

УДК 35:[502:32]

DOI <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.13>**Володимир САВЧИН**

аспірант кафедри регіонального та місцевого розвитку,

Національний університет «Львівська політехніка»

volodymyrsvchyn@gmail.com

ORCID: 0009-0009-6291-3108

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ЯК УПРАВЛІНСЬКА ТЕХНОЛОГІЯ У ЗБЕРЕЖЕННІ ДОВКІЛЛЯ

Анотація. Стаття присвячена дослідженню цифрових двійників як новітнього інструменту публічного управління у сфері охорони природних екосистем. Обґрунтовано управлінський потенціал цифрового двійника як цифрової репрезентації природного об'єкта чи явища, що функціонує в реальному часі та дає змогу моделювати сценарії змін, прогнозувати екологічні ризики та підвищувати обґрунтованість управлінських рішень. Запропоновано розглядати цифровий двійник не як суто технічну систему, а як частину управлінської інфраструктури, що забезпечує взаємодію між даними, просторовим аналізом, нормативним регулюванням і процесами ухвалення рішень. Проаналізовано перспективи впровадження цифрових двійників у захисті лісових, водних, гірських та степових екосистем України, а також виклики, пов'язані із правовим, організаційним і кадровим забезпеченням цієї інновації, її потенціал у контексті післявоєнного відновлення природних екосистем України. **Метою** статті є обґрунтування можливостей застосування цифрових двійників як інструменту публічного управління у сфері охорони природних екосистем, а також аналіз умов і викликів їх впровадження в екологічній політиці України, зокрема в аспекті післявоєнного відновлення довкілля. **Методологія** дослідження. У дослідженні використано системний і структурно-функціональний підходи для аналізу цифрового двійника як управлінського інструменту. Застосовано порівняльно-правовий метод для вивчення міжнародного досвіду, а також кейс-метод для ілюстрації можливостей впровадження цієї технології в охороні природних екосистем. **Наукова новизна** дослідження полягає в обґрунтуванні цифрового двійника як управлінського, а не лише технічного інструменту в системі охорони природних екосистем. Запропоновано розглядати його як елемент публічного управління, що поєднує дані, цифрове моделювання та нормативну основу для ухвалення екологічно обґрунтованих рішень. **Висновки.** Визначено, що ключовими викликами для впровадження цифрових двійників у сфері охорони природних екосистем є відсутність узгодженої нормативної бази, низький рівень інтеграції цифрових даних, обмежена інституційна спроможність органів влади та низький рівень міжвідомчої взаємодії. Рекомендовано розробити концепцію державної підтримки цифрових моделей екосистем, забезпечити доступ до актуальних геоекологічних даних, а також підвищити цифрову компетентність управлінських кадрів. Запропоновані підходи сприятимуть формуванню науково обґрунтованої екологічної політики, прозорості рішень у сфері природокористування та посиленню сталості управління довкіллям в Україні.

Ключові слова: цифровий двійник, публічне управління, природні екосистеми, охорона довкілля, екологічна політика, просторове моделювання, цифрова трансформація.

Volodymyr SAVCHYN

Postgraduate Student at the Department of Regional and Local Development,

Lviv Polytechnic National University

volodymyrsvchyn@gmail.com

ORCID: 0009-0009-6291-3108

DIGITAL TWINS AS A GOVERNANCE TECHNOLOGY FOR ECOSYSTEM PRESERVATION

Abstract. The article is devoted to the study of digital twins as the latest tool for public administration in the field of natural ecosystem protection. It substantiates the management potential of a digital twin as a digital representation of a natural object or phenomenon that functions in real time and allows modeling scenarios of change, predicting environmental risks, and improving the soundness of management decisions. It is proposed to consider a digital twin not

