ISSN 2306-1677 (Print) ISSN 2518-7325 (On-line)
Отримано: 12.08.2026; Прийнято: 26.08.2026; Опубліковано: 30.12.2026;
УДК 528.77:528.463:004.946:711.4(477) http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.06.11

СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАСОБАМИ БПЛА-ФОТОГРАММЕТРІЇ ТА ГІС

О.І. КАЧАНОВСЬКИЙ,
викладач,
E-mail: myzvk2014@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2322-8089
Н.Г. РУСІНА,
кандидат педагогічних наук,
E-mail: rusinanelja@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5826-8788
О.М. КУШНІРУК,
викладач,
E-mail: o.m.kushniruk@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0054-3956
С.В. БУЛАКЕВИЧ,
викладач,
E-mail: s.geotehnology@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5311-2733
О.М. РУДЬКО,
викладач,
E-mail: o.rudko@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2579-6792
Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Анотація. *У статті розглянуто методологію створення базового цифрового двійника міського середовища на основі інтеграції безпілотних літальних апаратів (БПЛА), фотограмметрії, високоточних GNSS-вимірювань і геоінформаційних систем (ГІС). Метою дослідження є розробка методології створення цифрового двійника міського середовища із застосуванням БПЛА-фотограмметрії та геоінформаційних технологій, а також її апробація на реальному об'єкті дослідження. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний шестифазний технологічний ланцюг, що охоплює планування знімальної місії, виконання польових робіт із RTK-позиціонуванням, фотограмметричне опрацювання матеріалів у середовищі Agisoft Metashape, векторизацію просторових об'єктів у QGIS з формуванням бази даних GeoPackage, просторовий аналіз та*

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

тривимірну візуалізацію. Ключовим результатом є створення цифрової моделі міського середовища рівня LOD1, яка відповідає концепції Digital Mirror і може розглядатися як початковий етап цифровізації територіальних громад. На відміну від повноцінного цифрового двійника, цифрове дзеркало відтворює поточний стан фізичного середовища, але не забезпечує автоматизованого двостороннього обміну даними в режимі реального часу. Методичний підхід апробовано на фрагменті міської території м. Рівне площею 42 га. Розраховано оптимальні параметри аерознімання, визначено необхідну кількість наземних опорних точок та підтверджено відповідність отриманої точності встановленим вимогам. Виконано оцінювання просторової точності отриманих матеріалів, розраховано коефіцієнт забудови, індекс рослинності VARI та сформовано модель рівня LOD1 із подальшою публікацією у вебсередовищі. Результати дослідження підтвердили, що запропонована методологія забезпечує формування цифрової моделі міського середовища, придатної для інвентаризації забудови, актуалізації картографічної основи, просторового планування та інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень у процесі відбудови й розвитку територій.

Ключові слова: *цифровий двійник, БПЛА-фотограмметрія, геоінформаційні системи, цифрова модель міста, LOD1, просторові дані, територіальна громада, цифрове моделювання.*

Вступ

Цифрова трансформація системи просторового управління містами є глобальним трендом, який набуває ознак стратегічної необхідності. Унаслідок збройної агресії Росії інфраструктура України зазнала масштабних прямих збитків, а значна кількість будівель була пошкоджена або повністю зруйнована. Ефективне планування відновлення потребує точних, актуальних і стандартизованих просторових даних, зокрема ортофотопланів, цифрових моделей рельєфу та 3D-моделей будівель, що є важливою інформаційною основою для формування цифрових двійників територій. Самі цифрові двійники розглядаються як комплексні динамічні моделі просторових об'єктів, процесів та інфраструктури, інтегрованих у систему прийняття управлінських рішень.

Удосконалення технологій дистанційного зондування Землі, безпілотних авіаційних систем, наземного й мобільного лазерного сканування, високоточних GNSS-вимірювань і хмарних геоінформаційних платформ створило передумови для переходу від традиційного картографування до комплексного цифрового моделювання територій [1]. Одним із ключових результатів цього процесу стало впровадження цифрових двійників, які забезпечують інтеграцію, аналіз, візуалізацію та постійне оновлення просторових даних і є важливим інструментом підтримки управлінських рішень [2].

Аналіз досліджень та публікацій по темі дослідження

У сучасних наукових дослідженнях цифрові двійники міського середовища визначаються як перспективний інструмент інтеграції просторових даних, тривимірного моделювання та геоінформаційних

технологій для підтримки управлінських рішень і сталого розвитку територій. Зокрема, M. Grieves і J. Vickers [3] розкрили зміст поняття цифрового двійника через взаємопов'язане функціонування матеріального об'єкта або системи та їхнього цифрового представлення, між якими здійснюється ітеративний обмін даними й інформацією. У документі Gemini Principles визначено основні принципи створення цифрових двійників. Зокрема, вони мають бути спрямовані на суспільне благо, створення цінності та отримання достовірної інформації, а також відповідати вимогам безпеки, відкритості, якості, сумісності й подальшого розвитку [4]. R. Kitchin і U. Dawkins [5] представили досвід створення тривимірної міської інформаційної моделі Дубліна, призначеної для інтеграції, візуалізації та інтерпретації просторових даних. Автори зазначають, що розроблена Dublin City Information Model CIM за своїми функціональними характеристиками була радше цифровим дзеркалом міського середовища, ніж повноцінним цифровим двійником, оскільки переважно відображала стан міста, але не забезпечувала повного двостороннього обміну даними з фізичним середовищем.

