

УДК 35:[502:32]

Савчин Володимир Федорович

*аспірант кафедри регіонального та місцевого розвитку
Національного університету «Львівська політехніка»*

Savchyn Volodymyr

*PhD Student of the Department of Regional and Local Development
Lviv Polytechnic National University*

ORCID: 0009-0009-6291-3108

DOI: 10.25313/2617-572X-2025-4-10929

РОЛЬ І НАПРЯМИ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПУБЛІЧНОМУ УПРАВЛІННІ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

THE ROLE AND DIRECTIONS OF IMPLEMENTING MODERN TECHNOLOGIES IN PUBLIC ADMINISTRATION IN THE FIELD OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

Анотація. Вступ. У статті досліджується роль сучасних технологій у публічному управлінні сферою захисту довкілля та напрями їх впровадження в екологічну політику України. З огляду на зростаючі екологічні виклики, як зміна клімату та забруднення, використання цифрових технологій, штучного інтелекту, великих даних та IoT для моніторингу і прогнозування екологічної ситуації стає надзвичайно важливим. Розглядаються проблеми інтеграції технологій у публічне управління, зокрема недостатня цифровізація екологічних інституцій, фрагментованість даних, низький рівень координації та обмежене фінансування екологічних інновацій. Акцент робиться на потенціалі супутникового моніторингу, блокчейну для регулювання екології, цифрових платформ для управління відходами та автоматизованих систем контролю промислових викидів.

Мета. Мета статті полягає в аналізі сучасних технологічних інноваційних інструментів та їх ролі у публічному управлінні екологічною сферою та визначенні основних напрямів їх впровадження з метою підвищення ефективності екологічної політики України.

Матеріали і методи. У дослідженні застосовано міждисциплінарний підхід із використанням методів аналізу, синтезу, порівняння, моделювання та прогнозування для оцінки ролі сучасних технологій у публічному управлінні охороною довкілля. Методологія базується на системному аналізі нормативної бази, наукових джерел, міжнародного досвіду та практики впровадження технологій в екологічну політику. Використано системний і порівняльний аналіз для дослідження міжнародного досвіду та його адаптації до національного контексту. Правовий аналіз дозволив виявити бар'єри та потенціал у цифровізації екологічної сфери. Аналіз наукових публікацій, урядових і міжнародних звітів дав змогу оцінити ефективність впроваджених рішень у розвинутих країнах світу, а також вивчити приклади використання цифрових технологій для контролю та управління ресурсами. Порівняння з традиційними підходами дозволило оцінити переваги новітніх технологій.

Результати. У результаті дослідження встановлено, що в Україні рівень впровадження сучасних технологій в екологічну політику залишається низьким через недостатню цифровізацію, слабку координацію між установами, застарілі методи оцінювання довкілля та обмежене фінансування. Водночас світовий досвід демонструє ефективність використання штучного інтелекту, супутникового моніторингу, цифрових двійників та Big Data для виявлення екологічних загроз, моніторингу лісів, водойм, якості повітря та управління природними ресурсами. Отож дослідження окреслило напрями модернізації екологічного управління у контексті європейської інтеграції України, зокрема розвиток смарт-систем для моніторингу, впровадження принципів відкритих даних, використання машинного навчання для оцінки ризиків та створення інтегрованих цифрових екосистем для координації політики.

Зроблено висновок, що впровадження інноваційних технологій вимагає комплексного підходу, поєднуючи нормативно-правові зміни, інституційну реформу та стимулювання науково-технічного прогресу.

Перспективи. У подальших наукових дослідженнях пропонується зосередити увагу на дослідженні механізмів імплементації інноваційних технологій на різних рівнях – від національного до регіонального й місцевого в контексті інтеграції України до європейських екологічних ініціатив.

Ключові слова: екологічна політика, публічне управління, автоматизовані системи моніторингу, цифровізація, рециркулярна економіка, інновації, екологічні ризики, штучний інтелект.

Summary. Introduction. The article explores the role of modern technologies in public administration of environmental protection and the directions for their implementation in Ukraine's environmental policy. Given the growing environmental challenges such as climate change and pollution, the use of digital technologies, artificial intelligence, big data, and IoT for monitoring and forecasting environmental conditions is becoming of great significance. The article discusses the challenges of integrating technologies into public administration, particularly the insufficient digitalization of environmental institutions, fragmented data, low levels of coordination, and limited funding for environmental innovations. It highlights the potential of satellite monitoring, blockchain for environmental regulation, digital platforms for waste management, and automated systems for industrial emissions control.

Purpose. The aim of the article is to analyze modern technological innovation tools and their role in public environmental governance, and to identify key directions for their implementation to enhance the effectiveness of Ukraine's environmental policy.

Materials and Methods. The research adopts an interdisciplinary approach, using methods of analysis, synthesis, comparison, modeling, and forecasting to assess the role of modern technologies in public environmental management. The methodology is based on a systematic analysis of legal frameworks, scientific sources, international experience, and best practices in technology implementation in environmental policy. Systematic and comparative analyses are used to study international experience and its adaptation to the national context. Legal analysis helped to identify barriers and potential for digitalization in the environmental sector. The analysis of scientific publications, governmental and international reports enabled the evaluation of the effectiveness of implemented solutions in developed countries and provided examples of the use of digital technologies for resource control and management. A comparison with traditional approaches allowed an assessment of the advantages offered by new technologies.

Results. The study found that in Ukraine, the level of adoption of modern technologies in environmental policy remains low due to insufficient digitalization, weak inter-institutional coordination, outdated environmental assessment methods, and limited funding. Meanwhile, global experience demonstrates the effectiveness of artificial intelligence, satellite monitoring, digital twins, and big data in identifying environmental threats, monitoring forests, water bodies, air quality, and managing natural resources. The research outlines directions for modernizing environmental management in the context of Ukraine's European integration, including the development of smart monitoring systems, the implementation of open data principles, the use of machine learning for risk assessment, and the creation of integrated digital ecosystems for policy coordination.

