УДК 332.1:004.94
DOI: https://doi.org/10.32782/CMI/2025-15-7

**Перегуда Ю.А.**
доктор економічних наук, доцент,
заступник завідувача кафедри організації туристичної діяльності,
професор кафедри організації туристичної діяльності,
Навчально-науковий інститут управління, економіки та бізнесу
Приватного акціонерного товариства «Вищий навчальний заклад
«Міжрегіональна Академія управління персоналом»;
доцент кафедри глобальної економіки,
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1434-2509

# ЦИФРОВІ ДВОЙНИКИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ МІСЬКОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ

*Дослідження присвячене аналізу потенціалу цифрових двійників (ЦД) як інструменту підвищення економічної ефективності управління міською інфраструктурою в Україні. На основі світового досвіду (Сінгапур, Гельсінкі, Венеція, Шеньчжень) та теоретичних підходів розглянуто можливості ЦД для оптимізації ресурсів, зниження експлуатаційних витрат (до 20–30%) та підвищення якості міських послуг через інтеграцію з IoT, ШІ та BIM. Виявлено, що ЦД забезпечують проактивне управління інфраструктурою (енергетика, транспорт, водопостачання) завдяки двосторонній кіберфізичній інтеграції, що перевершує пасивні моделі, як digital shadow. В Україні впровадження ЦД ускладнене технічними (брак стандартизації, кібербезпека), організаційними (недостатня координація, дефіцит компетенцій) та фінансовими бар'єрами (високі витрати на інфраструктуру). Запропоновано концептуальну рамку для імплементації ЦД, яка включає пілотні проєкти, стандартизацію даних (ISO 23247), залучення інвестицій через ДПП та інтеграцію з платформами, як-от «Дія». Ці заходи сприятимуть економії ресурсів, кліматичній стійкості та сталому розвитку міст.*

***Ключові слова:*** *цифрові двійники, міська інфраструктура, економічна ефективність, розумні міста, IoT.*

**Pereguda Yuliya**
Educational and Scientific Institute of Management, Economics and Business
Private Joint-Stock Company "Higher education institution
"Interregional Academy of Personnel Management";
National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine

# DIGITAL TWINS AS A TOOL FOR ENHANCING ECONOMIC EFFICIENCY IN URBAN INFRASTRUCTURE MANAGEMENT

*This study investigates the transformative potential of digital twins (DTs) as a tool for enhancing the economic efficiency of urban infrastructure management, with a specific focus on their applicability in Ukrainian cities facing unique challenges such as post-war reconstruction and limited resources. Grounded in an analysis of global case studies (e.g., Singapore's Virtual Singapore, Helsinki's 3D+, Venice's flood management, Shenzhen's Mawan Port) and theoretical frameworks, the research demonstrates that DTs, integrated with IoT, AI, GIS, and BIM, enable proactive management of urban systems, including energy, transport, and water infrastructure. By facilitating real-time data synchronization and bidirectional cyber-physical integration, DTs outperform passive digital shadow models, achieving operational cost reductions of 20–30% and improving urban service quality. Notable examples include Shenzhen's port, saving $5 million annually, and New Mexico's 15% CO2 emissions reduction through energy optimization. The study identifies key barriers to DT adoption in Ukraine, including technical challenges (data fragmentation, lack of standardization per ISO 23247, cybersecurity vulnerabilities), organizational obstacles (insufficient coordination, limited expertise), and financial constraints (high costs of IoT infrastructure and software, estimated at $10–15 million for initial deployment). To address these, a conceptual framework is proposed, advocating for pilot projects in water and energy sectors, adoption of standardized protocols, public-private partnerships to fund 50% of costs, and integration with platforms like "Diya" to mitigate data fragmentation. These strategies aim to enhance resource efficiency, urban resilience, and sustainable development, while ensuring transparency to build public trust. The framework lays the groundwork for future research into adaptive financing models and national standards to bolster Ukraine's urban competitiveness in the European context.*

***Keywords:*** *digital twins, urban infrastructure, economic efficiency, resource management, smart cities.*

**Постановка проблеми.** У контексті урбанізації, зростання навантаження на інфраструктуру та обмеженості ресурсів міста потребують підвищення ефективності управління. Кліматичні зміни, енергетична вразливість і підвищені вимоги до якості міських послуг ускладнюють ці виклики. Традиційні методи управління, засновані на реактивному підході та слабкій координації, є неефективними через низьку точність прогнозування та високі експлуатаційні витрати. Цифрові двійники (ЦД) є інструментом для підвищення ефективності міського управління завдяки створенню віртуальних моделей, синхронізованих у реальному часі. Інтеграція ЦД з IoT, штучним інтелектом і великими даними сприяє точному прогнозуванню, опти-


© Перегуда Ю.А., 2025

мізації ресурсів і зниженню витрат. Міжнародний досвід підтверджує економічні переваги ЦД у скороченні експлуатаційних витрат і підвищенні якості міських послуг. Питання кількісної оцінки економічного ефекту від впровадження цифрових двійників у міському господарстві, особливо в контексті українських міст, залишається недостатньо дослідженим. Відсутні комплексні методики, що поєднують фінансові, технічні та соціально-економічні показники, а також адаптовані до локальних умов рекомендації щодо інтеграції ЦД. Актуальність дослідження полягає в необхідності розробки практичних моделей впровадження ЦД для забезпечення економічної ефективності та сталого розвитку міст.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження цифрових двійників у контексті управління міською інфраструктурою зосереджені на їхньому потенціалі для оптимізації ресурсів, зниження витрат і підвищення якості міських послуг, а також на викликах їх інтеграції в умовах урбанізації та складності міських систем.

