

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАФТИ І ГАЗУ  
Інститут архітектури, будівництва та енергетики  
Кафедра геодезії та землеустрою

Гавадзин Андрій Миколайович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК528.41  
(індекс)

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

**Створення топографічної основи для проектування та будівництва ліній  
електропередач за допомогою лідарного сканування**  
(назва роботи)

Геодезія та землеустрій  
(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій  
(шифр і назва спеціальності)

Здобувач освітнього ступеня Гавадзин А.М.  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник доц., к.т.н. Романюк В.В.  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри  
проф. Приходько М.М.  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент  
доц.  
(посада)(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів, мають посилання на відповідне джерело**

Івано-Франківськ  
2025 р.

# Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут архітектури, будівництва та енергетики

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

Приходько М. М.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

## З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Гавадзину Андрію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: ” Створення топографічної основи для проектування та будівництва ліній електропередач за допомогою лідарного сканування ”

керівник роботи доц., к.т.н . Романюк Володимир Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від “ 16” лютого 2025 року №09-30

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: 1.Топографічний план 1:500, с. Яблунів 2. Ортофотоплан с. Яблунів 3.Маршрути та висоти польотів 4.Хмара точок з лідару

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Розкриття принципів дії, видів лідару, його переваг над традиційними методами. 2. Як готується маршрут польоту, врахування рельєфу, природних перешкод, перекриття смуг. 3. Завантаження, фільтрація, класифікація, побудова ЦМР у Spatix, 3Dsurvey.5. Польове обстеження, вибір точок для прив'язки, використання GNSS-приймачів. 1.Ортофотоплан 2. Топографічний план 4.Ситуаційна схема, 5.Ортофотоплан з БПЛА

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Ознайомлення з літературою.	<b>16.02.2025</b>	
2	Ознайомлення технологією лідарного сканування.	27.02.2025	
3	Визначення об'єкта дослідження, формулювання проблеми та очікуваних результатів.	17.03.2025	
4	Аналіз та порівняння традиційного та нового методу топознімання.	02.04.2025 07.04.2025	
5	Виконання польотів, контроль якості збору інформації, фіксація координат топознаків.	28.04.2025 15.05.2025	
6	Робота в Digitals та AutoCAD, формування креслень, генерація шарів з об'єктами місцевості.	24.05.2025 01.06.2025	
7	Написання висновків та пропозицій щодо виконаної дослідницької та роботи.	<b>05.06.2025</b>	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Гавадзин А.М.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Романюк В.В.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Розрахунково-пояснювальна записка: 58 сторінки, 12 рисунків, 1 таблиці, 12 посилань.

Ця бакалаврська робота присвячена створенню топографічної основи для проєктування та будівництва ліній електропередач (ЛЕП) з використанням лідарного сканування з безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Метою дослідження є розробка методики зйомки складної місцевості за допомогою лідара, оцінка ефективності цього підходу в порівнянні з традиційними методами топографічної зйомки та створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) для подальшого проєктування ЛЕП.

У роботі розглянуто основні теоретичні засади топографічної зйомки, сучасні технології дистанційного зондування, принципи роботи лідарних систем і специфіку їх застосування в гірській місцевості. Особлива увага приділена етапам практичного виконання зйомки: розвідці об'єкта, плануванню польотного завдання, розміщенню топознаків, координуванню, виконанню польотів, обробці лідарних даних, класифікації поверхонь та формуванню кінцевої топографічної основи.

**Методологія дослідження** включає як практичне застосування обладнання (дрон DJI Matrice 350 RTK та лідар Zenmuse L2), так і обробку результатів у програмному забезпеченні (DJI Terra, Global Mapper, ArcGIS, QGIS).

**Результати дослідження** підтверджують ефективність лідарного методу для оперативного та точного отримання топографічних даних. Виявлено, що застосування лідара значно скорочує терміни польових робіт, підвищує точність моделі рельєфу та дозволяє швидше розпочати етап проєктування інженерних мереж. Практичне значення роботи полягає в можливості адаптації розробленої методики до різних типів місцевості та об'єктів інфраструктури.