It concludes that the implementation of innovative technologies requires a comprehensive approach, combining regulatory changes, institutional reforms, and the stimulation of scientific and technological progress.

Discussion. Future scientific research is proposed to focus on studying the mechanisms for implementing innovative technologies at different levels – from national to regional and local – in the context of Ukraine's integration into European environmental initiatives.

Key words: environmental policy, public administration, automated monitoring systems, digitalization, circular economy, innovation, environmental risks, artificial intelligence.

Постановка проблеми. У політичній науці сама держава завжди була в центрі уваги, однак екологічні виклики, з якими стикаються держави, часто залишалися поза увагою. Забезпечення екологічних благ для населення, таких як чиста вода та чисте повітря, часто розглядалося на рівні з наданням інших соціальних благ, таких як охорона здоров'я, освіта, страхування, пенсії та інші державні послуги, пов'язані з соціальною підтримкою та підтриманням добробуту людей. Однак послуги, пов'язані з охороною навколишнього середовища, ставлять перед державою низку складних і інколи абсолютно нових викликів, що робить їх відмінними від інших видів державних послуг у кількох аспектах.

По-перше, надання соціальних благ переважно обумовлене внутрішніми викликами, тоді як дії щодо захисту навколишнього середовища також впливають із глобальної екологічної кризи, а результати цих дій матимуть міжнародні наслідки. По-друге, податкові схеми для фінансування екологічних ініціатив не так добре інтегровані в національні

фіскальні системи, як податкові плани для соціального забезпечення. По-третє, екологічні проблеми мають низку характеристик, які роблять їх складними для вирішення. До цих характеристик належать: велика кількість учасників на різних рівнях, які впливають на результати, низька видимість результатів, множинні джерела проблеми та розмитість відповідальності. Інші соціальні проблеми також мають деякі з цих характеристик, але їх поєднання є рідкісним у інших сферах політики. По-четверте, наука відіграє більшу роль у визначенні екологічних цілей, ніж у сфері соціального забезпечення. Таким чином, екологічні проблеми є складними з технічної, політичної та адміністративної точок зору. Тому зі зростанням екологічних викликів виникає потреба імплементувати новітні технології у публічне управління для вирішення екологічних проблем та переглянути поточні функції держави у сфері екологічної політики [1].

В Україні процес цифровізації екологічного управління залишається уповільненим через фра-

гментарність даних, відсутність єдиних цифрових платформ, низький рівень автоматизації та слабка координація між установами. Це значно ускладнює своєчасне реагування на екологічні загрози й знижує ефективність державної політики у сфері довкілля. Світовий досвід демонструє високу ефективність використання штучного інтелекту, супутникового моніторингу, Інтернету речей та великих даних для прогнозування ризиків, контролю забруднень і прийняття управлінських рішень. В Україні впровадження цих рішень потребує прискорення, адже саме цифрові технології можуть стати основою для прозорого, ефективного й стійкого екологічного управління, а також для виконання міжнародних зобов'язань у сфері сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У сучасних дослідженнях все більше уваги приділяється інтеграції інноваційних технологій у сферу екологічного управління. Зокрема, Лін Ю. та ін. [2] акцентують увагу на стратегічних можливостях зелених інновацій, підкреслюючи важливість розвитку екологічних технологій для підвищення конкурентоспроможності бізнесу. Їх підхід до оцінки факторів, що сприяють інноваціям, є важливим для України, оскільки країні необхідно створити стимули для активнішого розвитку екологічних технологій. Розвиток циркулярної економіки в контексті цифровізації проаналізували Чарі А. та ін. [3], чия ідея беззаперечно релевантна для України в контексті модернізації виробничих процесів та ресурсоефективного управління.

У вітчизняних дослідженнях Пітак І. В. та ін. [4] розглянули можливості геоінформаційних систем (ГІС), підкреслюючи їх значення для моніторингу та прогнозування стану навколишнього середовища. Це є одним із ключових напрямів для побудови ефективної екологічної інфраструктури в Україні.

Тема супутникового моніторингу розкрита у роботах Нестеренка С. В. та ін. [5] щодо стану української супутникової системи, а також у дослідженнях Тараріка О. Г. та співавторів [6], які аналізували можливості аерокосмічного моніторингу для боротьби з деградацією земель. Ці дослідження демонструють великий потенціал використання космічних технологій для екологічного нагляду в Україні, особливо в умовах кліматичних змін.

Важливими є дослідження цифрових двійників С. Ху та ін. [7], Е. Тіта та ін. [8], а також Ані Лапак з Мюнхенського технічного університету [9], яка продемонструвала можливості цифрових двійників для довгострокового моделювання лісових екосистем. Для України цифрові двійники можуть стати інструментом точного прогнозування змін у природних ландшафтах. Гюнтер В. А. та ін. [10] підкреслюють важливість Big Data для стратегічного управління інформацією. Впровадження аналізу великих даних у публічне управління дозволить Україні забезпечити оперативнішу оцінку екологічних ризиків та формувати доказову політику.

Таким чином, останні дослідження підтверджують, що інтеграція цифрових технологій у сферу екологічного управління є стратегічно важливою для багатьох країн, і засвоєння цього досвіду Україною сприятиме підвищенню ефективності, стійкості та прозорості екологічної політики.

