

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Київський національний університет імені Тараса Шевченка**  
**Географічний факультет**  
**Кафедра геодезії та картографії**

На правах рукопису УДК: 528.9

**3D-цифровий близнюк дорожньої інфраструктури**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Галузь знань 19 – «Архітектура та будівництво»

Спеціальність 193 – «Геодезія та землеустрій»

Освітня програма «Геодезія та землеустрій»

Кваліфікаційна робота бакалавра студентки

4 курсу освітнього рівня бакалавр

Остапенко Анастасії Павлівни

Науковий керівник: Гончаренко Олександр Степанович

кандидат технічних наук, доцент

Допущено до захисту: Протокол засідання кафедри N \_\_\_ від « \_\_\_ »

\_\_\_\_\_ 20 \_\_\_ року Завідувач кафедри проф. Даценко Л.М.

КИЇВ – 2025

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1.ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ БЛИЗНЮКІВ.....	10
1.1.Поняття «Цифровий двійник»:визначення та концепція.....	10
1.2.Задачі та цілі цифрового двійника.....	12
1.3 Тривимірне моделювання як основа для цифрових близнюків.....	14
1.4 Класифікація цифрових двійників.....	15
1.5 Аналіз сучасного програмного забезпечення для створення цифрових близнюків..	16
Висновки до розділу 1.....	19
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЇ ГЕОДАНИХ.....	20
2.1. Джерела геопросторових даних: DEM, ортофото, векторні шари.....	20
2.2. Методи отримання геоданих без польових вимірювань.....	24
2.2.1. Лазерне сканування та хмарні сервіси.....	24
2.2.2. Супутникові та GNSS-дані.....	27
2.2.3. Дрон-знімання та аерофотограмметрія .....	28
2.3. Обробка DEM та фотограмметричних моделей.....	31
2.4. Інтеграція геоданих у ГІС-середовища (QGIS, ArcGIS).....	32
2.5. Проблеми сумісності просторових даних і способи їх вирішення.....	33
Висновки до розділу 2 .....	35
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО БЛИЗНЮКА ДОРОЖНЬОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	37
3.1. Планування та етапи створення цифрового близнюка.....	38
3.2. Побудова основної геопросторової бази (DEM, ортофото, шари).....	40
3.3. Векторизація об'єктів: дороги, переходи, тротуари, зупинки, світлофори.....	42
3.4. Додавання атрибутів та зв'язків між об'єктами.....	44
3.5. Побудова 3D-моделі на основі DEM та векторних даних.....	46

3.6. Візуалізація та експорт 3D-близнюка (Qgis2threejs, WebGL).....	47
Висновки до розділу 3.....	49
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

## АНОТАЦІЯ

**Остапенко А.П.**

Кваліфікаційна робота на тему «3D-цифровий близнюк дорожньої інфраструктури» виконана за спеціальністю 193 – «Геодезія та землеустрій» у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, на географічному факультеті, кафедрі геодезії та картографії. Місто виконання – Київ, рік виконання – 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці методики створення цифрового двійника елементів міської дорожньої інфраструктури з використанням відкритих геоданих та інструментів геоінформаційного моделювання. Актуальність теми зумовлена необхідністю візуалізації, інвентаризації та аналізу об'єктів транспортної мережі в умовах урбанізації, обмежених ресурсів та відновлення інфраструктури після руйнувань.

У роботі обґрунтовано підходи до поєднання цифрової моделі рельєфу, ортофотопланів та векторних шарів у середовищі QGIS. Застосовано ручну векторизацію основних елементів дороги: проїжджої частини, тротуарів, пішохідних переходів та світлофорів. Особливу увагу приділено атрибутивному опису об'єктів, їх зв'язку в просторі та моделюванню змін у часі. Як інструмент 3D-візуалізації було використано плагін Qgis2threejs, який дозволив сформувати інтерактивну сцену та експортувати її у формат WebGL.

Практичну частину було реалізовано на прикладі ділянки вулиці Данила Щербаківського в Києві, яка представляє типову міську транспортну інфраструктуру. Модель була побудована виключно на основі відкритих даних, без використання польових вимірювань, що демонструє доступність та гнучкість запропонованого підходу.

Результати дослідження підтверджують можливість створення просторово точної та функціонально повної цифрової моделі дороги з аналітичним та презентаційним потенціалом.

Особистий внесок автора полягає у зборі, обробці та інтеграції геоданих, створенні 3D-моделі, розробці атрибутивної структури та тестуванні результатів у QGIS.

Ключові слова: «цифровий близнюк», «QGIS», «дорожня інфраструктура», «геопросторові дані», «3D-візуалізація», «DEM», «векторизація», «міське планування».

## ВСТУП

Сучасні цифрові технології активно трансформують різні сфери суспільного життя, включаючи містобудування, інженерну геодезію, транспортне планування та управління інфраструктурою. Важливим етапом цієї трансформації є розробка цифрових моделей, які не тільки відтворюють реальні об'єкти у вигляді карт або схем, але і об'єднують дані про їх геометрію, функціональність, поточний стан і можливі зміни в майбутньому. Такі інтелектуальні моделі, здатні до оновлення та динамічного аналізу, називаються цифровими двійниками. Вони використовуються у містобудуванні, логістиці, моніторингу технічного стану об'єктів та управлінні міськими системами.

У сфері міської інфраструктури цифрові двійники відіграють ключову роль, оскільки дозволяють ефективно управляти складними системами, як-от дорожні мережі. Вони дозволяють візуалізувати не тільки саму дорогу, але й супутні елементи: тротуари, пішохідні переходи, зупинки, світлофори, а також відображати їх технічні характеристики, історію ремонту, матеріали покриттів. Крім того, цифрові двійники можуть моделювати різні сценарії розвитку інфраструктури, що допомагає місцевим.

Традиційні методи обліку міської інфраструктури найчастіше базуються на паперових документах, окремих файлах САПР чи електронних таблицях. Такий підхід не забезпечує повної просторової інтеграції даних, не кажучи вже про їхнє динамічне оновлення. На відміну від них, географічні інформаційні системи (ГІС), зокрема QGIS – безкоштовний та відкритий інструмент – дозволяють об'єднувати різні типи геоданих (векторні, растрові, цифрові моделі рельєфу) та доповнювати їх семантикою, 3D-моделями та часовими параметрами.

**Об'єкт дослідження** - міська дорожня інфраструктура, зокрема її цифрове представлення у вигляді геопросторових та 3D-моделей.

**Предмет дослідження** - методи та засоби інтеграції відкритих геопросторових даних у середовищі QGIS для створення цифрового близнюка дорожньої мережі з використанням DEM, векторизації, атрибутивного моделювання та 3D-візуалізації.

У роботі створено цифровий двійник ділянки міської дороги на прикладі вулиці Данила Щербаковського у Києві з використанням виключно відкритих геопросторових даних. Для цього мною використовувалися: векторизація об'єктів інфраструктури, ортофотознімки, цифрова модель рельєфу (DEM), ручне малювання тротуарів, переходів, зупинок та світлофорів.

Особливу увагу приділено 3D-візуалізації з використанням інструментів видавлювання QGIS та створення інтерактивної сцени для представлення результатів. Хоча цифровий двійник може включати тимчасову складову (наприклад, через плагін TimeManager), у дослідженні було обрано інший підхід - відображення змін у часі через атрибути об'єктів та їхню стилізацію за роками будівництва або ремонту. Це дозволяє показати еволюцію інфраструктури без потреби використання додаткових модулів.

**Актуальність дослідження** полягає у розробці доступного методу аналізу міської інфраструктури, що не потребує дорогих програм або польових вимірювань, але забезпечує представлення просторової структури, технічних параметрів та історичних змін. Це особливо важливо в умовах обмежених бюджетів, характерних для України, зокрема у післявоєнний період, коли необхідно швидко та ефективно планувати реконструкцію доріг.

**Метою роботи** є розробка методики створення цифрового двійника елемента дорожньої інфраструктури у програмному забезпеченні QGIS з використанням відкритих даних, DEM, векторних шарів та 3D-візуалізації.

Для досягнення поставленої мети в рамках дипломної роботи необхідно було вирішити наступні **завдання**:

- Провести аналіз теоретичних основ цифрових близнюків, зокрема їхнього визначення, класифікації та застосування у сфері інфраструктурного планування.
- Вивчити сучасні джерела відкритих геопросторових даних, які можна використовувати без польових вимірювань (ортофотоплани, DEM, OpenStreetMap, GNSS-дані).
- Розробити покрокову методику побудови цифрового близнюка міської дороги в середовищі QGIS — від підключення растрових і векторних даних до побудови 3D-візуалізації.
- Реалізувати векторизацію основних об'єктів інфраструктури: доріг, тротуарів, пішохідних переходів, зупинок та світлофорів.
- Забезпечити атрибутивне наповнення шарів із врахуванням стану, типу, матеріалу та часових змін.
- Побудувати 3D-модель дорожньої ділянки та виконати екструзію об'єктів у просторі.
- Продемонструвати можливість моделювання змін у часі на основі атрибутів або плагіну TimeManager.

Отримані результати можуть бути використані для різних практичних і навчальних цілей. Зокрема, цифровий близнюк ділянки міської дороги може слугувати основою для аналізу стану транспортної інфраструктури, виявлення проблемних ділянок та прогнозування потреб у ремонті. Така модель є ефективним інструментом для підготовки візуальних паспортів вулиць, що особливо актуально для муніципалітетів і комунальних служб. Крім того, вона може застосовуватися при плануванні ремонтних і реконструктивних робіт, забезпечуючи просторово-атрибутивну основу для ухвалення технічних рішень. У сфері освіти результати роботи є цінним ресурсом для навчання майбутніх фахівців з геоінформаційних систем, міського планування та геодезії. Також розроблена методика може стати складовою частиною масштабніших ініціатив — таких

як концепція Smart City — де цифрові моделі використовуються для інтегрованого управління міським середовищем.

Робота демонструє, як інструменти відкритого доступу можуть бути використані для створення ефективних рішень щодо управління міською інфраструктурою.

Методологічну основу дослідження становлять загальнонаукові та спеціальні методи просторового аналізу, геоінформаційного моделювання та цифрової картографії:

- метод аналізу і синтезу: використано для вивчення сучасних підходів до створення цифрових близнюків, аналізу джерел геоданих і обґрунтування структури моделі дорожньої інфраструктури;
- метод векторизації: застосовано для ручного створення просторових об'єктів (дороги, тротуари, переходи, зупинки, світлофори) на основі ортофото у QGIS;
- метод просторової інтеграції: використано для поєднання цифрової моделі рельєфу (DEM), растрових основ і векторних шарів у єдиному ГІС-середовищі з урахуванням координатних систем та топологічних зв'язків;
- метод екструзії: застосовано під час побудови 3D-моделі, шляхом задання висотних характеристик об'єктам відповідно до атрибутів та DEM;
- метод візуального моделювання: реалізовано через плагін Qgis2threejs для створення інтерактивної сцени з можливістю просторової навігації та експорту у WebGL;
- метод часової фільтрації: застосовано для демонстрації змін об'єктів у часі на основі атрибутивних полів (дата будівництва, дата ремонту), без використання польових датчиків.

## РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ БЛИЗНЮКІВ

У сучасних умовах швидкої цифровізації всіх сфер діяльності, включаючи управління інфраструктурою, проектування та урбаністику, існує потреба у впровадженні нових підходів до моделювання реального світу. Одним з найперспективніших інструментів у цій галузі є цифровий двійник – інтегрована цифрова модель фізичного об'єкта, яка дозволяє відстежувати його стан, аналізувати поведінку, прогнозувати зміни та моделювати сценарії розвитку.

Технологія цифрових двійників поєднує тривимірне моделювання, геопросторовий аналіз, дані датчиків та аналітику в режимі реального часу, що відкриває нові можливості в управлінні об'єктами інфраструктури. Вона дозволяє створювати динамічні моделі, що реагують на зміни навколишнього середовища, відображають реальні процеси та забезпечують прийняття обґрунтованих рішень на основі актуальних даних.

