

DOI: 10.32347/2076-815x.2025.90.463-476

УДК 528.4

канд. тех. наук, доцент **Лазоренко Н.Ю.**,

lazorenko.niu@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1572-4947,

Київський національний університет будівництва та архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ ПРОСТОРОВИМИ ЦИФРОВИМИ ДВІЙНИКАМИ ТА БАЗОВИМИ ГЕОПРОСТОРОВИМИ ДАНИМИ НІГД

Метою статті є дослідження особливостей взаємодії між просторовими цифровими двійниками та базовими геопросторовими даними національної інфраструктури геопросторових даних (далі – НІГД).

Авторка проаналізувала міжнародний досвід створення, впровадження та використання цифрових двійників, а також визначила сучасні тенденції їх розвитку у світі. Також проаналізувала визначення терміну «цифровий двійник» і запропонувала визначення терміну «просторовий цифровий двійник» в контексті використання в геоінформатиці та сфері НІГД. Підкреслено, що інтероперабельність геопросторових даних відіграє ключову роль у забезпеченні високої якості моделей просторових цифрових двійників.

У статті запропонувала архітектуру просторового цифрового двійника, яка включає п'ять компонент: прикладні технології, функціональні платформи, набори та джерела даних, законодавчу базу, технічні регламенти та стандарти. Деякі із цих компонентів розглянуто крізь призму забезпечення законодавчої, організаційної, семантичної та технічної інтероперабельності. Окрему увагу приділено особливостям взаємодії просторового цифрового двійника з інфраструктурою геопросторових даних (далі – ІГД), зокрема використанню базових геопросторових наборів даних як можливості підвищення точності, повноти та актуальності цифрових моделей.

Результати дослідження можуть бути використані для формування методологічних підходів до впровадження просторових цифрових двійників в Україні, під час розроблення нової стратегії національної інфраструктури геопросторових даних, а також для інтеграції цієї інноваційної технології з НІГД.

Ключові слова: просторові цифрові двійники; геоінформаційні технології; штучний інтелект; інфраструктура просторових даних; геопросторові дані.

Постановка проблеми. Концепція цифрових двійників (від англ. Digital Twins) вже багато десятиліть застосовується в різних галузях економіки у світі, особливо у виробничому середовищі: промисловості, машинобудуванні,

авіакосмічній галузі. Нещодавні технологічні досягнення і зниження вартості сенсорних пристроїв для збирання даних (наприклад, Інтернет речей від англ. Internet of Things – IoT) призвели до зростання інтересу, застосування і розширення варіантів використання. У сучасних умовах цифрової трансформації суспільства особливого значення набувають технології цифрових двійників, які дозволяють моделювати об'єкти та процеси в реальному часі з високим ступенем деталізації. У контексті геоінформатики ключовим різновидом цифрового двійника є просторовий цифровий двійник, який поєднує геопросторову та семантичну інформацію. Разом із тим, ефективне функціонування просторових цифрових двійників критично залежить від якості, повноти, актуальності та інтероперабельності геопросторових даних, зокрема базових даних, що є одним із основних компонентів національної інфраструктури геопросторових даних. Проте на сьогодні відсутні чітко визначені моделі та механізми інтеграції просторових цифрових двійників з НІГД, що ускладнює їх практичне впровадження. Не менш важливою проблемою залишається відсутність загальноприйнятого визначення поняття «просторовий цифровий двійник» у контексті геоінформатики та НІГД, а також архітектури його реалізації.

Це вказує на суперечність між необхідністю забезпечення високої якості інтелектуальних геопросторових даних та відсутністю ґрунтовних досліджень щодо інтеграції просторових цифрових двійників у цей процес. Ця суперечність обумовлює необхідність комплексного дослідження особливостей взаємодії цих двійників з базовими геопросторовими даними НІГД, визначення архітектурних рішень і методичних підходів до їх узгодженого функціонування.