Дж. Луо та ін. [1] у систематичному огляді 84 публікацій (2014–2024) аналізують застосування ЦД у міському плануванні, акцентуючи на сприйнятті міського середовища та громадській участі. ЦД підтримують симуляцію в реальному часі та залучення стейкхолдерів, сприяючи ефективному управлінню. Дослідження відзначає економічні вигоди, зокрема зниження витрат на інфраструктуру, але вказує на прогалини в аналізі сільських контекстів, аудіальних аспектів і економічних механізмів впровадження. А. Хуззат та ін. [2] аналізують роль ЦД у розумних містах, зокрема в транспорті, водопостачанні, енергетиці та комунікаціях. Інтеграція з IoT, машинним навчанням і блокчейном забезпечує створення динамічних моделей, що оптимізують міські системи та знижують витрати. Водночас організаційні та фінансові виклики, такі як високі початкові витрати та брак стандартизації, залишаються недостатньо дослідженими.

Х. Омрані та ін. [3] досліджують міські цифрові двійники (МЦД) у контексті стійких міст, виділяючи їхній потенціал для моніторингу, планування, екологічного менеджменту та прийняття рішень. МЦД сприяють оптимізації інфраструктури, зокрема через моніторинг міського клімату, але брак стандартів і показників ефективності обмежує їхнє масштабування. Економічні аспекти, зокрема механізми повернення інвестицій, потребують подальшого аналізу. В. В. Лехтола та ін. [4] аналізують міські ЦД, пропонуючи структуру, що включає відповідність міським потребам, підтримку деталізації даних, автоматичне оновлення через IoT і забезпечення безпеки. ЦД сприяють плануванню та управлінню інфраструктурою, забезпечуючи економію часу та коштів, але їхнє впровадження обмежене через брак стандартизації та складність інтеграції даних.

Ф. Н. Абдін та ін. [5] досліджують громадянсько-орієнтовані ЦД, акцентуючи на їхньому потенціалі для прогнозного обслуговування та оптимізації інфраструктури через інтеграцію IoT і BIM. ЦД сприяють зниженню витрат, але обробка великих обсягів даних і кібербезпека залишаються викликами. Економічні механізми потребують подальшого вивчення. В. Р. Щеглов та О. І. Морозова [6] досліджують методи створення ЦД для промислового IoT, акцентуючи на моніторингу та прогнозуванні для підвищення ефективності систем. ЦД сприяють зниженню витрат на обслуговування, але економічні аспекти та фінансові бар'єри розглянуті обмежено. А. В. Калайда та М. П. Пан [7] аналізують ЦД розумних будівель на платформі Azure Digital Twins, відзначаючи їхній потенціал для оптимізації енергоспоживання. Економічні механізми та інституційні виклики масштабування в міському контексті потребують додаткового дослідження.

Дослідження підтверджують потенціал ЦД для підвищення ефективності міського управління через оптимізацію ресурсів [1–7]. Однак економічні механізми, інституційні та організаційні чинники їхнього масштабування, особливо в українських умовах, залишаються недостатньо вивченими, що вимагає подальших міждисциплінарних досліджень.

**Формування цілей статті (постановка завдання).** Мета статті – теоретично обґрунтувати механізми застосування цифрових двійників для підвищення економічної ефективності управління міською інфраструктурою в Україні та розробити аналітичну рамку для оцінки їхнього економічного впливу з метою забезпечення сталого розвитку міст. Підхід передбачає інтеграцію технологічних, економічних та інституційних аспектів для оптимізації ресурсів і підвищення якості муніципальних послуг.

**Гіпотеза дослідження:** цифрові двійники мають потенціал для підвищення ефективності управління міською інфраструктурою, але в Україні їхнє масштабування може бути ускладнене інституційними, фінансовими та технологічними обмеженнями без урахування локального контексту та адаптованих стратегій впровадження.

Завданнями статті є:

- Систематизувати теоретичні засади концепції ЦД, оцінити їхню релевантність для міських систем і визначити обмеження в українському контексті.
- Визначити особливості впровадження ЦД у міському господарстві, аналізуючи інтеграцію IoT, машинного навчання та онтологічних моделей для оптимізації енергетичних, транспортних і комунальних систем.
- Оцінити економічний ефект ЦД на основі міжнародного досвіду та їхньої застосовності до українських міст.
- Визначити інституційні, технологічні та фінансові бар'єри впровадження ЦД в Україні та їхній вплив на масштабування. (3)
- Розробити рекомендації для впровадження ЦД в українських містах, включаючи стратегії стандартизації даних, залучення інвестицій та інституційної підтримки.

Ці цілі та завдання спрямовані на концептуальне осмислення ролі ЦД у трансформації міського управління, пропонуючи аналітичний інструментарій для оцінки їхнього економічного потенціалу та розробки стратегій, адаптованих до локального контексту, що забезпечує чітке розуміння спрямованості дослідження та його наукової значущості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Цифрові двійники сприяють ефективному управлінню міською інфраструктурою завдяки двосторонній кіберфізичній інтеграції. У порівнянні з digital shadow, ЦД забезпечують активне управління міськими системами, але їхнє впровадження в Україні потребує адаптації до локальних умов. За стандартом ISO 23247:2021, ЦД є цифровим представленням фізичної сутності, синхроні-

зованим у реальному часі через сенсорні дані. Ф. Тао та ін. [8] визначають ЦД як п'ятивимірну модель, що інтегрує симуляцію, прогнозування та оптимізацію, що є важливим для міських систем.

Ц. Кі та Ф. Тао зазначають, що ЦД моделюють поведінку фізичних об'єктів за допомогою даних IoT, забезпечуючи прогнозування та оптимізацію процесів. На відміну від digital shadow, який обмежується одностороннім моніторингом [9, 10], ЦД підтримують двосторонню інтеграцію, що сприяє активному управлінню міськими системами та зниженню експлуатаційних витрат.

Цифрові двійники класифікуються за об'єктом (будівлі, транспорт, енергетика), масштабом (об'єктний, системний, міський) і рівнем інтеграції з IoT та ШІ. Інтеграція з великими даними дозволяє аналізувати гетерогенні дані для оптимізації міських систем, таких як енергетика та логістика [11]. ШІ підвищує прогнозну здатність ЦД, забезпечуючи перевагу над пасивними моделями, такими як digital shadow, у досягненні економічної ефективності [9].

