

Bohdan Cherniavskiy

PhD, Adjunct,

*Adjunct at the Department of Economic and Technical Science
University of Applied Science in Konin*

**DIGITAL TECHNOLOGIES
AS AN ACCELERATOR OF REMEDIATION:
A STRATEGIC VECTOR FOR THE POST-WAR
REVITALIZATION OF UKRAINE'S TERRITORY**

Summary

The monograph highlights the potential of modern digital solutions, recommended by the author for implementation to accelerate and optimize the remediation and revitalization processes of Ukraine's war-affected territories. Integrating technologies such as Geographic Information Systems (GIS), Virtual and Augmented Reality (AR/VR), Machine Learning (ML), the Internet of Things (IoT), blockchain, and 3D modeling into a comprehensive remediation strategy will not only facilitate efficient environmental monitoring and assessment but will also promote the establishment of interactive platforms to coordinate and ensure transparency in managing military contamination cleanup, infrastructure reconstruction, and the restoration of territorial socio-economic systems to optimal functioning. These technologies, as accelerators, will enhance the speed, quality, and safety of reconstruction efforts, which is crucial for reviving the national economy and restoring normalcy to war-affected regions. Global experience confirms that innovative technologies can significantly optimize this process, and Ukraine has all the means for their successful implementation. The author emphasizes that such an approach to Ukraine's post-war revitalization will showcase to partners, neighboring countries, and the global community Ukraine's commitment to innovation and ecological responsibility within the context of its European integration development trajectory.

Вступ

Післявоєнне відродження України вже зараз стає ключовим стратегічним завданням, з розв'язанням якого країна зіткнеться у найближчі роки. Процеси ліквідації різноманітних за характером та масштабом військових забруднень, а також ремедіація територій, що постраждали від війни, є надзвичайно складними й потребують задіяння комплексного та системного підходів до управління, координації та контролю виконання сукупності різновекторних заходів на всіх рівнях.

Руйнування та збитки, зафіксовані на сьогодні, свідчать про масштабність і багатовекторність її руйнівного впливу. Так, економічні втрати, завдані Україні внаслідок військових дій агресора, є безпрецедентними як за обсягом, так і за складністю наслідків. За оцінками Світового банку, загальні збитки та вартість відновлення країни на кінець 2023 року становлять \$486 мільярдів, і ця сума продовжує зростати, додаючи кожного місяця біля \$10 мільярдів у триваючій активній військовій діяльності. Значні руйнування зафіксовані у житловому секторі, у соціальній інфраструктурі, а також у сільському господарстві. Так, за час війни було пошкоджено близько 149 300 житлових будівель, а майже 20% сільськогосподарських угідь стали непридатними для подальшого використання. Загальні втрати інфраструктури, включаючи транспортну мережу, становлять приблизно \$225 мільярдів. Приблизно 30% території країни забруднені мінами та нерозірваними боєприпасами, що створює додаткові труднощі для відновлення національної економіки [1; 2].

В умовах сьогодення вже необхідно замислюватися над стратегією ліквідації військових забруднень, реконструкції та відновлення зруйнованого потенціалу країни. У цьому контексті актуальності, значущості та необхідності переосмислення набуває ремедіація як поліфункціональний процес відновлення територій, що зазнали негативного антропогенного впливу від військової діяльності, де цифрові технології виступатимуть невід'ємним компонентом успішної реалізації комплексної стратегії відродження цілісної територіальної соціально-економічної та екологічної системи.

Мета цього дослідження полягає у всебічному аналізі переваг та можливостей застосування цифрових технологій задля управління процесами ремедіації територій, постраждалих від війни, з акцентом на підвищення ефективності управління і контролю забезпечення та використання наявних інформаційних ресурсів. Дослідження також має на меті виявити потенційні можливості інтеграції діючих інформаційних систем з інструментами цифровізації (зокрема, GIS, AR/VR, ML, IoT, блокчейн та ін. – прим. авт.), що дозволить підвищити реактивність системи управління та максимально пришвидшити реалізацію стратегії ремедіації в Україні.

Автор цього дослідження пропонує нові підходи та рішення оптимізації, які б змогли дозволити досягти балансу між ефективністю, економічною доцільністю та швидкістю виконання відновлювальних заходів у разі їх імплементації. Наукової новизни набуває вдосконалення та подальший розвиток систем антикризового державного управління на базі цифрових технологій, що дозволять не лише моніторувати за реальним станом відновлення територій у режимі реального часу, а й оптимізувати розподіл ресурсів, коригувати плани ремедіації

з урахуванням цього та забезпечити прозорість використання усіх видів ресурсів.

Автором досліджуються приклади історичного світового досвіду подолання кризових ситуацій, зокрема відбудова та ремедіація після природних та техногенних катастроф, що демонструють значущість застосування цифрових технологій в критично важливих процесах управління швидкого й ефективного відновлення. Успішний досвід таких країн, як США (після урагану «Катріна», (2005), уряд США імплементував сучасні цифрові технології для координації відновлювальних робіт у постраждалих регіонах – *прим. авт.*) та Японії (цифрові технології допомагали у відстеженні забруднень навколо Фукусімської АЕС, (2011), та координували дії з очищення та відновлення забруднених територій – *прим. авт.*) свідчить, що цифрові інструменти допомогли координувати роботу між різними організаціями, забезпечити швидку реакцію та зміни у покращенні ситуації, а також уникнути затримок у реалізації ремедіаційних проектів [6; 7; 8].

На переконання автора, Україна вже має передові національні платформи, такі як «Дія», «Prozorro», «EcoCity» та ін., а також доступ до інноваційних технологій, що можна буде використати як наявний потенціал для формування інтегративної єдиної інформаційної платформи управління ремедіацією, залучивши міжнародних партнерів та донорів, зацікавлених у підтримці екологічного та соціально-економічного відродження країни.

Розділ 1. Вплив сучасних подій на зміну підходів до дослідження ремедіації

Як було зазначено вище, масштаб і характер руйнувань від дій агресора, а також тактика і методи ведення військової діяльності суттєво вплинули на підходи до ліквідації їх наслідків, що мусить віддзеркалитися у наповненні та переосмисленні поняття «ремедіація». За переконанням автора, сучасний військовий конфлікт в Україні, став відомий своєю гібридністю вперше за останні десятиліття, так як засвідчив факт одночасного застосування на одній території різних типів зброї масового ураження, таких як артилерія, авіація, міни, хімічні і навіть екологічні атаки, що спричинили масштабний за площею і комплексний за набором контамінант як для навколишнього середовища, так і для інфраструктури. Світова спільнота зіткнулася з таким рівнем і характером руйнувань вперше з часів Другої світової війни, що вимагає нових підходів у вирішенні наслідків подібних конфліктів. До цього вражає ще той факт, що за прогнозами дослідників, до 2026 року Україна може втратити ще до \$120 мільярдів продуктивності, а капітальні втрати можуть перевищити \$950 мільярдів. Такий рівень руйнувань не

спостерігався в Європі з часів Другої світової війни, і відновлення країни може зайняти десятиліття [2–3].

