорострумний контроль, ЕТ	Наведення вихорових струмів в матеріалі, спотворення його на дефектах і реєстрація датчиком спотворення	Пошук тріщин, розшарувань, сторонніх включень в металах. Контроль прокату, листового матеріалу, поковок, осей, рейок, труб. Контроль якості захисних покриттів.	30 мкм. Чутливість знижується зі збільшенням глибини	Широко поширений метод. Низька вартість, проста інтерпретація. Висока швидкість контролю.
Магнітопорошковий метод, МТ	Наведення постійного магнітного поля в металі, реєстрація концентрацій поля на краях тріщин за допомогою магнітного порошку	Пошук поверхневих і підповерхневих тріщин в металах з феромагнітними властивостями (сталі). Контроль після виготовлення і в процесі експлуатації.	20 мкм.	Широко поширений метод. Низька вартість, проста інтерпретація.
Магнітно-коерцитивний метод, МТ	Вимірювання напруженості магнітного поля, необхідної для повного розмагнічування попередньо намагніченого до насичення зразка (коерцитивної сили).	Оцінка напружено-деформованого стану металоконструкцій за кореляцією з коерцитивною силою H_c . Метод дозволяє виявляти зони концентрації напружень, оцінювати фізичне старіння металу, отримувати дані для прогнозування залишкового ресурсу.	-	Набуває поширення. Помірна вартість. Інтерпретація потребує кваліфікованого персоналу.

Джерело: підготовлено авторами

Класичний підхід до визначення залишкового ресурсу металокопструкцій полягає в розрахунку їх несучої здатності з урахуванням змін, які виникли в процесі експлуатації – корозійний і механічний знос, виникнення та розвиток тріщин, деформації (випадкові і експлуатаційні), внесення змін в копструкцію (рекопструкція, модернізація), проведення ремонтів і їх особливості (ремонт з заміною основних вузлів, без заміни). На основі цих даних вираховується фактична несуча здатність. Якщо вона задовольняє вимогам по нормативному запасу міцності для розрахункових навантажень, строк служби даної копструкції подовжується на визначений нормативною документацією термін. При зниженні несучої здатності приймається рішення або про проведення ремонту з її відновленням, або про зниження навантаження (при можливості), або про припинення експлуатації. Такий підхід має декілька недоліків, основними з яких є великий об'єм розрахунків при визначенні залишкової несучої здатності, неможливість точного розрахунку втрат несучого перерізу копструкцій внаслідок зносу, відсутність або неповнота інформації про кількість циклів навантаження і їх інтенсивність. Руйнування копструкцій відбувається як при перевищенні допустимого розрахункового навантаження (перевищення межі міцності), так і при накопиченні втомних дефектів від навантажень циклічної дії, значно менших від розрахункового.

Для запобігання втомним руйнуванням вузлів металокопструкцій, які відслужили нормативний строк, проводять спеціальні дослідження металу з метою оцінки напружено-деформованого стану.