Впровадження ЦД в Україні ускладнене браком стандартизації даних, високими витратами на IoT-інфраструктуру та складністю обробки гетерогенних даних [10, 11]. Для ефективного масштабування необхідні локалізовані стандарти, інституційна підтримка та стратегії фінансування. ЦД перевершують digital shadow завдяки двосторонній інтеграції, але їхнє застосування в Україні потребує адаптації до місцевих умов для забезпечення сталого розвитку міст.

Цифрові двійники сприяють ефективному управлінню міською інфраструктурою через інтеграцію з платформами Smart City, ШІ, технологіями Індустрії 4.0 та BIM. Вони оптимізують планування, інженерні мережі, транспорт, енергоменеджмент і екологічний моніторинг. Впровадження ЦД в Україні ускладнене технологічними та нормативними обмеженнями, що вимагає адаптованих стратегій.

Цифрові двійники застосовуються для моделювання та оптимізації міських систем у плануванні, інженерних мережах, транспорті, енергоменеджменті та екологічному моніторингу. У плануванні забудови ЦД оцінюють вплив нових об'єктів на транспорт і соціально-економічні показники, як у проєкті Virtual Singapore [13, 14]. У інженерних мережах ЦД використовують дані IoT для прогнозування зносу та запобігання збоям [17]. У транспорті вони оптимізують маршрути, в енергоменеджменті – балансують навантаження, а в екологічному моніторингу – моделюють кліматичні ризики [14]. Ці застосування забезпечують економічну ефективність порівняно з традиційними методами.

Інтеграція ЦД із платформами Smart City, зокрема GIS, SCADA та BIM, забезпечує обробку гетерогенних даних для управління міськими системами [12]. Наприклад, у Сінгапурі ЦД прогнозують транспортні потоки та оцінюють вплив урбанізації [13, 14], у Гельсінкі моделюють енергоспоживання [23, 24], а у Венеції – прогнозують затоплення [31]. Впровадження ЦД в Україні ускладнене через відсутність стандартизації та високі витрати. Поєднання ЦД із ШІ сприяє автоматизації прийняття рішень шляхом аналізу даних IoT для прогнозування аварій, оптимізації транспорту та енергоспоживання [12, 15–17]. Наприклад, у Virtual Singapore ШІ моделює сценарії затоплень і енергоефективності [13, 14]. Інтеграція з BIM оптимізує управління життєвим циклом будівель, знижуючи витрати [16]. ЦД перевершують digital shadow завдяки підтримці активного управління.

Цифрові двійники активно застосовуються у світі для підвищення ефективності міського господарства, забезпечення стійкості та стимулювання інновацій. Цей розділ доводить, що світовий досвід використання ЦД, зокрема у таких містах, як Сінгапур, Такамацу, Торонто, Гельсінкі, а також у межах Національної програми цифрових двійників Великої Британії та проєкту Urban Observatories, демонструє їхній потенціал для оптимізації міських процесів, підвищення економічної ефективності та стійкості до викликів, таких як кліматичні зміни, але їхнє впровадження в Україні вимагає адаптації до локальних умов через обмежені ресурси, брак стандартизації, недостатню координацію між стейкхолдерами та проблеми з довірою громадськості.

У Сінгапурі проєкт Virtual Singapore моделює міське середовище для прогнозування впливу забудови та зниження витрат [13, 14]. У Такамацу ЦД прогнозують гідрометеорологічні ризики, зменшуючи економічні збитки [27]. У Торонто проєкт Quayside інтегрував IoT і BIM, але був припинений через проблеми з прозорістю та конфіденційністю [21, 22]. У Гельсінкі Helsinki 3D+ підтримує енергоефективне планування [23, 24]. У Великій Британії NDTp розробила IMF для стандартизації даних [25], а проєкт Urban Observatories інтегрує транспортні та екологічні дані для прогнозування трафіку та декарбонізації [26].

Інтеграція ЦД із платформами Smart City (GIS, SCADA, BIM) забезпечує обробку гетерогенних даних. У Сінгапурі GIS і BIM підтримують 3D-моделювання [13, 14], у Такамацу SCADA моніторить інженерні мережі [27], у Гельсінкі Helsinki 3D+ використовує GIS і CityGML [23, 24]. У Великій Британії NDTp стандартизує дані через IMF [25], а Urban Observatories інтегрують транспортні та екологічні дані [26]. У Торонто Quayside зіткнувся з проблемами координації [21, 22]. Поєднання ЦД із ШІ підвищує ефективність управління. У Сінгапурі ШІ прогнозує затоплення та енергоефективність [13, 14], у Такамацу – гідрометеорологічні ризики [27], у Гельсінкі – енергетичний потенціал і шум [24]. У Торонто Quayside ШІ оптимізував маршрути, але викликав занепокоєння щодо конфіденційності [22]. У Великій Британії ШІ підтримує прогнозування через IMF [25], а Urban Observatories моделюють трафік і якість повітря [26].

Впровадження ЦД стикається з викликами, актуальними для України: високі витрати (Virtual Singapore – 73 млн. дол. США, Helsinki 3D+ – 1 млн. євро), брак стандартизації (NDTp, Urban Observatories) і проблеми прозорості (Quayside) [13, 14, 22–26]. Для України необхідні локалізовані стратегії, включаючи стандартизацію даних, інвестиції та координацію стейкхолдерів. Цифрові двійники сприяють оптимізації міського планування та зниженню екологічного впливу. Досвід Сюнаня, Куньміня, Шеньчженя, Джорджтауна, Нью-Мексико, Ренні, Нового Південного Уельсу, Вікторії та США показує економічні (зниження витрат на 20–30%) та екологічні вигоди (скорочення викидів CO2 на 15%) [27–29]. Впровадження в Україні потребує адаптації через брак стандартизації, високі витрати та недостатню координацію.