Драматичні для нашої країни події унаочнили на весь світ такі явища, як екоцид (підлив дамби Каховської ГЕС), геноцид (масове знищення цивільного населення в Бучі, Ірпені, Ізюмі та Маріуполі), а також урбіцид (цілеспрямоване знищення таких міст, як Авдіївка, Бахмут, Вугледар, Мар'їнка, Рубіжне, Попасна та Сєверодонецьк) (рис. 1–3). Усі вищезазначені факти підкреслюють необхідність вже зараз ініціювати формування комплексної стратегії ремедіації постраждалих територій [1–4].

Такий рівень і масштаб руйнувань створює надзвичайно складні умови для повернення територій до оптимального стану, придатного для життя, виробництва та відновлення соціально-економічної активності, що робить ремедіацію ключовою умовою національного відродження.



Рис. 1. Прорвана гребля Каховської ГЕС, 6 червня 2023 року
Джерело: <https://www.planet.com/gallery/#!/post/destruction-of-the-kakhovka-dam>



Рис. 2. Зафіксований факт геноциду, м. Ізюм, квітень 2022 р.
Джерело: <https://localhistory.org.ua/texts/statti/tse-novii-genotsid/>



Рис. 3. Зафіксований факту урбіциду, м. Бахмут, серпень, 2023 р.

Джерело: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-64743348>

Наукова розвідка автора щодо окресленого кола питань довела, що науковий дискурс довгий час фокусувався на дослідженні поняття «ремедіація» у вузькому контексті, здебільшого у сфері екології, щодо ліквідації певного виду забруднення (наприклад, хімічного чи забруднення ґрунту паливно-мастильними матеріалами). Історія становлення ремедіації як сфери наукових досліджень бере свій початок з 1945 року. На переконання автора, події сучасних військових конфліктів та масштабність й складність одночасного негативного антропогенного впливу вимагають переосмислення та нових підходів щодо контенту як самого наповнення поняття «ремедіація», так і зміни парадигми управління.

Важливо акцентувати увагу на тому, що ремедіація військових забруднень – відносно молода галузь наукових знань, яка бурхливими темпами інтенсивно розвивається. Глобальний простір, який швидко змінюється та політичні, економічні та соціальні процеси в окремих агресивно налаштованих державах підвищують рівень ризиків та загроз різного характеру й масштабу національної безпеки інших держав, що у результаті зумовлює необхідність державного управління цими процесами. Насамперед, на думку автора, має бути сформований упереджуваний механізм моніторингу, а, у другу чергу, механізм реагування, який включатиме комплекс заходів ремедіації.

Комплексне дослідження історичних фактів військової діяльності демонструє тісний зв'язок з основними етапами становлення та розвитку ремедіації військових забруднень як галузі міждисциплінарних наукових знань. Оприлюднені дані віддзеркалюють здобутки у більш конкретних випадках у науковій літературі періоду минулого століття, таких як:

атомне бомбардування Хіросіми і Нагасакі (1945 р.), застосування силами США у війні проти В'єтнаму 10 серпня 1961 року суміші дефоліантів та гербіцидів «Agent Orange», ліквідація військових забруднень на випробувальному полігоні Dugway Proving Ground (США), відновлення територій після військових дій у Боснії та Герцеговині, війна у Перській затоці та військові операції в Іраку, що призвели до значного забруднення довкілля від хімічної зброї, а також ремедіація після закінчення війни в Афганістані (2001–2021) займає значний пласт розвитку теоретичного та методичного інструментарію відновлювальних операцій. Публікації, що висвітлюють історичні факти військової діяльності стосуються переважно конкретних ремедіаційних проєктів, а саме, дослідження, пов'язані з усуненням різного роду військових забруднень, моніторингу ситуації та аналізу небезпечних наслідків для здоров'я людини, дослідження впливу хімічних речовин та вибухових матеріалів на екосистему тощо. Цей доробок вчених становить теоретико-методологічний базис ремедіації.

Але, слід додати ще одну віху в історію розвитку ремедіації – аварію на атомній електростанції «Фукусіма-1» у Японії в 2011 році, що ініціювала величезні зусилля з оперативної ремедіації радіоактивно забруднених територій. І хоча цей історичний факт не відноситься до ремедіації саме військових забруднень, однак, на думку автора, це ключовий етап в еволюційному розвитку методичних підходів з використання прогресивних технологій у процесах виявлення, очищення та ліквідації такого роду забруднень. Йдеться про використання сучасних технологій, таких як фіторемедіація (використання рослин для вилучення радіонуклідів) та роботизованих систем для здійснення ремедіаційних робіт у зонах високого радіаційного забруднення. Разом із вище зазначеним, вважаю, що ліквідація наслідків цієї аварії стала яскравим прикладом консолідації зусиль японського уряду та міжнародних організацій з очищення землі та води, а також видалення радіоактивних матеріалів із забрудненої території. Таким чином, можна говорити про нову сторінку використання передових підходів науки і техніки в ремедіації та міжнародної консолідації в питаннях збереження екосистеми [10].

Після лютого 2022 року відкрито наступну сторінку становлення та розвитку ремедіації в контексті військових конфліктів нового покоління гібридного характеру. Це пов'язано з комплексним застосуванням різних видів зброї та комплексного негативного антропогенного впливу на екосистему і територіальну соціально-економічну систему України. Уже зараз теоретики і практики вказують на складність, полівекторність і багатозаровість майбутньої ремедіації забрудненої території України.

Усе вище перелічене лише посилює актуальність і значущість ініційованих комплексних наукових досліджень у напрямі ідентифікації забруднень, методах та інструментах ефективної ремедіації забрудненої території. У контексті цього, оцінюючи безумовну значущість наукових напрацювань вчених минулого століття, необхідно відзначити, водночас, відсутність розробленої єдиної структурованої класифікації системи ремедіації, що унеможлиблює повне сутнісне осмислення багатовимірності процесу відновлення територіальної соціально-економічної та екологічної системи від наслідків воєнної діяльності.