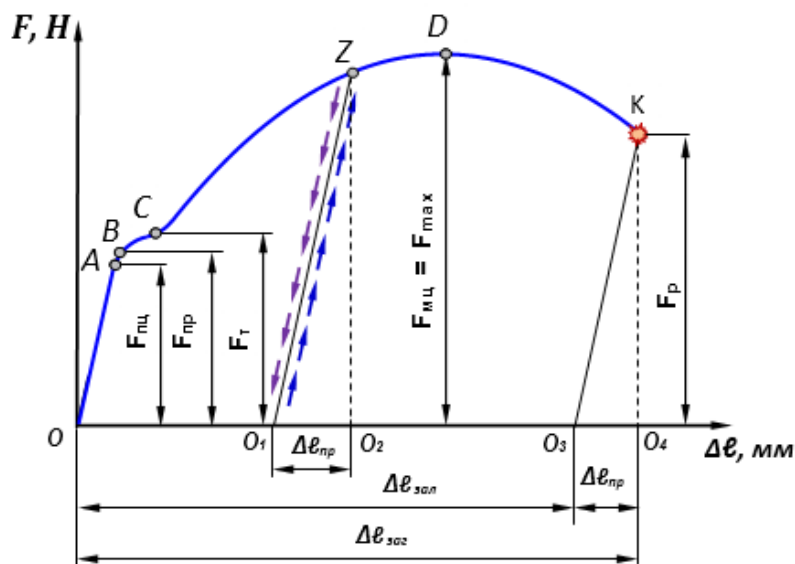


Рисунок 15: Діаграма напруження – деформації для копструкційної сталі

Джерело: підготовлено авторами

На рисунку 15 показана діаграма відносних деформацій в копструкційній сталі Δl при прикладенні зусилля F . Нормальна робота копструкції забезпечується на ділянці O-A. Це ділянка, де метал деформується пропорційно прикладеному навантаженню (за законом Гука). Точка B – межа, до якої можливе повернення початкових розмірів зразка при зниженні навантаження, тобто межа пружності. На ділянці B-C метал починає “текти”, збільшення відносної деформації проходить без суттєвого збільшення напруження, деформації мають незворотній характер. Потім зі збільшенням навантаження починається ділянка C-D, на якій пластичні властивості сталі погіршуються, але відбувається об'ємне зміцнення. При зниженні навантаження відбувається зменшення відносної деформації (відтинок Z- O_1), але при досягненні точки D (межа міцності) деформація відбувається навіть при зменшенні навантаження, до руйнування матеріалу. Для коректного вирішення задачі по встановленню залишкового ресурсу металокопструкції потрібно знати, на якому відтинку діаграми знаходиться метал розрахункових вузлів. Якщо метал деталі

(або на окремих ділянках деталі, в місцях концентрації напружень) перейшов между текучості (В-С), подальша робота буде супроводжуватися виникненням тріщин, пластичних шарнірів, з подальшим збільшенням інтенсивності їх виникнення через зменшення несучого перерізу, і до повного руйнування вузла.

При обстеженні металоконструкцій традиційними методами (візуально-оптичний, ультразвуковий, магнітопорошковий, капілярний) знаходять місця локалізації пошкоджень (тріщин, надривів, деформацій). Метал в цих зонах, як правило, зазнає найбільших втомних навантажень, і тому потребує додаткових обстежень для оцінки напружено-деформованого стану. Досить гарні результати дає магнітно-коерцитивний метод дослідження напружено-деформованого стану металоконструкцій, який використовує взаємозв'язок і кореляційні залежності магнітних, електромагнітних і механічних властивостей сталей і сплавів, які визначаються структурним станом, хімічним і фазовим складами речовини. Цей метод може успішно застосовуватися для контролю напружено-деформованого стану металу, рівня пластичної деформації і втомних пошкоджень найбільш навантажених вузлів металоконструкцій, які працюють в умовах тривалого циклічного навантаження. З 2007 року метод використовується як один з методів НК при експертному обстеженні вантажопідійомних кранів (ОМД 00120253.001, 2005), а з 2012 року він є обов'язковим при обстеженні технічного стану порталних кранів, які відпрацювали нормативний строк служби (ОМД 22460848.003, 2012).

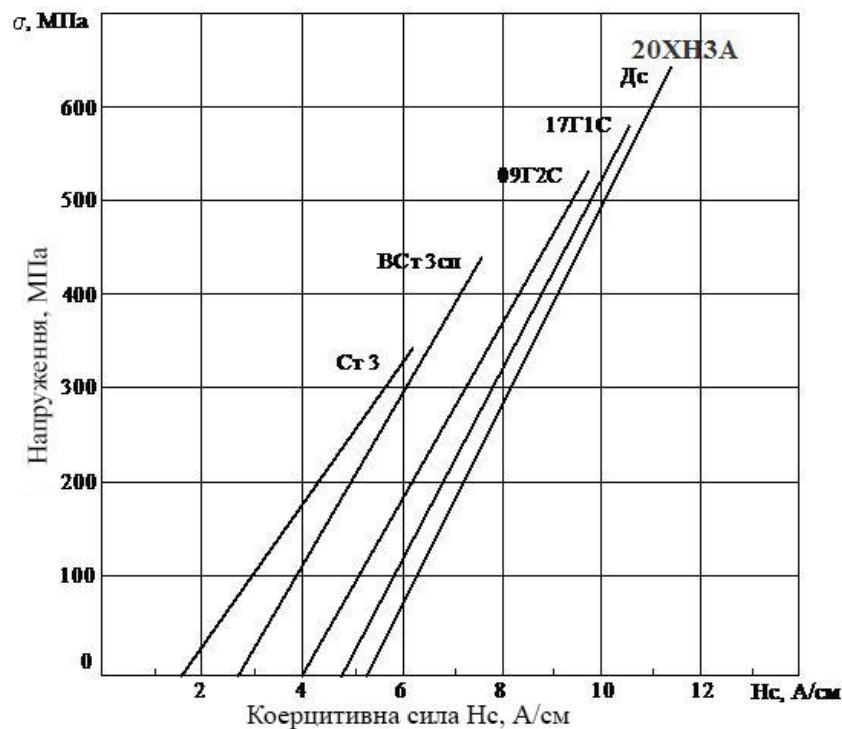


Рисунок 16: Діаграма залежностей коерцитивної сили від напруження для розповсюджених марок конструкційної сталі

Джерело: підготовлено авторами

В Україні розроблений і впроваджений у використання з відповідним метрологічним супроводженням магнітний структуроскоп КРМ-ЦК-2М (розробник НВФ "СНР"), для діагностування об'єктів підвищеної небезпеки (зовнішній вигляд показаний на рисунку 17).