Метою даного дослідження є комплексний аналіз можливостей та перспектив застосування сучасних технологічних інновацій у системі публічного управління екологічною сферою України. Дослідження спрямоване на виявлення ролі цифрових технологій, таких як штучний інтелект, великі дані, Інтернет речей, блокчейн та супутниковий моніторинг у підвищенні ефективності екологічної політики. Особлива увага приділяється вивченню шляхів інтеграції цих технологій у практики управління охороною довкілля в умовах зростаючих екологічних викликів та євроінтеграційних процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Україна, як держава, що зазнала значних руйнувань унаслідок війни, має нагальну потребу в інтенсивному та динамічному розвитку всіх сфер суспільної діяльності. Військові дії, неефективне управління протягом періоду відновлення незалежності, а також радянське минуле суттєво вплинули на темпи розвитку країни, зокрема на сприйняття та впровадження передових технологій у повсякденне життя громадян. Водночас післявоєнний етап може стати точкою відліку для залучення інвестицій та компенсування тривалого відставання в інноваційних процесах.

Трансформаційні процеси в Україні обумовлюють необхідність переосмислення парадигми державного управління, його змістовних і формальних аспектів. Комплексне виконання управлінських функцій органами виконавчої влади, зокрема на регіональному рівні, потребує інтеграції сучасних інноваційних механізмів управління. Однак для значної частини місцевих органів державної влади та органів місцевого самоврядування такі управлінські інструменти є недостатньо актуалізованими, попри їхню ефективну імплементацію в адміністративних і корпоративних структурах розвинених країн. Темпи інноваційного розвитку системи державного управління в Україні є відносно низькими порівняно з бізнесом, що значною мірою зумовлено інституційними та бюрократичними бар'єрами.

У контексті прагнення України до інтеграції в Європейський Союз важливим стратегічним завданням залишається прискорена модернізація всіх сфер життєдіяльності, де публічне управління відіграє ключову роль. Зокрема, впровадження технологій штучного інтелекту та розвиток інновацій є визначальними чинниками державного та суспільного прогресу. Як зазначає Дегтярьова І. О.: «Загальними закономірностями суспільного розвитку є динамізація всіх процесів, ускладнення та поява нових форм функціонування, інтеграція та конвергенція, непередбачуваність подій, нерівномірність

розвитку систем, зростання обсягів інформації тощо. В таких умовах ефективність державного та муніципального управління значною мірою залежить від використання достатнього обсягу інноваційних форм і методів управління, оскільки традиційні підходи втрачають свою результативність» [11, с. 5].

Сучасна екологічна політика України потребує інтеграції інноваційних механізмів для ефективного реагування на екологічні виклики та забезпечення стійкого розвитку. В умовах глобальних змін, викликаних кліматичними загрозами та антропогенним впливом, ключову роль відіграє концепція «зелених динамічних можливостей», що спирається на адаптацію, трансформацію та мобілізацію ресурсів для екологічної стійкості.

Динамічні можливості екологічного спрямування дозволяють державним інституціям та бізнесу розпізнавати стратегічні перспективи, інтегрувати технологічні інновації та оперативно реагувати на екологічні ризики. Залучення ресурсів і технологій та їх трансформації є ключовими елементами інноваційної екологічної політики, що дозволяють оптимізувати управлінські процеси і впроваджувати нові підходи до екологічного регулювання [2].

Інновації в екологічній політиці України мають спиратися на інтеграцію цифрових технологій, циркулярну економіку та розвиток стійких бізнес-моделей. Використання технологій штучного інтелекту, великих даних та автоматизованих систем моніторингу сприяє підвищенню ефективності управління природними ресурсами. Водночас адаптація принципів циркулярної економіки дозволяє мінімізувати негативний вплив на довкілля шляхом скорочення відходів та впровадження замкнених виробничих циклів [3].

Цифрові технології та штучний інтелект. Для оптимізації заходів із захисту навколишнього середовища, провідні держави світу активно впроваджують інноваційні технології, зокрема штучний інтелект (ШІ) та супутниковий моніторинг. Сучасні автоматизовані системи аналізу даних суттєво трансформують підходи до екологічного моніторингу, забезпечуючи високу точність прогнозування змін у довкіллі та оцінку екологічних ризиків.

Ряд міжнародних компаній, серед яких GeoOptics, Planet Labs, Global Forest Watch (GFW), Spire Global та SALO Sciences, займаються розробкою інструментів для виявлення антропогенних та природних загроз, а також підвищення ефективності природоохоронних заходів. Зокрема, компанія GeoOptics спеціалізується на зборі та аналізі атмосферних і поверхневих даних, що дає змогу прогнозувати катастрофічні явища, такі як повені та зсуви ґрунту. Global Forest Watch використовує високоточні супутникові знімки для моніторингу вирубки лісів, виявлення лісових пожеж та оцінки загального стану екосистем [12]. Компанія Planet Labs здійснює безперервне спостереження за змінами ландшафтів,

водними ресурсами та кліматичними процесами, що дозволяє урядам і науковим установам оперативно реагувати на екологічні загрози [13].

Важливу роль у прогнозуванні та аналізі ризиків для здоров'я населення відіграє компанія Spire Global [14], методи якої можуть бути адаптовані для оцінки впливу екологічних факторів, таких як забруднення атмосферного повітря та водних ресурсів. SALO Sciences зосереджується на розробці систем запобігання природним катастрофам, зокрема лісовим пожежам, і застосовує алгоритми машинного навчання для відновлення біорізноманіття. Компанія також розробляє цифрові інструменти для моніторингу, звітності та верифікації (MRV), що допомагають урядам і землевласникам ефективно управляти природними ресурсами. Їхнє програмне забезпечення здійснює картографування лісів із використанням передових аналітичних методів, базованих на супутникових знімках високої роздільної здатності. Обробка таких даних потребує інтеграції науково-технічних систем та залучення експертного екологічного аналізу для трансформації супутникових спостережень у точні кількісні показники стану екосистем [15].