На думку автора, основним методологічним ключем до конкретизації розуміння ремедіації воєнних забруднень, ідентифікації її внутрішньої природи є розроблена класифікація. Виходячи з того, що ремедіація військових забруднень являє собою складний і доволі полівекторний процес, що включає як природні механізми відновлення еко-системи, так і антропогенні втручання, то, насамперед, у процесі детальної класифікації було враховано гібридний її характер.

Пропоновані класифікаційні критерії автором полягають у наступному:

1. За об'єктами ремедіації:

Екосистемна ремедіація – відновлення природних компонентів територіальної екосистеми (грунт, вода, повітря), що були забруднені через бойові дії, зокрема токсичними речовинами, важкими металами, хімікатами.

Інфраструктурна ремедіація – ліквідація військових забруднень та відновлення пошкоджених об'єктів лінійної та пунктової інфраструктури, таких як дороги, мости, транспортні вузли, залізничні вокзали, аеропорти та морські порти, які через військові дії стали непридатними для експлуатації.

Соціально-економічна ремедіація – ліквідація військових забруднень та відновлення житлових, соціальних і медичних установ, навчальних закладів, що підтримують базові потреби населення та забезпечують економічну активність.

Промислова ремедіація – ліквідація військових забруднень та відновлення промислових об'єктів, які можуть бути джерелами забруднення (наприклад, Запорізька АЕС – прим. авт.) або самі постраждали від військових дій (заводи, підприємства, склади).

2. За рівнем управління та координації:

Національна ремедіація – реалізація загальнонаціональних програм ліквідації військових забруднень та відновлення постраждалих територій, що координуються державою.

Регіональна ремедіація – заходи, що здійснюються на рівні регіонів або областей, із урахуванням регіональних особливостей (ландшафту території, інфраструктурного та іншого ресурсного забезпечення).

Локальна ремедіація – заходи, спрямовані на відновлення окремої локації з урахуванням конкретного ураження та/або військового забруднення із застосуванням конкретної технології та/або комбінації методів ремедіації.

3. За критерієм застосованих технологій та методів:

Традиційна ремедіація, полягає у застосуванні класичних методів, таких як екскавація, фільтрація, знезараження та захоронення відходів.

«Зелена» ремедіація охоплює екологічно орієнтовані методи ліквідації військових забруднень та відновлення постраждалих територій, що мінімізують негативний вплив на довкілля та сприяють природному відновленню екосистем. Основними методами «зеленої» ремедіації є:

Біоремедіація – використання мікроорганізмів, таких як бактерії та/або грибки, для розщеплення або нейтралізації забруднювачів у ґрунті чи воді. Мікроорганізми розкладають шкідливі речовини на безпечні компоненти, тим самим, сприяючи очищенню без застосування хімічних речовин.

Фіторемедіація, що полягає у використанні рослин для поглинання, накопичення або розщеплення забруднювачів від військової діяльності. До того ж, рослини мають можливість абсорбувати важкі метали, органічні сполуки та інші токсичні речовини, відновлюючи, тим самим, ґрунт і воду.

Фітофільтрація – це метод очищення води або ґрунтових вод за допомогою водних рослин, коріння яких здатне поглинати, накопичувати або розкладати забруднюючі речовини. Цей підхід використовують для вилучення важких металів, органічних забруднювачів та інших токсичних речовин із забруднених вод, що сприяє природному очищенню екосистем.

Мікоремедіація – використання грибів для розщеплення токсичних речовин. Гриби виділяють ферменти, які здатні ефективно розкладати складні органічні сполуки, зокрема такі, як нафтові продукти та пестициди.

Використання природних бар'єрів – застосування біологічних чи мінеральних матеріалів для ізоляції або фільтрації забруднень, що запобігає їхньому поширенню в довкілля.

В контексті стратегічних євроінтеграційних намірів України «зелена» ремедіація відіграватиме ключову роль у забезпеченні екологічно безпечного очищення, яке, з одного боку, зберігатиме та, водночас, відновлюватиме біорізноманіття та природні ресурси, у результаті мінімізуючи вплив на довкілля.

Слід констатувати той факт, що новою сторінкою для дослідження інноваційних підходів до класифікації різних методів є поглиблений аналіз застосування:

– *нанотехнологій*, а саме, використання наночастинок з метою розкладання або нейтралізації військових забруднень у важкодоступних місцях. До цієї групи відноситься *нанofільтрація*, яка дозволяє ефективно видаляти шкідливі контамінанти з води та повітря;

– *технології генної модифікації*, які сфокусовані на створення генетично модифікованих мікроорганізмів або рослин, що спеціалізуються на розкладанні токсичних речовин та забруднювачів на постраждалих територіях.

– *ензимні технології*, що можуть застосовуватися у випадках біоремедіації для прискорення природного процесу розкладання певних органічних забруднювачів, таких як нафтопродукти, пестициди, гербіциди та інші органічні сполуки. У відношенні до цього необхідно виокремити:

Лігнінази та пероксидази дозволяють розщеплювати складні органічні сполуки, наприклад, деякі нафтові продукти.

Дегідрогенази та *оксигенази* здатні каталізувати розклад складних органічних речовин у менш токсичні контамінанти.

Вище представлена класифікація у розрізі застосовуваних методів, що можуть бути вибрані для комплексної або часткової ремедіації, забезпечує глибше розуміння їх можливостей через поєднання традиційних, зелених або комбінацію їх з, навіть, новітніми інноваційними методами. Це особливо актуально у контексті сучасних викликів в Україні.

4. За цільовими функціями:

Запобіжна ремедіація – комплекс очищувальних та відновлювальних заходів, спрямованих на попередження подальшого просторового поширення забруднень від військової діяльності, а також забезпечення безпеки населення.

Корекційна ремедіація – комплекс очищувальних та відновлювальних заходів, спрямована на виправлення поточних наслідків застосування конкретних технологій і методів ремедіації. Корекційна ремедіація має на меті оптимізацію результатів ремедіаційних операцій.

Реставраційна ремедіація – комплекс очищувальних та відновлювальних заходів, спрямованих на повернення територій до довоєнного стану, а після досягнення результату – реінтеграцію їх у національну та регіональну економічну систему.

5. За ступенем очищення:

Повна ремедіація, яка забезпечує генеральне видалення або нейтралізацію усіх забруднювачів, повертаючи територію до стану, максимально наближеного до її природного рівня або вихідних умов до забруднення. Після такої ремедіації територія вважається безпечною для

всіх видів використання, включаючи житлове, рекреаційне та сільськогосподарське.

Часткова ремедіація, яка сфокусована на зниженні рівня забруднень від військової діяльності до безпечного рівня, який відповідно до норм та стандартів є прийнятним для певного виду використання території. Наприклад, після часткової ремедіації територію можна бути безпечно використовувати для промислових або комерційних цілей, але не для житлових або рекреаційних.