**Ключові слова:** лідарне сканування, топографічна зйомка, БПЛА, цифрова модель рельєфу, топооснова, геодезія, ЛЕП.

## ABSTRACT

Calculation and explanatory note: 58 pages, 12 figures, 1 tables, 12 references.

This bachelor's thesis is dedicated to the development of a topographic base for the design and construction of power transmission lines (PTL) using LiDAR scanning with unmanned aerial vehicles (UAVs). The aim of the study is to develop a methodology for surveying complex terrain using LiDAR technology, evaluate its efficiency in comparison with traditional topographic methods, and create a digital terrain model (DTM) for further PTL planning.

The paper explores the theoretical foundations of topographic surveying, modern remote sensing technologies, the principles of LiDAR systems operation, and the specifics of their use in mountainous areas. Special attention is given to the practical stages of surveying: site reconnaissance, flight planning, ground control point placement, coordinate referencing, flight execution, data processing, point classification, and the final development of a topographic base.

The methodology includes both the practical use of equipment (DJI Matrice 350 RTK drone and Zenmuse L2 LiDAR sensor) and the processing of data using specialized software (DJI Terra, Global Mapper, ArcGIS, QGIS).

The results confirm the effectiveness of the LiDAR method for rapid and accurate acquisition of topographic data. It was found that LiDAR significantly reduces the time required for fieldwork, improves the accuracy of the terrain model, and enables a faster transition to the engineering design phase. The practical significance of the work lies in the possibility of adapting the developed methodology to various types of terrain and infrastructure projects.

**Keywords:** LiDAR scanning, topographic survey, UAV, digital terrain model, topographic base, geodesy, power transmission lines.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>1. Теоретичні засади створення топографічної основи за допомогою лідарного сканування</b> .....	8
<b>1.1 Супутникові технології (GNSS)</b> .....	10
<b>1.2 Аерофотозйомка з БПЛА</b> .....	13
<b>1.3 Мобільне сканування та наземні 3D-сканери</b> .....	16
<b>1.4 Комбіновані методи: синергія LiDAR, GNSS, фотограмметрії та ГІС</b> .....	17
<b>2. Методика створення топографічної основи для проектування ліній електропередач з використанням лідарного сканування</b> .....	20
<b>2.1. Підготовчий етап: планування топографічної зйомки для ЛЕП</b> ...	20
<b>2.2. Вибір та характеристика обладнання для лідарного сканування</b> ..	23
<b>2.3. Розробка та виконання польотного завдання для БПЛА</b> .....	27
<b>2.4. Обробка та аналіз отриманих лідарних даних</b> .....	29
<b>2.5. Використання даних для створення топографічної основи під ЛЕП</b> .....	30
<b>3. Практичне застосування лідарного сканування дрона для створення топографічної основи проєктуванні ЛЕП.</b> ....	34
<b>3.1. Підготовка до зйомки: розвідка місцевості та планування польотів</b> .....	34
<b>3.2. Розміщення топонімів і координування</b> .....	37
<b>3.3. Виконання польотів з лідаром</b> .....	41
<b>3.4. Завантаження та первинна обробка даних</b> .....	44
<b>3.5. Формування цифрової моделі рельєфу та цифрування</b> .....	47
<b>3.6. Завершальний етап: створення топооснови для проєкту ЛЕП</b> .....	50
<b>ВИСНОВОК</b> .....	54
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	57

У сучасних умовах розвитку інженерної інфраструктури України надзвичайно важливим є застосування новітніх технологій у геодезії, зокрема при проектуванні та будівництві ліній електропередач (ЛЕП). Одним із ключових етапів цього процесу є створення топографічної основи, яка слугує базою для подальших інженерних рішень. Традиційні методи топографічної зйомки хоча й залишаються актуальними, але мають певні обмеження в швидкості, точності та масштабах охоплення. У зв'язку з цим усе більшої популярності набуває технологія лідарного сканування (LiDAR), яка дозволяє оперативнo отримати високоточні цифрові моделі рельєфу місцевості.