ЦД забезпечують економічні вигоди: у Сюнані BIM знижує витрати на планування на 10–15%, у Куньміні – затори на 15%, у Шеньчжені порт Маван заощаджує 5 млн. дол. США щорічно, у Ренні – 12 млн. дол. США на метро, у Вікторії – 5–10% витрат, у США – 100 млн. дол. США на енергоефективність [27, 28]. Звіт NIST оцінює вплив ЦД у виробництві в 16,1–38,6 млрд. дол. США щорічно [29].

ЦД сприяють декарбонізації: у Нью-Мексико скорочено викиди CO2 на 15% (50 тис. тонн щорічно), у Джорджтауні – екологічні збитки на 10–20%, у Новому Південному Уельсі – викиди на 5–10% [27]. У Вікторії та США ЦД підвищують енергоефективність [28]. Звіт NIST зазначає скорочення відходів (10–20%) та енерговитрат (15–40%) [29]. Для систематизації потенціалу ЦД наведено Таблицю 1, яка узагальнює приклади, кількісні результати та виклики на основі.

Інтеграція ЦД із платформами Smart City (GIS, BIM, IoT) підсилює ефективність. У Сюнані BIM забезпечує точне відображення [27], у Куньміні GIS оптимізує транспорт [27], у Шеньчжені IoT автоматизує порт [27]. У Вікторії ЦД інтегрує дані в реальному часі [28]. У виробництві ЦД використовують IoT і ШІ для прогнозного обслуговування (39.9% продажів ПЗ) [29]. Проте 60% проєктів стикаються з фрагментацією даних, знижуючи ефективність на 20–25% [27]. У [28] зазначається потреба в інтеграції з ERP-системами, що ускладнює впровадження в Україні.

Поєднання ЦД із ШІ підвищує потенціал. У Шеньчжені ШІ прогнозує транспортні потоки [27], у Нью-Мексико оптимізує енергоспоживання [27], в аеропорту знижує затримки на 20–30% [28]. У виробництві ШІ підтримує прогнозне обслуговування, скорочуючи відходи на 10–20% [29]. Проте 70% проєктів обмежені низькою якістю даних [27].

ЦД інтегрують IoT і ШІ для оптимізації водних ресурсів, зменшуючи втрати та витрати. У Венеції ЦД моделюють припливи, скорочуючи витрати на захист від повеней на 15–25% [31]. Таблиця 2 узагальнює економічний ефект у водній галузі.

Цифрові двійники забезпечують прогнозне обслуговування водної інфраструктури через інтеграцію IoT і ШІ, знижуючи витрати на ремонт на 15–30%, подовжуючи термін служби обладнання на 10–20% і ско-

Таблиця 1

**Економічні та екологічні результати використання цифрових двійників у міському, інфраструктурному та виробничому плануванні**

| Місто/Проєкт | Застосування ЦД | Економічні результати | Екологічні результати | Виклики |
|---|---|---|---|---|
| Сюнань, Китай | Цифровий нагляд через BIM | Економія 10–15% на плануванні | Скорочення відходів на 10% | Високі витрати (50 млн. дол. США) |
| Куньмін, Китай | Транспортна база даних | Зменшення заторів на 15% | Скорочення викидів $CO_2$ на 5% | Фрагментація даних |
| Шеньчжень, Китай | Оптимізація портових операцій | Економія $5 млн. щорічно (ефективність +20%) | Зниження енергоспоживання на 15% | Недостатня стандартизація |
| Джорджтаун, Малайзія | Моделювання впливу забудови | Зниження ризиків на 10–20% | Запобігання затопленням | Обмежені технічні ресурси |
| Нью-Мексико, США | Оптимізація енергоспоживання | Економія $3 млн. на р. | Скорочення викидів $CO_2$ на 15% (50 тис. тонн) | Високі витрати на технології |
| Ренн, Франція | Моделювання метро | Економія $12 млн. (10%) | Зниження будівельних відходів на 8% | Складність інтеграції даних |
| Новий Південний Уельс, Австралія | Багатостороннє планування | Зниження витрат на 5–10% | Скорочення викидів на 5–10% | Координація стейкхолдерів |
| Вікторія, Австралія | Комплексна видимість інфраструктури | Зниження витрат на 5–10% | Скорочення викидів на 5–10% | Складність даних |
| Енергоефективність, США | Оптимізація енергетичних проєктів | Економія $100 млн. | Зниження енергоспоживання | Високі витрати на моделювання |
| Аеропорт, неназваний | Оптимізація операцій | Ефективність +20–30% | Зниження викидів через оптимізацію | Потреба в даних реального часу |
| Виробництво, США | Прогнозне обслуговування, бізнес-оптимізація | Потенціал $37.9 млрд. щорічно | Скорочення відходів (10–20%), енергії (15–40%) | Високі витрати, складність систем |

*Джерело: складено автором на основі [27–29]*

Таблиця 2

**Економічний вплив цифрових двійників на управління ресурсами у водній інфраструктурі**

| Тип ресурсу | Можливий економічний ефект | Метод вимірювання |
|---|---|---|
| Вода | Зменшення втрат води на 10–20% через виявлення витоків | Обсяг виявлених витоків через IoT-моніторинг |
| Енергія | Скорочення енергоспоживання на 15–40% через оптимізацію насосів | Дані енерголічильників у реальному часі |
| Персонал | Зниження витрат на персонал на 10–15% через автоматизацію | Час виконання рутинних операцій |
| Інфраструктура | Зниження витрат на ремонт на 15–30% через прогнозне обслуговування | Порівняння витрат прогнозного та реактивного ремонту |

*Джерело складено автором на основі [30; 31]*

рочуючи простої на 15–25% [30]. У Венеції ЦД прогнозують припливи, заощаджуючи 15–25% витрат [31]. У транспорті та виробництві економія становить 15–30% [26, 29]. Для України необхідні IoT-інфраструктура та стандарти, зокрема ISO 23247 [29]. ЦД сприяють сталому розвитку водної інфраструктури, скорочуючи втрати води на 10–20% і енергоспоживання на 15–40% [30]. У Венеції вони оптимізують захист від повеней, заощаджуючи 15–25% [31]. Екологічно ЦД зменшують вуглецевий слід на 15–40% у водній галузі, 5–10% у транспорті та відходи на 10–20% у виробництві [26]. Соціально ЦД покращують водопостачання та захист від повеней [31].