Обмежена ремедіація – це комплекс заходів, що фокусується переважно на стабілізації ситуації та/або ізоляції дії (у тому числі – масштабування у просторі, *прим. авт.*) забруднень різного характеру без їхнього повного видалення. Цей підхід відноситься до екстрених заходів запобігання поширенню забруднювачів у довкілля та зниження ризику негативного впливу на людей. Доступ на такі ділянки територій, зазвичай, обмежений, а у подальшому вони консервуються.

На підставі вище наведеного можна запропонувати вузьку та розширену інтерпретацію поняття «ремедіація». Так, у вузькому розумінні *ремедіація* – це процес відновлення територій, що зазнали негативного антропогенного впливу внаслідок військової діяльності з метою ліквідації забруднень та відновлення й забезпечення безпечного стану для їх подальшого використання. Ремедіація охоплює очищення природних ресурсів, відновлення інфраструктури та створення умов для стабілізації соціально-економічного життя.

У широкому розумінні, *ремедіація* – це поліфункціональний процес відновлення територій, що зазнали негативного антропогенного впливу від військової діяльності, спрямований на ліквідацію забруднень та руйнувань довкілля, інфраструктури, житлових і промислових об'єктів. Цей процес охоплює відновлення цілісної територіальної соціально-економічної та екологічної системи та спрямований на створення умов сталого розвитку та подальшого безпечного використання цих територій. Розширена дефініція цього поняття являє собою інтеграцію заходів очищення ґрунтів, водних ресурсів і повітря, відбудову об'єктів соціальної та промислової інфраструктури, а також відновлення умов для сталого розвитку країни.

Таким чином, з урахуванням вище описаних змін сьогодення постає нагальна потреба розширення наукового дискурсу та нового змістовного наповнення поняття «ремедіація». Цей термін у сучасних обставинах виступає комплексною концепцією, яка охоплює одночасну ліквідацію військових забруднень та відновлення природних, промислових, інфраструктурних і соціальних об'єктів у контексті системного відродження територій.

Розділ 2. Система управління ремедіацією постраждалих від війни територій України: від стратегічних рішень до локальної реалізації

На переконання автора, відбудова та відродження України після завершення військових дій вимагає зусиль фахівців різних дисциплін, таких як екологи, економісти, інженери, державні управлінці, спеціалісти з інформаційних технологій та соціологи. Цей проект виступає трансдисциплінарним, оскільки вимагає конвергенції знань та практичного досвіду з різних галузей для вирішення комплексного завдання ліквідації військових забруднень та ремедіації територій. Спеціалісти державного управління повинні вже зараз ініціювати реальні кроки в напрямку формування комплексної стратегії та політики відновлення України, а наукова спільнота – запропонувати інноваційні технологічні рішення. Що стосується фахівців-практиків, то їх неоцінена роль полягає у розробці та впровадженні дієвих механізмів та ефективних рішень реалізації ремедіаційних заходів на місцях. Об'єднання зусиль і створення спільного інформаційного простору дозволить виробити оптимальні сценарії ремедіації, відновлення інфраструктури та стабілізації економіки для забезпечення довгострокової стійкості країни.

Перш за все, необхідно представити, як характеризується і що саме входить до дефініції поняття «система управління ремедіацією» постраждалих від війни територій. На думку автора, система управління ремедіацією охоплює комплекс організаційних, управлінських та технічних процесів, інструментів і методів, які забезпечують ефективне організацію, планування, реалізацію та контроль заходів з ліквідації та очищення від контамінантів, відновлення та стабілізації територій, що зазнали руйнувань внаслідок військової діяльності. Ця система об'єднує багаторівневе управління, від державного до локального рівня, і координує діяльність усіх ключових суб'єктів, включно з державними органами влади, громадськими організаціями, науковими установами, місцевими громадами та міжнародними партнерами.

Для більш глибокого розуміння пропоную нижче результати загального параметричного аналізу такої складної відкритої багаторівневої системи управління ремедіацією в контексті відновлення територіальної системи від наслідків військової діяльності.

1. Ідентифікація та структуризація системи управління ремедіацією.

Мета – визначення основних компонентів та структури системи управління ремедіацією.

Ключові кроки:

– визначення меж системи управління ремедіацією, що передбачає чітке визначення елементів та процесів, які входять до системи управління ремедіацією;

– ідентифікація рівнів системи управління, а саме, розподіл системи на укрупнені структурні елементи – підсистеми, а також рівні ієрархії;
– опис елементів, що включає ідентифікацію основних компонентів кожного рівня, їхніх функцій і взаємодії.

2. Вибір параметрів для аналізу системи управління ремедіацією.

Мета – визначення ключових параметрів, які будуть досліджуватись у процесі аналізу проектованої моделі управління ремедіацією.

Ключові кроки:

– екологічні параметри, а саме, визначення рівней градації концентрації забруднюючих речовин, ідентифікація типів забруднень, стану біоти, визначення параметрів якості води, ґрунту і повітря;

– соціальні параметри, а саме, оцінка стану здоров'я населення, рівень захворювань внаслідок військових забруднень, оцінка доступності медичної допомоги, оцінка добробуту та соціальної стабільності;

– економічні параметри, а саме, оцінка фінансового забезпечення, оцінка ефективності та раціональності методів ремедіації, оцінка стану наявного ресурсного забезпечення;

– управлінські параметри, а саме, оцінка стану та рівня готовності до формування та імплементації комплексної стратегії ремедіації, оцінка ефективності планування та координації дій в розрізі ієрархічних рівнів управлінської системи, оцінка наявності ресурсів управління, ступінь залученості зацікавлених сторін тощо.

3. Збір і аналіз даних для стратегічного, тактичного та оперативного управління ремедіацією.

Мета – збір та обробка даних за обраними параметрами.

Ключові кроки:

– джерела даних, а саме, визначення джерел інформації (польові дослідження, статистичні дані, звіти, експертні дослідження, опитування, публікації);

– методи збору даних, а саме, використання наукових методів для вимірювання параметрів (аналіз ґрунту і води, соціологічні опитування, економічні розрахунки тощо);

– аналіз даних, що включає обробку зібраної інформації із застосуванням статистичних і аналітичних методів, а також експертні оцінки і прогнози.

4. Моделювання системи управління ремедіацією.

Мета – це створення моделі системи управління ремедіацією, яка дозволить реалізувати комплексну ремедіацію постраждалих територій в розрізі рівнів ієрархії (вищий рівень державного управління, регіональний рівень і локальний).