Застосування лідару в геодезичних дослідженнях відкриває нові можливості для точного картографування великих територій, особливо у складних природних умовах. Це особливо актуально при проектуванні ЛЕП, де врахування рельєфу, перешкод, типу покриття та інших чинників відіграє вирішальну роль. Прикладом ефективного використання такої технології є проекти, в яких я брав участь.

**Мета дослідження** — дослідити методику створення топографічної основи для проектування ЛЕП з використанням лідарного сканування, проаналізувати її переваги та практичне застосування на прикладі реалізованих проектів.

**Об'єкт дослідження:** технологічний процес створення топографічної основи для ЛЕП.

**Предмет дослідження:** використання лідарного сканування у геодезичних роботах для проектування ЛЕП.

**Завдання дослідження:**

- розглянути теоретичні засади лідарного сканування;
- проаналізувати вимоги до топографічної основи при проектуванні ЛЕП;
- дослідити процес обробки даних лідару;
- розглянути практичний приклад реалізації проекту з використанням цієї технології.

**1. Теоретичні засади створення топографічної основи за допомогою лідарного сканування**

У сучасному світі розвиток технологій значно трансформував методи топографічної зйомки, що традиційно слугувала основою для створення картографічних матеріалів, інженерних проєктів, кадастрових планів і геоінформаційних баз даних. Топозйомка, як напрямок прикладної геодезії, завжди вимагала точності, детальності й достовірності. Сьогодні ці вимоги зростають, адже зйомка виконує не лише картографічну, а й аналітичну функцію — її результати використовуються для моделювання, моніторингу, планування та автоматизації будівельних процесів.

Зі стрімким розвитком цифрових технологій та обчислювальних потужностей на перший план вийшли методи дистанційного зондування Землі, цифрової фотограмметрії, супутникової геодезії та лазерного сканування. Їх особливістю є здатність формувати велику кількість просторових даних за короткий проміжок часу з високою просторовою роздільною здатністю. Вони не замінили традиційні інструментальні методи, але істотно розширили арсенал геодезиста, підвищили ефективність і точність зйомки, а також розширили можливості її виконання в складних природних умовах або на великих площах.

Сучасні методи топографічної зйомки мають широке практичне застосування в будівництві, архітектурному проєктуванні, землеустрої, ландшафтному плануванні, гідрології, екології, оборонній сфері та транспортній інфраструктурі. Особливе значення вони мають під час проєктування лінійних об'єктів — таких як дороги, залізниці, газопроводи чи лінії електропередач. Тут критично важливо мати точну цифрову модель рельєфу, яка враховує особливості місцевості, а також дозволяє провести аналіз альтернативних трас, оцінити обсяги земляних робіт та спроектувати об'єкти з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Завдяки таким методам, як лазерне сканування (LiDAR) або GNSS-зйомка, фахівці можуть швидко отримати детальні тривимірні моделі місцевості, що значно полегшує процеси інженерного планування. Крім того, сучасні методи дозволяють створювати динамічні геопросторові бази даних,

які постійно оновлюються, забезпечуючи актуальність інформації для органів державної влади, приватних компаній чи громадських ініціатив.

### **1. 1 Супутникові технології (GNSS)**

Одним із найвідоміших і найпоширеніших методів сучасної топографічної зйомки є використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Вони стали основою для сучасної геодезії, бо забезпечують просторові координати з високою точністю у будь-якій точці Землі незалежно від погодних умов.

GNSS — це сукупність супутникових навігаційних систем різних країн: американської GPS, російської ГЛОНАСС, європейської Galileo, китайської BeiDou. Сучасні GNSS-приймачі здатні працювати одночасно з кількома системами, що дає змогу отримувати надійні координати навіть у складних умовах — таких як щільна міська забудова, лісисті райони або гірські місцевості.