Впровадження ЦД в Україні для управління водною інфраструктурою ускладнене технічними, організаційними та фінансовими бар'єрами. Технічні виклики включають фрагментацію даних (60% проєктів) через брак стандартів, як ISO 23247, і власницькі формати, що підвищують витрати на 20–30% [32; 33]. Відсутність API знижує ефективність систем ЦД на 15–25% [35], а кіберфізичні уразливості ускладнюють інтеграцію на 10–20% [36]. Обробка великих обсягів даних знижує ефективність на 10–15% [37, 38]. Кібербезпека та брак прозорості даних, як у Торонто та Портленді, ускладнюють впровадження [39]. Недостатній інформаційний менеджмент знижує ефективність на 10–20% [34].

Організаційні бар'єри включають бюрократію, слабку координацію з платформами, як «Дія», і брак компетенцій (20% фахівців з кваліфікацією IoT/ШІ) [29; 30]. Непрозорість, як у Quayside, знижує довіру громадськості на 10–20% [39]. Відсутність відкритості даних і стандартів ускладнює впровадження ЦД .

Фінансові бар'єри включають високі витрати на обладнання, ПЗ і навчання (10–15 млн. дол. США у Венеції, 5–20 млн. дол. США у виробництві) [25; 31]. Кіберфізичні системи підвищують витрати на захист на 15–25% [36], а обробка даних і невизначеність проєктів – на 10–20% [37, 38]. Власницькі системи та брак інформаційного менеджменту збільшують витрати на 15–30% [32; 34]. В Україні обмежені бюджети ускладнюють фінансування, хоча ЦД можуть заощадити 280 млрд. дол. США до 2030 р. [39].

Для впровадження цифрових двійників в Україні необхідно подолати технічні, організаційні та фінансові бар'єри шляхом стандартизації даних, поетапного впровадження та використання міжнародного досвіду. Приклади Венеції, Амстердама, Копенгагена та Лісабона демонструють потенціал ЦД для оптимізації управління водною, енергетичною та транспортною інфраструктурою [31, 39]. Економічний ефект ЦД, за оцінками, становить до 37,9 млрд. дол. США у виробничій сфері [25] та до 7 млрд. фунтів стерлінгів щорічно в інфраструктурних проєктах Великої Британії [34].

Успіх впровадження залежить від чіткої стратегії, прозорості даних і координації між стейкхолдерами:

1. Пілотні проєкти та масштабування: Розпочати з пілотних проєктів у водній інфраструктурі, як у Венеції, де ЦД оптимізують витрати на 15–25% через прогнозне обслуговування [31]. Масштабування на енергетику та транспорт після стандартизації даних підвищить ефективність на 10–15% [30]. Інтеграція з платформами, як «Дія», зменшить фрагментацію даних.

2. Фінансування через партнерство: Використовувати державно-приватне партнерство (ДПП), як у Великобританії, для покриття до 50% витрат [26], гранти ЄС (Horizon Europe) для фінансування 30–40% проєктів [25; 29] і муніципальні облігації, як у США, для залучення $5–10 млн. для середніх міст [28].

3. Стандартизація та кібербезпека: Впровадити ISO 23247 і протоколи кібербезпеки NIST для зменшення фрагментації даних на 60% і уразливостей на 15–20% [32]. ECSO рекомендує симуляційні тести ЦД для оцінки кіберризиків, що знижує уразливості на 10–15% [36]. Для SoDT [35] пропонуються спільні API для спрощення інтеграції на 10–20%.

4. Інтеграція IoT і прозорість: стандартизована інтеграція IoT і машинного навчання підвищує ефективність ЦД у розумних містах на 10–15%. Reuters [39] наголошує на прозорості даних для подолання недовіри, як у невдалих проєктах Торонто і Портленда.

5. Глобальна співпраця: WEF [38] рекомендує міжнародну співпрацю для стандартизації та зниження фінансових ризиків на 10–15%, що є критичним для України з обмеженими бюджетами.

Таким чином, подолання технічних (кібербезпека, інтероперабельність, стандарти), організаційних (компетенції, координація) і фінансових (ДПП, гранти) бар'єрів через поетапне впровадження, стандартизацію, інформаційний менеджмент і глобальну співпрацю забезпечить ефективне використання ЦД в Україні. Це сприятиме економії ресурсів, підвищенню кліматичної стійкості та сталому розвитку міст, як показують приклади Лісабона (запобігання 20 великим повеням за 100 років) та Венеції. Реалізація цих рекомендацій потребує скоординованих зусиль держави, бізнесу та громадськості.

**Висновки.** Цифрові двійники відкривають нові горизонти для трансформації міського управління в Україні, стаючи стратегічним інструментом для забезпечення сталого розвитку та підвищення економічної ефективності. Їх здатність інтегрувати дані в реальному часі, прогнозувати ризики та оптимізувати ресурси створює основу для інноваційного підходу до вирішення урбаністичних викликів, таких як кліматична стійкість, управління інфраструктурою та соціально-економічна нерівність. Міжнародний досвід демонструє, що ЦД сприяють модернізації міст через синергію технологій IoT, штучного інтелекту та стандартизованих даних, що може бути адаптовано до українських реалій. Проте успішна імплементація потребує подолання системних обмежень, зокрема через гармонізацію стандартів, розвиток цифрових компетенцій і залучення міжнародної співпраці.