Ключові кроки:

- вибір типу моделі, а саме, визначення відповідного типу інтегрованої моделі управління ремедіацією постраждалих територій;
- розробка моделі, що полягає у формалізації моделі на основі існуючої системи та оптимізаційних технологій і алгоритмів;
- валідація моделі, що полягає у перевірці моделі на адекватність та відповідність поставленим цілям.

5. Проведення параметричного аналізу проекту системи управління ремедіацією.

Мета – це дослідження впливу різних параметрів на функціонування пілотного варіанта системи управління ремедіацією.

Ключові кроки:

- аналіз чутливості проекту, що полягає в оцінці чутливості системи управління до змін різних параметрів;
 - аналіз сценаріїв – це проведення аналізу різних можливих сценаріїв розвитку подій (оптимістичний, песимістичний, реалістичний);
 - оптимізація параметрів, що полягає у визначенні оптимальних значень параметрів для досягнення найкращих результатів ремедіації.
- 6. Оцінка та інтерпретація результатів.

Мета – це оцінка результатів аналізу імплементації пілотного проекту та їх інтерпретація з точки зору ефективності управління системою.

Ключові кроки:

- порівняння результатів, що полягає у порівнянні отриманих результатів з вихідними даними, а також з очікуваними;
- інтерпретація результатів – це визначення рівня значимості отриманих результатів з метою верифікації їх практичного застосування в управлінні ремедіацією;
- рекомендації полягають у розробці рекомендацій з метою акселерації процесів ремедіації та їх оптимізації з точки зору впливу на стан довкілля на підставі агрегації результатів аналізу.

7. Імплементація і моніторинг пілотного проекту.

Мета – це реалізація рекомендованого проекту та моніторинг системи управління з метою можливості внесення коригувань та оптимізаційних рішень.

Ключові кроки:

- імплементація проекту, що полягає у реалізації системи запропонованих заходів оптимізації і найкращих стратегічних рішень з управління ремедіацією;
- моніторинг, який полягає у постійному безперервному спостереженню за системою управління, зборі поточних даних та їх аналізі для можливості своєчасної корекції управлінських дій;

– коригуючі заходи задля можливостей внесення змін у процесах оперативного і тактичного управління ремедіацією на основі моніторингу ситуації і аналізу отриманих нових даних у режимі реального часу.

Як бачимо, загальна процедура параметричного аналізу складної відкритої багаторівневої гібридної системи управління ремедіацією дозволяє ефективно спроектувати, спланувати, а потім управляти та контролювати фактичний процес реалізації ремедіаційних заходів, забезпечуючи при цьому досягнення стратегічних цілей держави.

Таким чином, формування та реалізація стратегії комплексної ремедіації безпосередньо пов'язана з комплексом управлінських дій та є критично важливою для стабілізації екологічного стану та забезпечення умов для соціально-економічного відродження України після завершення військової діяльності. На вищому рівні державного управління мусить бути забезпечена координація між відповідними міністерствами та відомствами (екології, інфраструктури, економіки) для залучення ресурсів та розробки єдиної стратегії. На національному рівні система управління ремедіацією повинна починатися з мобілізації зусиль усіх наукових, технічних та практичних інституцій, які зможуть об'єднатися задля кооперації та конвергенції ефективних результатів. Уже зараз необхідно ініціювати створення трансдисциплінарних проектних команд, які будуть складатися з теоретиків, аналітиків, інженерів та практиків. На основі звітів та даних моніторингу щодо наслідків військових дій потрібні будуть конкретні рішення для вибору оптимальних методів ліквідації військових забруднень та ремедіації, що зможуть враховувати специфіку забруднень конкретними видами контамінантів та враховувати специфіку кожної конкретної ситуації.

Саме такі рішення повинні бути узгоджені у пілотному варіанті комплексної стратегії ремедіації, яка включатиме:

- обрання методів ліквідації забруднень та ремедіації залежно від типу і характеру контамінантів (наприклад: ескавація, фізико-хімічне очищення, фіторемердіація, біоремердіація тощо – *прим. авт.*);

- визначення пріоритетів: відновлення транспортної інфраструктури, соціальних об'єктів з урахуванням критичної потреби у житлі, соціальних та промислових об'єктах, транспортній логістиці ресурсів;

- оцінку ефективності методів управління та коригування їх на основі операційних результатів, що дозволить створити гнучкий підхід до управління ремедіацією.

Що стосується регіонального рівня управління, то, передусім, ключова роль полягає у адаптації національної стратегії до конкретної ситуації щодо військових забруднень та потреб у ремедіації кожного регіону. Така адаптація враховує локальні умови пошкоджених територій та ресурсні потреби їх відновлення.

Основні технічні аспекти включають:

- регулярний моніторинг забруднень та стану об'єктів із застосуванням цифрових технологій, таких як GIS та IoT, що дозволяє відстежувати екологічний стан у режимі реального часу;

- розподіл ресурсів та управління локальними проектами ремедіації на основі визначених пріоритетів для кожної постраждалої території, забезпечуючи при цьому ефективне та раціональне використання наявних ресурсів;

- комунікація з місцевими органами та громадами з метою забезпечення прозорості процесу реалізації ремедіаційних заходів на місцях, отримання зворотного зв'язку та залучення громадян до обговорення і участі у проектах відновлення постраждалих територій.

Особливо слід зазначити про важливість адаптації стратегій ремедіації до регіональних та локальних умов, що є критичним для забезпечення підтримки суб'єктами господарювання та населенням. Це дозволить підвищити загальну ефективність реалізації ремедіаційних заходів з відновлення зруйнованих територій.

Виконання ремедіаційних заходів на місцевому рівні є завершальним етапом системи управління, що забезпечує ефективну координацію і контроль за відновленням територій.

Резюмуючи вище наведене можна стверджувати, що комплексний підхід до системи управління ремедіацією охоплює сукупність поетапних процесів від формування стратегії на національному рівні до локальної її реалізації, що у підсумку дозволить створити стійку основу для відновлення постраждалих територій. Сьогодні, коли перед Україною постають екологічні та соціально-економічні виклики, необхідно невідкладно впроваджувати багаторівневу модель системи управління ремедіацією, яка передбачатиме мобілізацію ресурсів, координацію між рівнями ієрархії системи управління, а також впровадження передових технологій задля оптимізації цього процесу.