Яковенко та ін. вперше в Україні застосували геодезичні методи моніторингу деформацій для уточнення граничних умов цифрового двійника будівлі, пошкодженої ракетним ударом 26.02.2022 за адресою: вул. Лобановського, 6-А у Києві [6]. Після пошкодження відхилення плити 25-го поверху від горизонтального рівня становило 241 мм, а відносна нерівномірність осідання – 0,0448, що у 8,96 раза перевищувало нормативне значення 0,005. Отримані дані були інтегровані до BIM-моделі та цифрового двійника будівлі й використані як граничні умови для моделювання методом скінченних елементів. Дослідження стало унікальним прикладом застосування геодезичних вимірювань для верифікації цифрового двійника будівлі в умовах активного збройного конфлікту. Сучасні інформаційні технології для моделювання міського середовища розглядала Т. Гончаренко [7], яка запропонувала концептуальну IT схему для управління міським простором на основі інтеграції трьох компонентів – системи штучного інтелекту Artificial intelligence, технології Big Data та методологічної платформи CIM. У науковій роботі [8] розглядають потенціал мобільної платформи для використання цифрового двійника процесів метеорологічного прогнозування, підкреслюючи його здатність покращувати точність прогнозів і забезпечувати швидкий доступ до актуальної інформації про погоду. Дослідження О. Черткова визначає значення використання геоінформаційних систем (GIS), BIM-моделювання, технологій дистанційного зондування Землі та автоматизованих систем моніторингу у підвищенні точності прогнозування, оптимізації проєктних рішень й забезпеченні оперативного управління інженерною інфраструктурою міста [9].

Метою статті є розроблення та апробація методології створення цифрового двійника міського середовища засобами БПЛА-фотограмметрії та геоінформаційних систем, яка охоплює послідовні етапи планування знімальної місії, збору й опрацювання геопросторових даних, побудови міської інформаційної моделі (CIM-моделі) першого рівня деталі-

зації (LOD1), оцінювання технічної та економічної ефективності її впровадження для потреб міських територіальних громад.

Матеріали і методи дослідження

Методологічну основу дослідження сформовано на основі поєднання системного, порівняльного, геоінформаційного, фотограмметричного та картографічного підходів. Дослідження ґрунтується на публікаціях вітчизняних і зарубіжних авторів, присвячених питанням цифрових двійників, міських інформаційних моделей, положеннях міжнародних стандартів OGC CityGML 3.0 [4] та ISO 19152 [10], нормативних документах у сфері геопросторових даних, а також на матеріалах БПЛА-знімання й відкритих просторових наборів даних. У роботі систематизовано типи цифрових моделей міського середовища, визначено доцільний рівень їх деталізації, обґрунтовано послідовність отримання та опрацювання геопросторових даних і сформовано міську інформаційну модель (CIM-модель) для потреб територіальних громад.

На початковому етапі дослідження визначено типи цифрових моделей міського середовища та визначено їхні функціональні відмінності. Відповідно до класифікацій M. Grieves і J. Vickers [3], A. Bolton та ін. [4], R. Kitchin і U. Dawkins [5], цифрові представлення міського середовища розглядаються за рівнем взаємодії між фізичним об'єктом і його цифровою моделлю, повнотою інформаційного обміну та функціональним призначенням. Міські інформаційні моделі реалізується на трьох функціональних рівнях (табл. 1).

Водночас стандарт OGC CityGML 3.0 [11;12] визначає п'ять геометричних рівнів деталізації LOD0–LOD4 (рис. 1). Для більшості міських територіальних громад України рівень Digital Mirror / LOD1 може розглядатися як доцільний початковий етап створення цифрового представлення території. З огляду на співвідношен-

1. Типологія цифрових двійників міського середовища

Тип	Назва	Характеристика	LOD	Платформа	Приклади	Примітка
Digital Mirror	Статична CIM	Точна геометрія + семантика. Немає зворотного зв'язку з реальним об'єктом	LOD1–LOD2	QGIS + GeoPackage + Cesium	Навчальні проєкти, МТГ першого циклу	Рекомендовано для початку в UA
Digital Shadow	Тінь	Одностороннє оновлення: датчики → модель. Немає управлінського зворотного зв'язку	LOD2	PostGIS + Sensor Feed	ЖКГ-моніторинг, аудит мереж	Середній рівень складності
Digital Twin	Повний двійник	Двосторонній зв'язок: зміна моделі → управлінські дії в реальному місті	LOD2–LOD3	CityEngine + IoT + AI	Singapore, Helsinki, Dubai	Висока вартість; потрібен IoT
CIM	Міська ін. модель	Семантична 3D + симуляції + реал.-час. Відповідає DM або DT залежно від реалізації	LOD2–LOD3	FME + CityGML + Unity	Dublin BCD (Kitchin, 2024)	Гнучка архітектура

Джерело: систематизовано авторами за [3-5; 11-12]



Рис. 1 Піраміда рівнів деталізації LOD0–LOD4 за OGC CityGML 3.0

Джерело: розроблено авторами [11;12]

ня деталізації, вартості, складності створення та доступності вихідних даних, рівень Digital Mirror / LOD1 обрано як базовий для початкової апробації методології в умовах міських територіальних громад України.

Для обґрунтування вибору методу знімання проведено порівняльний аналіз семи підходів за такими критеріями: продуктивність, планова та висотна точність (mXY, mH), досяжний рівень деталізації LOD, характер просторового покриття, вартість і рекомендована сфера застосування (табл. 2). Вихідні дані для порівняння сформовано на основі результатів досліджень Ľ. Kovanič [13], В. Тарнавського та співавторів [14] та власних розрахунків авторів.

За сукупністю визначених критеріїв для апробації методології обрано БПЛА-фотограмметрію з RTK-позиціонуванням, яка забезпечує суцільне просторове покриття, високу продуктивність, достатню для моделі LOD1 точність і можливість одночасного отримання ортофотоплану, цифрової моделі поверхні та щільної хмари точок.