У контексті України впровадження зазначених технологій може суттєво підвищити ефективність екологічної політики та управління природними ресурсами. Використання супутникових даних сприятиме оперативному виявленню незаконної вирубки лісів у Карпатському регіоні, моніторингу змін у гідрологічному балансі, зокрема рівня води у річках та водоймах, а також фіксації випадків їхнього забруднення. Високоточні алгоритми штучного інтелекту здатні автоматично аналізувати нічні супутникові знімки, що дозволить своєчасно виявляти нелегальні розробки корисних копалин та відстежувати динаміку природних пожеж у лісових і степових регіонах. Крім того, ШІ може бути застосований для прогнозування процесів опустелення та деградації болотних екосистем.

Запровадження таких систем, як Global Forest Watch, у державні екологічні програми дозволить покращити контроль за використанням природних ресурсів та створити ефективні механізми реагування на екологічні виклики. Використання технологій наприклад як Planet Labs сприятиме оперативному реагуванню на природні катаклізми, такі як повені в Закарпатському регіоні чи пожежі в Чорнобильській зоні відчуження. У містах супутниковий моніторинг та штучний інтелект забезпечать точну оцінку змін у площах зелених насаджень та якості міського середовища.

В Україні на даному етапі широко використовуються технології ГІС особливо у екологічному моніторингу. Геоінформаційні системи (ГІС) стали важливим інструментом для аналізу та управління екологічними процесами в Україні, особливо на тлі зростаючого антропогенного впливу та змін клімату. Вони дозволяють інтегрувати різноманітні дані — від

спутникових знімків до наземних вимірювань — у єдину просторову модель, що дає змогу оцінювати стан довкілля, прогнозувати екологічні ризики та оптимізувати використання природних ресурсів. Для роботи з ГІС використовують супутники [4, с. 22–24].

Сучасний екологічний моніторинг в Україні неможливий без інтеграції даних із міжнародних та вітчизняних супутників. Такі космічні апарати, як Sentinel-2 (Європейське космічне агентство) та Landsat 8–9 (NASA), надають високодеталізовані мультиспектральні знімки, які стали основою для аналізу земельних покриттів, виявлення змін у рослинності та оцінки антропогенного впливу. Однак Україна розвиває й власні космічні технології: у 2022 році було запущено супутник «Січ-2–30», призначений для дистанційного зондування Землі [5]. Його камери здатні фіксувати зміни у рослинному покриві, виявляти джерела забруднення та аналізувати динаміку посушливих явищ, що робить його важливим інструментом для покращення національної системи екологічного моніторингу.

Особливе значення ГІС набуло у промислових регіонах, таких як Дніпро та Кривий Ріг, де вони використовуються для аналізу забруднення повітря, ґрунтів і водних ресурсів. Інтеграція даних із Sentinel-2, Landsat та «Січ-2–30» дозволяє відстежувати зміни рослинного покриву, виявляти деградовані території та оцінювати ефективність природоохоронних заходів. Наприклад, спектральний аналіз допомагає ідентифікувати зони впливу промислових викидів, де концентрація важких металів у ґрунтах перевищує допустимі норми. Ці дані стають основою для планування рекультиваційних робіт та оптимізації виробничих процесів. У сільськогосподарських регіонах, зокрема в Херсонській, Миколаївській та Одеській областях, ГІС відіграють ключову роль у боротьбі з деградацією земель [6, с. 24–26].

Використання індексів, таких як NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для оцінки рослинності та TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) для визначення вологості ґрунтів дозволяє аграріям адаптуватися до кліматичних змін. На основі цих показників фермери можуть оптимізувати зрошення, зменшують витрати води та мінімізують ризики втрати врожаю. Також індекси вегетації, такі як NDVI, дозволяють класифікувати типи лісів, визначати рівень фотосинтетичної активності та прогнозувати вплив кліматичних змін на лісові покриви [16, с. 4–5]. Завдяки високій спектральній роздільній здатності, Sentinel-2 ідентифікує зміни у біорізноманітті та оцінює ефективність регенерації екосистем після лісових пожеж або вирубок.

Супутникова платформа Sentinel-2, інтегрована в програму Copernicus, забезпечує високоточний аналіз параметрів навколишнього середовища завдяки мультиспектральним сенсорам, здатним детектувати спектральні сигнатури, пов'язані з вологістю ґрунту, рослинним покривом та антропоген-

ними втручаннями. Використання індексів, таких як NDMI (Normalized Difference Moisture Index), дозволяє ідентифікувати рівень гідрологічного стресу в ґрунтах, що є критичним для прогнозування посух, управління водними ресурсами.

У контексті екологічної політики, дані Sentinel-2 застосовуються для оцінки деградації земель, зокрема в регіонах з інтенсивним антропогенним навантаженням. Наприклад, Sentinel-2 може аналізувати індекс GEMI, щоб виявляти ділянки, де ґрунти зруйновані через видобуток бурштину і використовуючи спектральний аналіз вдалось виявити локації та масштаби незаконного видобутку бурштину на території Волині та Полісся, де процеси ґрунтової ерозії та руйнування екосистем супроводжуються значними екологічними збитками. Ця функціональність супутника є ключовою для правоохоронних та природоохоронних органів у боротьбі з нелегальною господарською діяльністю.

Супутник Sentinel-2 відіграє важливу роль у виявленні та аналізі пожеж на території України завдяки даним у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR), які дозволяють ідентифікувати теплові аномалії навіть через густий дим або хмарність. Ця можливість забезпечує оперативне попередження про виникнення вогнищ, що дозволяє екстреним службам швидко мобілізувати ресурси для локалізації та гасіння вогню. Дані супутника також дають змогу точно оцінювати масштаби збитків, включаючи знищені лісові масиви, сільськогосподарські угіддя або торфовища, що є ключовим для планування відновлювальних робіт і захисту екосистем. Окрім екологічних наслідків, моніторинг пожеж через Sentinel-2 має значення для кліматичної політики — вивільнення вуглецю (CO₂) під час горіння та деградація ґрунтів поглиблюють глобальне потепління, тому своєчасне виявлення вогнищ допомагає зменшити вуглецевий слід [17, с. 122–128].