as a purely technical system, but as part of the management infrastructure that ensures interaction between data, spatial analysis, regulatory control, and decision-making processes. The article analyzes the prospects for the implementation of digital twins in the protection of forest, water, mountain, and steppe ecosystems in Ukraine, as well as the challenges associated with the legal, organizational, and human resources support for this innovation, and its potential in the context of the post-war restoration of Ukraine's natural ecosystems. **The aim** of the article is to justify the possibilities of using digital twins as a tool for public management in the field of natural ecosystem protection, as well as to analyze the conditions and challenges of their implementation in Ukraine's environmental policy, particularly in terms of post-war environmental restoration. **Research methodology.** The study applies systemic and structural-functional approaches to analyze the digital twin as a managerial tool. Comparative legal analysis is used to examine international practices, and the case-study method illustrates the potential application of this technology in ecosystem protection. **Scientific novelty** lies in the conceptualization of the digital twin as a governance, rather than solely technical, tool within the system of natural ecosystem protection. It is proposed to consider it as an integral element of public administration that integrates data, digital modeling, and regulatory frameworks for environmentally sound decision-making. **Conclusions.** Key challenges for the implementation of digital twins in ecosystem protection include the lack of a coherent regulatory framework, insufficient integration of digital data, limited institutional capacity of public authorities, and weak interagency coordination. It is recommended to develop a national concept for supporting digital ecosystem models, ensure access to relevant geoeological data, and improve the digital competence of administrative personnel. The proposed approaches will support the development of evidence-based environmental policy, transparency in natural resource management, and the sustainability of environmental governance in Ukraine.

Key words: digital twin, public administration, natural ecosystems, environmental protection, environmental policy, spatial modeling, digital transformation.

Постановка проблеми. У сучасних умовах системної деградації природного середовища, спричиненої зміною клімату, інтенсивною господарською діяльністю та фрагментарністю екологічного моніторингу, публічне управління у сфері охорони довкілля потребує принципово нових інструментів, здатних забезпечити динамічний, контекстно чутливий і науково обґрунтований підхід до ухвалення рішень.

У світі дедалі активніше впроваджуються цифрові двійники – динамічні цифрові моделі фізичних об'єктів і процесів, що синхронізуються з даними в режимі реального часу [8]. Їх застосування, зокрема у сфері захисту довкілля, уже сьогодні дає змогу проводити оцінювання життєвого циклу (LCA – Life Cycle Assessment) на основі поточних експлуатаційних умов, виявляти ризики й оптимізувати вплив на довкілля ще на етапі проектування [5]. Завдяки інтеграції з інтернетом речей (IoT), супутниковими технологіями та блокчейном цифрові двійники можуть утворити основу екосистеми управлінських рішень нового покоління.

Однак, попри позитивні приклади застосування у провідних галузях, в Україні цифрові двійники досі не сприймаються як компонент публічного управління. Наукові дослідження і практичні ініціативи в цій царині переважно фрагментарні або відсутні, а міждисциплінарні підходи до використання даних у реальному часі для стратегічного природоохоронного планування – практично відсутні.

Така ситуація свідчить про розрив між темпами технологічного прогресу й готовністю державного управління до його інституційного освоєння. Отже, постає проблема: як адаптувати підходи до цифрового моделювання стану екосистем, зокрема через використання цифрових двійників, у системі публічного управління охороною довкілля України – з урахуванням потреб інтегрованого планування, сталості, міжвідомчої координації та завдань післявоєнного екологічного відновлення країни.

Аналіз джерел та останніх досліджень. У дослідженні А.М. Мадні, К.К. Мадні та С.Д. Луцера окреслено архітектурні принципи, що дають змогу інтегрувати цифрові моделі протягом усього життєвого циклу складних технічних систем. Акцент зроблено на міждисциплінарності цієї технології та її здатності до адаптивного моделювання [8]. Джероджі та співавтори у своєму огляді доводять, що поєднання цифрових двійників із методами машинного навчання (ML) дозволяє автоматизувати екологічне оцінювання продуктів і процесів, що є особливо цінним для галузей із високим рівнем складності та невизначеності [5].