Рисунок 17: Зовнішній вигляд магнітного структурокопу КРМ-ЦК-2М, з датчиком
Джерело: підготовлено авторами за матеріалами НВФ “СНР”

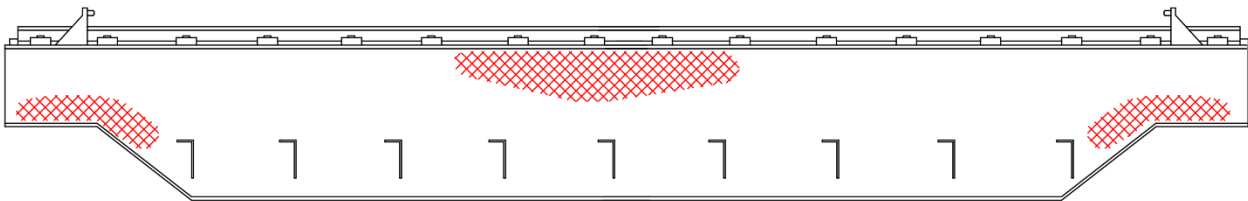


Рисунок 18: Схематичне зображення локалізації місць з найбільшою коерцитивною силою H_c на вертикальній стінці головної балки мостового крана (показані червоним)
Джерело: підготовлено авторами

На рисунку 16 наведені залежності коерцитивної сили H_c від рівня напруження в металі. Підвищення H_c в порівнянні з вихідним значенням H_{0c} свідчить про зростання залишкових внутрішніх напружень і деформацій. З переходом в пружно-пластичний стан ($H_{\max} = H_{Tc}$) метал починає втрачати запас пластичності, який остаточно вичерпується на стадії втрати міцності і переходу до руйнування, коли ($H_{\max} = H_{Bc}$). Тому весь прогнозований термін роботи металоконструкції може бути розділений на три етапи по мірі накопичення залишкових деформацій і мікрошкоджень в найбільш навантажених її елементах:

1. Режим “надійної” експлуатації при $H_{\max} \ll H_{Tc}$, коли метал працює в пружній області діаграми навантаження і максимальні напруження не перевищують фізичної межі пружності сталі. Металоконструкція експлуатується в звичайному режимі, з номінальними навантаженнями. Контроль згідно регламентованих нормативів.

2. Режим “контрольованої” експлуатації при $H_{\max} \leq H_{Tc}$, коли окремі елементи металоконструкції працюють в пружно-пластичній області діаграми навантаження, а максимальні залишкові напруження досягають фізичної межі плинності сталі. При роботі в даному режимі експлуатації необхідні:

організація постійного візуального контролю за елементами металоконструкцій, що потрапили в область пружно-пластичних деформацій;

при проведенні чергових повних технічних оглядів (ПТО) проведення магнітно-коерцитометричного контролю з фіксацією результатів замірів H_c в паспорті об’єкта, що дозволить відстежувати динаміку розвитку напружено-деформованого стану металу.

3. “Критичний” режим експлуатації при $H_{Tc} \leq H_{\max} \leq H_{Bc}$, коли окремі елементи об’єкта працюють в пружно-пластичній та пластичній областях діаграми навантаження і максимальні напруги перевищують межу текучості сталі, в результаті чого з’являються втомні тріщини. При роботі в “критичному” режимі необхідно:

провести посилення або заміну елементів, у яких $H_{\max} \geq 0,9 H_{Bc}$, оскільки ризик руйнування їх зростає в кілька разів;

виключити можливість перевантаження елементів і об'єкта в цілому, а при можливості – знизити робочі навантаження;

знизити інтервали між обстеженнями;

планувати заходи з виведення об'єкта з експлуатації і його заміни.

При наявності інформації про динаміку зростання H_{\max} , а також про інтенсивність навантажень, можна прогнозувати термін, коли МК прийде на межу критичного режиму, тобто з досить високою вірогідністю встановити залишковий ресурс МК, і запобігти її руйнуванню (Чухліб, 2020, с.10).

Метод акустико-емісійного контролю (АЕ) також набуває останнім часом поширення через можливість прогнозування залишкового ресурсу МК. Базується цей метод на реєстрації спеціальними високочутливими датчиками акустичних збуджень, що виникають при зростанні дефектів в умовах прикладення до металоконструкції робочого або випробувального навантаження. При релаксації місцевих напружень в місці концентрації (розкриття і зростання мікротріщин) виникають акустичні коливання, що мають дуже високу швидкість зростання і короткий час проходження імпульсу. Звукові імпульси реєструються датчиками, підсилюються і обробляються спеціальним ПЗ. За часом проходження сигналів від джерела до кожного датчика обчислюються координати розташування дефектів з точністю $\pm 1-100$ мм (в залежності від розмірів і складності МК). За формою сигналу також досліджуються структурні зміни в металі під напруженням. Метод потребує дуже простої підготовки до використання: у визначених розрахунком місцях МК проводиться зачистка від фарби, корозії або теплоізоляції, на зачищений метал встановлюються датчики (в залежності від складності 2, 4, на дуже складних об'єктах до 32), під'єднуються до реєструючої апаратури. Далі проводиться навантаження МК робочим або випробувальним навантаженням. В цей час апаратура реєструє імпульси і розраховує координати місць, звідки ці імпульси надійшли за різницею часу в реєстрації кожного імпульсу різними датчиками.