GNSS працює за принципом обчислення відстані до щонайменше чотирьох супутників, від яких приймач одночасно отримує сигнали. На основі часу проходження сигналу до приймача обчислюється його просторове положення (широта, довгота, висота). У геодезичній практиці використовуються професійні приймачі, які здатні досягати сантиметрової точності, особливо при використанні диференціальних методів. [10]

Одним із найпопулярніших методів є RTK (Real Time Kinematic) — кінематичне визначення координат у режимі реального часу. При цьому використовується пара: базова станція (або мережа VRS) і мобільний приймач. RTK забезпечує точність до 1–2 см при умові стабільного сигналу та якісного зв'язку.

Інший метод — PPK (Post Processed Kinematic) — передбачає запис сигналів у польових умовах із подальшою обробкою в офісі. Цей метод є надійнішим у складних умовах, де можуть виникати перебої зв'язку, однак він вимагає більше часу на обробку.

### Переваги GNSS:

- Висока точність: при правильній обробці можна отримати координати з точністю до 1 см;
- Швидкість зйомки: у порівнянні з тахеометром, GNSS дозволяє швидше обстежити великі площі;
- Універсальність: GNSS можна використовувати як у відкритій місцевості, так і в міських умовах;
- Автоматизація: координати записуються автоматично, знижуючи людський фактор;
- Сумісність із ГІС: дані з приймачів можна легко інтегрувати в геоінформаційні системи.

### Недоліки:

- Залежність від супутникового сигналу: у каньйонах, густих лісах або приміщеннях сигнал може бути недоступним або спотвореним;
- Потреба в корекційних даних: RTK вимагає передачі даних у реальному часі, що потребує зв'язку;
- Чутливість до іоносферних збурень і атмосферних умов;
- Вартість обладнання: професійні приймачі дорогі, хоча ціни з часом знижуються.

GNSS-технології незамінні під час створення опорних геодезичних мереж, виконання кадастрових зйомок, прокладання комунікацій, трасування доріг і ліній електропередач, де важлива швидкість і точність визначення координат.

LiDAR (Light Detection and Ranging — виявлення світла та визначення дальності) — це одна з найсучасніших технологій для створення цифрових моделей рельєфу та об'єктів на земній поверхні. Цей метод полягає у вимірюванні відстаней до об'єктів за допомогою лазерних імпульсів. Його застосування стало особливо актуальним у геодезії, інженерних

вишукуваннях, лісовому господарстві, гідрографії, археології та, зокрема, для проектування лінійних об'єктів — таких як дороги, залізниці, ЛЕП тощо.

LiDAR-сенсор випромінює тисячі імпульсів лазера за секунду. Вони відбиваються від поверхонь (земля, рослинність, споруди) і повертаються назад до приймача. Вимірюється час проходження імпульсу «туди й назад», і на основі цього обчислюється відстань до об'єкта. Додавши до цього координати положення пристрою та орієнтацію у просторі (завдяки GNSS і IMU — інерціальним системам), отримують точні 3D-координати точок.

Кожен лазерний імпульс може мати кілька відбиттів — це дозволяє знімати різні шари (наприклад, верхівки дерев, крони, підлісок і ґрунт під ними). Таким чином, навіть у лісових масивах можна побудувати точну цифрову модель земної поверхні.

Платформи для збору даних:

- Літакові (авіаційні) LiDAR — використовуються для великомасштабних картографічних проєктів;
- Наземні (статичні та мобільні) системи — встановлюються на штатив або транспорт, застосовуються для обмірів будівель, вулиць, фасадів, тунелів;
- БПЛА (дрони) з LiDAR — найбільш гнучке рішення для топографічної зйомки середньої деталізації на важкодоступній місцевості.