2. Порівняльний аналіз методів збору геопросторових даних

Метод	Продукт.	mXY	mH	LOD	Покриття	Вартість 1 км²	Застосування
Тахеометрична зйомка	0,5–2 км²/день	2–5 мм	5–10 мм	LOD3	Часткова	45–80 тис. грн/км²	Детальна кадастрова, BIM фасади
RTK-GNSS знімання	1–3 км²/день	8–12 мм	15–18 мм	LOD2	Часткова	30–50 тис. грн/км²	GCP, межі ділянок, опорна мережа
БПЛА-фотограмметрія (RTK)	10–50 км²/день	< 2–5 см	< 5–8 см	LOD1–2	Суцільна	8–15 тис. грн/км²	Ортофото, ЦМР, масовий кадастр, DT
Наземне лазерне скан. (НЛС)	0,1–20 га/день	0,1–1 мм	1–2 мм	LOD3	Суцільна	Дуже висока	Фасади, LOD3, пам'ятки, BIM
Повітряне ЛС (ALS/LiDAR)	≤ 800 км/день	5–8 см	10–15 см	LOD1	Суцільна	Висока (авіа)	Широкоплощинне, ЦМР, ліси
Мобільне ЛС (МЛС)	≤ 500 км/день	5–8 см	8–12 см	LOD2	Суцільна	Висока	Вулиці міст, ВДМ, тунелі
Супутниковий знімок (ком.)	Глобально	0,3–0,5 м	—	LOD0	Суцільна	Низька	Моніторинг, архівні дані, фон

Джерело: розроблено авторами [13;14]

Математичний апарат дослідження охоплює систему розрахункових формул, які формалізують основні етапи – від планування знімальної місії до оцінювання ефективності впровадження цифрового двійника.

Просторова роздільна здатність (GSD, см/піксель) [13]:

$$GSD = \frac{H \times d}{f \times 1000}, \quad (1)$$

де: H – висота польоту (мм); d – розмір фотоелемента матриці (мкм); f – фокусна відстань (мм). Вихідні дані для DJI P4 RTK (d=2,41 мкм, f=8,8 мм, H=120 м).

Кількість маршрутних смуг (n смуг) [13]:

$$n = \left[\frac{W}{(Sw \times (1 - By))}\right] + 1, \quad (2)$$

де: W – ширина території дослідження (AOI), м; Sw = GSD × Nw – ширина кадру на місцевості, м; Nw – кількість пікселів цифрового зображення за шириною кадру, пікс., By – поперечне перекриття.

Базова відстань між знімками (Вфото) та загальна кількість знімків (N) [13]:

$$B_{фото} = Sh \times (1 - Bx), \quad (3)$$

$$N = n \times \left[\frac{L}{B\text{фото}}\right], \quad (4)$$

де: Sh – довжина кадру на місцевості в напрямку польоту, м; Bx – базис фотографування вздовж напрямку польоту, тобто відстань між центрами двох послідовних знімків на місцевості, м.

L – довжина території дослідження вздовж маршруту польоту, м.

Точність ортофотоплану [13]:

$$mXY \approx 1{,}5 \times GSD; \quad mH \approx 2{,}0 \times GSD, \text{ см} \quad (5)$$

Точність без GCP у режимі PPK [10]:

$$mXYppk \approx GSD \times 1{,}2 + Csys, \text{ см} \quad (6)$$

де Csys = 2–5 см – систематична похибка RTK-позиціонування камери без наземного контролю.

Оптимальна кількість наземних опорних точок з відомими плановими та висотними координатами (nGCP, точок) [13]:

$$nGCP = \left[\sqrt{\frac{S}{So}}\right] \times k, \quad (7)$$

де S – площа території дослідження AOI (км²); S_0 = 0,5 км² – нормативна площа на 1 GCP; k– поправочний коефіцієнт врахування конфігурації території, кутових ділянок та необхідне перекриття, k=1,5–2,0.

Кількість і розміщення точок GCP визначали з урахуванням площі, конфігурації території, рельєфу та вимог до точності.

Коефіцієнт забудови (Kz) [13]:

$$Kz = \left(\frac{Sb}{S_{AOI}}\right) \times 100\%, \quad (8)$$

VARI-індекс рослинності для RGB-камери [10]:

$$VARI = \frac{G - R}{G + R - B}, \quad (9)$$

NDVI для мультиспектральних камер (DJI Multispectral, MicaSense RedEdge) [13]:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}, \quad (10)$$

де NIR – канал ближнього інфрачервоного випромінювання. Класифікація: < 0,1 – голий ґрунт/асфальт;

0,1–0,25 – рідка рослинність; > 0,25 – густі насадження.

Відносна економія щодо традиційного методу (Es, %), [13]:

$$Es = \frac{Etrad - Euav}{Etrad} \times 100\% \quad (11)$$

де Etrad – вартість традиційного знімання тієї ж площі (тис. грн); Euav – вартість БПЛА-знімання. При площі 1 км²: Etrad ≈ 62 тис. грн (тахеометрія), Euav ≈ 13 тис. грн → відносна економія щодо традиційного методу складає 79,0 %

Коефіцієнт відносної економічної ефективності (Ке) [13]:

$$Ke = \frac{Etrad}{Euav}, \quad (12)$$

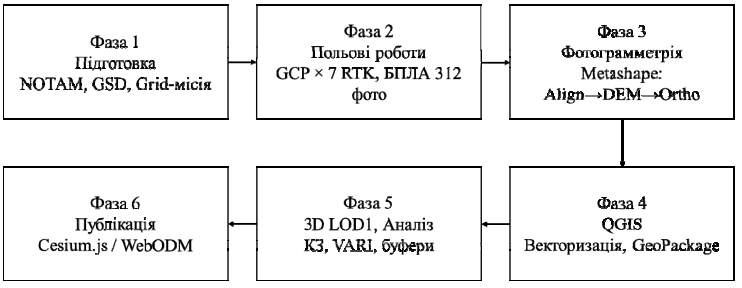
Розрахований коефіцієнт засвідчив скорочення витрат у 4,77 рази.