Аналіз досліджень та публікацій по темі дослідження. У більшості реалізацій спільним компонентом для всіх цифрових двійників є рівень візуалізації, який доповнюється постійними потоками даних і можливостями аналітики та дає можливість взаємодіяти з цифровою моделлю на користь її фізичного аналога, системи або процесу [1]. Оскільки візуалізація цифрового двійника містить: точні розміри і просторове розташування елементів, положення датчиків і компонентів, то створюються додаткові можливості об'єднання ізольованих систем у системи регіонального, національного і навіть глобального рівнів. Наприклад, уряд Сінгапура інтегрує технології, щоб змінити спосіб роботи, життя та відпочинку своїх громадян за допомогою ініціативи «Розумна нація» (Smart Nation), яка має три основні напрямки: цифрове урядування, цифрова економіка та цифрове суспільство. У рамках цієї програми Сінгапур інвестував 73 мільйони доларів у створення цифрової моделі всієї країни, щоб користувачі могли уявити собі майбутній розвиток

міста та відчутти на собі переваги проживання в ньому. Проєкт Віртуальний Сінгапур (Virtual Singapor) був завершений у 2022 році, щоб підтримати розвиток середовища розумного міста, яке охоплює різні сфери діяльності, від реагування на надзвичайні ситуації, поліпшення екології до управління містом в цілому (рис. 1) [2 – 4]. Під час реалізації зазначеного проєкту встановлено, що за основу використовувалися топографічні дані на територію Сінгапура.



Рис. 1. Фрагмент веб-інтерфейсу геопортала Сінгапура (<https://www.onemap.gov.sg/>)

Створення цифрового двійника міста Цюрих (Швейцарія) також ґрунтувалося на використанні цифрових топографічних планів, які є базовими геопросторовими даними (рис. 2) [5].

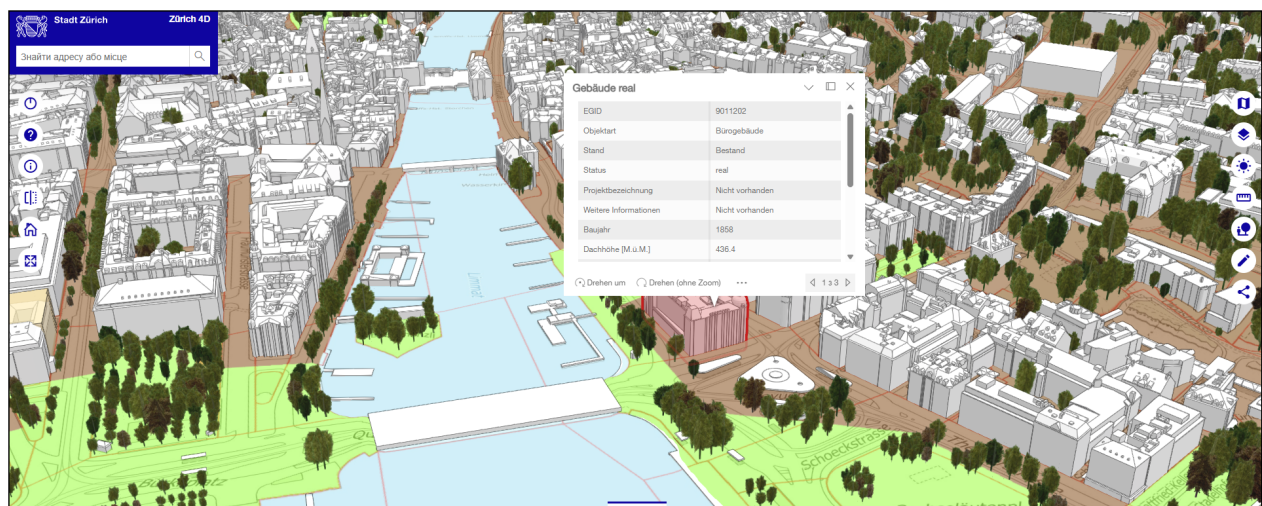


Рис. 2. Фрагмент веб-інтерфейсу геопортала Цюриха (https://3d.stzh.ch/appl/3d/zuerich_4d_extern/)

У наукових працях [6–9] зазначено, що топографічні дані для території, на яку створюється цифровий двійник, становлять базовий (початковий) рівень

для таких моделей. Це є однією зі спільних рис із інфраструктурою геопросторових даних. Також в дослідженнях [10 – 12] підкреслено, що для реалізації цифрових двійників необхідні інтероперабельні базові геопросторові дані, а також технології моделювання, візуалізації та інтеграції.