Особливе значення для сучасної топозйомки має лідарне сканування з дронів — завдяки малій вазі обладнання, зйомка стала доступною для приватних компаній і навіть окремих фахівців. [11]

Переваги LiDAR:

- Висока щільність точок: від кількох до сотень точок на квадратний метр;
- Проникнення крізь рослинність: можна отримати модель ґрунту навіть у густому лісі;

- Швидкість зйомки: дрон зі сканером може покрити десятки гектарів за кілька годин;
- Можливість створення 3D-моделей: для архітектурного моделювання, BIM, містобудування;
- Автоматизованість обробки: сучасні програми дозволяють класифікувати точки, генерувати моделі рельєфу, нахилу, об'єму тощо.

Обмеження:

- Висока вартість обладнання: хоча останніми роками з'явилися доступніші варіанти;
- Складність обробки: великі обсяги даних вимагають потужного програмного забезпечення та кваліфікованих операторів;
- Погодні умови: дощ, туман або сніг можуть впливати на точність сканування;
- Не завжди фіксує колірні характеристики поверхні — на відміну від фотограмметрії.

LiDAR особливо актуальний у проектах, де потрібна висока вертикальна точність і щільність знімання. Наприклад, для трасування ЛЕП він дозволяє точно виміряти висоту дерев, ухили схилів і визначити небезпечні зони, де провід може контактувати з об'єктами.

## **1.2 Аерофотозйомка з БПЛА**

Аерофотозйомка з використанням дронів (БПЛА) стала однією з найпоширеніших методик у сучасній топографічній зйомці. Її популярність зумовлена доступністю технології, високою швидкістю збору даних, відносно низькою вартістю обладнання та можливістю охоплення великих площ з детальним результатом.

На безпілотник встановлюється камера (RGB, multispectral або навіть тепловізійна). Під час польоту дрон автоматично робить серії знімків місцевості з перекриттям 70–80%. Потім ці зображення обробляються в спеціальному програмному забезпеченні (Agisoft Metashape, Pix4D,

DroneDeploy тощо) методом фотограмметрії — тобто на основі знімків і відомого положення камери реконструюється 3D-модель місцевості. [12]

Вихідні продукти такої зйомки:

- ортофотоплан (виправлене зображення без спотворень рельєфу),
- цифрова модель поверхні (DSM),
- цифрова модель рельєфу (DTM),
- хмара точок,
- топографічні плани та карти.

Переваги:

- Мобільність: запуск дрона можливий навіть у важкодоступній місцевості (гори, ліси, болота);
- Швидкість: за 1 годину можна облетіти до 100 га;
- Висока деталізація: роздільна здатність до 1–3 см/піксель;
- Колірна інформація: знімки несуть як геометричні, так і візуальні характеристики об'єктів;
- Можливість роботи без безпосереднього доступу до об'єкта.

Недоліки:

- Залежність від погоди: вітер, дощ або туман ускладнюють політ;
- Обмеження з боку законодавства: у деяких зонах потрібен дозвіл;
- Не «бачить» під рослинністю: не може проникати крізь дерева, як LiDAR;
- Менша точність по висоті, ніж у лідара — хоча достатня для масштабів 1:500–1:1000.

Дронова аерофотозйомка ідеально підходить для створення топопланів для генпланів, будівництва, проектування мереж, дорожніх об'єктів, сільськогосподарського моніторингу тощо. Часто вона використовується в

поєднанні з GNSS-прив'язкою або наземними реперними точками (GCPs), що дозволяє досягати геодезичної точності.

Цифрова фотограмметрія — це метод вимірювання об'єктів на основі аналізу цифрових фотографій, зазвичай отриманих з літаків, дронів або наземних камер. Її застосування у геодезії дозволяє створювати точні плани, ортофотоплани, цифрові моделі рельєфу (ЦМР), 3D-реконструкції та інші просторові продукти, які використовуються для картографування, будівництва, управління територіями та містобудування. [13]

Основні етапи цифрової фотограмметрії:

1. Збір зображень: за допомогою спеціальних камер (високої роздільної здатності, каліброваних) з високим перекриттям (до 80%);
2. Прив'язка до координат: використовується GNSS або наземні контрольні точки (GCP);
3. Створення хмари точок: програма (наприклад, Agisoft Metashape) визначає однакові об'єкти на різних знімках і за допомогою фототріангуляції розраховує їх просторові координати;
4. Побудова цифрової моделі поверхні;
5. Генерація ортофотоплану, 3D-моделей, ізоліній, топопланів.