Розділ 3. ReGen-UA – Інтеграція цифрових технологій

для екологічного відновлення та регенерації територій України

Інтеграція цифрових технологій у комплексну стратегію ремедіації та відновлення територій України є ключовою умовою для прискорення та оптимізації процесу відбудови. Ці технології можуть відігравати роль акселератора або прискорювача реалізації оперативних, тактичних та стратегічних дій на всіх рівнях ієрархії системи управління, завдяки своїй здатності значно підвищувати ефективність організації, планування, моніторингу, координації та здійснення усіх видів контролю за ситуацією та витрачанням ресурсів. Розглянемо роль кожної з них:

1. *Геоінформаційні системи (GIS)* забезпечують високоточний моніторинг забруднень у режимі реального часу, картографічний аналіз та оцінку стану забруднень та/або руйнувань на постраждалих територіях. Використання GIS дозволяє швидко ідентифікувати рівень забруднення і верифікувати пріоритети ремедіації, що дозволяє значно прискорити процеси ліквідації забруднень та пошкоджень, а потім відновити об'єкти з мінімальним рівнем ризику для довкілля та здоров'я населення.

2. *Віртуальна та доповнена реальність (AR/VR)* надають можливість візуалізувати стан територій до і після проведення ремедіації та відбудови, що спрощує процес вибору оптимального сценарію ремедіації та реконструкції. Слід зазначити особливу цінність AR/VR у плануванні ремедіаційних заходів та у прогнозуванні результатів. Ці технології якнайкраще дозволяють фахівцям детально оцінити обсяг і специфіку пошкоджень територій та руйнувань об'єктів, що знижує ймовірність помилок та підвищує ефективність прийняття управлінських рішень [14].

3. *Машинне навчання (ML)* дозволяє швидко обробляти великі обсяги даних, виявляти закономірності та прогнозувати результати ремедіаційних операцій. Безумовною перевагою ML є те, що воно здатне оптимізувати процес вибору конкретних методів ремедіації або запропонувати найбільш ефективну комбінацію різних методів, що зможе забезпечити досягнення економії ресурсів та економії часу на кожному етапі відновлюваних робіт [15].

4. *Інтернет речей (IoT)* забезпечує безперервний збір різновекторних даних у режимі реального часу (кліматичні умови, стан транспортної інфраструктури, рівень пошкоджень об'єктів, масштаб забруднення території тощо), що дозволяє оперативно реагувати на зміну ситуації та коригувати управлінські дії. IoT також дозволяє оптимізувати управління ресурсами відповідно до пріоритетів, що дозволяє більш ефективно розподіляти їх на територіях з різним рівнем та масштабом забруднень [16; 17].

5. *Блокчейн* забезпечує прозорість та контроль за фінансовими транзакціями та розподілом ресурсів. Це, передусім, сприяє довірі до процесу управління ремедіацією з боку донорів, міжнародних партнерів та інвесторів, що дозволяє мінімізувати ризики фінансових зловживань та у підсумку прискорює процес прийняття позитивних рішень щодо реалізації проектів відновлення територій [13].

6. *3D-моделювання* дозволяє створити детальні віртуальні моделі пошкоджених/зруйнованих об'єктів та постраждалих територій, що потребують відновлення або реконструкції і точно сгенерувати відбудовні заходи. Технології 3D-моделювання, у першу чергу, допоможуть у вирішенні питань забезпечення точності проектування,

оптимізації конструкторських рішень відновлення та реконструкції, у другу чергу, підвищення безпеки робіт.

Вище перераховані технології, діючи в синергії, створюють унікальну технологічну систему акселерації, що сприятиме не лише швидкому та ефективному отриманню даних для управління ремедіацією, але й максимальному зниженню рівня різних видів ризику та загроз.

Під акселерацією ремедіації території в контексті даного дослідження розуміється процес прискорення відновлювальних заходів на постраждалих територіях шляхом інтеграції передових цифрових технологій, які дозволяють ефективніше управляти процесами моніторингу, оцінки, планування та виконання ремедіаційних робіт. Автор вкладає в це поняття використання інноваційних інструментів, таких як GIS, ML, IoT, AR/VR, блокчейн та 3D-моделювання з метою підвищення швидкості та якості відновлення територіальних екологічних та соціально-економічних систем.

Акселерація ремедіації за рахунок задіяння цифрових технологій в управлінні, разом з цим, сприятиме оптимізації розподілу ресурсів, забезпеченню прозорості понесених витрат, швидкому реагуванню на зміни кліматичних умов, ресурсного забезпечення, зміни стану забруднення територій та пошкоджень об'єктів. Це дозволить у підсумку створити умови для максимально ефективного та раціонального використання наявного ресурсного забезпечення (фінансового, кадрового, матеріально-технічного тощо) в цілях відновлення постраждалих територій до оптимального стану для подальшої експлуатації за призначенням. Завдяки цьому, процес ремедіації буде більш динамічним, керованим та спрямованим на довгострокове відродження постраждалих регіонів.

На думку автора, ключовим кроком на цьому шляху є інтеграція існуючого потенціалу – національних цифрових платформ, систем комунікації та моніторингу – з інноваційними технологіями, такими як GIS, IoT, блокчейн, машинне навчання та 3D-моделювання [15; 16].

З цією метою автор пропонує імплементацію інтегрованого проекту ReGen-UA, який має на меті поєднати наявні функціонуєчі ресурси, створивши на цій базі єдину цифрову систему для управління процесом ремедіації, що стане основою для екологічного та соціально-економічного територіального відновлення. Завдяки інтеграції існуючих національних платформ, таких як «Дія», «Prozorro», «EcoCity» та інших систем, з новітніми інструментами, інтегрована система зможе:

- забезпечити детальний моніторинг стану забруднень територій та оперативного реагувати на зміни у стані довкілля;

- гарантувати прозорість розподілення та витрачання фінансових ресурсів завдяки блокчейну, що підвищить довіру з боку громадян і міжнародних донорів та партнерів;

- підтримати комунікацію і зворотній зв'язок з громадянами через платформу «Дія», що дозволить інформувати населення та ініціювати залучення його до реалізації пріоритетних завдань ремедіації;

- оптимізувати управління, а саме, проектування, планування та прогнозування ремедіаційних заходів, а також робіт з реконструкції завдяки застосуванню машинного навчання, 3D-моделювання та DSS (систем підтримки прийняття рішень).

На думку автора, проект ReGen-UA може бути тим комплексним дієвим інструментом для цілісної територіальної регенерації країни, що закладено безпосередньо у самій назві проекту і, навіть, може стати національним брендом. В результаті його імплементації буде закладений фундамент для сталого розвитку та екологічної безпеки, що зміцнить позиції України як інноваційної держави, яка ефективно використовує сучасні технології для відбудови та відродження соціально-економічного розвитку.