Запропонований шестифазний технологічний ланцюг охоплює повний цикл створення CIM-моделі – від підготовки вихідних даних до її публікації (рис. 2). Результатом кожної фази є окремий інформаційний продукт, який використовується як вхідний матеріал для наступного етапу.

Проведено порівняльний аналіз спеціалізованого програмного забезпечення для фотограмметричного опрацювання матеріалів БПЛА-знімання, просторового аналізу, зберігання геоданих, тривимірного моделювання та автоматизації робочих процесів з метою вибору найбільш ефективних рішень. Оцінювання здійснено за функціональним призначенням, типом ліцензії, підтримуваними операційними системами, ключовими можливостями та придатністю до окремих етапів створення CIM-моделі (табл. 3).

Результати та їх обґрунтування

Тестування методології виконано у формі практичної апробації – побудови цифрового дзеркала (Digital Mirror). Цифрове дзеркало (Digital Mirror) – це цифрове представлення фізичного об'єкта або міського середовища, яке відображає його стан на основі отриманих даних, але не забезпечує повноцінного автоматичного двостороннього обміну з реальним об'єктом [5;15]. Основними напрямами функціонального застосування цифрового двійника міста є навчання моделей та підтримка прийняття



Позначення: → — послідовна передача продукту; ← — зворотний перехід (Фаза 5→4 при виявленні топологічних помилок)

Рис. 2. 6-фазний методичний ланцюг побудови цифрового двійника МТГ

Джерело: розроблено авторами [13-16]

3. Порівняльна характеристика програмних засобів для створення CIM-моделі міського середовища

Програмний продукт	Категорія	ОС	Ключові функції	Оцінка придатності	Застосування
Agisoft Metashape Pro 2.x	Фотограмметрія	Комерційне	Win/Mac/Linux	SfM+MVS, RTK/PPK, авт. GCP, LOD1–3 продукти, звіт якості	висока
OpenDroneMap (ODM)	Фотограмметрія	Open Source	Docker/CLI	SfM без GUI, WebODM-інтерфейс, пакетна обробка	допоміжна
Pix4Dmapper	Фотограмметрія	Комерційне	Windows	Rapid Check, реал.-час якість, хмара точок LOD3	середня
QGIS 3.34 LTR	ГІС-аналіз, 3D	Open Source (GPL)	Крос-платф.	Векторизація, GeoPackage, 3D View, 100+ плагінів, NDVI	висока
PostGIS / PostgreSQL	Просторова БД	Open Source	Крос-платф.	SQL+геометрія, LADM-UA, масова оцінка, CityGML	середня
Delta/Digitals Pro XE	ГІС / топографія	Комерційне (UA)	Windows	DXF/XML, кадастрові плани, ДЗК-інтеграція	середня
Python (GeoPandas, Rasterio)	Автоматизація	Open Source	Крос-платф.	NDVI, deep learning, пакетна обробка растрів	середня
CityEngine (Esri)	3D-планування	Комерційне	Win/Mac	CGA-правила, LOD2–3, CityGML, процедурне моделювання	допоміжна
Cesium.js / Ion	3D-публікація	Open Source / SaaS	Веб (WebGL)	3D Tiles, CZML, публічний API, відкрите хмарне середовище	середня
DJI Pilot 2 / Terra	Місії БПЛА	Безкоштовне	Android/iOS/Win	Grid/Waypoint, RTH, автом. GSD, 2D/3D місії	середня

Джерело: розроблено авторами [15;16]

управлінських рішень. Він дає змогу вивчати взаємодію між елементами міста та приймати більш обґрунтовані рішення, спрямовані на підвищення ефективності управління і продуктивності міських елементів. Результати впровадження цифрового міського середовища забезпечують управління даними, візуалізацію, ситуаційну обізнаність, планування та прогнозування, інтеграцію та співпрацю [16].

Таким цифровим середовищем став фрагмент міської території Рівного, площею дослідження (AOI) – 42,0 га (рис.3).

Вхідні параметри місії DJI Phantom 4 RTK: h = 120 м, GSD = 3,02 см, Bx = 80%, By = 70%, n = 12 смуг, N = 322 знімків, розрахункова тривалість польотної місії становила 22 хв 41 с. (рис.4).

Геодезичне забезпечення: nGCP = 7 точок (S=0,42 км², S_0=0,5 км², k=2,0 → n=6 +1 = 7), рівномірно розподілені по периметру площі, виміряні методом RTK (Leica GS18 T / мережа NRTK ЗАКПОС): mXY = ±9–14 мм, mH = ±14–20 мм.

Опрацювання виконано в середовищі Agisoft Metashape Pro 2.1 середовищі (високий рівень точності (High accuracy), GCP прив'язка, щільна хма-

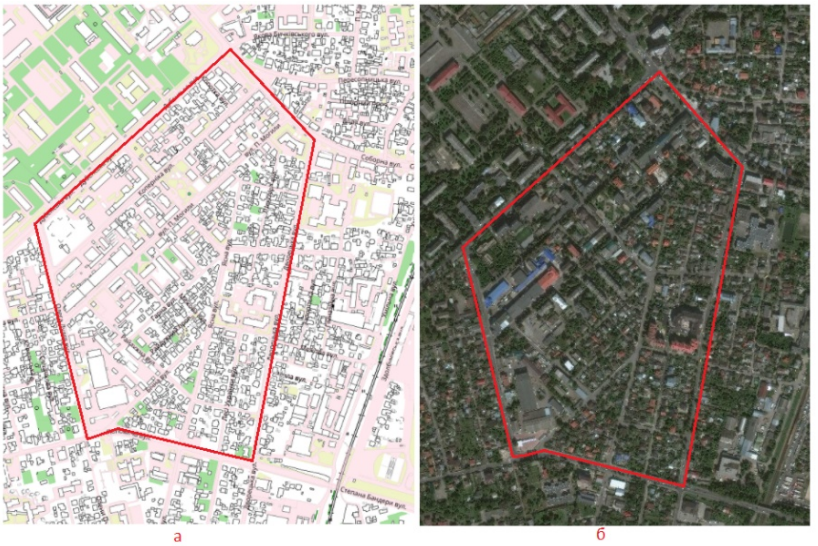


Рис. 3. Об'єкт дослідження Земельна ділянка м. Рівне: а-топооснова М1:2000; б – базова карта (ESRI Online Imagery).