Цифрові двійники мають особливе значення в таких галузях, як транспортне планування, енергетика, будівництво, розумні міста та виробництво. Їх використання дозволяє знизити витрати на обслуговування, підвищити ефективність використання ресурсів, оптимізувати технологічні процеси та покращити якість державних послуг.

### **1.1. Поняття «Цифровий двійник»: визначення, концепція та значення.**

Цифровий двійник (Digital Twin) являє собою програмну модель фізичного об'єкта, яка відтворює його внутрішні процеси, технічні характеристики та поведінку в умовах впливу зовнішніх чинників та перешкод. Ключовою особливістю цифрового двійника є використання даних з датчиків реального об'єкта, який функціонує паралельно. Завдяки цьому цифровий двійник може працювати як в онлайн-режимі, так і в офлайн-режимі. Такий підхід дозволяє проводити аналіз шляхом порівняння

даних віртуальних датчиків моделі з даними фізичних датчиків, виявляти аномалії та визначати причини їх появи. [1]

Ідея технології цифрових двійників була вперше представлена у 1991 році Девідом Гелернтером у його книзі «Дзеркальні світи». Подальший розвиток концепції відбувся у 2002 році, коли доктор Майкл Гривз, на той час викладач Мічиганського університету, офіційно презентував ідею цифрового двійника на конференції Товариства інженерів-виробників, присвяченій управлінню життєвим циклом продукту (PLM). Пізніше, у 2010 році, Джон Вікерс, співробітник NASA, впровадив термін «цифровий двійник» у своєму звіті про дорожню карту, яка стосувалася розробки цифрових симуляцій космічних капсул і кораблів для їх тестування. [2]

Цифрові двійники активно застосовуються в різноманітних галузях завдяки їх можливості моделювати та аналізувати об'єкти і процеси в реальному часі. У транспортній сфері телеметричні датчики передають інформацію про стан транспортних засобів до цифрових моделей, що дозволяє контролювати технічний стан та підвищувати ефективність їх роботи. У сфері медицини ці технології застосовуються для моніторингу стану здоров'я пацієнтів і прогнозування змін на основі даних, зібраних із датчиків. У виробничих процесах цифрові двійники використовуються для удосконалення технологічних операцій, сприяючи модернізації обладнання та збільшенню продуктивності.

Ключовою особливістю цифрових двійників є можливість відмови від фізичних прототипів, що дозволяє значно скоротити час розробки та підвищити якість продукції. Це досягається завдяки інтеграції мультифізичного моделювання, аналізу даних і алгоритмів машинного навчання. Такий підхід дозволяє оцінювати вплив змін у дизайні, різних сценаріїв використання, умов навколишнього середовища та інших змінних на об'єкт або систему.

## 1.2. Задачі та цілі цифрового двійника

Цифрові двійники використовуються в різних галузях для широкого спектра застосувань, забезпечуючи точне відображення фізичних об'єктів, процесів і систем. Вони дозволяють аналізувати, оптимізувати та прогнозувати різні сценарії розвитку подій, що сприяє підвищенню ефективності та стійкості різних секторів економіки. Деякі з ключових сфер застосування цифрових двійників включають:

1. **Розумні міста.** Віртуальні моделі міської інфраструктури дозволяють міським адміністраціям ефективніше управляти ресурсами, покращувати планування транспортних потоків, оптимізувати використання енергії та прогнозувати наслідки урбанізаційних процесів. Завдяки цифровим двійникам можлива інтеграція 3D і 4D просторових даних у реальному часі, що сприяє розширенню можливостей міського планування. Крім того, використання технологій доповненої реальності допомагає інженерам і архітекторам розробляти ефективніші проекти для сталого розвитку міст.

2. **Охорона здоров'я.** Цифрові двійники можуть використовуватися для створення точних профілів пацієнтів на основі сенсорних даних, що дозволяє лікарям прогнозувати можливі ризики та персоналізувати лікування. Медичні заклади використовують цю технологію для управління лікарняними ресурсами, включаючи моніторинг стану обладнання, управління ліжковим фондом та оптимізацію потоків пацієнтів у лікарнях. Також цифрові двійники застосовуються у підготовці хірургів, аналізі ефективності медичних процедур та прогнозуванні можливих ускладнень.

3. **Комунальні послуги та енергетика.** Енергетичні компанії використовують цифрові двійники для проектування, управління та обслуговування інфраструктури електромереж, електростанцій і систем відновлюваної енергетики. Завдяки цим технологіям можливо підвищити ефективність використання енергоресурсів, вчасно виявляти збої в роботі мереж і прогнозувати майбутні потреби споживачів. Особливу цінність цифрові двійники мають для сектору відновлюваної

енергетики, оскільки вони допомагають аналізувати та регулювати коливання виробництва енергії на сонячних і вітрових станціях.

4. **Роздрібна торгівля та електронна комерція.** У сфері роздрібною торгівлі цифрові двійники використовуються для аналізу поведінки покупців, моделювання розташування товарів у магазинах і прогнозування змін у попиті. Наприклад, французька мережа супермаркетів Intermarché застосовує цю технологію для аналізу руху клієнтів у магазинах та їхньої взаємодії з продукцією. Це дозволяє покращити організацію торгового простору, підвищити рівень обслуговування клієнтів та оптимізувати маркетингові стратегії.

5. **Виробництво.** Завдяки цифровим двійникам можливо супроводжувати весь життєвий цикл продукту - від розробки концепції до його виходу на ринок. Вони допомагають скорочувати витрати, підвищувати ефективність виробничих процесів та мінімізувати ризики, пов'язані з проектуванням і тестуванням. Компанія Siemens активно використовує цифрові двійники для моделювання своїх виробничих процесів, контролю якості продукції та підвищення загальної продуктивності.

6. **Боротьба зі стихійними лихами.** Зміни клімату спричинили збільшення частоти та інтенсивності природних катастроф. Цифрові двійники можуть допомогти у створенні більш стійкої інфраструктури, розробці стратегій реагування на надзвичайні ситуації та моніторингу змін клімату. Вони використовуються для прогнозування можливих стихійних лих, оптимізації заходів евакуації та оцінки потенційних ризиків для інфраструктурних об'єктів.

Цифрові двійники продовжують розвиватися, стаючи незамінним інструментом у багатьох сферах діяльності. Їхнє використання сприяє оптимізації процесів, підвищенню ефективності управління ресурсами та покращенню прогнозування майбутніх викликів. Завдяки швидкому прогресу технологій, цифрові двійники стають важливим елементом цифрової трансформації в сучасному світі.

### 1.3 Тривимірне моделювання як основа для цифрових близнюків

Тривимірне (3D) моделювання є ключовим етапом у створенні цифрових близнюків дорожніх мереж, оскільки забезпечує візуалізацію, аналіз і моніторинг інфраструктурних об'єктів у реальному та прогнозованому часі. Технології 3D-моделювання дозволяють створювати точні віртуальні копії фізичних об'єктів, що сприяє оптимізації проектування, експлуатації та обслуговування дорожніх мереж. Для побудови цифрових близнюків використовуються різні методи збору просторових даних, серед яких фотограмметрія, лазерне сканування (LiDAR) та супутникові технології GNSS. Фотограмметрія базується на використанні аерофото- та наземних знімків і забезпечує високу точність, особливо при застосуванні безпілотних літальних апаратів. Лазерне сканування дозволяє отримати хмару точок, яка формує цифрову модель рельєфу та інфраструктури з високою деталізацією. GNSS-технології використовуються для геоприв'язки моделей, забезпечуючи точність у глобальних системах координат[20].

Процес створення тривимірної моделі починається із збору просторових даних, які можуть бути отримані шляхом фотограмметрії, лазерного сканування або супутникових вимірювань. Далі слідує етап обробки, що включає очищення та поєднання даних, корекцію похибок і формування єдиної 3D-моделі. На основі отриманих даних створюється геометрична модель, яка відображає цифровий рельєф та поверхневі структури дорожньої мережі. Після цього додаються текстури та семантичні дані, що включають характеристики матеріалів, дорожню розмітку, знаки та інші елементи. Завершальним етапом є інтеграція моделі у геоінформаційні системи (ГІС), що забезпечує її доступність для аналізу та використання в управлінні транспортною інфраструктурою[19].

Цифрові близнюки дорожніх мереж широко застосовуються для моніторингу стану доріг, прогнозування їх зносу та визначення необхідності ремонтних робіт. Вони використовуються для інфраструктурного планування, моделювання нових дорожніх

об'єктів та аналізу транспортних потоків. Також тривимірне моделювання допомагає оцінювати аварійно небезпечні ділянки, аналізувати ризики та підвищувати рівень безпеки руху. Автоматизоване управління транспортом, засноване на цифрових близнюках, сприяє інтеграції в інтелектуальні транспортні системи для оптимізації трафіку та ефективного використання дорожньої мережі. Тривимірне моделювання та цифрові близнюки дозволяють значно покращити управління інфраструктурою, зменшити витрати на її обслуговування та підвищити ефективність транспортних систем, що робить їх важливим інструментом у сучасному транспортному інжинірингу.

#### 1.4. Класифікація цифрових близнюків

Можливості використання цифрових двійників залежать від етапу життєвого циклу продукту, який вони моделюють. У загальному розумінні існує три основні типи цифрових двійників(рис 1.1.): продукту, процесу та системи[3]. Об'єднання та інтеграція цих трьох типів у процесі їх спільної еволюції утворює так звану **цифрову нитку**. Термін "нитка" підкреслює її здатність поєднувати дані з усіх етапів життєвого циклу продукту та виробничого процесу.

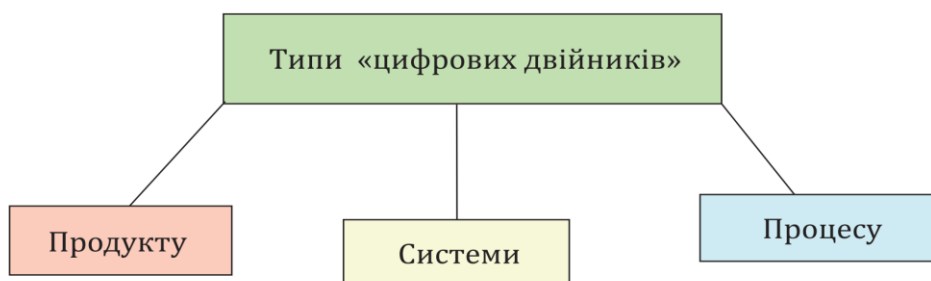


Рисунок 1.1. Типи цифрових близнюків.

##### **Цифрові близнюки продукту**

Цей тип цифрових двійників створює цифрову копію фізичних продуктів. Вони застосовуються для розробки, тестування та моделювання продуктів. Завдяки цифровим

двійникам інженери та дизайнери можуть аналізувати, як продукт працюватиме за різних умов, що дозволяє оптимізувати його конструкцію та функціональність ще до початку фізичного виробництва.

### **Цифрові близнюки процесу**

Цифрові двійники процесу моделюють та аналізують поведінку фізичних процесів або систем. Вони використовуються для моніторингу, управління та оптимізації операцій у складних системах, таких як виробничі лінії, ланцюги постачання чи енергетичні мережі. Ці двійники дозволяють організаціям візуалізувати, моделювати та аналізувати процеси в реальному часі, що сприяє ухваленню обґрунтованих рішень та підвищенню ефективності.

### **Цифрові близнюки системи**

Цифрові двійники системи відтворюють у цифровому середовищі цілісні системи чи екосистеми. Вони об'єднують кілька цифрових двійників продуктів, процесів та інших компонентів для комплексного моделювання та аналізу поведінки складних систем. Цей тип цифрових двійників застосовується для моделювання та оптимізації масштабних систем, таких як розумні міста, транспортні мережі чи промислові комплекси.