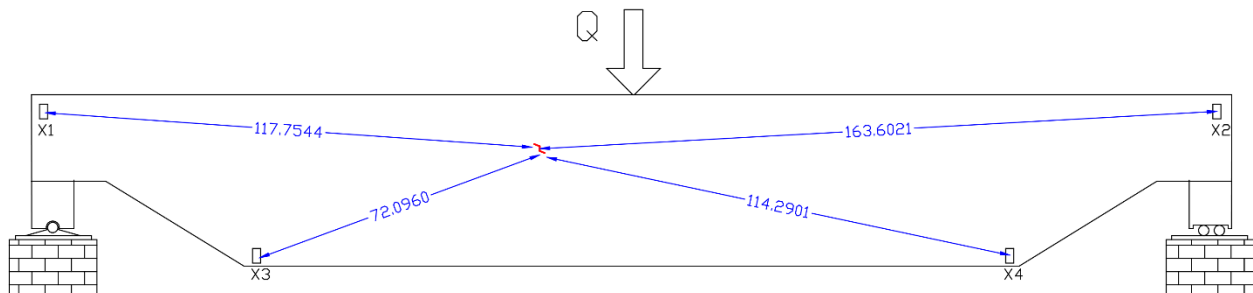


Рисунок 19: Схема розташування датчиків на вертикальній стінці прогону моста. Дефект (тріщина) показаний червоним. Сигнал від дефекту доходить до датчиків з різницею в часі

Джерело: підготовлено авторами

Реальні конструкції мають, як правило, не один дефект, тому задача ПЗ, яке проводить обробку даних, ідентифікувати дефекти, поєднати їх в кластери і показати зони концентрації дефектів. Далі проводиться або більш детальний контроль методом АЕ з більш щільним встановленням датчиків, або пошук тріщин традиційними методами (візуально-оптичний, ультразвуковий тощо). Такий підхід значно скорочує час проведення контролю всієї МК. На даний час таким чином обстежуються паро- і продуктопроводи, посудини під тиском, цистерни, МК вантажопідіймальних кранів (Скальський, 2016, с. 59).



Рисунок 20: АЕ-контроль посудини під тиском. ТОВ СП “Товариство технічного нагляду “ДІЕКС”, м. Дніпро

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами ТОВ “ДІЕКС”

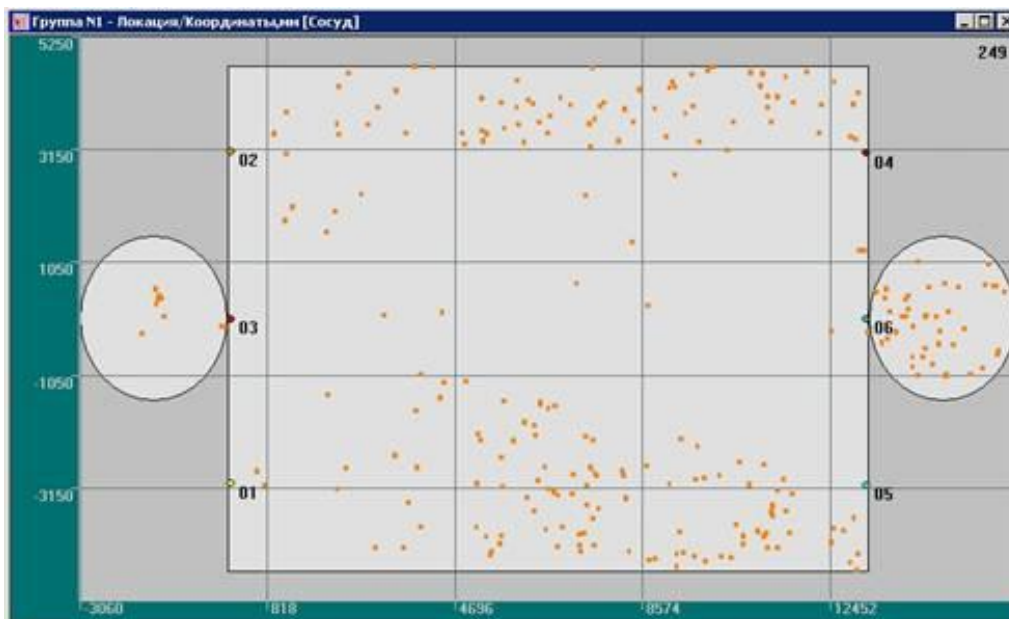


Рисунок 21: Схема розташування сигналів АЕ на розгортці посудини під тиском

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами ТОВ “ДІЕКС”