У науковій літературі різні автори, а також розробники цифрових двійників, дають визначення терміну «цифровий двійник» (англ. *digital twin*) з огляду на сферу застосування, галузеву специфіку, рівень деталізації та ступінь інтеграції з фізичним світом. Нижче наведено деякі з них.

Цифровий двійник – це набір віртуальних інформаційних конструкцій, які повністю описують потенційний або фактичний фізичний продукт: від мікрорівня до макрорівня. Цей цифровий двійник дозволяє отримати всю інформацію, яку можна було б отримати під час обстеження фізичного продукту [13].

Цифровий двійник – це цифрове зображення фізичного об'єкта або процесу в режимі, близькому до реального часу, яке допомагає оптимізувати бізнес-процеси [14].

Цифровий двійник – це цифрове подання реального об'єкта або системи. Реалізація цифрового двійника передбачає інкапсульований програмний об'єкт або модель, що відображає унікальний фізичний об'єкт, процес, організацію, особу чи іншу абстракцію [15]. Дані з кількох цифрових двійників можуть бути агреговані для створення композитного об'єкта, наприклад, електростанція чи місто, та їхніх відповідних процесів.

Цифровий двійник – це віртуальне подання фізичного об'єкта або системи протягом усього життєвого циклу, яке використовує дані в реальному часі для забезпечення розуміння, навчання та аналізу [16].

Цифровий двійник – це дзеркальне відображення фізичного процесу, яке працює паралельно з відповідним фізичним процесом, зазвичай точно відтворюючи його функціонування в режимі реального часу [17].

Цифровий двійник – це віртуальна модель процесу, продукту, виробничого активу або послуги. Обладнання з сенсорами та підключенням до IoT, у поєднанні з машинним навчанням і розширеною аналітикою, може використовуватися для відображення стану пристрою в реальному часі. У поєднанні з 2D- і 3D-моделями об'єктів місцевості цифровий двійник може візуалізувати реальний світ і моделювати електронні, механічні та комбіновані результати системи [18].

З огляду на наведені вище визначення поняття «цифровий двійник» запропоновано визначення терміну «просторовий цифровий двійник» для використання в контексті геоінформатики, оскільки він відсутній в законодавстві України, зокрема у сфері національної інфраструктури

геопросторових даних [19, 20]. Зазначена інноваційна технологія має бути передбачена у новій стратегії розвитку НІГД, оскільки інфраструктура геопросторових даних забезпечує просторовий цифровий двійник базовими геопросторовими даними, а той у свою чергу підвищує інтелектуальний рівень цих даних, гармонізує, збагачує сукупність різних наборів даних з різних практичних інструментів таких як: ГІС, інформаційне моделювання будівель (від англ. Building Information Model – BIM), мережева модель реальності (Reality mesh), система управління взаємовідносинами з клієнтами (Customer Relationship Management – CRM), комп'ютеризована система управління технічним обслуговуванням (Computerized Maintenance Management System – CMMS), IoT тощо.

Отже, *просторовий цифровий двійник* – це динамічна цифрова модель об'єктів реального світу, процесів або явищ, яка містить просторову компоненту і ґрунтується на інтероперабельних базових геопросторових та семантичних даних, а також вимірюваннях у реальному часі. Такий цифровий двійник забезпечує цілісне, масштабоване моделювання об'єктів реального світу, процесів або явищ різних рівнів деталізації, точності та агрегації: від окремих споруд до глобальних систем.

Метою статті є дослідження особливості взаємодії між просторовими цифровими двійниками та базовими геопросторовими даними національної інфраструктури геопросторових даних.

Виклад основного змісту дослідження. У цій статті авторка запропонувала архітектуру просторового цифрового двійника, яка передбачає п'ять компонент:

- 1) прикладні технології;
- 2) функціональні платформи;
- 3) набори та джерела даних;
- 4) законодавство;
- 5) технічні регламенти, стандарти та специфікації.

Ці компоненти дають можливість функціонувати просторовому цифровому двійнику, забезпечуючи законодавчий, організаційний, семантичний і технічний рівні інтероперабельності. Детально про рівні інтероперабельності описано у роботі [11]. Це в свою чергу дозволяє створювати такі цифрові двійники, які не будуть залежати від програмного забезпечення під час їх реалізації, а також обмінюватись їх даними між системами.