Переваги цифрової фотограмметрії:

- Висока деталізація (до 1 см на піксель);
- Візуально зрозумілий матеріал;
- Можливість повторного аналізу в майбутньому;
- Відносна дешевизна порівняно з LiDAR;
- Придатна для містобудування, археології, обмірів фасадів, моніторингу.

Обмеження:

- Чутливість до освітлення, тіней, погодних умов;
- Неможливість «бачити» крізь рослинність;
- Точність залежить від калібрування камери та якості перекриття;

- Висотна точність гірша, ніж у лідара.

Цифрова фотограмметрія, незважаючи на свою меншу вертикальну точність порівняно з LiDAR, є надзвичайно ефективним інструментом при проєктуванні об'єктів, де критично важлива детальність та візуальна складова (наприклад, фасади історичних будівель, архітектурне середовище, міські території). [14]

### **1.3 Мобільне сканування та наземні 3D-сканери**

Ще одним сучасним методом топографічної зйомки є мобільне лазерне сканування, при якому обладнання встановлюється на автомобіль, поїзд або іншу рухому платформу. Воно поєднує LiDAR, GPS і інерційну навігацію для швидкого збору 3D-інформації вздовж доріг, міських територій, залізниць.

Існують також стаціонарні наземні лазерні сканери, які встановлюються на штатив і виконують повну панорамну зйомку об'єкта (360° по горизонталі і до 300° по вертикалі).

Основні переваги мобільного та наземного сканування:

- Надзвичайно висока точність (до міліметра);
- Швидкість збору даних — кілька мільйонів точок за секунду;
- Придатні для міських середовищ, тунелів, мостів, інтер'єрів;
- Можливість створення точних 3D-моделей об'єктів.

Недоліки:

- Дороге обладнання;
- Великий обсяг даних — потребує професійного програмного забезпечення та серверних ресурсів;
- Не завжди підходить для великих ділянок відкритої місцевості (дрони ефективніші).

Наземні сканери активно використовуються для зйомки фасадів, промислових об'єктів, технічного обстеження мостів, ГЕС, тунелів, станцій та ангарів. Їхня точність та рівень деталізації дозволяє не тільки знімати топографію, а й виявляти тріщини, викривлення, дефекти матеріалів. [15]

## **1.4 Комбіновані методи: синергія LiDAR, GNSS, фотограмметрії та ГІС**

У реальній практиці геодезисти все частіше застосовують інтегровані рішення, коли поєднують декілька методів зйомки: GNSS-приймачі, дрони, LiDAR, фотограмметрію та геоінформаційні системи (ГІС). Це дозволяє:

- Досягати максимальної точності та надійності;
- Покривати великі території та детальні об'єкти одночасно;
- Зменшувати час на польові роботи за рахунок автоматизації;
- Формувати багат шарові карти та 3D-репрезентації.

Приклади комбінованого застосування:

- Проектування ЛЕП: дрон із лідаром + GNSS + ортофотозйомка + цифровий топоплан;
- Моніторинг зсувів ґрунту: наземний сканер + фотограмметрія + аналіз у ГІС;
- Реконструкція доріг: мобільне сканування + фотозйомка + GPS;
- Урбаністика: ортофотоплани з дрона + LiDAR з літака + цифрова 3D-модель міста.

Роль ГІС у сучасній топозйомці:

Геоінформаційні системи — це платформи, які дозволяють інтегрувати, аналізувати, моделювати та візуалізувати просторові дані. У топографічній зйомці ГІС відіграють роль:

- Центру збору даних з різних джерел (GPS, LiDAR, дронів, сканерів);
- Інструменту для просторового аналізу (нахили, профілі, видимість, гідрологія);
- Середовища для прийняття рішень при проектуванні інфраструктури.