## **1.5. Аналіз сучасного програмного забезпечення для створення цифрових близнюків.**

Цифрові двійники - це технологія, яка дозволяє створювати точні віртуальні копії фізичних об'єктів, процесів або систем. Вони використовуються для моніторингу, аналізу, прогнозування та оптимізації різних інженерних і управлінських процесів. Створення цифрових двійників стало можливим завдяки розвитку спеціалізованого програмного забезпечення, яке забезпечує інтеграцію геодезичних даних, 3D-моделювання, аналітики та візуалізації. У цьому розділі розглядається сучасне

програмне забезпечення, що використовується для створення цифрових двійників у різних сферах.

### **1. Bentley Systems iTwin**

Bentley Systems iTwin - це потужна платформа для створення цифрових двійників інфраструктурних об'єктів. Вона використовується в будівництві, транспортній сфері та енергетиці. Головною особливістю цієї платформи є її здатність інтегрувати геопросторові дані, інформаційне моделювання будівель (BIM) і аналітичні інструменти. iTwin дозволяє візуалізувати зміни у реальному часі, що значно полегшує процес прийняття рішень у сфері управління інфраструктурою.

### **2. Siemens MindSphere**

Siemens MindSphere - це хмарна IoT-платформа, яка використовується для створення цифрових двійників у промисловому виробництві. Вона дозволяє підключати фізичні пристрої до єдиної екосистеми, аналізувати дані з датчиків і прогнозувати можливі збої в роботі обладнання. Завдяки цьому підприємства можуть значно підвищити ефективність виробничих процесів, зменшити витрати на обслуговування та уникати простоїв.

### **3. Hexagon HxGN**

Hexagon HxGN є важливою платформою для створення цифрових двійників у сфері транспорту та міського планування. Вона інтегрує дані лазерного сканування, геоінформаційних систем (ГІС) та аналітичних моделей для управління дорожніми мережами та міською інфраструктурою. Платформа дозволяє прогнозувати стан дорожнього покриття, аналізувати транспортні потоки та оптимізувати ремонтні роботи.

### **4. Autodesk Forge**

Autodesk Forge - це набір хмарних інструментів, що використовуються для створення цифрових двійників у будівництві та архітектурі. Платформа дозволяє інтегрувати BIM-моделі з даними, отриманими від сенсорів IoT, що забезпечує повний контроль над об'єктами будівництва. Вона також використовується для моделювання

та управління життєвим циклом будівель, що допомагає покращити їхню експлуатацію та підвищити енергоефективність.

## 5. Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE

Платформа 3DEXPERIENCE від Dassault Systèmes застосовується для моделювання та управління складними інженерними процесами. Вона широко використовується в автомобільній, авіаційній та оборонній промисловості. Ця система забезпечує комплексне управління проєктами, від концептуального дизайну до виробництва, дозволяючи компаніям створювати високоточні цифрові двійники своїх продуктів.

## 6. PTC ThingWorx

PTC ThingWorx - це ще одна потужна IoT-платформа, яка дозволяє створювати цифрові двійники для промислових об'єктів. Вона забезпечує глибоку інтеграцію з датчиками, штучним інтелектом та технологіями машинного навчання, що дає змогу прогнозувати можливі несправності обладнання та оптимізувати виробничі процеси.



Рис. 1.2 Платформи для створення цифрових близнюків

Розвиток цифрових двійників значною мірою залежить від програмного забезпечення, яке забезпечує їхнє створення, інтеграцію та аналіз. Різні платформи пропонують унікальні можливості для конкретних галузей: від промислового виробництва до міського планування та управління транспортною інфраструктурою. Використання цифрових двійників дозволяє підвищити ефективність управління об'єктами, знизити витрати та покращити точність прогнозування процесів. З розвитком технологій очікується подальше вдосконалення цих платформ та їхня глибша інтеграція з системами штучного інтелекту, великими даними та інтернетом речей (IoT).

### **Висновки до розділу 1**

У результаті аналізу літературних джерел і теоретичних підходів встановлено, що цифровий близнюк є комплексною цифровою копією реального об'єкта, яка включає не лише геометричну структуру, але й функціональні, технічні та часові характеристики. У сфері дорожньої інфраструктури цифрові близнюки дають змогу створити інтегровану модель, що об'єднує просторові дані, атрибутивну інформацію та інструменти 3D-візуалізації.

Розглянуто основні цілі цифрових близнюків - моніторинг, аналіз, прогнозування, технічне обслуговування та підтримка прийняття рішень. Було проаналізовано типологію цифрових двійників, що охоплює статичні, динамічні, аналітичні та прогнозні моделі. Також узагальнено основні функції цифрового близнюка: інтеграція різних джерел даних, відображення поточного стану об'єкта, сценарне моделювання та взаємодія з іншими цифровими системами. Окрему увагу приділено аналізу програмного забезпечення, придатного для побудови цифрових близнюків інфраструктурних об'єктів.

Отже, розділ сформував теоретичну базу для переходу до практичного етапу створення цифрового близнюка міської дороги з використанням відкритих геоданих та ГІС-інструментів.

## РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЇ ГЕОДАНИХ

У наш час геопросторові дані стали основою для моделювання, моніторингу та управління елементами транспортної інфраструктури. Геодані - це просторово прив'язана інформація, яка описує об'єкти фізичного середовища, і вони відіграють ключову роль у створенні цифрових двійників дорожніх мереж. У поєднанні з геоінформаційними системами (ГІС) геодані дозволяють будувати інтерактивні моделі, аналізувати зв'язки між об'єктами та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Джерелами геоданих є класичні геодезичні методи (тахеометричні зйомки, ГНСС-вимірювання), а також сучасні технології - лазерне сканування (LiDAR), аерофотозйомка, супутникові знімки та хмарні сервіси. Дані, отримані з цих джерел, мають високу точність та деталізацію, що робить їх придатними для побудови тривимірних моделей місцевості, інтеграції в ГІС-проекти та подальшої візуалізації дорожніх об'єктів.

У цьому розділі розглядаються основні технології отримання геоданих, особливості їх обробки, структурування та інтеграції в середовищі QGIS. Також аналізується, як геодезичні дані трансформуються у векторні та растрові шари, які згодом використовуються для створення повноцінних цифрових двійників дорожньої інфраструктури.

### **2.1. Джерела геопросторових даних: DEM, ортофото, векторні шари**

Ефективне створення цифрових близнюків дорожньої інфраструктури базується на використанні різних типів геопросторових даних: цифрових моделей рельєфу (DEM), ортофотопланів та векторних шарів. Кожен з них має власне призначення, рівень точності, структуру та метод інтеграції у ГІС-середовищі.

DEM - це растрове уявлення безперервної поверхні, що зазвичай посилається на поверхню Землі. Точність цих даних визначається насамперед роздільною здатністю

(відстанню між точками вибірки). Іншими факторами, що впливають на точність, є тип даних (цілий або з плаваючою точкою) і фактична вибірка поверхні під час створення вихідної DEM.

DEM використовуються для визначення характеристик рельєфу, таких як висота в будь-якій точці, ухил та експозиція. Особливості рельєфу, такі як водозбірні басейни та мережі каналів також можуть бути визначені за допомогою цифрової моделі, DEM широко використовуються в гідрологічних та геологічних аналізах, моніторингу небезпек, розвідці природних ресурсів, управлінні сільським господарством тощо[17].

DEM забезпечує тривимірне відображення рельєфу місцевості. Згідно з аналізом Isioye & Jobin (2012), джерела DEM істотно відрізняються за точністю та придатністю. Для локального моделювання найбільш придатні: Google Earth Pro (висока кореляція з польовими вимірами, доступність), оцифровані топографічні карти (при умові актуальності), SRTM - менш придатні для міського масштабу через низьку просторову роздільну здатність (~90 м) та згладжування рельєфу[23].

Отже, DEM використовується як основа для побудови 3D-моделей у QGIS та дозволяє оцінювати ухили, висоти об'єктів, забезпечує коректну просторову прив'язку інфраструктури.

Ортофотознімки - це зображення, створені шляхом виправлення аерофотознімків, що включають тривимірні координати (x, y, z) поверхні Землі, усуваючи помилки, пов'язані з обертанням, висотою та спотворенням. Цей процес, відомий як ортотрансформація, перетворює аерофотознімки, отримані за допомогою БПЛА, супутників або літаків, у вертикальну проекцію, виправляючи помилки, спричинені такими факторами, як платформа, висота та обертання. Ці виправлені зображення називаються ортофотознімками та широко використовуються в таких галузях, як геодезія, сільське господарство, машинобудування, міське планування, гірничодобувна промисловість, пошуково-рятувальні роботи, оборона та науки про

Землю. Використання ортофотознімків значно поширилось згодом, зігравши ключову роль соціально-економічному розвитку у різних регіонах. Вони особливо цінні для створення базових карт з високою роздільною здатністю, просторового планування міст (включаючи дорожні та інфраструктурні проекти, захист навколишнього середовища), просторового аналізу та картографування.

Для отримання зображень Землі були розроблені спеціальні літаки. Обробляючи ці зображення, можна використовувати ортофотознімки для створення карт і планів у різних масштабах. Завдяки передовим методам обробки даних ортофотознімки можуть розкривати складні деталі Землі, підтримуючи створення цільових даних. В результаті ортофотознімки все частіше використовуються у дистанційному зондуванні.

Технологічні досягнення уможливили створення високоточних ортофотознімків з аерофотознімків, зроблених за допомогою БПЛА (безпілотних літальних апаратів). Точність позиціонування ортофотознімків, створених за допомогою зображень БПЛА, може досягати  $\pm 3-5$  см. Завдяки можливості передачі даних у реальному часі БПЛА можуть надавати миттєві оновлення про критичні умови, такі як пожежі, повені або погода на наземні станції.

Ортофотокарта - це карта, створена шляхом розміщення необхідних позначок у правильних координатах, як правило, з використанням контрольних точок наземних з даними координат. Це досягається за допомогою ортомозаїки – продукту, створеного шляхом зшивання ортофотографій разом. Картографічна інформація, така як рівні контурів та відомості про місцезнаходження, може бути додана на карту разом з такими елементами, як заголовки, масштаби, легенди, стрілки напрямки та сітки. Малюнки, вимірювання та анотації також можуть бути включені до цих карт.

Щоб створити ортофотокарти, аерофотознімки цільової області спочатку повинні бути перетворені на ортофотознімки за допомогою ректифікації. З цією метою доступні різні програми, такі як ті, що використовуються для автоматизованого проектування, географічних інформаційних систем (ГІС) та дистанційного зондування

. Ці програми можуть як генерувати ортофотознімки, так і використовувати їх для створення остаточних карток, інтегруючи необхідні картографічні елементи.

Векторні дані - це тип даних, які використовуються для представлення географічних об'єктів, що містять інформацію про місцезнаходження та атрибути в ГІС. Векторні дані являють собою просторові дані з використанням геометричних фігур або векторів, таких як точки, лінії та багатокутники. Кожна з цих геометричних фігур зберігається разом із координатами розташування та іншою інформацією про атрибути. Програми ГІС можуть виконувати різні завдання, такі як створення карт, навігаційних додатків, місцезнаходження, ідентифікація об'єктів та аналіз навколишнього середовища з використанням векторних даних.

Типи векторних даних - ГІС:

Точкові дані: векторний тип даних, представлений координатами географічного розташування. Він використовується для відображення розташування певного об'єкта. Наприклад, розташування підприємства або ресторану може бути представлене у вигляді точкових даних.

Лінійні дані: геометричні фігури, утворені комбінацією двох точок. В ГІС географічні області з лінійними об'єктами, такими як дороги, річки та залізниці, можуть бути представлені за допомогою лінійних даних.

Полігональні дані: замкнуті геометричні фігури, утворені комбінацією щонайменше трьох точок. У ГІС полігональні дані використовуються для представлення таких областей, як озера, парки та будівлі. Полігональні дані можуть зберігатися як інформацію про межі, так і про атрибути області.