Далі розглянемо кожен компонент окремо.

Прикладні технології – це компонента сучасних геоінформаційних технологій, які призначені для збирання, опрацювання, моделювання,

візуалізації геопросторових та семантичних даних, забезпечують обмін цими даними між системами за допомогою API та геоінформаційних сервісів в мережі Інтернет. Дотримання технічної інтероперабельності просторового цифрового двійника дає можливість використовувати повторно дані цієї моделі в інших системах на основі відкритих форматів обміну даних (GML, GeoJSON, GeoPackage) або пропрієтарних (GDB, MXD, TAB, MIF/MID) з наявними засобами конвертації у відкриті.

Функціональні платформи передбачають три рівні, а саме:

- 1) рівень інтерфейсу користувача та сервісів;
- 2) рівень інтеграції та управління даними;
- 3) рівень візуалізації та віртуального подання ресурсів.

Ці три рівні взаємопов'язані між собою, оскільки для їх функціонування необхідно системи керування базами даних, сховища даних на відповідному серверному обладнанні та розроблені сервіси для взаємодії між користувачами та базами даних через інтерфейси програмного забезпечення, що в комплексі формує платформу просторового цифрового двійника.

Набори та джерела даних є одними із основних компонент запропонованої архітектури, оскільки на їх основі здійснюється моніторинг показників моделі, що дає можливість виконувати подальший аналіз, моделювання та прогнозування. Слід зазначити, що якість даних просторового цифрового двійника залежить від якості базових геопросторових даних, тому що ці набори безпосередньо повинні використовуватись під час реалізації моделювання просторового цифрового двійника з визначеною точністю, детальністю, повнотою та іншими елементами якості. Семантична інтероперабельність цього двійника буде досягнута, якщо виконано етапи концептуального та логічного моделювання з урахуванням положень чинних стандартів і специфікацій: серії міжнародних стандартів ISO 19100 «Географічна інформація/ Геоматика», Відкритого геопросторового консорціуму (Open Geospatial Consortium – OGC) та специфікацій INSPIRE.

Положення цих документів також необхідно виконувати під час розроблення прикладних технологій, платформ та моделювання геопросторових даних, з метою підвищення інтелектуального рівня самої моделі двійника, повторного її використання, а також реалізації цієї моделі незалежно від програмного забезпечення.

Технічні регламенти, стандарти та специфікації, нормативно-правова база забезпечують виконання законодавчої та організаційної інтероперабельності просторового цифрового двійника.

Для реалізації просторового геопросторового двійника використовують стандарти OGC геоінформаційних сервісів, які визначено в Порядку

функціонування НІГД [20], які поступово будуть замінені API сервісами [21]. Відповідно до концепції інфраструктури геопросторових даних, яка передбачає відкритість та спільне використання геопросторової інформації користувачами, зростає потреба в оперативних динамічних даних. Це, зокрема, може реалізовуватися шляхом інтеграції сенсорних даних та потоків відеоданих у режимі реального часу. Для забезпечення такої інтеграції даних використовуються стандарти OGC, такі як SensorThings API та Moving Features, які були розроблені для задоволення цієї потреби разом із концепцією Dynamizer у CityGML. А для кодування даних використовуються: CityGML, CityJSON, MUDDI та Geopose, які базуються на моделях даних, які визначають структуру даних.

З урахуванням результатів досліджень [1], слід зазначити, для того щоб моделі просторових цифрових двійників були реалізовані у різних сферах діяльності та сприяли подальшій інтеграції технологій, необхідно створювати такі моделі з відкритим вихідним кодом.



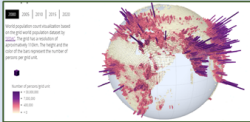
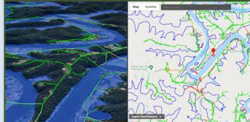
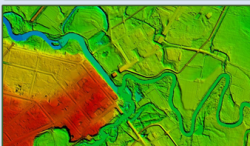
Рис. 3. Архітектура просторового цифрового двійника (адаптовано автором) [1]

Просторовий цифровий двійник реалізовується на трьох рівнях: мікро-, муніципальному та макрорівнях. Аналогічні рівні має інфраструктура геопросторових даних.