Моніторинг стану лісових масивів, особливо в Карпатському регіоні, де ГІС використовуються для виявлення незаконних рубок і оцінки наслідків зсувів ґрунту, відіграє ключову роль у збереженні екосистем. Дані з супутників Sentinel-2 та Landsat дозволяють створювати детальні карти лісового покриву, а алгоритми автоматизованого детектування змін (change detection) дають змогу оперативно реагувати на порушення [18].

У водному господарстві супутниковий моніторинг став основним інструментом для аналізу стану водойм. У басейнах Дніпра та Дністра дані з мультиспектральних знімків використовуються для відстеження рівня води, якості водних ресурсів і процесів евтрофікації. Наприклад, спектральний аналіз допомагає виявляти цвітіння водоростей, яке є індикатором надлишку нутрієнтів у водоймах [19, с. 41]. Ця інформація критично важлива для запобігання екологічним катастрофам, таких як масова загибель риби або забруднення питної води.

Digital Twins (цифрові двійники) — це віртуальні моделі реальних об'єктів або процесів, що створюються за допомогою даних із сенсорів, супутників, дронів та інших джерел. Вони дозволяють моделювати, аналізувати та прогнозувати зміни в навколишньому середовищі, що є критично важливим для екологічного моніторингу та управління природними ресурсами. Цифровий двійник відображає ключові характеристики фізичного об'єкта у цифровому середовищі. Завдяки інструментам проєктування, моделювання та віртуальної реальності створюється такий двійник дозволяє не лише аналізувати поточний стан об'єкта, а й прогнозувати можливі ризики, невизначені фактори та знаходити оптимальні рішення для їх усунення [7, с.2]. Крім того, цифровий двійник може отримувати зворотний зв'язок від реальних операцій, що дозволяє покращувати точність його симуляцій і прогнозів. Із розвитком інтелектуальних інформаційних технологій цифрові двійники все більше інтегруються у реальний світ через підключення датчиків та виконавчих пристроїв до хмарних систем і Інтернету. Розвиток мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) та використання супутникових технологій, таких як Starlink, забезпечують безперервний обмін даними між фізичними об'єктами та їхніми цифровими копіями майже в реальному часі [20, с. 611].

Здатність цифрових двійників здійснювати постійний моніторинг даних у реальному часі мінімізує час простою, оптимізує використання ресурсів і продовжує термін експлуатації обладнання. Цифрові двійники відкривають нову еру аналітики та оптимізації, демонструючи трансформаційний потенціал у різних галузях. Вони сприяють підвищенню ефективності, стимулюють інновації та забезпечують прийняття обґрунтованих рішень на основі детального аналізу реальних і змодельованих даних [8]. Їх можна використовувати у різних напрямках у сфері захисту навколишнього середовища, зокрема для моніторингу змін клімату та управління природними ресурсами, охорони лісів та боротьби з вирубкою, контролю якості водних ресурсів, відновленої енергетики та зменшення викидів.

Одним із ключових напрямів застосування цифрових двійників є аналіз мікросередовищ, які визначають кліматичні умови на локальному рівні. Наприклад, у містах цифрові двійники дозволяють детально відстежувати підвищення температури, інтегруючи дані з сенсорів, супутникових знімків і метеостанцій для моделювання теплових потоків та оцінки впливу факторів, таких як забудова, тип дорожнього покриття та наявність зелених насаджень. Це дозволяє міським адміністраціям оптимізувати озеленення, планувати матеріали для покриття вулиць і впроваджувати заходи для зниження перегріву. З іншого боку, застосування цифрових двійників для аналізу змін клімату у контрольованих аграрних екосистемах допомагає впроваджувати

адаптаційні заходи, оптимізувати енергетичні та екологічні стратегії, а також підвищувати стійкість до кліматичних змін [21].

Технологія Digital Twins відкриває нові можливості для збереження лісів, забезпечуючи моніторинг, прогнозування та управління лісовими ресурсами. Завдяки поєднанню супутникових знімків, сенсорів вологості та даних з дронів цифрові двійники дозволяють у реальному часі відстежувати стан лісів, виявляти ознаки деградації, незаконної вирубки та прогнозувати пожежі. Використання штучного інтелекту для аналізу кліматичних умов дає змогу передбачати ризики загоряння та оперативно вживати заходів для запобігання катастрофам. Сучасні моделі, такі як **iLand**, дозволяють прогнозувати стан лісів у довгостроковій перспективі, враховуючи зміну клімату, порушення екосистем і людське втручання. Ця технологія, що охоплює 150 видів дерев і використовується на різних континентах, допомагає оцінювати стійкість лісів та розробляти ефективні стратегії їхнього відновлення. Наприклад, застосування цифрових двійників у відновленні лісів Амазонії дозволяє не лише контролювати темпи вирубки, а й аналізувати ефективність заходів із повторного заліснення [9].

Big Data. Основні виклики імплементації технологій включають високу капіталомісткість технологічних рішень, дефіцит кваліфікованих кадрів у сфері аналізу великих масивів екологічних даних (Big Data), обмеженість інфраструктурних потужностей для ефективного збору, обробки та зберігання інформації. Додатковим ризиком є забезпечення кібербезпеки екологічних інформаційних систем, що критично важливо для запобігання несанкціонованому доступу до стратегічно значущих екологічних даних. Подолання цих бар'єрів потребує впровадження комплексних освітніх програм для підготовки спеціалістів у сфері екологічної аналітики, розвитку науково-дослідницької інфраструктури та посилення співпраці з міжнародними центрами передового досвіду у сфері цифрових екологічних технологій [10]. Big Data — це технологія та концепція обробки, зберігання та аналізу великих обсягів структурованих і неструктурованих даних, які генеруються з різних джерел у режимі реального часу. У контексті екологічного управління Big Data відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного моніторингу навколишнього середовища, прогнозуванні екологічних загроз та розробці стратегій для сталого розвитку.