Головні переваги методу АЕ перед традиційними:

об’єм підготовчих робіт значно менший, ніж для традиційних методів (наприклад, зняття теплозахисту і фарби на посудинах потрібне тільки в місцях розташування датчиків, при ультразвуковому контролі – зачищається вся поверхня);

сигнали надходять від дефектів, що розвиваються під дією експлуатаційних навантажень, тобто найбільш небезпечних з точки зору можливості руйнування;

швидкий пошук місць розташування дефектів;

відсутність необхідності повної зупинки роботи об'єкта, призупинення роботи необхідна тільки на період встановлення і зняття датчиків.

Застосування методу АЕ для контролю відповідальних МК почалося відносно недавно, спочатку за його допомогою обстежувались продуктопроводи високого тиску, що мають велику довжину, і контроль яких традиційними методами займав багато часу. З удосконаленням апаратури і ПЗ почали розроблятися методики обстеження інших металоконструкцій, таких як посудини під тиском, підйомні споруди, мости, обладнання хімічної промисловості.

Багаторічні дослідження фахівців Інституту електрозварювання ім. Патона (м. Київ) за тематикою технічної діагностики МК дозволили створити комплекс апаратури і ПЗ ЕМА-3 і ЕМА-4, що використовує метод акустичної емісії як основу для діагностування стану об'єкту, а також прогнозування його залишкового ресурсу (Недосека, 2019, с. 3]. Цей комплекс початково створювався для постійного моніторингу складних і відповідальних об'єктів нафтогазового комплексу і хімічної промисловості, згодом були розроблені методики використання для інших галузей, підготовлена нормативна база. Розробники математичного апаратури комплексу і ПЗ винайшли спосіб швидкого обчислення координат масивів точок збудження акустичної емісії, використавши в поєднанні зі звичайним способом математичного обчислення, спосіб матричного пошуку. Крім того, математичний апарат даного ПЗ дозволяє з нормованою вірогідністю прогнозувати залишковий ресурс МК при встановленому рівні навантаження (чи кількість робочих циклів), або встановити рівень навантаження, при якому настане руйнування конструкції. Обчислювання ведуться на основі еталонів, які ПЗ створює в процесі машинного навчання для даного типу МК і марки металу. Можливе проведення як періодичних інспекцій МК з метою поетапного прогнозування залишкового ресурсу, так і безперервний моніторинг з метою попередження про перехід стану металу в критичний і запобігання аварій.

Результати

Відповідно до завдань Держспецтрансслужби, можливі наступні варіанти використання вищеописаних методів НК.

Стосовно відбудови об'єктів єдиної транспортної структури України:

застосування даних методів НК при обстеженні пошкоджених металоконструкцій об'єктів ЄТСУ з метою встановлення їх несучої здатності;

оцінка технічного стану об'єктів, що знаходяться в експлуатації (мости, естакади), прогнозування їх залишкового ресурсу;

використання при обстеженнях вантажопідйомного і спеціального обладнання (крани, підйомники, екскаватори тощо) для прискорення пошуку дефектів і оцінки напружено – деформованого стану металу (магнітно-коерцитивний метод), для подовження строку служби.

Стосовно капітального будівництва і реконструкції об'єктів і споруд загальновійськового та спеціального призначення:

застосування методів при обстеженні МК з метою оцінки можливості проведення реконструкції;

оцінка технічного стану з метою прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, котрі залишаються незмінними при реконструкції об'єкта;

пошук дефектів з метою проведення капітального ремонту для відновлення несучої здатності МК, що підлягають реконструкції.

Основні проблеми, пов'язані з впровадженням в діяльність Держспецтрансслужби даних методів НК:

висока вартість обладнання і ПЗ, особливо для методу АЕ;

високі вимоги до кваліфікації персоналу, пов'язані зі складністю інтерпретації первинних даних;

необхідність створення спеціалізованих лабораторій, їх сертифікації;

необхідність залучення фахівців з традиційних методів НК для детального обстеження МК, локалізації дефектів, уточнення даних.

Зважаючи на наявність вищезначеної проблематики, доцільно при впровадженні даних методів залучати до проведення робіт фахівців профільних установ зі сталим досвідом і наявністю необхідного обладнання на договірній основі.

Обговорення

Отримані результати підтверджують загальну тенденцію, зафіксовану в сучасних дослідженнях: інтеграція дистанційних, геофізичних і неруйнівних методів контролю суттєво підвищує ефективність оцінювання технічного стану інфраструктурних об'єктів. Водночас, на відміну від більшості зарубіжних робіт, де аналіз здійснюється у відносно стабільних умовах експлуатації, у даному дослідженні враховано специфіку функціонування Держспецтрансслужби в умовах воєнного часу, що суттєво змінює критерії ефективності технологій.