На сьогодні в Україні триває розвиток таких цифрових двійників на мікрорівні: на окремі будівлі та споруди, які використовують для збереження об'єктів історичної та культурної спадщини та муніципальному рівні (на

території населених пунктів), наприклад, із застосуванням технології SmartCity, але повноцінної реалізації архітектури просторового двійника виконано ще не було.

Слід звернути увагу, що у сталій практиці, інфраструктура геопросторових даних теж передбачає ієрархію рівнів з використанням базових геопросторових даних, які відповідають детальності, повноті та точності певного масштабу залежно від рівня інфраструктури та територіального охоплення відповідно (рис. 4). Базові геопросторові дані на місцевому рівні ІГД, які створюються на основі цифрових топографічних планів масштабу 1:500 – 1:5000 та цифрових топографічних карт масштабу 1:10000, є вихідними даними для просторових цифрових двійників на мікро- та муніципальному рівнях.

Рівні просторових цифрових двійників	Приклади моделей	Масштаби планів та карт	Рівні інфраструктури геопросторових даних
Макро (регіон, держава, частини світу, земна куля)		> 1:1 000 000	Глобальний
		1:1000000 1:50000 1:500000 1:25000 1:200000 1:10000 1:100000	Національний
		1:50000 1:25000 1:10000	Регіональний
Муніципальний (громада, населений пункт)		1:10000 1:5000 1:2000 1:1000 1:500	Місцевий
Мікро (окремі об'єкти)			

Методи генералізації

Рис. 4. Рівні просторових цифрових двійників та інфраструктури просторових даних (створено автором). Приклади моделей у роботах [22-26]

Висновок. Концепція цифрових двійників набула широкого поширення у світі завдяки розвитку технологій збору та опрацювання даних, зокрема IoT, сенсорних систем та аналітики в реальному часі. У контексті геоінформатики ключовим різновидом виступає просторовий цифровий двійник, який поєднує геопросторову та семантичну інформацію. Ефективне функціонування просторових цифрових двійників залежить від якості, повноти, актуальності та інтероперабельності базових геопросторових даних. Це забезпечується завдяки взаємодії такого двійника із сервісами національної інфраструктури геопросторових даних.

Впровадження технології просторових цифрових двійників у різних галузях економіки сприятиме розвитку цифрового суспільства в цілому. Однак короткострокові проєкти без визначення проблем, які потрібно вирішити за допомогою цих двійників; без визначення переліку зацікавлених сторін та осіб, які приймають рішення, а також їх потреб; без кількісної оцінки факторів успіху впровадження і можливостей для використання цих моделей – все це впливає на отримання соціально-економічних вигод від впровадження цифрових двійників.

Слід зазначити, що вплив результатів поточного етапу розвитку цифрових двійників і стратегія просування деяких зацікавлених сторін створили невизначеність у застосуванні просторового цифрового двійника та прийнятті управлінських рішень на основі даних цієї моделі, зокрема:

- надмірне використання та адаптація синонімічних термінів для позначення цифрових двійників, таких як «віртуальна копія», «цифрова репліка» та інші;
- виробники даних називають 3D- та 4D-моделі цифровими двійниками;
- з метою візуалізації просторових цифрових двійників виконується спрощення цих моделей, що впливає на цілісність і зручність їх використання;
- поширеною практикою є пошук методів експорту та імпорту даних, а не інтеграція та інтероперабельність систем.

Подальші дослідження будуть спрямовані на підвищення якості та інтероперабельності базових геопросторових даних, а також створення методичних основ взаємодії моделей просторових цифрових двійників з НІГД.

Список джерел

1. *Spatial Digital Twins: Global Status, Opportunities, and the Way Forward*. (2022). 76 p.. The World Geospatial Industry Council. URL: <https://wgicouncil.org/wp-content/uploads/2023/11/WGIC-Policy-Report-2022-01-Spatial-Digital-Twins.pdf> (дата звернення: 01.09.2025 р.)
2. Diaz-Sarachaga, J. M. (2025). Developing an assessment governance framework for urban digital twins: Insights from smart cities. *Cities*, 156, 105558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105558>
3. Digital Government Office. (2024). Smart Nation Singapore. URL: <https://www.smartnation.gov.sg/about/> (дата звернення: 01.09.2025 р.)
4. Luo J, Liu P, Xu W, Zhao T, Biljecki F. (2025). A perception-powered urban digital twin to support human-centered urban planning and sustainable city development. *Cities*, 156: 105473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105473>
5. Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The digital twin of the city of Zurich for urban planning. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 99-112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2>
6. Alvi, M., Dutta, H., Minerva, R., Crespi, N., Raza, S. M., & Herath, M. (2025). Global perspectives on digital twin smart cities: Innovations, challenges, and pathways to a sustainable urban future. *Sustainable Cities and Society*, 106356. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106356>