Використання сенсорних мереж, супутникових знімків, дронів та IoT-пристроїв дозволяє в реальному часі збирати великі масиви екологічних даних і швидко виявляти забруднення, оцінювати стан природних ресурсів і прогнозувати екологічні ризики. Використання алгоритмів штучного інтелекту для аналізу великих даних дозволяє державним установам ухвалювати науково обґрунтовані рішення

ня щодо екологічної політики, планування міського середовища та управління ресурсами. Завдяки обробці Big Data можливо автоматизувати контроль за дотриманням екологічних норм підприємствами, ідентифікувати потенційні порушення та вчасно реагувати на екологічні загрози. Аналіз історичних даних та машинне навчання дозволяють прогнозувати зміни клімату, розвиток природних катастроф (повені, пожежі, зсуви) та оцінювати довгострокові екологічні наслідки економічної діяльності.

Використання розподілених систем зберігання та блокчейн-технологій допомагає захищати екологічні дані від несанкціонованого доступу та маніпуляцій, забезпечуючи прозорість у сфері екологічного управління.

Наразі застосування Big Data у публічному управлінні України перебуває на етапі розвитку, і для повноцінної реалізації його потенціалу необхідні суттєві покращення. Для подальшого впровадження технологій аналізу великих даних у державне управління слід інвестувати в освіту та підготовку фахівців з аналітики даних, розширювати міжсекторальну співпрацю та впроваджувати передові міжнародні підходи [22].

Однак економічний ефект від розвитку відкритих та великих даних напряму залежить від створення вдалих проектів на їх основі у різних галузях суспільної діяльності, адже цінність вони матимуть лише тоді, коли використовуватимуться для створення продуктів та сервісів, що допомагають вирішувати повсякденні проблеми суспільства, бізнесу й держави [23].

Законодавча та фінансова підтримка впровадження технологій у сфері екологічної політики. На даному етапі в Україні серед нормативно-правових актів, які регулюють впровадження технологій для моніторингу довкілля, важливою є Постанова Кабінету Міністрів України № 392 від 21 квітня 2021 року. Вона визначає порядок проведення національної інвентаризації лісів — ключового елементу екологічної політики та стратегічного управління лісовими ресурсами. Документ передбачає комплексний підхід до збору, обробки та аналізу даних про стан лісів, що відповідає міжнародним практикам сталого лісокористування. Основна мета — отримання достовірної інформації про кількісні та якісні характеристики лісових насаджень для прийняття обґрунтованих управлінських рішень [24].

Постанова запроваджує використання сучасних технологій моніторингу, зокрема дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем (ГІС) та польових досліджень, що забезпечують точність і системність у виявленні змін лісового покриву та оцінці впливу різних факторів. Важливим є також впровадження відкритих даних, що забезпечує прозорість управлінських процесів і доступ до інформації для науковців, громадськості та екологічних організацій.

Фінансування заходів здійснюється з державного бюджету, що підкреслює пріоритетність напряму. Регулярна інвентаризація лісів дозволяє ефективно обліковувати ресурси та інтегрувати дані у міжнародні екологічні ініціативи. Це важливий крок до ефективного природоохоронного управління та реалізації стратегії сталого розвитку.

Впровадження інновацій на законодавчому рівні потребує системного підходу, що враховує правові, економічні та технологічні аспекти. Необхідно розробити нормативну базу для застосування ГІС, супутникових систем, штучного інтелекту тощо. Ці акти мають регулювати використання технологій державними структурами, приватним сектором та міжнародними партнерами, а також визначати механізми дотримання екологічних стандартів.

Координацію має здійснювати Міністерство цифрової трансформації та Міністерство захисту довкілля у співпраці з космічним агентством, ДСНС, науковими закладами тощо. Доцільно створити міжвідомчу платформу для інтеграції технологій у державну систему управління екологічною безпекою.

Фінансування можливе з держбюджету, міжнародних фондів, грантів ЄС, ООН, а також за рахунок державно-приватного партнерства. Для стимулювання бізнесу варто запровадити податкові пільги та субсидії для компаній, що впроваджують екологічні технології.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Цифровізація екологічного моніторингу та управління на основі штучного інтелекту, Big Data, супутникових технологій і автоматизованих систем дозволяє суттєво підвищити ефективність прийняття рішень, оптимізувати використання людських і матеріальних ресурсів, зменшити ризики помилок та компенсувати дефіцит кваліфікованих кадрів. Запровадження інноваційних підходів до аналізу екологічних ризиків і використання відкритих цифрових платформ сприяє підвищенню прозорості управління та залученню громадськості до контролю за станом довкілля. Інвестиції у вітчизняні стартапи, міжнародні грантові програми та партнерства сприяють розвитку екологічно орієнтованих технологій та економіки знань. У довгостроковій перспективі важливими є гармонізація національного законодавства з європейськими стандартами, впровадження принципів циркулярної економіки, реформування екологічних інституцій і створення ефективної системи превентивного реагування на екологічні загрози. Такий комплексний підхід забезпечить Україні стійкий екологічний розвиток, підвищення якості життя населення та конкурентні переваги у глобальному середовищі.

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на вивчення механізмів впровадження інноваційних технологій на національному, регіональному та місцевому рівнях у контексті інтеграції України до європейських екологічних ініціатив.