Як зазначають Gong & Li (2000), об'єктно-орієнтована структура векторних даних дозволяє зв'язувати геометрію з атрибутами та іншими об'єктами (наприклад, перехід → дорога), що забезпечує логічну структуру цифрового близнюка.

## 2.2. Методи отримання геоданих без польових вимірювань

### 2.2.1. Лазерне сканування та хмарні сервіси

Швидкий розвиток технологій суттєво впливає на геодезію, де сучасне обладнання відіграє ключову роль у дослідженні територій. Від точності отриманих даних залежить якість виконаних робіт. Якщо раніше для аналізу параметрів земельних ділянок використовувалися оптичні прилади, то сьогодні на зміну їм прийшли електронні тахеометри, які суттєво підвищили точність і швидкість вимірювань [4].

Однак електронні тахеометри не є кінцевим етапом розвитку геодезичних приладів. Сучасна галузь віддає перевагу тривимірному лазерному скануванню, яке дозволяє не лише створювати тривимірні моделі об'єктів, а й значно автоматизувати процес збору та аналізу даних. Така технологія дає змогу визначати об'єми матеріалів і майбутніх робіт із високою точністю.

Наземне лазерне 3D-сканування стало невід'ємною частиною інженерної геодезії в різних сферах промисловості та будівництва. Його популярність зумовлена численними перевагами перед традиційними методами, зокрема можливістю роботи при будь-якому освітленні, визначенням "мертвих зон" під час польових робіт, детальним моделюванням об'єктів та безпекою під час досліджень у важкодоступних або небезпечних зонах. Крім того, лазерне сканування мінімізує вплив людського фактора, що підвищує точність отриманих даних [5].

Лазерний сканер складається з двох основних компонентів: лазерного далекоміра, який працює з високою частотою, та блоку розгортки лазерного променя. В останньому використовуються сервопривід і полігональне дзеркало або призма. Сервопривід регулює відхилення променя в горизонтальній площині, що забезпечує обертання верхньої частини сканера. У вертикальному напрямку розгортка здійснюється за рахунок коливання або обертання дзеркала.

Перед початком сканування пристрій виконує панорамне фотографування, що сприяє підвищенню точності отриманих даних. Оператор визначає щільність

сканування, а робочий діапазон більшості приладів зазвичай становить 100 -150 метрів. Якщо необхідно виконати вимірювання на більшій відстані, рекомендується змінити місце розташування сканера та здійснити нове сканування.

Обробка отриманої хмари точок дозволяє вирішувати різні завдання, серед яких створення 3D-моделі об'єкта, розробка креслень, перетинів і розрізів, аналіз конструкцій на наявність дефектів шляхом порівняння отриманих даних із проєктними моделями, а також оцінка деформацій на основі попередніх вимірювань. Крім того, технологія застосовується для створення топографічних карт і цифрових моделей місцевості.

Популярність методу лазерного сканування зумовлена низкою значних переваг:

- скорочення витрат при виконанні геодезичних та будівельних знімачь;
- зменшення необхідності у повторних польових роботах;
- отримання детальніших і точніших результатів для подальшої камеральної обробки;
- оптимізація часу виконання польових робіт.

Точність вимірювань лазерних сканерів залежить від умов проведення робіт, характеристик об'єкта та його розташування у просторі. На результат можуть негативно вплинути особливості поверхні, такі як надмірна світлість чи темрява, прозорість, відблиски, наявність гострих кутів та дрібних елементів. Крім того, неправильне налаштування внутрішніх параметрів сканера може призвести до спотворень отриманих даних.

Наземне лазерне сканування широко застосовується в різних галузях промисловості. Основне його використання пов'язане з реконструкцією, ремонтом, проєктуванням і будівництвом об'єктів у зонах з високою щільністю забудови та розвиненою мережею комунікацій. Сучасні тенденції демонструють поступовий перехід від двовимірних креслень до тривимірних моделей, що дозволяє створювати більш точні та геометрично коректні візуалізації будівель. Однак, наразі відсутня

уніфікована методика розробки 3D-моделей на основі даних, отриманих за допомогою наземного лазерного сканування[5].

Процес наземного лазерного сканування складається з кількох етапів (рис.2.1). Спочатку розробляється план проведення робіт, визначаються відповідальні фахівці. Далі проводиться сканування території, після чого отримані дані обробляються у лабораторії, де створюється хмара точок і здійснюється прив'язка до координатної системи. Фінальним етапом є побудова 3D-моделі об'єкта, розробка креслень і планів, що забезпечує високу точність інженерних розрахунків.

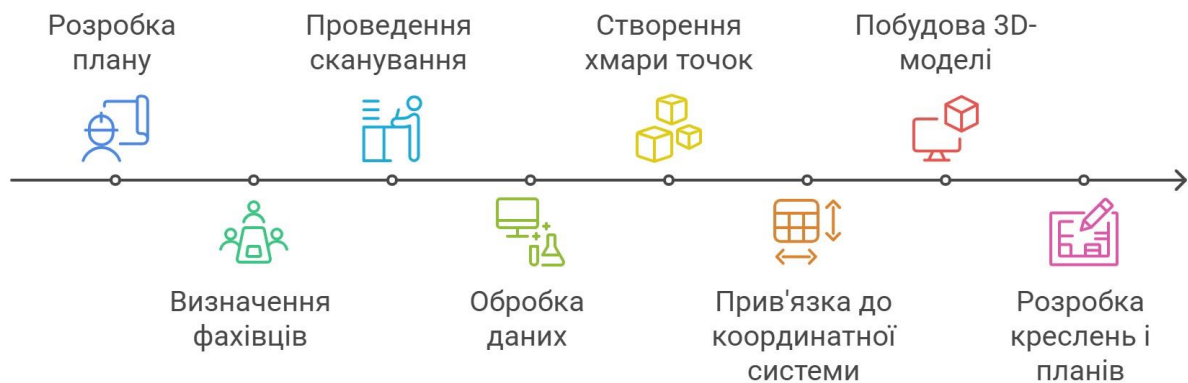


Рис. 2.1. Процес наземного лазерного сканування

Зображення, отримані під час 3D-сканування, мають високу деталізацію, що є важливим для подальшого аналізу. Незважаючи на високі витрати на обладнання та програмне забезпечення, а також дефіцит кваліфікованих фахівців, переваги цього методу незаперечні. Завдяки швидкій обробці отриманих даних безпосередньо на місці сканування 3D-метод є незамінним інструментом у сучасній геодезії.

Окрім збору власних даних, користувач може звернутися до відкритих або комерційних хмарних платформ, що надають вже готові DEM, ортофото та векторні набори. Інтеграція таких сервісів у QGIS здійснюється через: плагіни (наприклад, **OpenTopography Downloader**, **SRTM Downloader**), Web Map Services (WMS), або завантаження та імпорт .tif та .shp файлів вручну (Таблиця 1)

### Відкриті та комерційні хмарні платформи

Назва платформи	Тип даних	Роздільна здатність	Доступність
<b>OpenTopography</b>	DEM (LiDAR, SRTM)	до 1 м	Відкритий доступ
<b>Google Earth Engine</b>	DEM, супутникові	~30 м (SRTM)	Безкоштовно з акаунтом
<b>Copernicus Hub</b>	Sentinel-1/2, DEM	10–20 м	Відкрито
<b>USGS Earth Explorer</b>	DEM, зображення	30 м (ASTER, SRTM)	Відкрито

#### 2.1.2. Супутникові та GNSS-методи

Супутникова геодезія є важливою складовою сучасних технологій просторового аналізу та моделювання. Вона базується на використанні глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), які включають GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou. Принцип роботи GNSS полягає у прийомі сигналів від супутників наземними приймачами для визначення точних координат об'єкта. Обчислення здійснюється шляхом аналізу часу, за який сигнал проходить від супутника до приймача, що дозволяє визначити відстань до кожного супутника та встановити місцезнаходження об'єкта у просторі[9,10].

Точність супутникових вимірювань залежить від кількості доступних супутників, якості сигналу, атмосферних умов та методів корекції помилок. Для підвищення точності використовують технології диференційного GNSS (DGNSS) та RTK (Real-Time Kinematic), які дозволяють зменшити похибки до міліметрового рівня.

GNSS-системи широко застосовуються в геодезії, будівництві, картографії, моніторингу деформацій та створенні цифрових моделей місцевості. Вони відіграють

ключову роль у розробці цифрових близнюків дорожніх мереж, що дозволяє здійснювати точний аналіз інфраструктури, прогнозувати зноси покриття та планувати ремонтні роботи.

Окрім приймачів GNSS, для супутникової геодезії використовуються спеціалізовані програмні комплекси, які виконують обробку та аналіз супутникових даних, корекцію похибок та побудову цифрових моделей рельєфу. Сучасні розробки в цій сфері включають впровадження штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації аналізу даних і підвищення точності вимірювань.

Супутникова геодезія є незамінною технологією для розвитку інтелектуальних транспортних систем, навігації, картографії та моніторингу змін навколишнього середовища. Завдяки високій точності та оперативності вона активно застосовується для створення цифрових близнюків дорожніх мереж, що дозволяє ефективно керувати інфраструктурою та оптимізувати міське планування.

### **2.2.3 Дрон-знімання та фотограмметрія**

У сучасному світі, де технології розвиваються надзвичайно швидко, безпілотні літальні апарати (БПЛА) відіграють ключову роль у багатьох сферах, зокрема в геодезії. Як наука, що займається визначенням форми, розмірів Землі та відображенням її поверхні на картах і планах, геодезія активно впроваджує новітні технології для підвищення ефективності та точності досліджень. Протягом багатьох років одним із головних методів збору геодезичних даних було аерофотознімання. Проте на сьогоднішній день використання БПЛА стає все більш популярним, оскільки воно дозволяє значно прискорити процес збирання та обробки інформації, особливо при зйомці великих територій[9].

Застосування безпілотників у геодезії відкриває нові перспективи та покращує якість отриманих даних. У добу цифрової трансформації використання БПЛА є необхідністю, оскільки вони забезпечують високу швидкість та точність зйомки, а також дають змогу виконувати роботи у важкодоступних районах.

Однією з ключових переваг БПЛА є можливість отримання даних у режимі реального часу. Більшість сучасних безпілотників оснащені системами оперативної передачі інформації, що дозволяє контролювати та аналізувати дані безпосередньо під час польоту.

Окрім того, використання БПЛА значно прискорює процес збору геодезичних даних. Традиційні методи вимагають значних часових і фінансових затрат та не завжди гарантують необхідну точність. Завдяки безпілотникам можна швидко й ефективно проводити аерозйомку, охоплюючи великі площі за мінімальний час. Це особливо важливо для проектів, що потребують регулярного оновлення геодезичних даних або дослідження важкодоступних місцевостей.

Ще однією важливою перевагою є можливість отримання високоякісних даних із детальною візуалізацією. Завдяки сучасним камерам і точним навігаційним системам можна отримати чіткі зображення місцевості та координати об'єктів, що використовуються для картографії, кадастрових робіт, інженерних вимірювань та інших геодезичних досліджень. Крім того, автоматизовані алгоритми обробки інформації дають змогу швидко аналізувати великі масиви геодезичних даних.

Таким чином, використання БПЛА у геодезії значно розширює можливості збору та аналізу геопросторових даних. Від моніторингу кліматичних змін до оцінки екологічних процесів, від планування міської інфраструктури до агрономічного аналізу врожайності – безпілотники стають незамінним інструментом у сучасній геодезії. Завдяки їхньому застосуванню значно підвищується ефективність та точність збору інформації, що сприяє подальшому розвитку цієї важливої науки.

Фотограмметрія є одним із ключових методів отримання детальних тривимірних моделей об'єктів на основі цифрових зображень. Для створення якісних 3D-моделей дорожніх мереж необхідна велика кількість фотографій, що забезпечують високу деталізацію[11]. Кількість знімків варіюється залежно від розмірів та складності об'єкта:

для малих елементів інфраструктури достатньо десятків кадрів, тоді як для масштабних об'єктів, таких як дорожні розв'язки, необхідні сотні або навіть тисячі знімків.