У контексті екологічного врядування та доступу до екологічної інформації важливе місце посідає Орхуська конвенція (1998 р.), що закріплює право громадськості на участь в ухваленні рішень з питань довкілля, а також вільний доступ до екологічних даних [1]. Практичні можливості реалізації цифрових

двійників у сфері міського планування демонструє платформа Tugron, яка забезпечує високопродуктивну обробку геопросторових даних, відкритість API¹, підтримку стандартів WMS/WFS² та інтеграцію з реальними урбаністичними сценаріями [9]. Ці стандарти широко використовуються в геоінформаційних системах (далі – ГІС), цифрових двійниках, системах просторового планування тощо. Кліпелл і співавтори запропонували концепцію, яка поєднує візуалізацію даних у віртуальній реальності (VR), сенсорні потоки й інтуїтивну взаємодію, особливо ефективну в геонауках і дослідженнях про навколишнє середовище. Автори розглядають низку кейсів, зокрема 3D-моделювання вулкана, симуляцію критичної зони та сценарії лісів майбутнього [7].

Зрештою, ініціатива Destination Earth (DestinE) від Європейської комісії є знаковим проєктом, спрямованим на створення високоточних цифрових двійників Землі, що мають стати основою для екологічного прогнозування, стратегічного планування та реакції на зміну клімату. Проєкт передбачає інтеграцію супутникових даних, штучного інтелекту та хмарних обчислень у відкритій цифровій платформі [4].

Метою роботи є обґрунтування потенціалу цифрових двійників як інструменту публічного управління для забезпечення ефективного захисту природних екосистем України в умовах цифрової трансформації.

Виклад основного матеріалу. Цифровий двійник (Digital Twin, DT) – це віртуальна модель фізичного об'єкта або системи, яка постійно оновлюється за допомогою даних у реальному часі [6]. У контексті екологічного управління це поняття набуває особливого значення, оскільки цифровий двійник екосистеми відображає складну, динамічну та багатоаспектну взаємодію природних процесів, що важко формалізуються традиційними методами. Цифрові двійники дедалі активніше розглядаються як перспективний інструмент публічного управління у сфері охорони довкілля, здатний забезпечити проактивний моніторинг,

моделювання змін і обґрунтування управлінських рішень на основі реального часу. Їх використання має сенс у контексті класифікації природних екосистем – лісових, водних, гірських і степових – кожна з яких має свою специфіку у зборі, інтеграції та інтерпретації даних.

На відміну від промислових або інфраструктурних цифрових двійників, які здебільшого моделюють об'єкти із чіткими геометричними та функціональними параметрами (будівлі, двигуни, транспортні системи), екологічний цифровий двійник моделює розподілені, відкриті та самоорганізовані системи, як-от лісові масиви, водойми, гірські райони або степи. Такі екосистеми характеризуються нерівномірним просторовим розвитком, багатфакторною динамікою, високою залежністю від антропогенних і кліматичних факторів.

У лісових екосистемах цифрові двійники можуть інтегрувати супутникові знімки, IoT-сенсори, біоакустичний моніторинг і картографічні дані для фіксації вирубок, моніторингу біорізноманіття, оцінювання ризику пожеж або вторгнення інвазивних видів. Це дозволяє не лише оперативно реагувати на екологічні загрози, а й планувати створення нових природоохоронних територій, визначати для цього найбільш вразливі або стратегічні ділянки лісового фонду.

У водних екосистемах цифрові двійники формуються на базі гідродинамічних моделей, сенсорного моніторингу якості води та візуалізації із супутників. Завдяки цьому стає можливим моделювання впливу забруднень, оцінювання змін водного балансу, а також відстеження біологічних процесів у динаміці. Один із прикладних сценаріїв – аналіз джерел забруднення та оцінювання шкоди довкіллю, що є критичним у разі аварійних скидів або незаконної діяльності суб'єктів господарювання.