Порівняльний аналіз показав, що жодна з розглянутих технологій не є універсальною. Фотограмметрія та аерозйомка забезпечують високу оперативність і візуалізацію, але їх ефективність істотно залежить від зовнішніх факторів, зокрема впливу радіоелектронної боротьби та погодних умов. Георадарні методи, навпаки, характеризуються високою інформативністю щодо внутрішньої структури об'єктів, однак обмежені складністю інтерпретації даних і потребують поєднання з традиційними інженерно-геологічними дослідженнями. Методи неруйнівного контролю металоконструкцій демонструють високу точність і потенціал для прогнозування залишкового ресурсу, проте їх впровадження пов'язане зі значними витратами та потребою у висококваліфікованому персоналі.

Ключовим результатом є обґрунтування доцільності використання комбінованого підходу, що базується на інтеграції кількох технологій залежно від типу завдання. Запропонована багатокритеріальна модель оцінювання дозволяє формалізувати процес вибору технологій, однак її застосування має певні обмеження. Зокрема, використання експертних вагових коефіцієнтів може зумовлювати суб'єктивність результатів, а п'ятибальна шкала оцінювання — спрощувати складні технічні характеристики. Це вказує на необхідність подальшого розвитку моделі, зокрема через використання методів нечіткої логіки або аналізу ієрархій.

Важливим аспектом є розрив між швидким розвитком технологій та їх нормативним забезпеченням. Наявна нормативно-технічна база лише частково враховує можливості сучасних цифрових і автоматизованих рішень, що створює бар'єри для їх повноцінного впровадження. Крім того, домінування реактивного підходу до відновлення інфраструктури обмежує потенціал стратегічного використання отриманих даних.

Таким чином, результати дослідження підтверджують необхідність переходу від фрагментарного застосування окремих технологій до системної моделі інструментального обстеження, інтегрованої з процесами прийняття управлінських рішень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення цифрових платформ підтримки рішень, адаптацію міжнародних стандартів та оцінювання ефективності технологій у реальних умовах експлуатації.

Висновки

В результаті проведеного аналізу встановлено переваги зазначених в статті методів досліджень перед традиційними, хоча вони не набули в даний час широкого розповсюдження як в цивільній, так і у військовій сфері. Відносна складність впровадження і висока початкова вартість є основними факторами, що вимушують керівників приймати рішення про

використання традиційних методів, але в довгостроковій перспективі і при наявності великої кількості об'єктів використання новітніх технологій створює перевагу у швидкості і якості отриманих даних.

Відновлення ЄТСУ та об'єктів критичної інфраструктури, гуманітарне розмінування територій в повоєнний час після збройної агресії російської федерації буде потребувати великого об'єму робіт з обстеження цих об'єктів, проектування відновлювальних робіт і контролю за проведенням самих робіт. Впровадження даних технологій, як і будь-яких інновацій, пов'язане з необхідністю підбору, навчання та сертифікації спеціалістів, в тому числі у ВНЗ і ВВНЗ, створення спеціалізованих лабораторій, закупку необхідного обладнання і ПЗ.

Зазначені в статті технології не є єдиними в даний час новинками, наведені тільки способи отримання даних при обстеженні. Впровадження сучасних способів проектування, застосування інноваційних методів будівництва і будівельних матеріалів дозволить пришвидшити роботи з відновлення і капітального будівництва, підвищити якість, знизити їх загальну вартість, збільшити надійність і довговічність конструкцій.

Подяки

Автори висловлюють подяку колегам із Науково-дослідного центру Державної спеціальної служби транспорту – Бондар В. Ю., Шумлянському С. В. за консультаційну та технічну допомогу під час проведення досліджень.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

- Andrijanič M. B. A Western-funded drone surge could end Russia's invasion of Ukraine // Atlantic Council. 2025. 14 липня. URL: <https://www.atlanticcouncil.org/blogs/ukrainealert/a-western-funded-drone-surge-could-end-russias-invasion-of-ukraine/>
- Бутенко Є. В., Волонтир А. В., Куценко О. О. Використання штучного інтелекту при фотограмметричному опрацюванні цифрових даних // Землеустрій, кадастр і моніторинг земель. 2025. № 3. С. 68–76. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.03.07>
- Ghadarah N. S., Ayre D. A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of polymer-based composites // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 15. 6945. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156945>
- ДБН А.2.1-1-2008. Вишукування, проектування і територіальна діяльність. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва.
- Дорожинський О. Л., Тукай Р. Д. Фотограмметрія. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. 332 с.
- Левашов С. П., Якимчук Н. А., Корчагін І. Н., Піщаний Ю. М., Прилуков В. В., Якимчук Ю. Н. Оперативное картирование зон увлажнения и водоносных потоков на участке строительства новой ветки метрополитена // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики : зб. наук. праць. Київ, 2011. С. 202–212. URL: https://www.geology.com.ua/wp-content/uploads/2014/10/21_Levashov_Metro1.pdf
- Leica Geosystems. Scanning Damaged Heritage Sites in Ukraine. 2025. URL: <https://leica-geosystems.com/case-studies/reality-capture/scanning-damaged-heritage-sites-in-ukraine>