Джерело: Геопортал відкритих даних м. Рівне



Рис. 4. Прокладений маршрут аерознімання за допомогою DroneDeploy Flight App

Джерело: розроблено авторами

ра точок середньої роздільної здатності (Medium Dense Cloud)): 5793412 точок, ЦММ (DSM) 6 см, ортофото GSD = 3,29 см/піксель. Залишкова похибка по GCP: mXY = 0,014 м (норматив < 1,5 × GSD = 0,045 м). У середовищі QGIS 3.34 LTR сформовано геопросторову базу даних city.gpkg у

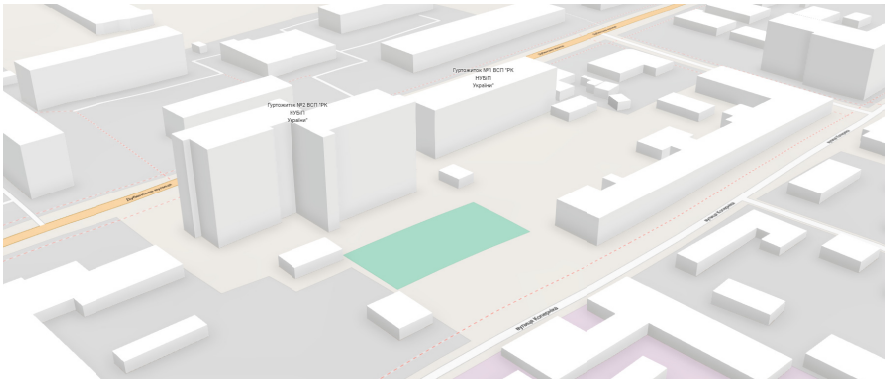


Рис. 5. Тривимірна модель рівня LOD1 фрагмента міського середовища м. Рівне

Джерело: розроблено авторами

форматі GeoPackage та системі координат EPSG:5562. База містила п'ять тематичних шарів: будівлі – 248 полігонів, дороги – 187 лінійних сегментів, зелені насадження – 34 полігони, наземні опорні точки – 7 точок і межу території дослідження – 1 полігон. Трудомісткість ручної векторизації становила близько 2,5 год/га (рис.5).

Просторовий аналіз території передбачав визначення коефіцієнта забудови, оцінювання стану зелених насаджень за індексом VARI, побудову зон пішохідної доступності та розрахунок економічної ефективності застосованого підходу. Коефіцієнт забудови становив 12,9 %, середнє значення VARI – близько 0,22, що свідчить про задовільний стан рослинного покриву. Для оцінювання доступності об'єктів сформовано буферні зони радіусом 500 м. Коефіцієнт відносної економічної ефективності застосуванням БПЛА становить близько 4,77 рази, що свідчить про зниження витрат порівняно з традиційними методами вищими за витрати із. Під час формування моделі рівня LOD1 висоти для 87 % будівель визначено автоматично за цифровою моделлю поверхні, тоді як для решти 13 % об'єктів висотні характеристики уточнено вручну. Зведені результати апробації наведено у таблиці 4.

Для території площею 42,00 га прийнято сім наземних опорних точок, розташованих по периметру та в центральній частині знімального блока. Кількість точок визначено з урахуванням конфігурації території, параметрів перекриття, способу RTK-позиціонування камери та необхідності просторового контролю фотограмметричної моделі. Середнє значення VARI у межах виділених ділянок зелених насаджень становило близько 0,22, що в межах прийнятої класифікації відповідає переважанню розрідженої та помірно щільної рослинності.

Результати апробації підтвердили практичну придатність запропонованого технологічного ланцюга для формування базового цифрового представлення міської території рівня LOD1. Застосування БПЛА-фотограмметрії забезпечило одночасне отримання ортофотоплану з просторовою роздільною здатністю 3,02 см/піксель, цифрової моделі поверхні з

4. Зведені результати практичної апробації методології

Показник	Значення	Коментар
Кількість знімків DNG	322 шт.	20 МП, з EXIF-RTK координатами, формат RAW
Висота польоту (AGL)	120 м	Відповідно до APU-UAS; оптимум GSD/час
GSD (розрахункове)	3,29 см/піксель	Формула (1): d=2,41 мкм, f=8,8 мм, H=120 м
Поздовжнє / поперечне перекриття	80% / 70%	Normatyvna vymoga > 60% / 55%
Кількість маршрутних смуг	12 смуг	Формула (2): W=577 м, Sw≈165 м, By=0,70%
Тривалість місії (розрахункова)	22 хв 41 с	За даними планувальника польотної місії.
Кількість GCP	7 точок (101–107)	*Рівномірний розподіл; відстань між GCP ≤350 м
Точність GCP (mXY)	±0,009–0,014 м	RTK Leica GS18 T / мережа NRTK ЗАКПОС
Точність GCP (mH)	±0,014–0,020 м	Балтійська система висот 1977 р.
Щільна хмара точок	5 793 412 точок	Agisoft Metashape, Medium quality
GSD ортофотоплану	3,02 см/піксель	GeoTIFF, RGB 8-bit, EPSG:5562, seamless
Роздільна здатність DSM	6,0 см/піксель	GeoTIFF float32, EPSG:5562
Середня залишкова планова нев'язка на GCP (mXY)	0,014 м (сер.)	Відповідає < 1,5 × GSD = 0,049 м
Кількість векторних об'єктів: buildings	248 полігонів	Середня площа 218,5 м²; ручна оцифровка
Кількість об'єктів: roads	187 сегментів	Осьові лінії, атрибут surface/width_m
Кількість об'єктів: greenery	34 полігони	Площа ≈ 8,46 га (20,1% AOI)
Коефіцієнт забудови (КЗ)	12,9%	Формула (8): Sбуд=54200/SAOI=420 000 м²
Індекс стану рослинності (VARI)	≈ 0,22	Формула (6): зелена зона – задовільний стан
Час векторизації 1 га	≈ 2,5 год	Ручне оцифрування в QGIS 3.34, масштаб 1:500
Коефіцієнт відносної економічної ефективності (Ке)	≈ 4,8 рази вищими за витрати із застосуванням БПЛА	Формула (12): E_trad=62 тис./E_uav=13 тис. грн