Гірські екосистеми, через свою природну динаміку та геологічну складність, потребують високоточної просторової репрезентації. За допомогою цифрових двійників, які поєднують георадарні дані, LIDAR-сканування, кліматичні моделі й інформацію про туристичні потоки, органи управління можуть прогнозувати зсуви, ерозійні процеси, деградацію природного покриву. Це створює можливості

¹ Інтерфейс програмування застосунків як спосіб взаємодії комп'ютерних програм між собою.

² WMS (Web Map Service) і WFS (Web Feature Service) – це відкриті стандарти обміну геопросторовими даними, розроблені консорціумом OGC (Open Geospatial Consortium).

для довгострокового планування екотуризму, будівництва інфраструктури з урахуванням екосистемних обмежень та запровадження захисних режимів.

У степових регіонах цифрові двійники забезпечують раннє попередження про опустелювання, скорочення рослинного покриву, ерозію ґрунтів і поширення небажаної флори. Аналітика на основі вегетаційних індексів, моделей вітрового навантаження та кліматичних прогнозів дозволяє формувати сценарії екологічної стабілізації, здійснювати зважене оцінювання доцільності розширення міст або інфраструктурного будівництва з урахуванням інтересів екосистем.

Універсальність цифрових двійників виявляється в можливості моделювання різноманітних сценаріїв впливу – як природного, так і антропогенного походження. Вони дозволяють візуалізувати наслідки кліматичних змін для конкретних екосистем, порівнювати альтернативні варіанти просторового планування, прогнозувати наслідки урбанізації, а також обґрунтовувати рішення щодо розміщення нових зон рекреації чи сільськогосподарського використання.

До складу цифрового двійника екосистеми входять такі ключові компоненти:

1. Геопросторові шари – базова просторово-прив'язана інформація про рельєф, ґрунти, рослинність, гідрологічну мережу, інфраструктуру й адміністративні межі.

2. Сенсорні дані (IoT) – дані з датчиків вологості ґрунту, рівня води, якості повітря, температури, шумового забруднення тощо.

3. Супутниковий моніторинг – високочастотні знімки у спектральних діапазонах (оптичному, ІЧ, радіолокаційному) для виявлення змін земного покриву, вирубок, підтоплення, інвазійної рослинності.

4. Сценарні моделі – алгоритми прогнозування (зокрема, з використанням ШІ), які дозволяють моделювати вплив кліматичних змін, урбанізації, забруднення або лісовідновлення.

5. 3D/4D-візуалізація – інтерактивні візуальні моделі, що дозволяють представити не лише просторову, але й часову динаміку об'єкта (наприклад, розвиток ерозійного процесу в гірській місцевості або динаміку забруднення водойми) [3].

Фундаментальна відмінність цифрового двійника від традиційних, наприклад, ГІС-моделей (геоінформаційних систем) полягає в динамічності й інтерактивності. Тоді як ГІС традиційно слугує сховищем просторових даних, які потребують ручного оновлення, цифровий двійник постійно синхронізується з фізичним об'єктом, реагує на зміну стану середовища в режимі реального часу. Окрім того, цифровий двійник має вбудовані механізми зворотного зв'язку – здатність не лише фіксувати зміни, а й адаптувати модель та надавати рекомендації на основі прогнозної аналітики.

Отже, цифровий двійник екосистеми – це інтегрована аналітично-візуальна платформа, яка об'єднує екологічні, просторові, технічні та нормативні дані для забезпечення сталого природокористування та обґрунтованих рішень в екологічній політиці. Цифрові двійники стають не лише технологічним інструментом моніторингу, а й засобом публічного моделювання альтернатив – із прямим впливом на формування природоохоронної політики. Їх запровадження створює потенціал для прозорих, науково обґрунтованих і сталих рішень щодо управління екосистемами в умовах багатофакторного ризику та високої невизначеності, що характерна для кліматично вразливих територій.

Нормативно-правова база України. На сучасному етапі нормативно-правова база України не містить безпосередніх положень, що регулювали б використання цифрових двійників у публічному управлінні чи екологічному моніторингу. Водночас окремі законодавчі та концептуальні документи формують фрагментарне середовище, яке потенційно може бути адаптоване для інтеграції цієї інноваційної технології.