7. Knezevic, M., Donaubaue, A., Moshrefzadeh, M., & Kolbe, T. H. (2022). Managing urban digital twins with an extended catalog service. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 119-126. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W3-2022-119-2022>
8. Haraguchi, M., Funahashi, T., & Biljecki, F. (2024). Assessing governance implications of city digital twin technology: A maturity model approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 204, 123409. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123409>
9. Tomczak, A., Stępień, G., Kogut, T., Jedynek, Ł., Zaniewicz, G., Łacka, M., & Bodus-Olkowska, I. (2024). Development of a Digital Twin of the Harbour Waters and Surrounding Infrastructure Based on Spatial Data Acquired with Multimodal and Multi-Sensor Mapping Systems. *Applied Sciences*, 15(1), 315. <https://doi.org/10.3390/app15010315>
10. Lyashchenko, A., Karpinskyi, Y., Kin, D., & Lazorenko, N. (2024, October). Conceptual Model of Topological Constraints for the Geospatial Database of a Topographic Map at a Scale of 1: 10 000. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024»* (Vol. 2024, No. 1, pp. 1-5). *European Association of Geoscientists & Engineers*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510003>
11. Карпінський Ю.О. Основи створення інтероперабельних геопросторових даних /Ю.О. Карпінський, А.А. Лященко, Н.Ю. Лазоренко, Д.О. Кінь – К.: КНУБА, 2023. – 302 с. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/14205>
12. Karpinskyi, Y., Lyashchenko, A., Lazorenko-Hevel, N., Cherin, A., Kin, D., & Havryliuk, Y. (2021, May). Main state topographic map: Structure and principles of the creation A database. In *Geoinformatics (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-6)*. *European Association of Geoscientists & Engineers*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521043>
13. Grieves, M., & Vickers, J. (2016). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches* (pp. 85-113). *Cham: Springer International Publishing*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
14. Parrott A, Warshaw L. (2017). Industry 4.0 and the digital twin. *Deloitte Univ Press*. URL: <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html> (дата звернення: 01.09.2025 р.).
15. Gartner. Gartner Glossary. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin> (дата звернення: 01.09.2025 р.).
16. Armstrong M. M. (2020). Cheat sheet: What is Digital Twin? *IBM*. URL: <https://www.ibm.com/internet-of-things/trending/digital-twin> (дата звернення: 01.09.2025 р.).
17. Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817-820. DOI: <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>
18. *The promise of a digital twin strategy. Best practices for designers and manufacturers of products and industrial equipment*. (2017). Microsoft Services. 23 p. URL: <https://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/Microsoft%27s%20Digital%20Twin%20%27How-To%27%20Whitepaper.pdf> (дата звернення: 01.09.2025 р.).
19. Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних»: прийнятий 13 квіт. 2020 року № 554-IX// Відомості Верховної Ради України. – 2020. – № 37. – Ст. 277. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text> (дата зв.: 01.09.2025 р.)
20. Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних: Постанова Кабінету Міністрів України від 26 трав. 2021 р. № 532. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/532-2021-п#Text> (дата звернення: 01.09.2025 р.)
21. Urban Digital Twins: Integrating Infrastructure, natural environment and people. 24-025. Чинний від 24.05.2024. *Open Geospatial Consortium*, 2024. URL: <http://www.opengis.net/doc/dp/UDT> (дата звернення: 01.09.2025).