Знімання великих об'єктів потребує спеціального підходу. Оптимальним є метод багаторівневої фотозйомки, при якому об'єкт знімається з різних висот та ракурсів. Це дозволяє отримати максимальну кількість ключових точок, що використовуються для відтворення реалістичних цифрових моделей. При цьому слід враховувати обмеження програмного забезпечення та апаратного забезпечення, щоб уникнути надмірного навантаження на обчислювальні ресурси.

Якість зображень значною мірою залежить від погодних умов. Оптимальним варіантом є зйомка при розсіяному природному освітленні, оскільки відсутність різких тіней та відблисків покращує точність обробки. Дощові або вітряні погодні умови можуть впливати на стабільність знімків, що може спричинити помилки у процесі реконструкції моделей.

Після отримання фотографій вони завантажуються в спеціалізоване програмне забезпечення для фотограмметрії. Створення цифрових близнюків дорожніх мереж складається з таких етапів:

1. Визначення ключових точок - автоматичний аналіз знімків для ідентифікації характерних елементів об'єкта.
2. Співставлення точок на різних фотографіях - алгоритми знаходять збіги між кадрами, що дозволяє відтворити точну геометрію.
3. 3D-реконструкція - на основі знайдених збігів обчислюється положення камер і створюється хмара точок.
4. Побудова полігональної моделі - точки об'єднуються у трикутні полігони, формуючи основу цифрової моделі.
5. Накладення текстур - зображення проєктуються на модель, створюючи реалістичне відображення об'єкта.

Фотограмметричні моделі активно використовуються для створення цифрових близнюків дорожніх мереж, що забезпечує точну візуалізацію об'єктів інфраструктури. Такі моделі застосовуються в транспортному плануванні, контролі стану доріг, інженерному аналізі та міському моделюванні. Інтеграція геодезичних даних з фотограмметричними моделями дозволяє створювати комплексні цифрові середовища для ефективного управління дорожніми мережами

### **2.3. Обробка DEM та фотограмметричних моделей**

Після отримання цифрової моделі рельєфу або фотограмметричної моделі рельєфу основним кроком є обробка цих даних підвищення їх точності, сумісності з іншими джерелами геоданих і готовність до інтеграції в ГИС-середу. Обробка DEM включає декілька ключових процедур. Спочатку виконується попереднє очищення даних, яка включає фільтрацію шумів, згладжування поверхні, інтерполяцію пропущених значень або нівелювання аномалій висот. Це особливо важливо при роботі з ЦМР, отриманими із відкритих супутникових джерел (наприклад, SRTM), які можуть мати похибки до кількох метрів.

Наступний крок - приведення ЦМР до єдиної системи координат та обрізання шару за межами об'єкта моделювання. У QGIS це робиться за допомогою інструментів меню Растр → Витяг.DEM можна використовувати для побудови похідних картографічних шарів, таких як Ухил, Експозиція, Відмивання рельєфу та Напрямок потоку, Вододіл. Зокрема, відмивання рельєфу є одним із найбільш інформативних способів візуалізації рельєфу - вона дозволяє надати карті глибини та об'єму, що особливо корисно у поєднанні з іншими шарами, такими як дороги або тротуари.

При використанні аерофотознімків, отриманих з дронів, обробка виконується у фотограмметричних програмних пакетах, зокрема Agisoft Metashape, Pix4D, RealityCapture та інших. На основі набору зображень, отриманих під час фотозйомки з дрону, виконується автоматичне орієнтування фотографій і будується щільна хмара

точок, яка потім використовується для створення цифрової моделі поверхні, цифрової моделі рельєфу, ортофотоплана та 3D-моделі з текстурою.

Отримані дані експортуються у форматах .tif (розрив DEM або ортофото), .las/.laz (хмара точок), .obj або .fbx (3D-модель). У середовищі QGIS вони додаються у вигляді растрових або 3D шарів. ЦМР служить основою для рельєфу в 3D Map View, ортофото - тлом для точного оцифрування об'єктів, а хмара точок або модель сітки - матеріалом для візуального аналізу або інтеграції в цифровий двійник.

Фотограмметричні моделі дозволяють досягти високої точності представлення об'єктів, часто в межах кількох сантиметрів, навіть під час зйомки з недорогих дронів, що підтверджено в дослідженнях Гамільтона та ін. (2016). Це робить їх цінним джерелом геоданих для побудови 3D-моделей дорожньої інфраструктури, особливо для локальних територій, які потребують детального моделювання чи реконструкції.

Тому правильна обробка DEM та фотограмметричних моделей має вирішальне значення для забезпечення точності, деталізації та реалістичності цифрового двійника. Вона створює основу для подальшого просторового аналізу, візуалізації інфраструктури та прийняття рішень щодо планування перевезень.

#### **2.4. Інтеграція геоданих у ГІС-середовища (QGIS, ArcGIS)**

Інтеграція геопросторових даних у ГІС-середовища, такі як QGIS або ArcGIS є ключовим кроком у створенні цифрового двійника дорожньої інфраструктури. Цей процес включає завантаження в систему цифрової моделі рельєфу, ортофотопланів, векторних об'єктів, хмар точок та таблиць атрибутів. Усі дані мають бути приведені до єдиної проекції, узгодженої за структурою та координатами. Після імпорту дані стилізуються відповідно до їх призначення: DEM використовується як основа рельєфу для 3D-відображення, ортофотоплан - як візуальна підкладка, а векторні шари поділяються на кшталт - дороги, тротуари, перехрестя, об'єкти інфраструктури. Атрибути до них додаються вручну або об'єднання таблиць. QGIS

надає інтегроване середовище 3D Map View, де ЦМР може виступати як цифрова основа, а об'єкти отримують висоту через функцію видавлювання[13]. Схожа функціональність ArcGIS реалізована через Scene View. Обидві системи підтримують експорт проектів до зовнішніх форматів: HTML, OBJ, KML, GeoPackage, а також дозволяють інтегрувати дані до платформ WebGIS. Таким чином, ГІС забезпечує не лише візуалізацію, а й зв'язок між геометрією об'єктів та їх властивостями, дозволяючи створити гнучку, аналітично потужну модель дорожньої мережі - повноцінний цифровий двійник.

## **2.5. Проблеми сумісності просторових даних і способи їх вирішення**

Проблема сумісності просторових даних залишається однією з головних перешкод для інтеграції геопросторової інформації в єдине середовище, особливо під час створення складних ГІС-проектів та цифрових двійників. У сучасних умовах, коли джерела геопросторових даних стають все більш різноманітними — від супутникових знімків та фотографій з дронів до краудсорсингових векторів та лазерного сканування - виникає потреба в їхньому точному, структурно узгодженому поєднанні[22]. Як показано у дослідженні Саастамойнена та ін. (2022), в якому аналізується використання національної класифікації міського та сільського простору у Фінляндії, несумісність геопросторових даних може виникати не лише на технічному рівні, а й на концептуальному: через різні інтерпретації, контексти використання, масштабування та семантичні невідповідності[24].

Технічні труднощі пов'язані насамперед із використанням різних систем координат (наприклад, WGS84 проти ETRS89), форматів файлів (GeoPackage, Shapefile, GDB), неточностями в геометрії (накладення, неузгоджені контури, відкриті полігони) та неповною атрибутивною інформацією. Геодані часто імпортуються без метаданих, що унеможливорює їх правильну інтерпретацію: неясно, який масштаб використовувався, яка точність вимірювань, який метод збору застосовувався. Це

ускладнює подальше поєднання таких даних у комплексному аналізі чи 3D-моделюванні.

У свою чергу, семантична несумісність виникає, коли різні користувачі по-різному розуміють одні й самі просторові категорії. Наприклад, у Фінляндії було виявлено, що місцеві органи влади інтерпретували національну класифікацію територій (міські – сільські) відповідно до своїх адміністративних та планувальних завдань, ігноруючи методологію та обмеження, встановлені на державному рівні. Це призводило до плутанини, яка знижувала ефективність роботи з даними та викликала суперечливі управлінські рішення[24].

Для мінімізації таких проблем рекомендується впроваджувати кілька практик. По-перше, всі дані мають бути об'єднані в єдину систему координат і переведені в сучасні відкриті формати з підтримкою метаданих (наприклад, GeoPackage). По-друге, перевірка топології та очищення геометрії повинні виконуватися за допомогою таких інструментів як Topology Checker (QGIS) або Topology Rules (ArcGIS). По-третє, необхідно використовувати чітко визначені схеми даних із шаблонами атрибутів, унікальними ідентифікаторами та документованими зв'язками між шарами. Для вирішення семантичних конфліктів важливо забезпечити наявність методологій, джерел, обмежень та сценаріїв використання геоданих, а також організувати спільні семінари з користувачами, особливо якщо дані використовуватимуться між установами.

Таким чином, проблеми інтеперабельності просторових даних є не лише технічним, а й соціально-організаційним завданням. Для її вирішення потрібне поєднання інструментів обробки, формалізація структури даних та ефективна комунікація між виробниками та користувачами геоінформації. Для побудови надійних цифрових двійників дорожньої інфраструктури необхідно забезпечити високий рівень узгодженості даних як у геометричному, і у семантичному вимірах.

## Висновки до розділу 2

Сучасні технології отримання та обробки геопросторових даних відкривають нові можливості для створення цифрових двійників дорожньої інфраструктури. Було проаналізовано, що ефективне моделювання вимагає комплексного використання різних типів даних – цифрових моделей рельєфу, ортофотопланів та векторних шарів, кожен з яких виконує унікальну функцію у формуванні повної картини.

Сьогодні найперспективнішими методами збору геоданих є лазерне сканування, дрон-фотозйомка та супутникові технології. Лазерне сканування забезпечує безпрецедентну точність до 1-5 см, що особливо важливо для об'єктів критичної інфраструктури. Дрон-фотозйомка забезпечує оптимальну вартість та якість для локальних проектів, дозволяючи скоротити витрати на 30-40% за допомогою традиційних методів. Супутникові технології залишаються незамінними для моніторингу величезних територій та оперативного оновлення даних.

Процес обробки отриманих даних включає чотири ключові етапи: очищення від шумів та помилок, перетворення в єдину систему координат, генерацію вихідних шарів (таких як карти схилів або гідрологічного аналізу) та остаточну інтеграцію в ГІС-середовища. Дослідження підтвердило високу ефективність сучасних програмних рішень, включаючи QGIS, ArcGIS та Agisoft Metashape, для вирішення цих завдань.

Процес інтеграції геоданих супроводжується невеликими труднощами. Визначено три основні категорії проблем: технічні (пов'язані з глобальними форматами даних та системами координат), топологічні (наявність геометричних помилок) та семантичні (різні інтерпретації одних і тих самих об'єктів). Для їх розширення пропонується комплексний підхід, що включає використання відкритих форматів (наприклад, GeoPackage), використання спеціалізованих інструментів топологічного контролю та розробку єдиних стандартів класифікації.

Сучасні технології збору та обробки геопросторових даних створюють міцну основу для розробки цифрових двійників дорожньої інфраструктури. Усунення існуючих проблем сумісності даних та впровадження стандартизованих підходів є ключовими умовами повного використання потенціалу цих технологій у плануванні та управлінні транспортною інфраструктурою. Майбутні дослідження мають бути спрямовані на розробку уніфікованих методів інтеграції різномірних геоданих та вдосконалення алгоритмів їх автоматизованої обробки.