Конституція України визначає обов'язок держави щодо збереження природного середовища, а також гарантує кожному громадянину право на безпечне довкілля, що створює базові засади для впровадження інструментів екологічного моніторингу. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» містить положення про екологічне прогнозування, моніторинг та інформування населення, які можуть бути реалізовані через сучасні цифрові рішення. Особливе значення має Закон

України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних», який запроваджує правові механізми для збору, обміну й стандартизації просторових даних між органами влади, що є критично важливим для створення ефективної платформи цифрових двійників.

У контексті оцінювання впливу на довкілля важливим є врахування положень законів «Про стратегічну екологічну оцінку» та «Про оцінку впливу на довкілля», які передбачають використання прогностичних підходів, картографічної інформації та моделювання сценаріїв змін. Проте на практиці ці інструменти здебільшого реалізуються у формі статичних експертних оцінок, без залучення динамічних цифрових моделей. У сфері цифрової трансформації функціонують загальні документи стратегічного характеру, зокрема Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України, яка не передбачає цифрових двійників як інструменту управління, але орієнтована на запровадження data-driven підходів. Окремі ініціативи, як-от державна цифрова платформа «ЕкоСистема», мають потенціал для інтеграції цифрових моделей, але поки не реалізують такої функціональності.

Особливу актуальність становить адаптація міжнародних стандартів до національного контексту. Україна є стороною Орхуської конвенції, що гарантує відкритість екологічної інформації [1], а також зобов'язана гармонізувати законодавство відповідно до Угоди про асоціацію з Європейським Союзом, включно з вимогами Директиви INSPIRE щодо інфраструктури просторових даних [2].

Попри наявні передумови, упровадження цифрових двійників у сфері охорони довкілля стикається з низкою системних бар'єрів. Передусім це відсутність поняття «цифровий двійник» у національному правовому полі, недостатній рівень координації між галузевими політиками, фрагментарність нормативних підходів до використання цифрових даних і низька інституційна спроможність органів виконавчої влади. Окрім того, наявні процедури екологічного планування залишаються слабо інтегрованими з механізмами просторового аналізу, що унеможливорює повноцінне використання потенціалу цифрового моделювання.

Тож наявна нормативна база України створює лише загальні рамки для цифровізації

екологічного управління, не забезпечує системного правового механізму для розгортання інноваційних технологій – у даному випадку цифрових двійників – як управлінських інструментів. Подальший розвиток у цій сфері потребує законодавчого визначення статусу та функціоналу цифрових моделей, розроблення національних стандартів просторового моделювання природних систем, а також створення міжвідомчої координаційної платформи, здатної забезпечити інтегроване використання даних у публічному управлінні охороною довкілля.

Міжнародний досвід. Розвиток цифрових двійників у сфері публічного управління довкіллям активно підтримується на міжнародному рівні як стратегічний напрям цифрової трансформації екологічної політики. Однією з найвідоміших практик є система управління водними ресурсами в Нідерландах, де цифрові двійники використовуються для моніторингу рівня води, прогнозування паводків і моделювання сценаріїв кліматичних змін. Ці моделі інтегрують дані з гідро-сенсорів, супутникових спостережень за допомогою суперкомп'ютера, що дозволяє уряду оперативно реагувати на загрози затоплення та управляти дамбами в режимі реального часу [9; 10].