22. Raluca N. (2018). Get creative with globe visualizations. URL: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/js-api-arcgis/mapping/get-creative-with-globe-visualizations> (дата звернення: 01.09.2025 р.)
23. Ryan S. (2022). Mitigate Flood Risk with Digital Twin. URL: <https://www.tdworld.com/disaster-response/article/21243732/mitigate-flood-risk-with-digital-twin-technology> (дата звернення: 01.09.2025 р.)
24. *UK town creates digital twin to help deliver net zero future. Digital twins.* (2022). SmartCitiesWorld. URL: <https://www.smartcitiesworld.net/digital-twins/uk-town-creates-digital-twin-to-help-deliver-net-zero-future> (дата звернення: 01.09.2025 р.)
25. *3D regional towns LiDAR 2018-19* (2023). State Government of Victoria <https://www.land.vic.gov.au/maps-and-spatial/imagery/elevation-data/major-lidar-projects/3d-regional-towns-lidar-2018-19> (дата звернення: 01.09.2025 р.)
26. Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, environment and urban systems*, 59, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005>

Ph. D., Associate Professor **Lazorenko Nadiia**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

RESEARCH ON THE INTERACTION BETWEEN SPATIAL DIGITAL TWINS AND CORE REFERENCE DATA OF THE NSDI

The purpose of this article is to explore the specific peculiarities of interaction between spatial digital twins and the core reference datasets of the National Spatial Data Infrastructure (NSDI). The study highlights the importance of digital twins as an emerging technology that enables the modelling of real-world objects, systems, and processes in real time with a high degree of detail. Digital twins are extensively utilized in various industrial sectors; however, their use in the geospatial domain is still emerging and faces numerous methodological and organizational challenges.

The author provides an overview of international experience in the creation, implementation, and practical use of digital twins, emphasizing recent trends in their global development. She conducted a critical review of existing definitions of the term “*digital twins*,” followed by the proposal of an adapted definition of “*spatial digital twins*” in the context of geoinformatics and the NSDI. Geospatial data quality, completeness, timeliness, and above all, interoperability are essential factors for ensuring the reliability and applicability of spatial digital twin models.

The article introduces an architectural framework for spatial digital twins, which includes five interrelated components: applied technologies, functional platforms, data sources and datasets, legal frameworks, and technical regulations and standards. The components are examined from the viewpoints of legal, organizational, semantic, and technical interoperability. Core reference datasets significantly enhance the accuracy, consistency, and relevance of spatial digital twins.

The results of this research can contribute to the development of methodological approaches for implementing spatial digital twins in Ukraine, support the formulation of a new NSDI strategy, and facilitate the integration of innovative geospatial technologies into national and regional infrastructures.

Keywords: spatial digital twins; geoinformation technologies; artificial intelligence; spatial data infrastructure; geospatial data

REFERENCES

1. *Spatial Digital Twins: Global Status, Opportunities, and the Way Forward*. (2022). 76 p.. The World Geospatial Industry Council. URL: <https://wgicouncil.org/wp-content/uploads/2023/11/WGIC-Policy-Report-2022-01-Spatial-Digital-Twins.pdf> (дата звернення: 01.09.2025 р.). {in English}.
2. Diaz-Sarachaga, J. M. (2025). Developing an assessment governance framework for urban digital twins: Insights from smart cities. *Cities*, 156, 105558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105558>. {in English}.
3. *Digital Government Office*. (2024). Smart Nation Singapore. URL: <https://www.smartnation.gov.sg/about/> (дата звернення: 01.09.2025 р.). {in English}.
4. Luo J, Liu P, Xu W, Zhao T, Biljecki F. (2025). A perception-powered urban digital twin to support human-centered urban planning and sustainable city development. *Cities*, 156: 105473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105473>. {in English}.
5. Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The digital twin of the city of Zurich for urban planning. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 99-112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2>. {in English}.
6. Alvi, M., Dutta, H., Minerva, R., Crespi, N., Raza, S. M., & Herath, M. (2025). Global perspectives on digital twin smart cities: Innovations, challenges, and pathways to a sustainable urban future. *Sustainable Cities and Society*, 106356. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106356>. {in English}.
7. Knezevic, M., Donaubaue, A., Moshrefzadeh, M., & Kolbe, T. H. (2022). Managing urban digital twins with an extended catalog service. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 119-126. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W3-2022-119-2022>. {in English}.
8. Haraguchi, M., Funahashi, T., & Biljecki, F. (2024). Assessing governance implications of city digital twin technology: A maturity model approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 204, 123409. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123409> {in English}.