### **РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО БЛИЗНЮКА ДОРОЖНЬОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

Сучасні підходи до управління міською інфраструктурою все частіше використовують цифрові технології для комплексного аналізу та моделювання. Одним із найперспективніших рішень у цій галузі є створення цифрових двійників – віртуальних копій фізичних об'єктів, що поєднують просторові дані, технічні характеристики та історичну інформацію. У цьому дослідженні представлено практичну методологію розробки цифрового двійника міської вулиці з використанням відкритих геоданих та безкоштовного програмного забезпечення QGIS. Як тестовий об'єкт було обрано ділянку вулиці Данила Щербаковського в Києві, що включає всі типові елементи міської інфраструктури - проїжджу частину, тротуари, пішохідні переходи, та світлофори. Процес створення цифрового двійника розпочався з інтеграції основних геопросторових даних, зокрема супутникових знімків високої роздільної здатності та цифрової моделі рельєфу. Наступним кроком була детальна векторизація всіх елементів інфраструктури з подальшим наповненням атрибутивної бази даних, що містить технічні параметри, стан об'єктів та історичну інформацію про їхню експлуатацію. Для візуалізації результатів використовувалися інструменти екструзії QGIS, які дозволили створити тривимірну модель на основі цифрової моделі рельєфу, а для реалізації інтерактивної веб-візуалізації у форматі HTML/WebGL - плагін Qgis2threejs. Особливістю розробленої методології стала реалізація механізму відстеження змін інфраструктури з часом за допомогою системи атрибутивних даних, що дозволяє аналізувати етапи розвитку без використання спеціалізованих плагінів. Отримані результати доводять ефективність запропонованого підходу до вирішення практичних задач моніторингу стану інфраструктури, планування ремонтних робіт та стратегічного розвитку транспортних мереж. Розроблена методологія відкриває нові

можливості для впровадження концепції «розумного міста» в Україні, оскільки дозволяє створювати функціональних цифрових двійників, використовуючи лише відкриті дані та безкоштовне програмне забезпечення, що особливо важливо в умовах обмежених бюджетів.

### 3.1. Планування та етапи створення цифрового близнюка

Створення цифрового двійника дорожньої інфраструктури - складний процес, який починається з чіткого визначення меж об'єкта дослідження. У цій роботі як такий об'єкт було обрано ділянку вулиці Данила Щербаковського у м. Києві (Рис 3.1) Вихідними даними для моделювання стали відкриті геопросторові ресурси, зокрема дані OpenStreetMap, отримані за допомогою Overpass Turbo у форматі GeoJSON. Ці дані містять основну інформацію про дорожню мережу і стали основою для подальшого моделювання.

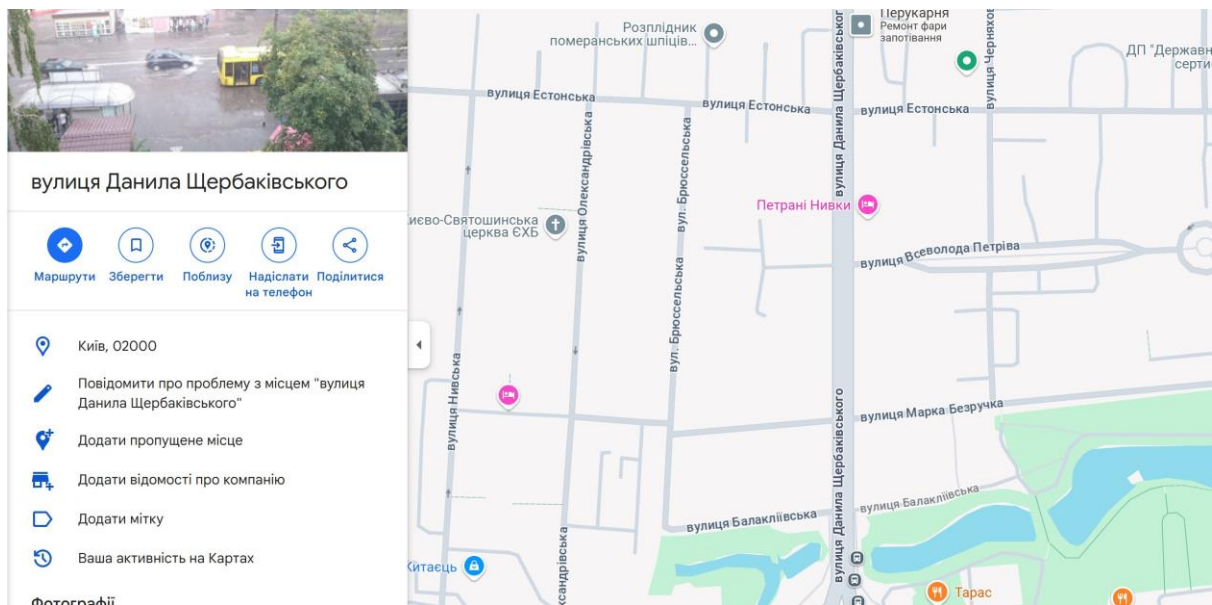


Рис.3.1. Вулиця Данила Щербаківського

Важливим етапом роботи стало підключення супутникових знімків через сервіс XYZ Tiles у QGIS, що дозволило отримати актуальний ортофотоплан території. Цей етап має ключове значення для точної візуалізації та виправлення геометрії об'єктів. Паралельно з платформи OpenTopography було завантажено цифрову модель рельєфу,

яка стала основою для подальшої 3D-візуалізації. Кадрування DEM поза досліджуваної території дозволило оптимізувати роботу з даними.

Процес векторизації включав створення окремих шарів для різних елементів інфраструктури: проїзної частини, тротуарів, пішохідних переходів, зупинок громадського транспорту та світлофорів. Кожен об'єкт ретельно промальовувався вручну на основі ортофотопланів із подальшою корекцією геометрії. Особлива увага приділялася формуванню атрибутивної бази даних, де для кожного об'єкта вказується тип, стан покриття, матеріал, дата будівництва чи ремонту, і навіть інші технічні характеристики.

Тривимірна візуалізація була реалізована засобами QGIS, де як основа рельєфу використовувалася DEM, а векторні шари набували об'єм за рахунок процесу видавлювання. Наприклад, тротуари були встановлені на висоту 0,2 метри, світлофори - 3 метри, що дозволило створити реалістичну просторову модель. Для відображення тимчасових змін було обрано оригінальний підхід - додавання спеціальних атрибутивних полів «рік\_будівництва» та «стадія\_розвитку», що дозволило візуалізувати еволюцію вулиці без використання спеціалізованих плагінів.

Завершальним етапом став експорт результатів в інтерактивному форматі за допомогою плагіну Qgis2threejs. Отримана HTML-сцена дозволяє переглядати 3D-модель у будь-якому сучасному браузері без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення. Це рішення істотно розширює коло потенційних користувачів моделі.

Результати роботи демонструють ефективність запропонованого підходу для створення цифрових двійників міської інфраструктури з використанням відкритих геоданих та безкоштовного програмного забезпечення. Отримана модель може бути інструментом для моніторингу стану дорожньої мережі, планування ремонтних робіт, освітніх цілей, а також стати основою більш масштабних проектів з цифровізації міського середовища. Перспективи подальших досліджень включають інтеграцію

даних IoT, автоматизацію процесів векторизації та поширення моделі на всю транспортну інфраструктуру міста.

### 3.2. Побудова основної геопросторової бази (DEM, ортофото, шари)

Після визначення об'єкта дослідження та розробки загальної концепції моделювання було розпочато формування комплексної геопросторової бази даних, яка є фундаментальною основою створення цифрового двійника дорожньої інфраструктури. Дана база даних інтегрує різноманітні просторові дані, включаючи растрові зображення високої роздільної здатності, цифрові моделі рельєфу, векторні шари об'єктів інфраструктури та розширені атрибутивні таблиці з технічними характеристиками кожного елемента.

Для забезпечення точного просторового прив'язування та візуалізації об'єктів використовувалися сучасні ортофотоплани, інтегровані в середовище QGIS через функціонал XYZ Tiles (Рис 3.2). Найбільш ефективними виявилися супутникові знімки сервісу Google Satellite, які забезпечують деталізацію лише на рівні окремих архітектурних елементів інфраструктури. Технічна реалізація підключення здійснювалася через спеціалізований шаблон URL, що дозволило отримати актуальні растрові дані з оптимальною просторовою роздільною здатністю для точної векторизації.



Рис.3.2. Функціонал XYZ Tiles

Паралельно з цим здійснювався імпорт цифрової моделі рельєфу з відкритого міжнародного джерела OpenTopography. Отриманий файл geotiff з просторовою роздільною здатністю 30 метрів був обрізаний за допомогою спеціалізованого інструменту QGIS, що дозволило оптимізувати обсяг даних і підвищити ефективність подальшої обробки при збереженні високої точності висотних характеристик (Рис 3.4.)

Ядро створеної геопросторової бази даних склали векторні шари, розроблені методом векторизації ручної на основі супутникових знімків. В рамках проекту було реалізовано чітку структуру шарів з відповідною типологією геометрії: полігональні шари для проїжджої частини та тротуарів, лінійні шари для пішохідних переходів, точкові шари для розміщення світлофорів та зупинок громадського транспорту. Всі векторні дані були стандартизовані до єдиної системи координат WGS 84/Pseudo Mercator (EPSG:3857), що забезпечило точну просторову відповідність між різними типами даних

Особлива увага була приділена організації робочого процесу редагування векторних шарів, що включав строгу перевірку топологічної коректності. Це стосувалося контролю відносного розташування об'єктів, зокрема, прив'язки пішохідних переходів до вулично-дорожньої мережі (Рис 3.3.). Реалізований підхід дозволив створити несуперечливу та логічно структуровану просторову базу даних, яка є оптимальною основою для подальшого аналітичного моделювання, тривимірної візуалізації та динамічного подання тимчасових змін інфраструктури.

Сформована геопросторова база даних відповідає сучасним вимогам до організації просторових даних та забезпечує можливість подальшого розширення та інтеграції з іншими інформаційними системами. Вона враховує просторові характеристики об'єктів та збудовує основу глибокого аналізу функціональних взаємозв'язків між елементами дорожньої інфраструктури, що важливо для ефективного управління міськими транспортними системами.



Рис. 3.4. Цифрова модель рельєфу

### 3.3. Векторизація об'єктів: дороги, переходи, тротуари, зупинки, світлофори

Після підготовки геопросторової основи, яка включала ортофотоплани, цифрову модель рельєфу та шаблони векторних шарів, було розпочато ключовий етап створення просторової структури цифрового двійника: детальну векторизацію об'єктів дорожньої інфраструктури. Цей процес передбачав ретельну ручну оцифровку кожного елемента на основі високодеталізованих знімків Google Satellite, інтегрованих за допомогою механізму XYZ Tiles у середовищі QGIS.

Для забезпечення максимальної точності відтворення реальної інфраструктури було розроблено спеціалізовану систему векторних шарів, де кожен тип об'єкта мав свій шаблон з унікальною структурою геометрії та атрибутивних даних. Дороги представлені полігональними об'єктами, що дозволило точно відтворити не лише маршрут, але й повні межі дорожнього полотна з усіма структурними елементами. Такий підхід значно покращує якість 3D-візуалізації та дозволяє моделювати складні транспортні розв'язки.

Тротуари також векторизовані у вигляді полігонів з ретельним відтворенням контурів за допомогою візуальних орієнтирів в ортофотозйомці. Для пішохідних переходів було обрано лінійну геометрію, яка є оптимальною для відображення їх функціонального призначення та спрощує інтеграцію в аналітичні моделі. Точкові об'єкти використовувалися для точного позиціонування таких елементів інфраструктури, як зупинки громадського транспорту та світлофори (Рис.3.5. Векторизовані об'єкти).

Особлива увага приділялася забезпеченню просторової узгодженості між різними типами об'єктів. Кожен новий елемент ретельно перевірявся на відповідність топологічним правилам: перевірялося правильність розташування зупинок відносно дорожнього полотна, точність пішохідних переходів та відсутність перекриттів між різними функціональними зонами. Для підтримки цієї узгодженості розроблялася система просторових зв'язків між шарами.