Джерело: розроблено авторами; розрахунки проведено за формулами (1)–(12); QGIS Field Calculator

роздільною здатністю 6 см/піксель і щільної хмари, що налічувала понад 5,79 млн точок. Залишкова планова похибка становила 0,014 м, тобто була меншою за прийняте граничне значення 1,5×GSD. Отримані матеріали забезпечили достатню геометричну основу для векторизації будівель, дорожньої мережі й зелених насаджень та подальшого формування тривимірної моделі забудови.

Перевагою запропонованого підходу є поєднання фотограмметричних продуктів із семантично структурованою геопросторовою базою даних. Сформована база GeoPackage містила 248 полігонів будівель, 187 сегментів дорожньої мережі, 34 полігони зелених насаджень, наземні опорні точки та межу території дослідження. Така структура дає змогу перейти від візуального відображення території до виконання просторових запитів, розрахунку показників забудови, аналізу зелених насаджень і підготовки даних для тривимірної візуалізації. Водно-

час трудомісткість ручної векторизації, що становила приблизно 2,5 год на 1 га, свідчить про необхідність подальшої автоматизації процесу розпізнавання об'єктів.

Порівняння методів збирання геопросторових даних показало, що БПЛА-фотограмметрія займає проміжне положення між високоточними, але малопродуктивними наземними методами та широко площинними, проте менш деталізованими супутниковими й авіаційними технологіями [15]. Для завдань формування моделі LOD1 її основною перевагою є співвідношення просторової деталізації, суцільності покриття, продуктивності та вартості. Наземне лазерне сканування забезпечує вищу точність і деталізацію фасадів, однак є доцільнішим для моделей LOD3, паспортизації окремих будівель і документування пам'яток архітектури [16]. Супутникові знімки можуть використовуватися як фонові й архівні матеріали, але їхньої просторової роздільної здатності недостатньо для детального моделювання окремих міських об'єктів [17] .

Сформована модель за своїми функціональними характеристиками відтворює геометричний і семантичний стан території на момент зняття, але не має постійного зв'язку із сенсорами та не забезпечує автоматичного двостороннього обміну даними. Це не зменшує її практичної цінності для територіальних громад, оскільки саме рівень Digital Mirror / LOD1 може бути реалістичним початковим етапом цифровізації просторового управління [18]. Модель такого рівня може використовуватися для інвентаризації забудови, актуалізації картографічної основи[19], аналізу землекористування, оцінювання зелених зон, планування благоустрою та попереднього обґрунтування містобудівних рішень [20]. Поступове підключення даних інженерних мереж, муніципальних реєстрів, сенсорів та інформації про зміни об'єктів дасть змогу надалі трансформувати цифрове дзеркало в цифрову тінь, а згодом – у повнофункціональний цифровий двійник. Класифікаційне розмежування цих рівнів уже закладено в методологічній частині статті.

Висновки

У дослідженні обґрунтовано методологію створення базового цифрового представлення міського середовища на основі інтеграції БПЛА-фотограмметрії, високоточних GNSS-вимірювань і геоінформаційних систем. Запропонований шестифазний технологічний ланцюг охоплює підготовку знімальної місії, виконання польових робіт, фотограмметричне опрацювання, формування геопросторової бази даних, просторовий аналіз, тривимірне моделювання та публікацію результатів. За результатами порівняльного аналізу встановлено, що БПЛА-фотограмметрія є доцільним методом формування міської інформаційної моделі рівня LOD1. Вона забезпечує суцільне просторове покриття, отримання ортофотоплану, цифрової моделі поверхні та хмари точок, достатню для визначених завдань точність і нижчу вартість порівняно з традиційним наземним зніманням. Створена модель відповідає функціональному рівню Digital Mirror / LOD1, а не повноцінному цифровому двійнику, оскільки не передбачає автоматичного двостороннього обміну з фізичним середовищем. Водночас вона може розгля-

датися як базовий етап формування цифрового двійника територіальної громади та використовуватися для інвентаризації об'єктів, оновлення картографічної основи, аналізу забудови й зелених насаджень, просторового планування та інформаційного забезпечення управлінських рішень.

Подальший розвиток методології доцільно пов'язати з автоматизацією векторизації, оцінюванням точності за незалежними контрольними точками, переходом до рівня LOD2, інтеграцією кадастрових і містобудівних даних, створенням механізмів регулярного оновлення та підключенням сенсорної інформації. Це забезпечить поступовий перехід від статичного цифрового дзеркала до динамічного цифрового двійника міського середовища.