Ще одним прикладом є проєкт з візуалізації наслідків зміни клімату, у рамках якого було створено віртуальну модель лісу північного Вісконсину на основі просторово-експліцитної симуляції LANDIS-II. Для моделювання використано дані інвентаризації лісів (FIA) та два кліматичні сценарії, що дозволило спрогнозувати динаміку змін видового складу, щільності та структури екосистеми на 50 років уперед. Отримані результати були візуалізовані у вигляді повноцінного 3D-ландшафту у віртуальному середовищі, створеному в Unreal Engine. Процедурне моделювання дозволило реалізувати точне відтворення деревного ярусу, підліску, трав'яного покриву та мертвої деревини. Користувачі мали змогу вільно переміщатися лісовою територією у VR, взаємодіяти з елементами екосистеми та змінювати кліматичні сценарії. Такий досвід забезпечує занурення у складні природні процеси та формує інтуїтивне розуміння довготривалих змін. Віртуальна модель була верифікована шляхом

порівняння з реальними знімками з польових ділянок. Результати проєкту свідчать про потенціал утілених цифрових двійників як інструменту екологічної освіти, досліджень і підтримки рішень. Вони також демонструють ефективність поєднання екологічного моделювання, геопросторових даних і віртуальної реальності для прогнозування майбутнього стану довкілля [7].

На рівні Європейського Союзу перспективи використання цифрових двійників для охорони навколишнього середовища систематизуються через низку стратегічних ініціатив. Зокрема, проєкт DESTINE (Digital Twins for the Environment) зосереджується на розвитку екологічно орієнтованих цифрових двійників у контексті Європейського зеленого курсу. Водночас окремою, ширшою за масштабом ініціативою є Destination Earth (далі – DestinE), започаткована Європейською комісією для створення високоточних цифрових моделей, що відображають як природні, так і антропогенні процеси в реальному часі. У межах DestinE впроваджується низка прикладних сценаріїв (use cases), які охоплюють адаптацію до кліматичних змін, управління ризиками повеней, прогнозування екстремальних погодних явищ, моніторинг теплових зон у містах, водних ресурсів і функціонування енергетичних систем. За допомогою хмарної платформи Core Service Platform, що поєднується з інструментами штучного інтелекту, DestinE забезпечує доступ до інтегрованих геопросторових даних у режимі реального часу, акумульованих у центральному сховищі Data Lake. Ключовими компонентами є цифрові двійники клімату та погодних екстремумів, які дозволяють моделювати сценарії на локальному та національному рівнях з урахуванням просторової динаміки. Проєкт слугує прикладом стратегічного використання втілених цифрових двійників для підвищення екологічної обізнаності, підтримки адаптаційної політики й ухвалення рішень в умовах зростання кліматичної невизначеності [4].

Цифрові двійники в контексті післявоєнного відновлення природного середовища України. Повномасштабна війна, що триває на території України, завдала суттєвих втрат не лише соціально-економічній інфраструктурі, а й природним екосистемам. Руїнація

лісових масивів, забруднення водних об'єктів, ерозія ґрунтів, пожежі, хімічне зараження та порушення екологічного балансу стали новими викликами для державної екологічної політики. У процесі післявоєнного відновлення постає нагальна потреба у використанні сучасних технологій, здатних забезпечити точне картографування наслідків, прогнозування ризиків і науково обґрунтоване планування природоохоронних заходів. У цьому контексті цифрові двійники можуть відіграти ключову роль як інструмент стратегічного управління.

Цифровий двійник, як динамічна віртуальна модель природної системи, що постійно оновлюється за допомогою сенсорних даних, супутникових знімків, результатів геоекологічного моніторингу та моделювання сценаріїв, дозволяє не лише візуалізувати масштаб екологічних пошкоджень, а й моделювати наслідки запропонованих утручань. Його впровадження створює можливості для оцінювання стану лісів, водойм, ґрунтів і біорізноманіття в режимі реального часу, що особливо актуально для деокупованих територій, техногенно уражених зон і об'єктів природно-заповідного фонду.

На практиці цифрові двійники можуть забезпечити формування національного реєстру екологічних втрат, сприяти ідентифікації найбільш уразливих територій, а також слугувати доказовою базою в підготовці матеріалів для екологічної репарації, що подаються до міжнародних судових і компенсаційних інституцій. За допомогою вбудованих моделей можна прогнозувати швидкість природного відновлення окремих ландшафтів або потребу у втручанні, моделювати ризики повторного забруднення, змін ґрунтових вод чи біологічного виснаження.