- Малов В. І., Олійник С. В. Розвиток цифрових фотограмметричних технологій у ДНВП «Геосистема» // Вісник геодезії та картографії. 2011. № 6. С. 26–28.
- Недосека С. А., Недосека А. Я., Яременко М. А., Овсиенко М. А., Бойчук О. І., Волошкевич І. Г. Особенности АЭ диагностики. Технология, аппаратура и алгоритмы // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2019. № 1. С. 3–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2019.01.01>
- ОМД 00120253.001-2005. Методика проведення експертного обстеження (технічного діагностування) кранів мостового типу : організаційно-методичний документ. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/omd_00120253.001-2005.pdf
- ОМД 22460848.003-2012. Крани порталні, крани-перевантажувачі. Експертне обстеження : організаційно-методичний документ.
- Порядок проведення обстеження прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва : постанова Кабінету Міністрів України від 12.04.2017 № 257 (редакція від 13.03.2025). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/257-2017-%D0%BF>
- Правда В. І., Мрачковський О. Д., Абрамович А. О. Георадари // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. 2015. № 818. С. 49–54. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4977/071.pdf>
- Про Державну спеціальну службу транспорту : закон України від 05.02.2004 № 1449-IV (зі змінами станом на 01.12.2025). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1449-15>
- Про затвердження Методики проведення обстеження та оформлення його результатів : наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 06.08.2022 № 144. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0898-22>
- Popular Mechanics Magazine. 1942. September. P. 33. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=xNYDAAAAMBAJ&pg=PA33>
- Safe Pro Group. Safe Pro's Artificial Intelligence Delivers 800+% Productivity Surge in Ukraine Demining Surveys According to Independent Research Presented at Leading Global Conference. 2025. 4 листопада. URL: <https://safeprogroup.com/safe-pros-artificial-intelligence-delivers-800-productivity-surge-in-ukraine-demining-surveys-according-to-independent-research-presented-at-leading-global-conference/>
- Tonelli D., Luchetta M., Rossi F., Migliorino P., Zonta D. Structural Health Monitoring Based on Acoustic Emissions: Validation on a Prestressed Concrete Bridge Tested to Failure // Sensors. 2020. Vol. 20, No. 24. 7272. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247272>.
- Скальський В. Р. Явище акустичної емісії в оцінюванні пошкодженості елементів конструкцій // Вісник НАН України. 2016. № 2. С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2016.02.059>
- Чухліб В. Л., Губський С. О. Підходи до вирішення проблем практичного застосування магнітно-коерцитивного контролю при оцінці стану кранових металоконструкцій // Теорія і практика металургії. 2020. № 2 (125). С. 10–16.
- Шумлянський С. В., Хоменко Є. В., Попрієнко С. В. Ризикоорієнтований підхід до впровадження штучного інтелекту у сфері оборони України: концептуальні засади // Military science. 2025. Vol. 3, № 3. С. 147–161. DOI: <https://doi.org/10.62524/msj.2025.3.3.11>.

References

- Andrijanič, M. B. (2025, July 14). *A Western-funded drone surge could end Russia's invasion of Ukraine*. Atlantic Council. <https://www.atlanticcouncil.org/blogs/ukrainealert/a-western-funded-drone-surge-could-end-russias-invasion-of-ukraine/>
- Butenko, Ye. V., Volontyr, A. V., & Kutsenko, O. O. (2025). *Vykorystannia shtuchnoho intelektu pry fotogrammetrychnomu opratsiuvanni tsyfrovyykh danykh* [Use of artificial intelligence in