Література

1. Povitkina M. *Necessary but not sustainable? The limits of democracy in achieving environmental sustainability*. PhD Dissertation. University of Gothenburg. 2018. URL: https://gupea.ub.gu.se/bitstream/handle/2077/56151/gupea_2077_56151_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата звернення: 10.03.2025).
2. Lin Y., Tseng M.-L., Chen C.-C., Chiu A. S.F. Positioning strategic competitiveness of green business innovation capabilities using hybrid method. *Expert Systems with Applications*. 2011. № 38(3). P. 1839–1849. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.113>.
3. Chari A., Niedenzu D., Despeisse M., Gonçalves Machado C., Azevedo J. D., Boavida-Dias R., Johansson B. Dynamic capabilities for circular manufacturing supply chains — Exploring the role of Industry 4.0 and resilience. *Business Strategy and the Environment*. 2022. № 31(5). P. 2500–2517. <https://doi.org/10.1002/bse.3040>
4. Пітак І. В., Негадайлов А. А., Масікевич Ю. Г. та ін. *Геоінформаційні технології в екології*: Навчальний посібник. Суми: СумДУ. 2012. 273 с.
5. Нестеренко С. В., Єрмоленко Д. А., Шефер О. В., Клепко А. В. Українська навігаційна супутникова система: Стан і перспективи. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2021. № 65(3). С. 4–7. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.004>.
6. Тараріко О. Г., Сиротенко О. В., Кучма Т. Л., Льєнко Т. В. *Аерокосмічний моніторинг опустелювання та деградації земель*. К., 2017. 55 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/321886648_Aerokosmicnij_monitoring_opusteluvanna_ta_degradacii_zemel (дата звернення: 10.04.2025).
7. Hu C., Shi W., Jiang L. Application case of digital twin technology in electric power system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. № 788(1). 012083. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012083>.
8. Tita E. E., Watanabe G., Shao P., Arie K. Development and application of digital twin–BIM technology for bridge management. *Applied Sciences*. 2023. № 13(13). 7435. <https://doi.org/10.3390/app13137435>.
9. Lapac A. Digital twin model enables precise simulation of forest landscapes, depicting a forest in 100 years. 2024. URL: <https://phys.org/news/2024-12-digital-twin-enables-precise-simulation.html> (дата звернення: 15.04.2025).
10. Günther W. A. et al. Debating big data. *Journal of Strategic Information Systems*. 2017. № 26(3). P. 191–209. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2017.07.003>.
11. Дегтярьова І. О. Інновації в державному і муніципальному управлінні як необхідна умова соціально-економічних досягнень в сучасній Україні. *Вісник Національного університету цивільного захисту України*. 2014. Вип. 1. С. 5–11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNUCZUDU_2014_1_3 (дата звернення: 15.04.2025).
12. *Global Forest Watch*: вебсайт. URL: <https://www.globalforestwatch.org/about/> (дата звернення: 25.03.2025).
13. *Planet Labs PBC. Satellite Imaging and Daily Earth Insights to Take Action*: вебсайт. URL: <https://www.planet.com/> (дата звернення: 01.04.2025).
14. *Spire: Global Data and Analytics*: вебсайт. URL: <https://spire.com/> (дата звернення: 01.04.2025).
15. *Salo Sciences*: вебсайт. URL: <https://salo.ai/> (дата звернення: 01.04.2025).
16. Георгіян М. І., Миронюк В. В. Дешифрування видового складу лісових насаджень за даними супутникових знімків Sentinel-2. *Лісове і садово-паркове господарство*. 2017. № 11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc_2017_11_6. (дата звернення: 03.04.2025).
17. Бушин І. М., Черненко Р. В. Використання згорткових нейронних мереж для розпізнавання згорілих полів на супутникових знімках на території України. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2023. № 29(1). P. 122–132. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-29-01-071>.
18. Myroniuk V., Kutia M., Sarkissian A. J., Bilous A., Liu S. Regional-scale forest mapping over fragmented landscapes using global forest products and Landsat time series classification. *Remote Sensing*. 2020. № 12(1). P. 187. <https://doi.org/10.3390/rs12010187>.
19. Соколов Є. В. Використання ГІС та ДЗЗ у природоохоронних дослідженнях прибережних екосистем північно-західного Причорномор'я. *ГІС і заповідні території. Матеріали науково-методичного семінару (04.08 червня 2020 р.) / упоряд. С. В. Винокурова, Д. В. Дядін. Харків: Основа. 2020. С. 40–44.*
20. Ahn E.-Y., Lee J., Bae J., Kim J.-M. Analysis of Emerging Geo-technologies and Markets Focusing on Digital Twin and Environmental Monitoring in Response to Digital and Green New Deal. *Economic and Environmental Geology*. 2020. № 53(5). P. 609–617. <https://doi.org/10.9719/EEG.2020.53.5.609>.
21. Chikukwa A., Fobiri G., Moyo T., Musonda I., Moyo T. Digital twins in microclimate analysis. *Digital Twins for Smart Cities and Villages / ed. by Iyer S., Nayyar A., Paul A., Navel M. Elsevier*. 2024. P. 513–536. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28884-5.00022-1>.
22. Скібіна Т. І. Застосування великих масивів даних (Big Data) для підвищення ефективності державного управління в Україні. *Таврійський науковий вісник*. 2024. № 5. P. 86–91. <https://doi.org/10.32782/tnv-pub.2024.5.10>.
23. Твердохліб О. С., Грицяк Н. В. Практичні аспекти застосування технологій аналізу даних великих масивів (Big Data) в публічному управлінні. *Ефективність державного управління*. 2020. № 3(64). С. 121–235. <https://doi.org/10.33990/2070-4011.64.2020.217610>.
24. Про затвердження Порядку проведення національної інвентаризації лісів та внесення зміни у додаток до Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних: Постанова Кабінету Міністрів України від 21. 04. 2021 р. № 392. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 11.04.2025).