9. Tomczak, A., Stępień, G., Kogut, T., Jedynak, Ł., Zaniewicz, G., Łacka, M., & Bodus-Olkowska, I. (2024). Development of a Digital Twin of the Harbour Waters and Surrounding Infrastructure Based on Spatial Data Acquired with Multimodal and Multi-Sensor Mapping Systems. *Applied Sciences*, 15(1), 315. <https://doi.org/10.3390/app15010315>. {in English}.
10. Lyashchenko, A., Karpinskyi, Y., Kin, D., & Lazorenko, N. (2024, October). Conceptual Model of Topological Constraints for the Geospatial Database of a Topographic Map at a Scale of 1: 10 000. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024»* (Vol. 2024, No. 1, pp. 1-5). *European Association of Geoscientists & Engineers*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510003>. {in English}.
11. Karpinskyi Y.O. Fundamentals of creating interoperable geospatial data./ Y.O. Karpinsky et al. Kyiv: KNUBA, 2023. 302 p. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/14205>. {in Ukrainian}
12. Karpinskyi, Y., Lyashchenko, A., Lazorenko-Hevel, N., Cherin, A., Kin, D., & Havryliuk, Y. (2021, May). Main state topographic map: Structure and principles of the creation A database. In *Geoinformatics* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-6). *European Association of Geoscientists & Engineers*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521043>. {in English}.
13. Grieves, M., & Vickers, J. (2016). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches* (pp. 85-113). *Cham: Springer International Publishing*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4. {in English}.
14. Parrott A, Warshaw L. (2017). Industry 4.0 and the digital twin. *Deloitte Univ Press*. URL: <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html> (дата звернення: 01.09.2025 р.). {in English}.
15. *Gartner*. *Gartner Glossary*. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin> (дата звернення: 01.09.2025 р.). {in English}.
16. Armstrong M. M. (2020). Cheat sheet: What is Digital Twin? *IBM*. URL: <https://www.ibm.com/internet-of-things/trending/digital-twin> (дата звернення: 01.09.2025 р.). {in English}.
17. Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817-820. DOI: <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>. {in English}.
18. *The promise of a digital twin strategy. Best practices for designers and manufacturers of products and industrial equipment*. (2017). Microsoft Services. 23 p. URL: <https://info.microsoft.com/rs/157-GQE->

382/images/Microsoft%27s%20Digital%20Twin%20%

27How-To%27%20Whitepaper.pdf (дата звернення: 01.09.2025 р.). {in English}.

19. The Law of Ukraine On the National Infrastructure of Geospatial Data: adopted on April 13. 2020 No. 554-IX// Information of the Verkhovna Rada of Ukraine. – 2020. – No. 37. – 277. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text>. {in Ukrainian}

20. On the approval of the Procedure for the functioning of the national infrastructure of geospatial data: Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated May 26. 2021 No. 532. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/532-2021-п#Text>. {in Ukrainian}

21. Urban Digital Twins: Integrating Infrastructure, natural environment and people. 24-025. Чинний від 24.05.2024. Open Geospatial Consortium, 2024. URL: <http://www.opengis.net/doc/dp/UDT> (дата звернення: 01.09.2025). {in English}.

22. Raluca N. (2018). Get creative with globe visualizations. URL: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/js-api-arcgis/mapping/get-creative-with-globe-visualizations> (дата звернення: 01.09.2025 р.). {in English}.

23. Ryan S. (2022). Mitigate Flood Risk with Digital Twin. URL: <https://www.tdworld.com/disaster-response/article/21243732/mitigate-flood-risk-with-digital-twin-technology> (дата звернення: 01.09.2025 р.). {in English}.

24. UK town creates digital twin to help deliver net zero future. Digital twins. (2022). Smart Cities World. URL: <https://www.smartcitiesworld.net/digital-twins/uk-town-creates-digital-twin-to-help-deliver-net-zero-future> (дата звернення: 01.09.2025 р.). {in English}.

25. 3D regional towns LiDAR 2018-19 (2023). State Government of Victoria <https://www.land.vic.gov.au/maps-and-spatial/imagery/elevation-data/major-lidar-projects/3d-regional-towns-lidar-2018-19> (дата звернення: 01.09.2025 р.)

26. Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, environment and urban systems*, 59, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005>. {in English}.