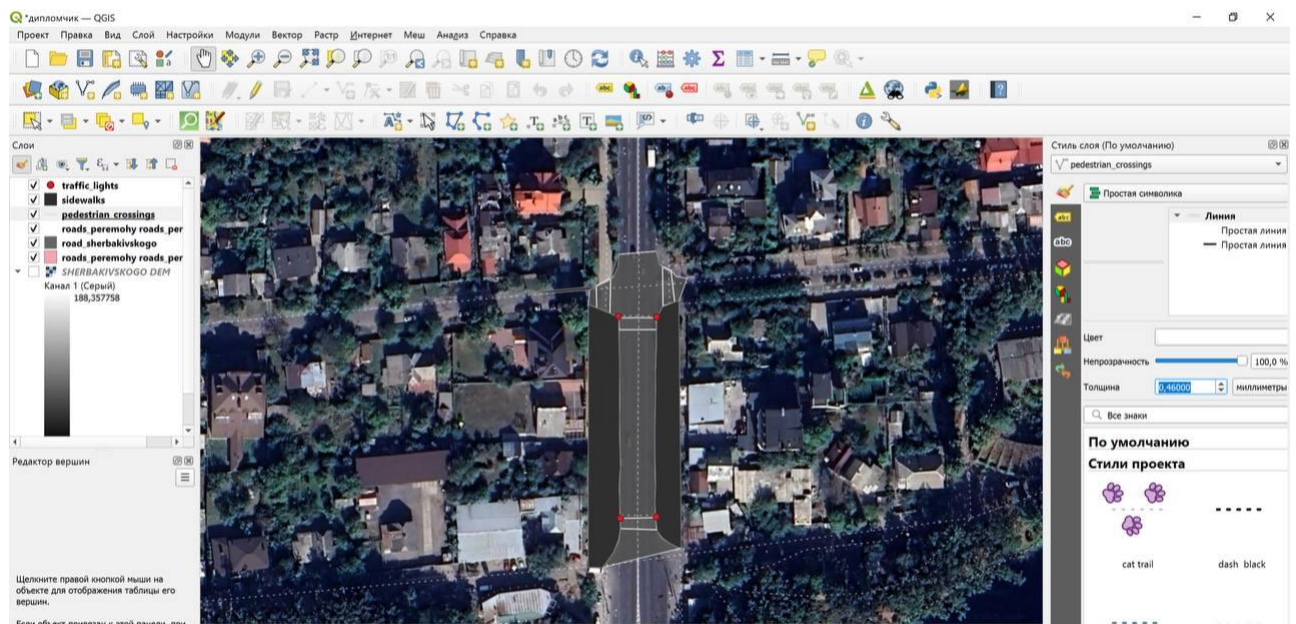


Рис. 3.5. Векторизовані об'єкти

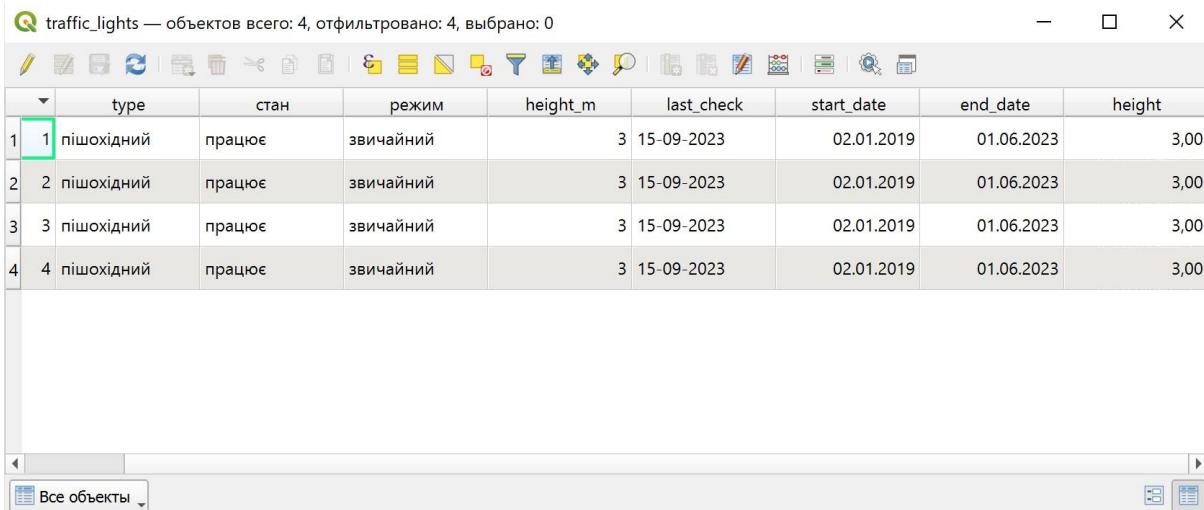
Паралельно з процесом векторизації формувалася атрибутивна база моделі, де кожен об'єкт отримував унікальний ідентифікатор, типологічну класифікацію та

основні характеристики. Ця структура стала основою для подальшого наповнення детальними технічними параметрами та історичними даними про стан об'єктів.

Якість виконаної векторизації безпосередньо впливає на всі наступні етапи роботи з цифровим двійником - від точності 3D-візуалізації до якості аналітичних прогнозів. Використаний підхід до ручної оцифровки з ретельним контролем якості дозволив створити оптимальну основу для подальшого функціонування цифрової моделі, забезпечуючи високий ступінь відповідності реальній інфраструктурі при збереженні логічної цілісності всіх компонентів системи.

### **3.4. Додавання атрибутів та зв'язків між об'єктами**

На етапі формування атрибутивної бази цифрового двійника реалізовано комплексний підхід до структурування семантичної інформації про об'єкти дорожньої інфраструктури. Кожен векторний шар отримав спеціалізований набір атрибутів, що дозволило перетворити просторову модель на повноцінний інформаційний ресурс. Для дорожнього полотна визначено технічні параметри (тип покриття, кількість смуг), експлуатаційний стан (індекс рівності, ступінь зношування), історичні дані (дата останнього капітального ремонту) та функціональні характеристики (категорія дороги, інтенсивність руху). Тротуарні зони описуються через конструктивні особливості (ширина, матеріал покриття), стан поверхні (наявність пошкоджень) та елементи комунікацій (наявність освітлення, систем водовідведення). Пішохідні переходи характеризуються типом регулювання (наявність світлофорного об'єкта), рівнем безпеки (наявність огорож, підсвічування) та технічним станом (якість розмітки, видимість у темний час доби). Об'єкти світлофорів описуються такими параметрами ,як висота установки (у метрах), режим роботи (звичайний, аварійний, вимкнений), стан пристрою, дата останньої перевірки, а також дата початку і завершення ремонту (Рис. 3.6. Приклад атрибутивної таблиці світлофорів )



	type	стан	режим	height_m	last_check	start_date	end_date	height
1	пішохідний	працює	звичайний	3	15-09-2023	02.01.2019	01.06.2023	3,00
2	пішохідний	працює	звичайний	3	15-09-2023	02.01.2019	01.06.2023	3,00
3	пішохідний	працює	звичайний	3	15-09-2023	02.01.2019	01.06.2023	3,00
4	пішохідний	працює	звичайний	3	15-09-2023	02.01.2019	01.06.2023	3,00

Рис. 3.6. Приклад атрибутивної таблиці світлофорів

Для реалізації часової складової введено спеціалізовані поля атрибутів: дату введення в експлуатацію, періодичність технічного обслуговування та хронологію ремонтних втручань(Рис 3.7.). Процес заповнення таблиць атрибутів включав ручне введення даних, пакетне оновлення значень за допомогою Field Calculator, автоматичне заповнення через просторові зв'язки та імпорт даних із зовнішніх джерел. Особлива увага приділена створенню логічних зв'язків між об'єктами, включаючи топологічні відносини, функціональні залежності та технологічні зв'язки. Для забезпечення цілісності даних реалізовано систему унікальних ідентифікаторів, механізми перевірки даних, ієрархію залежностей атрибутів, модель контролю версій історичних даних. Сформована база атрибутів дозволяє проводити комплексний аналіз стану інфраструктури, моделювати сценарії розвитку та модернізації, автоматизувати процеси моніторингу та звітності, інтегрувати дані із зовнішніми системами управління.



інтегрувалися через точкові об'єкти з налаштуваннями масштабування та вертикального зміщення.

Кольорова схема моделі розроблена з урахуванням функціонального призначення об'єктів: проїзна частина виконана в сірих тонах, тротуари - у темно-сірих відтінках, пішохідні переходи - білі, а світлофори - червоні. Така візуальна диференціація сприяє швидкій ідентифікації елементів інфраструктури та аналізу їх взаємного розташування.

Отримана 3D-модель ефективно демонструє просторові зв'язки між об'єктами, включаючи висотні зв'язки, щільність елементів та потенційні проблемні зони. Наприклад, чітко видно піднесення світлофорних конструкцій над дорогою, що дозволяє оцінити їх видимість для учасників дорожнього руху. Така деталізація відкриває широкі можливості для аналізу безпеки, планування реконструкції та оцінки комфорту інфраструктури.

Реалізований підхід до 3D-візуалізації доводить ефективність використання QGIS як повноцінного інструменту для створення цифрових двійників, забезпечуючи водночас гнучкість у подальшому використанні моделі – від аналітичних досліджень до інтеграції у веб-середовища через стандартні формати експорту. Отримана 3D-сцена служить не лише візуальним представленням інфраструктури, але й важливим інструментом для прийняття обґрунтованих рішень щодо її розвитку та модернізації.

### **3.6. Візуалізація та експорт 3D-близнюка (Qgis2threejs, WebGL)**

Заключним етапом створення цифрового двійника стало формування інтерактивної 3D-сцени, доступної для перегляду у веб-браузері. Для цього було використано спеціалізований плагін Qgis2threejs, який дозволяє трансформувати геопросторові дані з QGIS у формат WebGL. Плагін було встановлено через стандартний менеджер розширень QGIS (Плагіни → Керування та встановлення

плагінів), після чого в інтерфейсі програми з'явився новий інструмент Qgis2threejs Exporter.

Для векторних шарів було налаштовано різні типи візуалізації: полігональні об'єкти (дороги, тротуари) відображалися в режимі "Extruded" з висотою 0,1-0,2 м, лінійні об'єкти (пішохідні переходи) - тонкими пунктирними лініями, а точкові об'єкти (світлофори) - циліндри з заданою висотою (Рис 3.8.).

Колірна схема кожної категорії об'єктів була ретельно підібрана з урахуванням їх функціонального призначення, що забезпечило високу інформативність візуалізації.