Список використаної літератури

1. Калина Т., Гайша О., Арамян А. Картографічне моделювання у стратегічному плануванні територіального розвитку. *Сталий розвиток економіки.* 2026. №1 (58). С. 389-397. https://doi.org/10.32782/2308-1988/2026-58-50
2. Нестеренко С.Г., Радзінська Ю.Б., Доброходова О.В. Геодезичне і картографічне забезпечення цифрових двійників територій. Комунальне господарство міст. 2026. №. 196. С. 232-241. DOI: 10.33042/3083-6727-2026-1-196-232-241
3. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. *Springer,* 2017. P. 85–113. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4
4. Bolton A., Butler L., Dabson I. et al. Gemini Principles. Centre for Digital Built Britain. Cambridge: website. URL: https://www.cdbb.cam.ac.uk/DFTG/GeminiPrinciples?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 1.08.2026)
5. Kitchin R., Dawkins U. Digital twins and deep maps. *Transactions of the Institute of British Geographers.* 2025. Vol. 50 (1). e12699. https://doi.org/10.1111/tran.12699
6. Yakovenko M., Nesterenko O., Tytarenko V., Bakulin Y., Banakh A., Vapnichna V., Berchun Y., Kaliukh I. Application of geodetic methods to refine boundary conditions in digital twins of war-damaged multi-story buildings. EUREKA: *Physics and Engineering.* 2025. № 5. С. 61–77. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003951
7. Гончаренко Т. Сучасні інформаційні технології для моделювання міського середовища та розробки цифрових двійників міських об'єктів. *Управління розвитком складних систем*. 2022. № 51. С. 87–93. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.87-93
8. Гайдукевич В.О., Дорошенко А.Ю. Створення цифрового двійника в метеопрогнозуванні для розумного міста на мобільній платформі. *Проблеми програмування.* 2023. №3. С.40-48. http://doi.org/10.15407/pp2023.03.40
9. Чертков О. Інженерна підготовка та інженерний захист міських територій у контексті останніх цифрових рішень. *Шляхи підвищення ефективності будівництва.* 2025. №1(56). С.187–192. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(1).187-192
10. IS0 19152:2012, Land Administration. URL: https://www.fig.net/resources/articles_about_fig/geoinformatics/2013_08_geoinformatics.pdf (дата звернення: 1.08.2026)
11. Kutzner T. Chaturvedi K Kolbe T.H. City GML 3.0: New Functions Open Up New Applications. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science. 2020. № 88, P. 43–61 https://doi.org/10.1007/s41064-020-00095-z
12. Peronato, G., Stoeckli J., Rey E. Sensitivity of calculated solar irradiation to the level

of detail: insights from the simulation of four sample buildings in urban areas. URL: https://surl.li/jwkitw (дата звернення: 1.08.2026)
13. Kovanič Ľ., Urban R., Gdulová K., Výbošt'ok J., et. al. Review of Photogrammetric and LiDAR Applications of UAV. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13 (2): 1102. https://doi.org/10.3390/app13116732
14. Тарнавський В. А., Сіроштан Т. М., Комарова Н. В., Камінецька О. В. Інтегровані геопросторові підходи до високоточного моделювання місцевості з використанням БпЛА у сфері кадастру та землеустрою. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2026. № 13(1). С. 15–24. https://doi.org/10.36023/ujrs.2026.13.1.291.
15. Blagonić B., Markovinović D., Matijević H., Redovniković L. Integration of Digital Twin Technologies in Urban Regeneration of a Small Historic Town in Europe. *Sustainability.* 2025. №17. 10740. https://doi.org/10.3390/su172310740
16. Yadav Y., Colucci E., Boccardo P., Zlatanova S. A Geodatabase design for the development of a digital twin for urban environments: a case study from Turin, Italy. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2024. №XLVIII-4-2024. P.525–532, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-2024-525-2024.
17. Piras G, Agostinelli S, Muzi F. Digital Twin Framework for Built Environment: *A Review of Key Enablers. Energies.* 2024. № 17(2):436. https://doi.org/10.3390/en17020436
18. Caprari G, Castelli G, Montuori M, Camardelli M, Malvezzi R. Digital Twin for Urban Planning in the Green Deal Era: A State of the Art and Future Perspectives. *Sustainability.* 2022. №14(10):6263. https://doi.org/10.3390/su14106263
19. Saeed ZO, Mancini F, Glusac T, Izadpanahi P. Future City, Digital Twinning and the Urban Realm: A Systematic Literature Review. *Buildings.* 2022. №12(5):685. https://doi.org/10.3390/buildings12050685
20. Gkontzis AF, Kotsiantis S, Feretzakis G, Verykios VS. Enhancing Urban Resilience: Smart City Data Analyses, Forecasts, and Digital Twin Techniques at the Neighborhood Level. *Future Internet.* 2024. №16(2):47. https://doi.org/10.3390/fi16020047

References

1. Kalyna, T., Haysha, O., & Aramyan, A. (2026). Kartohrafichne modelyuvannya u stratehichnomu planuvanni terytorial'noho rozvytku [Cartographic modeling in strategic planning of territorial development]. *Stalyy rozvytok ekonomiky,* 1(58), 389–397. https://doi.org/10.32782/2308-1988/2026-58-50
2. Nesterenko, S. H., Radzins'ka, Yu. B., & Dobrokhodova, O. V. (2026). Heodezychne i kartohrafichne zabezpechennya tsyfrovykh dviynykiv terytoriy [Geodetic and cartographic support of digital twins of territories]. Komunal'ne hospodarstvo mist, 196, 232–241. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-232-241
3. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
4. Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., et al. (2018). Gemini principles. Available at: https://www.cdbb.cam.ac.uk/DFTG/GeminiPrinciples
5. Kitchin, R., & Dawkins, U. (2025). Digital twins and deep maps. Transactions of the Institute of British Geographers, 50(1), e12699. https://doi.org/10.1111/tran.12699
6. Yakovenko, M., Nesterenko, O., Tytarenko, V., Bakulin, Y., Banakh, A., et al. (2025). Application of geodetic methods to refine boundary conditions in digital

twins of war-damaged multi-story buildings. Eureka: Physics and Engineering, 5, 61–77. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003951