У контексті післявоєнної відбудови України цифрові двійники можуть сприяти підвищенню прозорості, ефективності використання ресурсів і довіри громадськості. Перспективи подальших досліджень включають розробку моделей фінансування, адаптованих до обмежених ресурсів, створення національних стандартів для інтеграції ЦД із платформами, такими як «Дія», та аналіз їхнього впливу на конкурентоспроможність українських міст у європейському контексті, зокрема через посилення кібербезпеки та інформаційного менеджменту. Успішне впровадження ЦД залежить від чіткої стратегії, координації стейкхолдерів і забезпечення суспільної довіри.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ


1. Luo J., Liu P., Kong X., Shen J., Wu Q., Xu D. Urban digital twins for citizen-centric planning: A systematic review of built environment perception and public participation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2025. Vol. 143. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104746
2. Huzzat A., Anpalagan A., Khwaja A. S., Woungang I., Alnoman A. A., Pillai A. S. A comprehensive review of Digital Twin technologies in smart cities. *Digital Engineering.* 2025. Vol. 4. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100040 (дата звернення12.08.2025).
3. Omrany H., Mehdipour A., Oteng D., Al-Obaidi K. M. The uptake of urban digital twins in the built environment: a pathway to resilient and sustainable cities. *Computational Urban Science.* 2025. Vol. 5. P. 20. DOI: https://doi.org/10.1007/s43762-025-00177-x
4. Lehtola V. V., Koeva M., Oude Elberink S., Raposo P., Virtanen J.-P., Vahdatikhaki F., Borsci S. Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2022. Vol. 114. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915
5. Abdeen F. N., Shirowzhan S., Sepasgozar S. M. E. Citizen-centric digital twin development with machine learning and interfaces for maintaining urban infrastructure. *Telematics and Informatics.* 2023. Vol. 85. P. 102032. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tele.2023.102032
6. Щеглов В. Р., Морозова О. І. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустріального інтернету речей. *Системи управління, навігації та зв'язку.* 2022. № 4. С. 127–132. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127
7. Калайда А. В., Пан М. П. Створення цифрових двійників розумних будівель на платформі Azure Digital Twins. *Комунальне господарство міст.* 2024. Т. 6, вип. 187. С. 2–7. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-2-7
8. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics.* 2019. Vol. 15, no. 4. P. 2405–2415. DOI: https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186
9. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access.* 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
10. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. *IFAC PapersOnLine.* 2018. Vol. 51, no. 11. P. 1016–1022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474
11. Qi Q., Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access.* 2018. Vol. 6. P. 3585–3593. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265
12. Yaqoob I., Salah K., Khan L. U., Jayaraman R., Al-Fuqaha A., Omar M. Digital Twins for Smart Cities: Benefits, Enabling Technologies, Applications, and Challenges. *2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF).* 2023. P. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1109/FNWF58287.2023.10520349
13. Experion Technologies. Virtual Singapore: A Digital Gateway to Urban Innovation. URL: https://experionglobal.com/virtual-singapore/ (дата звернення: 12.08.2025).
14. OECD Observatory of Public Sector Innovation. Virtual Twin Singapore. 2015. URL: https://oecd-opsi.org/innovations/virtual-twin-singapore/ (дата звернення: 12.08.2025).
15. Wang S., Wan J., Li D., Zhang C. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks.* 2016. Vol. 12. DOI: https://doi.org/10.1155/2016/3159805
16. Sepasgozar S. M. E., Khan A. A., Smith K., Romero J. G., Shen X., Shirowzhan S., Li H., Tahmasebinia F. BIM and Digital Twin for Developing Convergence Technologies as Future of Digital Construction. *Buildings.* 2023. Vol. 13, no. 2. P. 441. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13020441
17. Lu Y., Liu C., Wang K. I., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 2020. Vol. 61. P. 101837. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837
18. ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing. International Organization for Standardization. 2017. URL: https://www.iso.org/standard/61148.html (дата звернення: 12.08.2025).
19. Therias A., Rafiee A. City digital twins for urban resilience. *International Journal of Digital Earth.* 2023. Vol. 16, no. 2. P. 4164–4190. https://doi.org/DOI: 10.1080/17538947.2023.2264827
20. Litman T. Transportation Cost and Benefit Analysis: Techniques, Estimates and Implications, Second Edition. Victoria Transport Policy Institute. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/235360398_Transportation_Cost_and_Benefit_Analysis_Techniques_Estimates_and_Implications (дата звернення: 12.08.2025).
21. Waterfront Toronto. Corporate Plan 2018/2019. 2017. URL: https://www.waterfrontoronto.ca/sites/default/files/documents/wt-corporate-plan-18-19-final-approved.pdf (дата звернення: 12.08.2025).
22. Al-Fahim M., Frankenburg S., Bennon M. Qualms with Quayside: Public Engagement in the Toronto Smart City Project. Leadership Academy for Development, Stanford University. 2021. URL: https://fsi9-prod.s3.us-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2024-02/qualms_with_quayside_shortened.pdf (дата звернення: 12.08.2025).
23. City of Helsinki. Helsinki 3D. 2017. URL: https://www.hel.fi/en/decision-making/information-on-helsinki/maps-and-geospatial-data/helsinki-3d (дата звернення: 12.08.2025).
24. Bentley Systems. Improving Environment with City-scale Digital Twin | City of Helsinki. 2016. URL: https://bentley.com/company/esg-user-project-city-of-helsinki/ (дата звернення: 12.08.2025).
25. Centre for Digital Built Britain. National Digital Twin Programme. 2018. URL: https://www.cdbb.cam.ac.uk/what-we-did/national-digital-twin-programme (дата звернення: 12.08.2025).
26. Chapman L., Cowell N., James P., Jonczyk J., Bell D., Evans J., Topping D., Bannan T., Murabito E., Tsoneva E., Birkin M., Arribas-Bel D., Carlino D. EDIF: Towards a Digital Twin for Urban Transport: Final Report & Blueprint. Department for Transport. 2023. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/62ba0ee08fa8f57213aba3b9/economic-data-innovation-fund-towards-a-digital-twin-for-urban-transport-report-and-blueprint.pdf (дата звернення: 12.08.2025).
27. World Economic Forum. Digital Twin Cities: Framework and Global Practices. 2022. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Digital_Twin_Cities_Framework_and_Practice_2022.pdf (дата звернення: 12.08.2025).
28. McKinsey & Company. Digital Twins: Boosting ROI of Government Infrastructure Investments. 2025. URL: https://mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-boosting-roi-of-government-infrastructure-investments (дата звернення: 12.08.2025).