Особливе значення цифрові двійники мають у контексті інтеграції екологічних пріоритетів у загальних планах просторового планування післявоєнної відбудови. Наприклад, під час розроблення планів розвитку міст чи розміщення критичної інфраструктури можна оцінювати вплив будівництва на екосистеми, визначати екологічні коридори, передбачати й уникати конфліктів між антропогенним і природним середовищем. Цифрова модель надає змогу не лише моніторити поточний стан довкілля, а й будувати адаптивні сценарії

його використання в умовах кліматичних змін і нових соціально-економічних реалій.

Застосування цифрових двійників у післявоєнний період потребує належного нормативного регулювання, розбудови технічної інфраструктури (систем збору й обробки даних, дата-центрів, платформ для моделювання), а також підготовки кадрів – фахівців у сфері геоінформатики, екології, аналізу даних і державного управління. Водночас стратегічним є забезпечення інтеграції даних з різних відомств і джерел, що дозволить забезпечити цілісність моделей і оперативність реагування.

З огляду на досвід країн, що пережили масштабні природні або техногенні катастрофи, можна стверджувати, що цифрові двійники здатні забезпечити якісно новий рівень екологічного управління. Їх упровадження в Україні має потенціал не лише зменшити втрати довкілля, а й стати основою для формування прозорості, науково обґрунтованої та адаптивної політики сталого відновлення.

Висновки. Упровадження цифрових двійників у сферу охорони довкілля має значний потенціал для підвищення ефективності управлінських рішень, прогнозування ризиків та підтримки сталого розвитку, однак супроводжується низкою викликів. Серед основних – ризики маніпуляцій даними, обмеження доступу до моделей, технологічна залежність від іноземних платформ і потреба в захисті

чутливої екологічної інформації. У статті обґрунтовано доцільність використання цифрових двійників у публічному управлінні, проаналізовано міжнародний досвід і окреслено правові, технічні й етичні аспекти їх упровадження. Зроблено висновок про необхідність державної підтримки розвитку національної цифрової екосистеми, забезпечення відкритого доступу до екологічних моделей, нормативного регулювання та міжвідомчої інтеграції даних, що дозволить застосовувати цифрові двійники як інструмент прозорості та ефективної екологічної політики.

Подальші дослідження варто зосередити на практичному впровадженні цифрових двійників у систему публічного управління та екологічну політику України: від змін у законах і підзаконних актах до чітких процедур для міністерств, місцевої влади та громад. Потрібні зрозумілі моделі розподілу ролей, фінансування і відповідальності, відкриті стандарти даних і прозорі закупівлі, щоб результати таких моделей обов'язково враховувалися під час стратегічного планування, містобудування та оцінювання впливу на довкілля. Доцільно перевірити ці підходи на реальних пілотних проєктах і забезпечити незалежний нагляд, участь громадськості та навчання службовців – це підвищить довіру й створить підґрунтя для широкого застосування під час післявоєнного відновлення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості у процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля (Орхуська конвенція) : ратифікована Законом від 6 липня 1999 р. № 832–XIV / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_015
2. Про створення інфраструктури просторової інформації у Європейському Співтоваристві (INSPIRE) : Директива Європейського парламенту і Ради ЄС від 14 березня 2007 р. / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_002-07#Text
3. Цифрові двійники для промислового застосування : Визначення, комерційна цінність, аспекти розробки, стандарти та приклади використання / С. Малакуті та ін. ; за ред. С. Малакуті, П. ван Шалквик ; пер. з англ. О. Степанця, О. Некрашевич. *Industrial Internet Consortium*. 2020. URL: https://atep.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/12/iic_digital_twins_industrial_apps_white_paper_2020-02-18-ukr.pdf
4. European Commission. Destination Earth (DestinE) : вебсайт. URL: <https://destination-earth.eu/destination-earth/>
5. Ghoroghi A., Rezgui Y., Petri I., Beach Th. Advances in application of machine learning to life cycle assessment : a literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2022. № 27. P. 433–456. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02030-3>
6. IT-Enterprise. Цифровий двійник (Digital Twin). URL: <https://it.ua/en/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoj-dvojnik-digital-twin>
7. Klippel A., Sajjadi P., Zhao J., Wallgrün J. O., Huang J., Bagher M. Embodied Digital Twins for Environmental Applications. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2021. № 4. P. 193–200. URL: <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/V-4-2021/193/2021/>

8. Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*. 2019. № 7 (1). P. 7. URL: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7>
9. Tygron Platform. Digital Twin. URL: <https://www.tygron.com/en/digital-twin/>
10. van LoonSteensma J.M. Flood defence zone design and planning for multiple functions. Towards climatechange proof flood risk management: Executive Summary of Interim Report / ed. by F. Klijn, M. Kok, H. de Moel. Report nr. KfC 57/2012. Knowledge for Climate, 2012. P. 61–70. URL: <https://edepot.wur.nl/246186>

REFERENCES:

1. Konventsiiia pro dostup do informatsii, uchast hromadskosti v protsesi pryiniattia rishen ta dostup do pravosuuddia z pytan, shcho stosuutsia dovkillia (Orkhuska Konventsiiia) [Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-Making and Access to Justice in Environmental Matters (Aarhus Convention)]. (n.d.). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_015 [in Ukrainian].
2. Dyrektyva Yevropeiskoho Parlamentu i Rady YEES “Pro stvorennia infrastruktury prostorovoi informatsii u Yevropeiskomu Spivtovarystvi (INSPIRE)” [Directive 2007/2/EC Establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE)]. (2007). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_002-07 [in Ukrainian].
3. Malakuti, S., van Schalkwyk, P., Boss, B., Sastry, C.R., Runkana, V., Lin, S.-W., et al. (2020). *Tsyfrovi dviinyky dlia promysloвого zastosuvannia: Vyznachennia, komertsiiina tsinnist, aspekty rozrobky, standarty ta pryklady vykorystannia* [Digital Twins for Industrial Applications: Definition, Business Values, Design Aspects, Standards and Use Cases]. (White paper Version 1.0). Industrial Internet Consortium. Retrieved from: https://atep.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/12/iic_digital_twins_industrial_apps_white_paper_2020-02-18-ukr.pdf
4. European Commission. (n.d.). *Destination Earth (DestinE)*. Retrieved from: <https://destination-earth.eu/destination-earth/>
5. Ghoroghi, A., Rezgui, Y., Petri, I., Beach, Th. (2022). Advances in application of machine learning to life cycle assessment: a literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27, 433–456. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02030-3>
6. IT-Enterprise. (n.d.). *Tsyfrovyi dviinyk (Digital Twin)*. Retrieved from: <https://it.ua/en/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoj-dvoynik-digital-twin>
7. Klippel, A., Sajjadi, P., Zhao, J., Wallgrün, J.O., Huang, J., & Bagher, M.M. (2021). Embodied Digital Twins for Environmental Applications. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 193–200. Retrieved from: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-4-2021-193-2021>
8. Madni, A.M., Madni, C.C., & Lucero, S.D. (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 7 (1), 7. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
9. Tygron Platform. *Digital Twin*. (n.d.). Retrieved from: <https://www.tygron.com/en/digital-twin/>
10. van LoonSteensma, J.M. (2012). *Flood defence zone design and planning for multiple functions*. In F. Klijn, M. Kok, & H. de Moel (Eds.), *Towards climatechange proof flood risk management: Executive Summary of Interim Report*. Report nr. KfC 57/2012. Knowledge for Climate, 61–70. Retrieved from: <https://edepot.wur.nl/246186>

Дата надходження статті: 11.08.2025

Дата прийняття статті: 19.09.2025

Опубліковано: 17.12.2025