Крім «Дія», «Prozorro», «EcoCity» для підтримки системи управління ремедіацією можна інтегрувати такі вже існуючі цифрові платформи та інструменти:

- платформу відкритих даних data.gov.ua для аналізу відкритих екологічних даних, а саме, її можна використовувати для відстеження змін у забрудненні повітря, води та ґрунтів на основі доступних екологічних даних;

- платформу єдиного державного земельного кадастру з метою використання даних кадастру в цілях ідентифікації сільськогосподарських земель, що потребують ремедіації;

- геопортал відкритих даних (платформа GIS-послуг) з метою створення інтерактивних мап для моніторингу процесу ремедіації для інформування населення та міжнародної спільноти;

- систему електронної звітності E-reporting через оприлюднення звітів щодо ходу ремедіації від місцевих адміністрацій до національних структур, забезпечуючи своєчасне оновлення інформації;

- електронний реєстр промислових відходів з метою оприлюднення даних про промислові забруднення, що впливають на екологію та стан довкілля, а також їх локалізацію;

- єдину систему електронної ідентифікації BankID та MobileID з метою персоналізації доступу до даних для різних користувачів, зокрема для місцевих адміністрацій, громадян, науковців. Безпечний доступ до стратегічної інформації щодо даних про стан забруднення, ризики та

загрози тощо лише для авторизованих осіб для забезпечення захисту інформації [18; 19; 20].

Інтеграція цих наявних платформ дозволить створити цілісну систему підтримки управлінських рішень щодо ремедіації, підвищуючи прозорість, зручність і ефективність усіх етапів цього процесу, від організації, планування, розподілення ресурсів, моніторингу до звітності та контролю [21].

Для розроблення та впровадження проекту ReGen-UA в життя можуть бути залучені провідні міжнародні компанії, які спеціалізуються на технологіях управління даними, моніторингу екології, цифрових платформах, а також автоматизації та безпеці. За умов дефіциту фінансових ресурсів допомога та підтримка таких відомих компаній, могла б суттєво спростити процес розробки та імплементації проекту. Нижче представлено детальний аналіз потенціальних можливостей компаній – світових лідерів, які можуть використати унікальні можливості апробування своїх новітніх розробок у реальних умовах (табл. 1.) [22–28].

Таблиця 1

Потенціальні партнери розроблення та впровадження проекту ReGen-UA

Компанія	Роль у проекті ReGen-UA	Потенційні можливості	Зацікавленість
1	2	3	4
Microsoft	Хмарна інфраструктура для зберігання та обробки даних (Azure); інструменти ML та AI для аналізу даних екологічного моніторингу	Хмарна інфраструктура для зберігання великих даних та обробки показників екологічного моніторингу; сервіси AI для розпізнавання екологічних патернів і автоматизації процесів ремедіації; платформа для командної співпраці в режимі реального часу	Просування технологій для сталого розвитку; зміцнення іміджу лідера у сфері технологій управління ліквідацією наслідків надзвичайних ситуацій
Google (Google Cloud)	Хмарні рішення для обробки даних (Google Cloud); геоінформаційні сервіси (Google Earth Engine) для моніторингу та аналізу	Масштабні рішення для зберігання та аналізу даних у хмарі; інструменти для картографування постраждалих територій і верифікація зон забруднення через Google Earth Engine; BigQuery для обробки та аналізу даних екологічного моніторингу	Розширення соціальної відповідальності; зміцнення позицій на ринку передових екологічних технологій

1	2	3	4
IBM	Інтеграція блокчейн для прозорості розподілення та витрачання фінансових ресурсів (IBM Blockchain); підтримка аналізу даних через IBM Watson AI	Блокчейн для прозорості фінансових транзакцій та обліку витрат; штучний інтелект для прогнозування ризиків та управління проектами ремедіації територій; підтримка аналізу великих обсягів даних через Watson AI	Підтримка екологічних ініціатив; просування інноваційних рішень у державному секторі
ESRI	Надання рішень на базі GIS для картографування рівня та масштабу забруднень, моніторингу стану довкілля та екологічного аналізу	Рішення GIS для інтерактивного картографування та візуалізації зон забруднення; комплексний аналіз просторових даних для підтримки прийняття управлінських рішень; можливість виявлення динаміки забруднень через геоінформаційний аналіз	Розширення спектра екологічної експертизи; демонстрація можливостей GIS для реалізації проектів ремедіації
Amazon Web Services (AWS)	Хмарні сервіси для обробки великих обсягів даних (AWS); рішення ML для оцінки екологічних ризиків (Amazon SageMaker)	Хмарна обробка та зберігання великих обсягів даних; ML-інструменти для комплексного аналізу ризиків та планування ремедіації; інтеграція з IoT-сенсорами для моніторингу у режимі реального часу	Просування рішень для охорони довкілля; підвищення впливу AWS-рішень на екологічні проекти
Siemens	Сенсори IoT для моніторингу рівня забруднень (якість повітря, води); обладнання для автоматизації контролю процесів ремедіації	Сенсори для контролю якості повітря, води та ґрунту у режимі реального часу; технології для автоматизації управління та моніторингу ремедіаційних робіт; енергоефективне обладнання для контролю екологічних параметрів	Посилення позицій у сфері досягнення цілей сталого розвитку; застосування рішень для екологічного моніторингу
Palantir	Аналітична платформа для комплексного аналізу даних про стан забруднення, планування заходів ремедіації та оцінки її ефективності	Платформа для комплексного аналізу великих обсягів даних про стан та масштаби забруднення довкілля; моделі для прогнозування ефективності ремедіаційних заходів; планування та оцінка ефективності робіт з ремедіації через аналітичну платформу	Використання аналітичних рішень у кризових ситуаціях; підтримка екологічних та соціально значущих проектів

Висновки

Представлені у роботі матеріали поглибленого дослідження теоретичних та практичних аспектів використання цифрових технологій у системі управління ремедіацією постраждалих від війни територій дозволили автору зробити наступні висновки та узагальнення.

1. Традиційно, «ремедіація» охоплювала лише екологічні аспекти очищення довкілля, однак сьогодні вона включає широкий комплекс заходів, спрямованих на відновлення не тільки природних ресурсів, але й житлової, соціальної та промислової інфраструктури, яка зазнала значних пошкоджень. Ремедіація перетворюється на трансдисциплінарну стратегію, яка вимагає комплексного підходу для не тільки довкілля та очищення від військових забруднень ґрунтів, водних ресурсів, повітря, а також для відновлення подальшого соціально-економічного розвитку країни.