References

1. Povitkina, M. (2018). *Necessary but not sustainable? The limits of democracy in achieving environmental sustainability*. PhD Dissertation. University of Gothenburg. URL: https://gupea.ub.gu.se/bitstream/handle/2077/56151/gupea_2077_56151_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
2. Lin, Y., Tseng, M.-L., Chen, C.-C. and Chiu, A.S.F. (2011). Positioning strategic competitiveness of green business innovation capabilities using hybrid method. *Expert Systems with Applications*, 38(3): 1839–1849. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.113>.
3. Chari, A., Niedenzu, D., Despeisse, M., Gonçalves Machado, C., Azevedo, J. D., Boavida-Dias, R. and Johansson, B. (2022). Dynamic capabilities for circular manufacturing supply chains — Exploring the role of Industry 4.0 and resilience. *Business Strategy and the Environment*, 31(5): 2500–2517. <https://doi.org/10.1002/bse.3040>.
4. Pitak, I. V., Negadailov, A. A., Masikevych, Yu. H., Pliatsuk, L. D., Shaporev, V. P. and Moiseiev, V. F. (2012). *Geoinformation technologies in ecology*. Sumy: Sumy State University [in Ukrainian].
5. Nesterenko, S. V., Yermolenko, D. A., Shefer, O. V. and Klepko, A. V. (2021). Ukrainian navigation satellite system: Current state and prospects. *Control, Navigation and Communication Systems*, 65(3): 4–7. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.004> [in Ukrainian].
6. Tarariko, O. H., Syrotenko, O. V., Kuchma, T. L. and Iliencko, T. V. (2017). *Aerospace monitoring of desertification and land degradation*. Kyiv: National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. URL: https://www.researchgate.net/publication/321886648_Aerokosmicnij_monitoring_opusteluvanna_ta_degradacii_zemel [in Ukrainian].
7. Hu, C., Shi, W. and Jiang, L. (2019). Application case of digital twin technology in electric power system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788(1): 012083. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012083>.
8. Tita, E. E., Watanabe, G., Shao, P. and Arii, K. (2023). Development and application of digital twin-BIM technology for bridge management. *Applied Sciences*, 13(13): 7435. <https://doi.org/10.3390/app13137435>.
9. Lapac, A. (2024). Digital twin model enables precise simulation of forest landscapes, depicting a forest in 100 years. URL: <https://phys.org/news/2024-12-digital-twin-enables-precise-simulation.html>.
10. Günther, W. A. et al. (2017). Debating big data. *Journal of Strategic Information Systems*, 26(3): 191–209. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2017.07.003>.
11. Dehtiariova, I. O. (2014). Innovations in public and municipal administration as a necessary condition for socio-economic achievements in modern Ukraine. *Bulletin of the National University of Civil Defence of Ukraine*, 1: 5–11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNUCZUDU_2014_1_3 [in Ukrainian].
12. Global Forest Watch (n.d.). URL: <https://www.globalforestwatch.org/about/>.
13. Planet Labs PBC. (2025). Satellite Imaging and Daily Earth Insights to Take Action. URL: <https://www.planet.com/>.
14. Spire: Global Data and Analytics. (n.d.). URL: <https://spire.com/>.
15. Salo Sciences. (2023). URL: <https://salo.ai/>.
16. Heorhiyan, M. I. and Myroniuk, V. V. (2017). Deciphering the species composition of forest stands using Sentinel-2 satellite imagery. *Forestry and Landscape Gardening*, 11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc_2017_11_6 [in Ukrainian].
17. Bushyn, I. M., Chernenko, R. V. (2023). The use of convolutional neural networks for the recognition of burned fields on satellite photos in the territory of Ukraine. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 29(1): 122–132. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-29-01-071> [in Ukrainian].
18. Myroniuk, V., Kutia, M., Sarkissian, A. J., Bilous, A. and Liu, S. (2020). Regional-scale forest mapping over fragmented landscapes using global forest products and Landsat time series classification. *Remote Sensing*, 12(1): 187. <https://doi.org/10.3390/rs12010187>.
19. Sokolov, Ye. V. (2020). The use of GIS and remote sensing in environmental research of coastal ecosystems in the northwestern Black Sea region. *GIS and Protected Areas: Proceedings of the Scientific and Methodological Seminar (04–08 June, 2020)*, edited by S. Vynokurova and D. Diadin. Kharkiv: Osnova [in Ukrainian].
20. Ahn, E.-Y., Lee, J., Bae, J. and Kim, J.-M. (2020). Analysis of Emerging Geo-technologies and Markets Focusing on Digital Twin and Environmental Monitoring in Response to Digital and Green New Deal. *Economic and Environmental Geology*, 53(5): 609–617. <https://doi.org/10.9719/EEG.2020.53.5.609>.
21. Chikukwa, A., Fobiri, G., Moyo, T., Musonda, I. and Moyo, T. (2024). Digital twins in microclimate analysis. In: Iyer, S., Nayyar, A., Paul, A., and Navel, M. (Eds.) *Digital Twins for Smart Cities and Villages*. Elsevier: 513–536. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28884-5.00022-1>.
22. Skibina, T. I. (2024). Application of big data to improve the efficiency of public administration in Ukraine. *Tavriisky Scientific Bulletin*, 5: 86–91. <https://doi.org/10.32782/tnv-pub.2024.5.10>.
23. Tverdokhlib, O. S. and Hrytsiak, N. V. (2020). Practical aspects of using big data analytics technologies in public administration. *Efficiency of Public Administration*, 64(3): 121–235. <https://doi.org/10.33990/2070-4011.64.2020.217610> [in Ukrainian].
24. On approval of the Procedure for conducting a national forest inventory and amendments to the Annex to the Regulation on data sets to be published in the form of open data. Resolution No. 392. (2021). *Cabinet of Ministers of Ukraine*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392-2021-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].