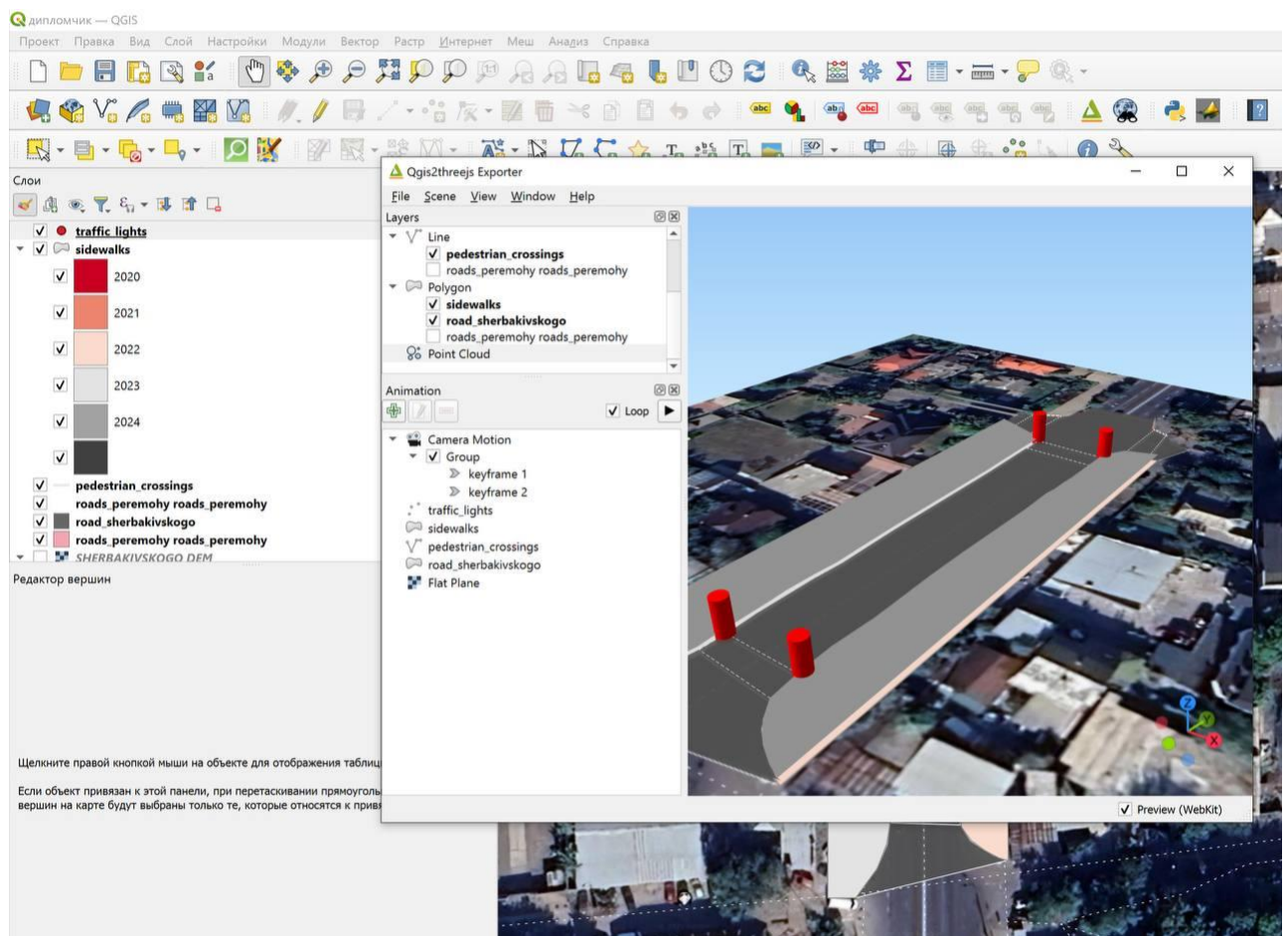


Рис 3.8. 3D-модель проїзду вулиці Данила Щербаківського

Кінцевим результатом роботи став HTML-файл, що містить повноцінну 3D-сцену з інтерактивними можливостями керування: обертання, масштабування, вимірювання

та пошарове відображення об'єктів. Отримана модель не потребує спеціального програмного забезпечення для перегляду та може бути інтегрована у веб-сайти. Це рішення значно розширює потенційну аудиторію користувачів цифрових двійників та полегшує процес прийняття управлінських рішень на основі візуалізованих даних.

### **Висновки до розділу 3**

У цьому розділі представлено комплексний підхід до розробки цифрового двійника міської транспортної інфраструктури з використанням безкоштовного програмного забезпечення QGIS та відкритих геопросторових даних. Як тестовий об'єкт було обрано ділянку вулиці Данила Щербаковського в Києві – типовий приклад міського середовища з розгалуженою мережею пішохідних зон, регульованих переходів та громадського транспорту.

Процес моделювання розпочався з інтеграції основних геопросторових матеріалів: супутникових знімків високої роздільної здатності (через сервіс XYZ Tiles), цифрової моделі рельєфу Copernicus GLO-30 (30 м) та векторних даних OpenStreetMap. На цій основі було створено детальну систему векторних шарів, де кожен елемент інфраструктури (від тротуарів до світлофорів) отримав свій власний тип геометрії (полігони, лінії, точки) та розширений опис атрибутів.

При роботі з 3D-візуалізацією було виявлено суттєве обмеження – недостатня точність доступних відкритих DEM (30 м), що не дозволяє повноцінно відображати локальні особливості рельєфу (схили, бордюри, перепади висот). Цей недолік частково компенсується використанням умовної екструзії векторних об'єктів.

Для створення інтерактивної 3D-візуалізації було використано плагін Qgis2threejs, який дозволив експортувати модель у веб-сумісний формат HTML/WebGL.

Важливим досягненням стала реалізація часової складової моделі без спеціалізованих плагінів – за допомогою атрибутивних даних та динамічної стилізації, що дозволяє відстежувати етапи розвитку інфраструктури.

Практичні результати довели, що навіть використовуючи лише відкриті ресурси, можна створити функціонального цифрового двійника, придатного для:

- моніторингу стану інфраструктури
- планування реконструкцій
- освітніх цілей
- потреб презентації в рамках концепції Розумного міста

Виявлені технічні обмеження (зокрема, щодо точності рельєфу) вказують на необхідність врахування цих факторів при масштабуванні методу на більші площі або для складніших інженерних завдань.

## ВИСНОВКИ

В рамках кваліфікаційної роботи розроблено та апробовано методика створення цифрового двійника ділянки міської дорожньої інфраструктури з використанням відкритих геопросторових даних та інструментів ГІС-аналізу. Основною метою дослідження була демонстрація можливостей побудови тривимірної моделі вуличного середовища, яка поєднує просторову, атрибутивну та часову інформацію без використання польових вимірювань.

У процесі виконання роботи було проведено аналіз теоретичних основ технології цифрових двійників, визначено їх ключові переваги, сфери застосування та значення в сучасному управлінні об'єктами міської інфраструктури. Були досліджені методи отримання та обробки геопросторових даних, зокрема ортофотопланів, цифрових моделей місцевості, даних з OpenStreetMap та інших відкритих джерел. На основі зібраної інформації розроблено покрокову методика створення цифрового двійника в середовищі QGIS - від формування векторних шарів до побудови 3D-візуалізації об'єктів. Як практичний приклад реалізовано модель ділянки вулиці Данила Щербаківського в Києві, яка включає ключові елементи транспортної інфраструктури: проїжджу частину, тротуари, пішохідні переходи, зупинки громадського транспорту та світлофори. Векторні об'єкти були екструдовані відповідно до висот, а вся сцена візуалізована за допомогою плагіна Qgis2threejs. Окремо продемонстровано можливість моделювання змін з часом на основі атрибутивних даних, що дозволяє аналізувати етапи реконструкції та динаміку розвитку об'єктів інфраструктури.

Практична частина підтвердила, що навіть використовуючи лише відкриті дані та безкоштовне програмне забезпечення, можна створити інформативний цифровий двійник, який має прикладну цінність. Отримана модель може бути застосовна для інвентаризації інфраструктури, планування ремонтів, обґрунтування інвестиційних рішень, а також для освітніх та презентаційних цілей.

Загалом, робота підтвердила доцільність використання відкритих ГІС-інструментів (включаючи QGIS) для створення цифрових моделей міського середовища. Подальший розвиток цього напрямку передбачає інтеграцію точніших DEM, даних датчиків (IoT), автоматизований збір атрибутів та підключення до загальноміських цифрових платформ у рамках концепції «Розумного міста».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Digital Twins [Електронний ресурс]. – URL:  
<https://www.it.ua/knowledgebase/technologyinnovation/cifrovoj-dvojnuk-digital-twin> (дата звернення: 07.01.2025)
2. Top 10 Digital Twin Companies Impacting Industry 4.0 Innovations in 2021 [Електронний ресурс]. – 2022. – URL:  
<https://www.emergenresearch.com/blog/top-10-digital-twincompanies-impacting-industry-4-0-innovations-in-2021> (дата звернення: 07.01.2025)
3. Types of Digital Twins: What You Need to Know [Електронний ресурс] // Program-Ace. – 2023. – Режим доступу: <https://program-ace.com/blog/types-of-digital-twins/> (дата звернення: 07.01.2025)
4. Романишин І. Класифікація та основні характеристики наземних 3D-сканерів / І. Романишин, А. Маліцький, В. Лозинський // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – Вип. 2 (24). – С. 69-74.
5. Сурін О. Лазерне сканування [Електронний ресурс]. – URL:  
<http://geodez.com.ua/lazerne-skanuvannya> (дата звернення: 07.01.2025)
6. Литвиненко Ю. О. Використання лазерних сканерів при геодезичних роботах у землеустрої [Електронний ресурс]. – URL:  
<http://dspace.knau.kharkov.ua/jspui/bitstream/123456789/956/1/Використання%20лазерних%20сканерів%20при%20геодезичних%20роботах%20у%20землеустрої.pdf> (дата звернення: 07.01.2025)
7. Leica Geosystem's company [Електронний ресурс]. – URL:  
[https://ngc.com.ua/ua/info/whats\\_hds.html](https://ngc.com.ua/ua/info/whats_hds.html) (дата звернення: 07.01.2025)

8. Бурштинська Х. В. Аерокосмічні знімальні системи : підручник / Х. В. Бурштинська, С. А. Станкевич. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 316 с.
9. Романченко І. С. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях : монографія / І. С. Романченко, С. Л. Данилюк, С. М. Чумаченко [та ін.]. – Київ : НАУ, 2016. – 232 с.
10. Teunissen P. J. G. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck. – Springer, 2017. – 1327 p.
11. Rizos C. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications / C. Rizos, P. J. G. Teunissen. – Artech House, 2017. – 734 p.
12. Манченко А. В. Використання фотограмметрії для створення 3D моделей / А. В. Манченко, В. Д. Солодов // Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем (IPST-2024) : тези доп. 13-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 11-13 листопада 2024 р. – Харків : НТУ "ХПИ", 2024. – С. 131-133.
13. Світличний О. О. Основи геоінформатики : навчальний посібник / О. О. Світличний, С. В. Плотницький. – Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. – 295 с.
14. Іщук О. О., Коржнев М. М., Кошляков О. Є. Просторовий аналіз і моделювання в ГІС : навч. посіб. / О. О. Іщук, М. М. Коржнев, О. Є. Кошляков. – Київ : ВПЦ «Київський університет», 2009. – 200 с.
15. OpenStreetMap [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.openstreetmap.org/#map=12/47.1229/37.5428> (дата звернення 10.04.2025)

16. Kukko A. Mobile Laser Scanning – System Development, Performance and Applications / A. Kukko. – Kirkkonummi : Finnish Geodetic Institute, 2013. – 247 p.
17. An Assessment of Digital Elevation Model for Terrain Analysis [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37803261/ajest\\_id1\\_2-libre.pdf](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37803261/ajest_id1_2-libre.pdf) ( дата звернення 10.04.2025)
18. Graser A. Learning QGIS – Third Edition / A. Graser. – 3rd ed. – Birmingham : Packt Publishing, 2016.
19. Пященко А. А., Смирнов В. В., Шлапак В. А. Формування віртуальної просторової моделі міської забудови на основі бази цифрових картографічних даних // Містобудування та територіальне планування. – К. : КНУБА, 2002. – Наук.-техн. збірник. – Вип. 13. – С. 131–140.
20. Москаль Н. М. Розробка технології створення та візуалізації 3D моделі місцевості // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідом. наук.-техн. зб. – Львів, 2003. – Вип. 63.
21. Москаль Н. М. Третій вимір в геоінформаційних системах: передумови та шляхи реалізації // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідом. наук.-техн. зб. – Львів, 2001. – Вип. 61. – С. 152–159.
22. Інфраструктура просторових даних : навч. посібник / А. А. Євдокімов, Н. О. Манакова, Т. С. Сенчук ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 159 с.
23. Isioye O. A., Jobin P. An assessment of digital elevation models (DEMs) from different spatial data sources // Asian Journal of Engineering, Sciences and Technology. – 2012. – Vol. 2, Issue 1. – P. 1–10.
24. Saastamoinen, U., Vikström, S., Helminen, V., Lyytimäki, J., Nurmio, K., Nyberg, E., & Rantala, S. (2022). The limits of spatial data? Sense-making within the

development and different uses of Finnish urban-rural classification. *Land Use Policy*, 120, 106231. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106231>