2. Цифрові технології відіграють провідну роль в управлінні комплексною ремедіацією, підвищуючи її прозорість, оперативність та ефективність. Інструменти, такі як геоінформаційні системи (GIS), Інтернет речей (IoT), машинне навчання (ML) та блокчейн, створюють ефективну платформу для моніторингу, прогнозування та управління процесами ремедіації. Ці технології забезпечують можливість моніторити стан і масштаб забруднення у режимі реального часу, аналізувати отримані дані, планувати оптимальні заходи, розподіляти ресурси та відстежувати фінансові витрати на кожному етапі ремедіаційних робіт.

3. Автором пропонується проект ReGen-UA розроблений саме для того, щоб об'єднати наявні національні платформи та інноваційні технології у єдину цифрову систему управління ремедіацією.

4. За умов дефіциту фінансових ресурсів залучення міжнародних донорів і партнерів виступає важливим допомога у забезпеченні ресурсної та технологічної підтримки. Провідні компанії, такі як Microsoft, Google, IBM, ESRI та інші, мають потенціал надати сучасні інструменти для аналітики, управління великими обсягами даних, моніторингу забруднення ґрунтів, води та повітря, а також прозорого контролю розподілення та фінансових витрат через блокчейн. Участь таких компаній у проекті ReGen-UA забезпечить не лише доступ до передових технологій, але й підвищить рівень міжнародної довіри до процесів відновлення в Україні, а також продемонструє їх соціальну відповідальність та підтримку глобальної екологічної безпеки.

Список використаних джерел:

1. Hryhorczuk D., Levy B.S., Prodanchuk M., Kravchuk O., Bubalo N., Hryhorczuk A., Erickson T.B. (2024). The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine.

Journal of Occupational Medicine and Toxicology, vol. 19(1). DOI: <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>

2. World Bank. (2024) Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released. Available at: <https://www.worldbank.org>

3. Federle, J., & Schularick, M. (2024). The Price of War: Economic Fallout from the Conflict in Ukraine. Kiel Institute. Available at: <https://www.ifw-kiel.de>

4. Merritt, J. (2024). Even as the war persists, Ukraine is rebuilding – here’s how. World Economic Forum. Available at: <https://www.weforum.org>

5. Rand Corporation. (2024). Consequences of the War in Ukraine: The Economic Fallout. Available at: <https://www.rand.org>

6. Sari Bektaş (2021). Evaluation Of Inter-Institutional Coordination In Disaster Management. *Hastane Öncesi Dergisi*, vol. 6, pp. 393-406. DOI: <https://doi.org/10.54409/hod.979044>.

7. Regalado, Jose & Arbulu Pérez Vargas, Carmen Graciela. (2021). Decision Support Systems in Disaster Risk Management Policies for Adaptation to Climate Change. *HCI International 2021 – Posters*, pp. 506–512. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78645-864>

8. Novelan M.S., Efendi S., Sihombing,P., Mawengkang H. (2023). Vehicle routing problem optimization with machine learning in imbalanced classification vehicle route data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5(3(125)), pp. 49–56. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288280>

9. Khan S.M., Shafi I., Butt W.H., Diez I. de la T., Flores M.A.L., Galán, J.C., Ashraf I. (2023). A Systematic Review of Disaster Management Systems: Approaches, Challenges, and Future Directions. *Land*, vol. 12(8), p. 1514. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12081514>

10. Remediation of Buried Chemical Warfare Materiel. (2012). National Academies Press. DOI: <https://doi.org/10.17226/13419>

11. Trofymchuk O., Klymenko V., Anpilova Y., Sheviakina N., Zagorodnia S. (2020) The aspects of using GIS in monitoring of environmental components. *Int. Multidiscip. Sci. GeoConf. SGEM 2020*, vol. 20, pp. 581–588. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2020/2T/s08.075>.

12. Muraoka H., Ishii R., Nagai S., Suzuki R., Motohka T., Noda H.M., Hirota M., Nasahara K.N., Oguma H., Muramatsu K. (2012). Linking Remote Sensing and In Situ Ecosystem/Biodiversity Observations by “Satellite Ecology.” The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region, pp. 277–308. DOI: https://doi.org/10.1007/978-4-431-54032-8_21

13. Britchenko I., Cherniavska T. (2019). Blockchain technology in the fiscal process of Ukraine. *Economic Studies*, vol. 28(5), pp. 134–148.

14. Tariq M.U. (2024). Leveraging Open Innovation for Sustainable Growth in the Digital Era. *Mastering Innovation in Business*, pp. 157–192. DOI: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3759-2.ch007>

15. Archetti C., Cordeau J.-F., Desaulniers,G. (2020). Introduction to the special issue on combining optimization and machine learning: Application in vehicle routing, network design and crew scheduling. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 9(4), p. 100024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2020.100024>

16. Vinod Raut S. (2024). Artificial Intelligence Use in Disasters Management. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, pp. 2928–2930. DOI: <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24MAY1679>

17. Şengöz Murat (2024). Utilization Of Artificial Intelligence And Big Data In Disaster Management: Future Risk Reduction Strategies. Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. DOI: <https://doi.org/10.46373/hafebid.1534925>
18. Hyrenko O., Dmytrenko S. (2024). Modern trends and problems of digitalization of public administration in Ukraine. *Actual Problems of Innovative Economy and Law*, vol. 3, pp. 15–19. DOI: <https://doi.org/10.36887/2524-0455-2024-3-3>
19. Tokarieva K., Berezovskyi D. (2023). The application of modern digital technologies in public administration (on the example of the financial sphere). *Law and innovations*, vol. 3 (43), pp. 54–63. DOI: [https://doi.org/10.37772/2518-1718-2023-3\(43\)-8](https://doi.org/10.37772/2518-1718-2023-3(43)-8)
20. Lutsenko, V. & Pikylia, T.. (2024). Legal security of digital transformation in Ukraine. *Uzhhorod National University Herald. Series: Law*. 1. 61–67. DOI:10.24144/2307-3322.2024.81.1.9
21. Yevtushenko, Oleksandr. (2023). Digitalization of public administration and its peculiarities and prospects in Ukraine. *Public Administration and Regional Development*. 964-983. DOI:10.34132/pard2023.22.03
22. Microsoft. URL: <https://azure.microsoft.com/en-us/explore/>
23. Google. Google Cloud. URL: <https://cloud.google.com/docs/overview>
24. IBM. URL: <https://www.ibm.com/artificial-intelligence>
25. ESRI. Environmental Systems Research Institute. URL: <https://www.esri.com/en-us/about/about-esri/overview>
26. Amazon Web Services (AWS). URL: https://aws.amazon.com/what-is-aws/?nc1=h_ls
27. Siemens. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/buildings/iot.html>
28. Palantir URL: <https://www.palantir.com/about/>