7. Honcharenko, T. (2022). Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi dlya modelyuvannya mis'koho seredovyshcha ta rozrobky tsyfrovykh dviynykiv mis'kykh ob'yektiv [Modern information technologies for modeling the urban environment and developing digital twins of urban objects]. Upravlinnya rozvytkom skladnykh system, 51, 87–93. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.87-93
8. Haydukevych, V. O., & Doroshenko, A. Yu. (2023). Stvorennya tsyfrovoho dviynyka v meteoprohnozuvanni dlya rozumnoho mista na mobil'niy platformi [Creating a digital twin in weather forecasting for a smart city on a mobile platform]. Problemy prohramuvannya, 3, 40–48. https://doi.org/10.15407/pp2023.03.40
9. Chertkov, O. (2025). Inzhenerna pidhotovka ta inzhenernyy zakhyst mis'kykh terytoriy u konteksti ostannikh tsyfrovykh rishen' [Engineering preparation and engineering protection of urban areas in the context of the latest digital solutions]. Shlyakhy pidvyshchennya efektyvnosti budivnytstva, 1(56), 187–192. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(1).187-192
10. ISO 19152:2012. Land administration. Available at: https://www.fig.net/resources/articles_about_fig/geoinformatics/2013_08_geoinformatics.pdf
11. Kutzner, T., Chaturvedi, K., & Kolbe, T. H. (2020). CityGML 3.0: New functions open up new applications. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 88, 43–61. https://doi.org/10.1007/s41064-020-00095-z
12. Peronato, G., Stoeckli, J., & Rey, E. (n.d.). Sensitivity of calculated solar irradiation to the level of detail: Insights from the simulation of four sample buildings in urban areas. Available at: https://surl.li/jwkitw
13. Kovanič, Ľ., Urban, R., Gdulová, K., Výbošt'ok, J., et al. (2023). Review of photogrammetric and LiDAR applications of UAV. *Applied Sciences,* 13(2), 1102. https://doi.org/10.3390/app13021102
14. Tarnavs'kyy, V. A., Siroshtan, T. M., Komarova, N. V., & Kaminets'ka, O. V. (2026). Intehrovani heoprostorovi pidkhody do vysokotochnoho modelyuvannya mistsevosti z vykorystannyam BpLA u sferi kadastru ta zemleustroyu [Integrated geospatial approaches to high-precision terrain modeling using UAVs in the field of cadastre and land management]. *Ukrayins'kyy zhurnal dystantsiynoho zonduvannya Zemli*, 13(1), 15–24. https://doi.org/10.36023/ujrs.2026.13.1.291
15. Blagonić, B., Markovinović, D., Matijević, H., & Redovniković, L. (2025). Integration of digital twin technologies in urban regeneration of a small historic town in Europe. *Sustainability,* 17, 10740. https://doi.org/10.3390/su172310740
16. Yadav, Y., Colucci, E., Boccardo, P., & Zlatanova, S. A. (2024). Geodatabase design for the development of a digital twin for urban environments: A case study from Turin, Italy. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-4, 525–532. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-2024-525-2024
17. Piras, G., Agostinelli, S., & Muzi, F. (2024). Digital twin framework for built environment: A review of key enablers. *Energie*s, 17(2), 436. https://doi.org/10.3390/en17020436
18. Caprari, G., Castelli, G., Montuori, M., Camardelli, M., & Malvezzi, R. (2022). Digital twin for urban planning in the Green Deal era: A state of the art and future perspectives. *Sustainability,* 14(10), 6263. https://doi.org/10.3390/su14106263
19. Saeed, Z. O., Mancini, F., Glusac, T., & Izadpanahi, P. (2022). Future city, digital twinning and the urban realm: A systematic literature

review. *Buildings,* 12(5), 685. https://doi.org/10.3390/buildings12050685
20. Gkontzis, A. F., Kotsiantis, S., Feretzakis, G., & Verykios, V. S. (2024). Enhancing urban resilience: Smart city data analyses, forecasts, and digital twin techniques at the neighborhood level. *Future Internet,* 16(2), 47. https://doi.org/10.3390/fi16020047

Kachanovs'kyy O., Rusina N., Kushniruk O., Bulakevych S., Rudko O.
CREATION OF A DIGITAL TWIN OF THE URBAN ENVIRONMENT USING UAV PHOTOGRAMMETRY AND GIS
LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 4'26: 173-188.
http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.04.11

Abstract. *This paper presents a methodology for creating a basic digital twin of the urban environment based on the integration of unmanned aerial vehicle (UAV) technology, photogrammetry, high-precision GNSS measurements, and geographic information systems (GIS). The aim of the study is to develop a methodology for creating a digital twin of the urban environment using UAV photogrammetry and geospatial technologies and to validate the proposed approach through a real-world case study. To achieve this objective, a comprehensive six-phase technological workflow was developed, including flight mission planning, field data acquisition with RTK positioning, photogrammetric processing in Agisoft Metashape, vectorization of spatial objects in QGIS with the creation of a GeoPackage database, spatial analysis, and three-dimensional visualization. The key outcome of the study is the development of an LOD1 digital model of the urban environment corresponding to the Digital Mirror concept, which can be considered the initial stage of digital transformation for territorial communities. Unlike a full-scale digital twin, a Digital Mirror reproduces the current state of the physical environment but does not provide automated bidirectional real-time data exchange. The proposed methodology was validated on a 42-hectare urban area in Rivne, Ukraine. Optimal flight parameters (ground sampling distance of 3.02 cm/pixel and flight altitude of 120 m) were determined, the required number of ground control points was established, and the achieved positional accuracy was confirmed to comply with the specified requirements. The spatial accuracy of the generated datasets was assessed, the building coverage ratio and the Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) were calculated, and an LOD1 model was created and published in a web environment. The research findings demonstrate that the proposed methodology enables the development of a digital urban model suitable for building inventory, updating cartographic data, spatial planning, and supporting decision-making processes for post-war reconstruction and sustainable territorial development.*

Keywords: *digital twin; UAV photogrammetry; geographic information systems (GIS); digital city model; orthophoto; spatial data; LOD1; territorial community; digital modeling.*