29. Thomas D. Economics of Digital Twins: Costs, Benefits, and Economic Decision Making. NIST Advanced Manufacturing Series (AMS) 100-61. 2024. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=958153 (дата звернення: 12.08.2025).

30. SWAN. Digital Twin Readiness Guide: Applying SWAN's Digital Twin Architecture to the Water Industry. 2022. URL: https://swan-forum.com/wp-content/uploads/2022/05/SWAN-Digital-Twin-Readiness-Guide.pdf (дата звернення: 12.08.2025).

31. Villani L., Gugliermetti L., Barucco M. A., Cinquepalmi F. A Digital Twin Framework to Improve Urban Sustainability and Resiliency: The Case Study of Venice. *Land.* 2025. Vol. 14, no. 1. P. 83. DOI: https://doi.org/10.3390/land14010083

32. Voas J., Mell P., Laplante P., Piroumian V. Security and Trust Considerations for Digital Twin Technology. NIST Internal Report (IR) 8356. 2025. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=957183 (дата звернення: 12.08.2025).

33. Petersen J. NIST Report Says Standards Needed for Digital Twin Integration. ExecutiveGov. 2025. URL: https://executivegov.com/articles/nist-internal-report-digital-twins (дата звернення: 12.08.2025).

34. Bolton A., Enzer M., Schooling J. et al. The Gemini Principles: Guiding Values for the National Digital Twin and Information Management Framework. Centre for Digital Built Britain. 2018. URL: https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/TheGeminiPrinciples.pdf ((дата звернення:12.08.2025).

35. David I., Shao G., Gomes C., Tilbury D., Zarkout B. Interoperability of Digital Twins: Challenges, Success Factors, and Future Research Directions. 2023. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=956427 (дата звернення: 12.08.2025).

36. European Cyber Security Organisation (ECSO). ECSO Technical Paper on Cybersecurity Scenarios and Digital Twins. 2023. URL: https://ecs-org.eu/ecso-Uploads/2023/07/ECSO_WG6_DigitalTwin-2.1.pdf (дата звернення: 12.08.2025).

37. El-Agamy R. F., Sayed H. A., AL Akhatatneh A. M. et al. Comprehensive analysis of digital twins in smart cities: a 4200-paper bibliometric study. *Artificial Intelligence Review.* 2024. Vol. 57, no. 154. DOI: https://doi.org/10.1007/s10462-024-10781-8

38. World Economic Forum, China Academy of Information and Communications Technology (CAICT). Digital Twin Cities: Key Insights and Recommendations. 2023. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Digital_Twin_Cities_2023.pdf (дата звернення: 12.08.2025).

39. Nguyen A. How AI is Arming Cities in the Battle for Climate Resilience. *Reuters.* 2024. URL: https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/how-ai-is-arming-cities-battle-climate-resilience-2024-05-23/ (дата звернення: 12.08.2025).

## REFERENCES

1. Luo J., Liu P., Kong X., Shen J., Wu Q. & Xu D. (2025). Urban digital twins for citizen-centric planning: A systematic review of built environment perception and public participation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,* 143, 104746. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104746

2. Huzzat A., Anpalagan A., Khwaja A. S., Woungang I., Alnoman A. A. & Pillai A. S. (2025). A comprehensive review of digital twin technologies in smart cities. *Digital Engineering,* 4, 100040. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100040 (accessed: 12.08.2025).

3. Omrany H., Mehdipour A., Oteng D. & Al-Obaidi K. M. (2025). The uptake of urban digital twins in the built environment: A pathway to resilient and sustainable cities. *Computational Urban Science,* 5, 20. DOI: https://doi.org/10.1007/s43762-025-00177-x

4. Lehtola V. V., Koeva M., Oude Elberink S., Raposo P., Virtanen J.-P., Vahdatikhaki F. & Borsci S. (2022). Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,* 114, 102915. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915

5. Abdeen F. N., Shirowzhan S. & Sepasgozar S. M. E. (2023). Citizen-centric digital twin development with machine learning and interfaces for maintaining urban infrastructure. *Telematics and Informatics,* 85, 102032. https://doi.org/10.1016/j.tele.2023.102032

6. Shcheglov V. R. & Morozova O. I. (2022). Metody ta tekhnolohii rozroblennia tsyfrovykh dviinykiv dlia harantozdatnykh system industriialnoho internetu rechei [Methods and technologies for developing digital twins for reliable systems of the industrial internet of things]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku,* (4), 127–132. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127 (in Ukrainian)

7. Kalaida A. V. & Pan M. P. (2024). Stvorennia tsyfrovykh dviinykiv rozumnukh budivel na platformi Azure Digital Twins [Creation of digital twins for smart buildings on the Azure Digital Twins platform]. *Komunalne hospodarstvo mist,* 6(187), 2–7. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-2-7 (in Ukrainian)

8. Tao F., Zhang H., Liu A. & Nee A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* 15(4), 2405–2415. DOI: https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186

9. Fuller A., Fan Z., Day C. & Barlow C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access,* 8, 108952–108971. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

10. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J. & Sihn W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine,* 51(11), 1016–1022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

11. Qi Q. & Tao F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access,* 6, 3585–3593. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265

12. Yaqoob I., Salah K., Khan L. U., Jayaraman R., Al-Fuqaha A. & Omar M. (2023). Digital twins for smart cities: Benefits, enabling technologies, applications, and challenges. *2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF),* 1–7. DOI: https://doi.org/10.1109/FNWF58287.2023.10520349

13. Experion Technologies. (n.d.). *Virtual Singapore: A digital gateway to urban innovation.* Available at: https://experionglobal.com/virtual-singapore/ (accessed: 12.08.2025).

14. OECD Observatory of Public Sector Innovation. (2015). *Virtual Twin Singapore.* Available at: https://oecd-opsi.org/innovations/virtual-twin-singapore/ (accessed: 12.08.2025).