- photogrammetric processing of digital data]. *Zemleustrii, kadastr i monitorynh zemel*, (3), 68–76. <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.03.07>
- Ghadarah, N. S., & Ayre, D. (2023). A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of polymer-based composites. *Sensors*, 23(15), 6945. <https://doi.org/10.3390/s23156945>
- DBN A.2.1-1-2008. (2008). *Vyshukuvannia, proiektuvannia i terytorialna diialnist. Inzhenerni vyshukuvannia dlia budivnytstva* [Engineering surveys for construction].
- Dorozhynskiy, O. L., & Tukai, R. D. (2008). *Fotogrammetriia* [Photogrammetry]. Lviv Polytechnic Publishing House.
- Levashov, S. P., Yakymchuk, N. A., Korchahin, I. N., Pishchanyi, Yu. M., Prylukov, V. V., & Yakymchuk, Yu. N. (2011). Operativnoe kartirovanie zon uvlazhneniia i vodonosnykh potokov na uchastke stroitelstva novoi vetki metropolitena [Operational mapping of moisture zones and groundwater flows at a metro construction site]. In *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky* (pp. 202–212). https://www.geology.com.ua/wp-content/uploads/2014/10/21_Levashov_Metro1.pdf
- Leica Geosystems. (2025). *Scanning damaged heritage sites in Ukraine*. <https://leica-geosystems.com/case-studies/reality-capture/scanning-damaged-heritage-sites-in-ukraine>
- Malov, V. I., & Oliinyk, S. V. (2011). Rozvytok tsyfrovyykh fotogrammetrychnykh tekhnolohii u DNVP “Heosystema” [Development of digital photogrammetric technologies at DNVP “Geosystema”]. *Visnyk heodezii ta kartohrafii*, (6), 26–28.
- Nedoseka, S. A., Nedoseka, A. Ya., Yaremenko, M. A., Ovsienko, M. A., Boichuk, O. I., & Voloshkevych, I. H. (2019). Osobennosti AE diagnostiki. Tekhnologii, apparatura i algoritmy [Features of acoustic emission diagnostics: Technology, equipment and algorithms]. *Tekhnicheskaiia diagnostika i nerazrushaiushchii kontrol*, (1), 3–12. <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2019.01.01>
- OMD 00120253.001-2005. (2005). *Metodyka provedennia ekspertnoho obstezhennia kraniv mostovoho typu* [Methodology for expert inspection of bridge cranes]. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/omd_00120253.001-2005.pdf
- OMD 22460848.003-2012. (2012). *Krany portalni, krany-perevantazhuvachi. Ekspertne obstezhennia* [Portal cranes and transshipment cranes: Expert inspection].
- Cabinet of Ministers of Ukraine. (2017). *Poriadok provedennia obstezhennia pryiniatykh v ekspluatatsiiu obektiv budivnytstva* [Procedure for inspection of commissioned construction objects] (No. 257, as amended 2025). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/257-2017-%D0%BF>
- Pravda, V. I., Mrachkovskiy, O. D., & Abramovych, A. O. (2015). Heoradary [Ground-penetrating radars]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnika”. Seriya: Radioelektronika ta telekomunikatsii*, (818), 49–54. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4977/071.pdf>
- Verkhovna Rada of Ukraine. (2004). *Pro Derzhavnu spetsialnu sluzhbu transportu* [On the State Special Transport Service] (Law No. 1449-IV, as amended 2025). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1449-15>
- Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2022). *Pro zatverdzhennia Metodyky provedennia obstezhennia ta oformlennia yoho rezultativ* [On approval of the methodology for inspection and documentation] (Order No. 144). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0898-22>
- Popular Mechanics Magazine*. (1942, September). 33. <https://books.google.com.ua/books?id=xNYDAAAAMBAJ&pg=PA33>
- Safe Pro Group. (2025, November 4). *Safe Pro’s artificial intelligence delivers 800+% productivity surge in Ukraine demining surveys*. <https://safeprogroupp.com/safe-pros-artificial->

[intelligence-delivers-800-productivity-surge-in-ukraine-demining-surveys-according-to-independent-research-presented-at-leading-global-conference/](#)

- Tonelli, D., Luchetta, M., Rossi, F., Migliorino, P., & Zonta, D. (2020). Structural health monitoring based on acoustic emissions: Validation on a prestressed concrete bridge tested to failure. *Sensors*, 20(24), 7272. <https://doi.org/10.3390/s20247272>
- Skalskyi, V. R. (2016). Yavyshe akustychnoi emisii v otsiniuvanni poshkodzhenosti elementiv konstruktsii [Acoustic emission phenomenon in damage assessment of structural elements]. *Visnyk NAN Ukrainy*, (2), 59–66. <https://doi.org/10.15407/visn2016.02.059>
- Chukhlib, V. L., & Hubsykyi, S. O. (2020). Pidkhody do vyrishennia problem praktychnoho zastosuvannia mahnitno-koertsytyvnoho kontroliu [Approaches to solving problems of magnetic coercive control application]. *Teoriia i praktyka metalurhii*, (2), 10–16.
- Shumlianskyi, S. V., Khomenko, Ye. V., & Popriienko, S. V. (2025). Ryzkykooorientovanyi pidkhid do vprovadzhennia shtuchnoho intelektu u sferi oborony Ukrainy: Kontseptualni zasady [Risk-oriented approach to AI implementation in defense]. *Military Science*, 3(3), 147–161. <https://doi.org/10.62524/msj.2025.3.3.11>



This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.