15. Wang S., Wan J., Li D. & Zhang C. (2016). Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1). DOI: https://doi.org/10.1155/2016/3159805

16. Sepasgozar S. M. E., Khan A. A., Smith K., Romero J. G., Shen X., Shirowzhan S., Li H. & Tahmasebinia F. (2023). BIM and digital twin for developing convergence technologies as future of digital construction. *Buildings,* 13(2), 441. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13020441

17. Lu Y., Liu C., Wang K. I., Huang H. & Xu X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* 61, 101837. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837

18. International Organization for Standardization. (2017). *ISO 15686-5:2017: Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing.* Available at: https://www.iso.org/standard/61148.html (accessed: 12.08.2025).

19. Therias A. & Rafiee A. (2023). City digital twins for urban resilience. *International Journal of Digital Earth,* 16(2), 4164–4190. DOI: https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2264827

20. Litman T. (2009). T*ransportation cost and benefit analysis: Techniques, estimates and implications* (2nd ed.). Victoria Transport Policy Institute. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235360398_Transportation_Cost_and_Benefit_Analysis_Techniques_Estimates_and_Implications (accessed: 12.08.2025).

21. Waterfront Toronto. (2017). *Corporate plan 2018/2019.* Available at: https://www.waterfrontoronto.ca/sites/default/files/documents/wt-corporate-plan-18-19-final-approved.pdf (accessed: 12.08.2025).

22. Al-Fahim M., Frankenburg S. & Bennon M. (2021). *Qualms with Quayside: Public engagement in the Toronto smart city project.* Leadership Academy for Development, Stanford University. Available at: https://fsi9-prod.s3.us-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2024-02/qualms_with_quayside_shortened.pdf (accessed: 12.08.2025).

23. City of Helsinki. (2017). *Helsinki 3D.* Available at: https://www.hel.fi/en/decision-making/information-on-helsinki/maps-and-geospatial-data/helsinki-3d (accessed: 12.08.2025).

24. Bentley Systems. (2016). *Improving environment with city-scale digital twin | City of Helsinki.* Available at: https://bentley.com/company/esg-user-project-city-of-helsinki/ (accessed: 12.08.2025).

25. Centre for Digital Built Britain. (2018). *National Digital Twin Programme.* Available at: https://cdbb.cam.ac.uk/what-we-did/national-digital-twin-programme (accessed: 12.08.2025).

26. Chapman L., Cowell N., James P., Jonczyk J., Bell D., Evans J., Topping D., Bannan T., Murabito E., Tsoneva E., Birkin M., Arribas-Bel D. & Carlino D. (2023). *EDIF: Towards a digital twin for urban transport: Final report & blueprint.* Department for Transport. Available at: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/62ba0ee08fa8f57213aba3b9/economic-data-innovation-fund-towards-a-digital-twin-for-urban-transport-report-and-blueprint.pdf (accessed: 12.08.2025).

27. World Economic Forum. (2022). *Digital twin cities: Framework and global practices.* Available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Digital_Twin_Cities_Framework_and_Practice_2022.pdf (accessed: 12.08.2025).

28. McKinsey & Company. (2025). *Digital twins: Boosting ROI of government infrastructure investments.* Available at: https://mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-boosting-roi-of-government-infrastructure-investments (accessed: 12.08.2025).

29. Thomas D. (2024). *Economics of digital twins: Costs, benefits, and economic decision making* (NIST Advanced Manufacturing Series, AMS 100-61). Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=958153 (accessed: 12.08.2025).

30. SWAN. (2022). *Digital twin readiness guide: Applying SWAN's digital twin architecture to the water industry.* Available at: https://www.swan-forum.com/wp-content/uploads/2022/05/SWAN-Digital-Twin-Readiness-Guide.pdf (accessed: 12.08.2025).

31. Villani L., Gugliermetti L., Barucco M. A. & Cinquepalmi F. (2025). A digital twin framework to improve urban sustainability and resiliency: The case study of Venice. *Land,* 14(1), 83. DOI: https://doi.org/10.3390/land14010083

32. Voas J., Mell P., Laplante P. & Piroumian V. (2025). *Security and trust considerations for digital twin technology* (NIST Internal Report, IR 8356). Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=957183

33. Petersen J. (2025). NIST report says standards needed for digital twin integration. *ExecutiveGov.* Available at: https://executivegov.com/articles/nist-internal-report-digital-twins (accessed: 12.08.2025).

34. Bolton A., Enzer M., Schooling J. & Others. (2018). *The Gemini principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework.* Centre for Digital Built Britain. Available at: https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/TheGeminiPrinciples.pdf (accessed: 12.08.2025).

35. David I., Shao G., Gomes C., Tilbury D. & Zarkout B. (2023). *Interoperability of digital twins: Challenges, success factors, and future research directions.* Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=956427 (accessed: 12.08.2025).

36. European Cyber Security Organisation. (2023). *ECSO technical paper on cybersecurity scenarios and digital twins.* Available at: https://ecs-org.eu/ecso-Uploads/2023/07/ECSO_WG6_DigitalTwin-2.1.pdf (accessed: 12.08.2025).

37. El-Agamy, R. F., Sayed, H. A., Al Akhatatneh, A. M., & Others. (2024). Comprehensive analysis of digital twins in smart cities: A 4200-paper bibliometric study. *Artificial Intelligence Review,* 57(154). DOI: https://doi.org/10.1007/s10462-024-10781-8

38. World Economic Forum, & China Academy of Information and Communications Technology. (2023). *Digital twin cities: Key insights and recommendations.* Available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Digital_Twin_Cities_2023.pdf (accessed: 12.08.2025).

39. Nguyen A. (2024). How AI is arming cities in the battle for climate resilience. *Reuters.* Available at: https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/how-ai-is-arming-cities-battle-climate-resilience-2024-05-23/ (accessed: 12.08.2025).

*Стаття надійшла: 14.08.2025*
*Стаття прийнята: 12.09.2025*
*Стаття опублікована: 24.09.2025*