ГІС також дають можливість створення цифрового кадастру, цифрових двійників територій, моделювання екологічного навантаження, і є невіддільною складовою сучасної топографічної зйомки. [15]

З початку XXI століття технологічна революція охопила і сферу геодезії. Новітні методи топозйомки стають не лише точнішими, а й значно інтелектуальнішими, завдяки стрімкому розвитку штучного інтелекту (ШІ), інтернету речей (IoT), хмарних обчислень, мобільних додатків та автономних систем.

Одним із найперспективніших напрямів у сучасній геодезії є застосування штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML). Вони дозволяють автоматизувати обробку величезних обсягів просторових даних, які надходять із дронів, сканерів, супутників.

Зокрема, AI застосовується для:

- Автоматичного розпізнавання об'єктів (будівлі, дороги, дерева) на зображеннях;
- Виявлення змін на місцевості (моніторинг забудови, ерозії, зсувів);
- Класифікації поверхонь (асфальт, трава, вода, бетон);
- Побудови та очищення хмар точок без втручання оператора.

Наприклад, під час обстеження ліній електропередач, алгоритми глибокого навчання можуть автоматично виявляти опори, дроти, просіки та потенційно небезпечні перешкоди (наприклад, дерева, які можуть спричинити аварії).

Це суттєво скорочує час обробки і підвищує надійність результатів, особливо на масштабних територіях, де людський фактор може стати обмеженням.

Інтернет речі і Smart-сенсори поступово входять і в геодезію. Використання розумних сенсорів, які можуть збирати дані про рухи ґрунту, нахил опор, вібрації або температуру, дозволяє створювати інтелектуальні системи моніторингу територій.

Такі сенсори інтегруються з геодезичними мережами та підключаються до централізованих платформ. Наприклад:

- Під час будівництва мостів сенсори відстежують деформації в режимі реального часу;
- У гірничих районах фіксується просідання чи зсуви масивів;
- На дамбах та ГЕС сенсори моніторять напруги в конструкціях;
- На лініях ЛЕП – датчики аналізують коливання опор.

Це створює передумови для попереджувального обслуговування інфраструктури на основі точних геопросторових даних.

Хмарні технології дозволяють відмовитися від важкого локального ПЗ на користь онлайн-сервісів. Web-GIS платформи (наприклад, ArcGIS Online, QGIS Cloud, Mapbox) забезпечують:

- Швидкий обмін геоданими між учасниками проекту (польовики, інженери, замовники);
- Віддалений доступ до результатів топозйомки;
- Розширені функції обробки, візуалізації та аналізу просторових даних;
- Захищене зберігання хмарних даних;
- Автоматизацію побудови звітів, карт, 3D-сцен.

Сьогодні геодезист може виконати польову зйомку дроном, а за кілька хвилин клієнт у США вже переглядає ортофотоплани в браузері на планшеті.

З кожним роком на ринку геодезії з'являються автономні дрони, роботизовані тахеометри та наземні платформи, які здатні працювати з мінімальним втручанням людини. Сучасні дрони автоматично планують маршрут, уникають перешкод, визначають параметри зйомки, коригують свою позицію за допомогою RTK GNSS та здійснюють посадку самостійно. [16]

Наземні роботи (наприклад, Boston Dynamics Spot з лідаром) вже зараз застосовуються для обстеження небезпечних об'єктів, кар'єрів, промислових споруд, де робота людини є ризикованою.

Автоматизація призводить до:

- Зниження людського фактора;
- Підвищення точності;
- Прискорення польових робіт;
- Зменшення витрат на персонал.

Лідар не може проникати під землю або крізь тверді непрозорі об'єкти. Тобто, виявлення комунікацій під землею, трубопроводів або закритих об'єктів потребує додаткових методів (наприклад, георадару чи архівних даних). [17]

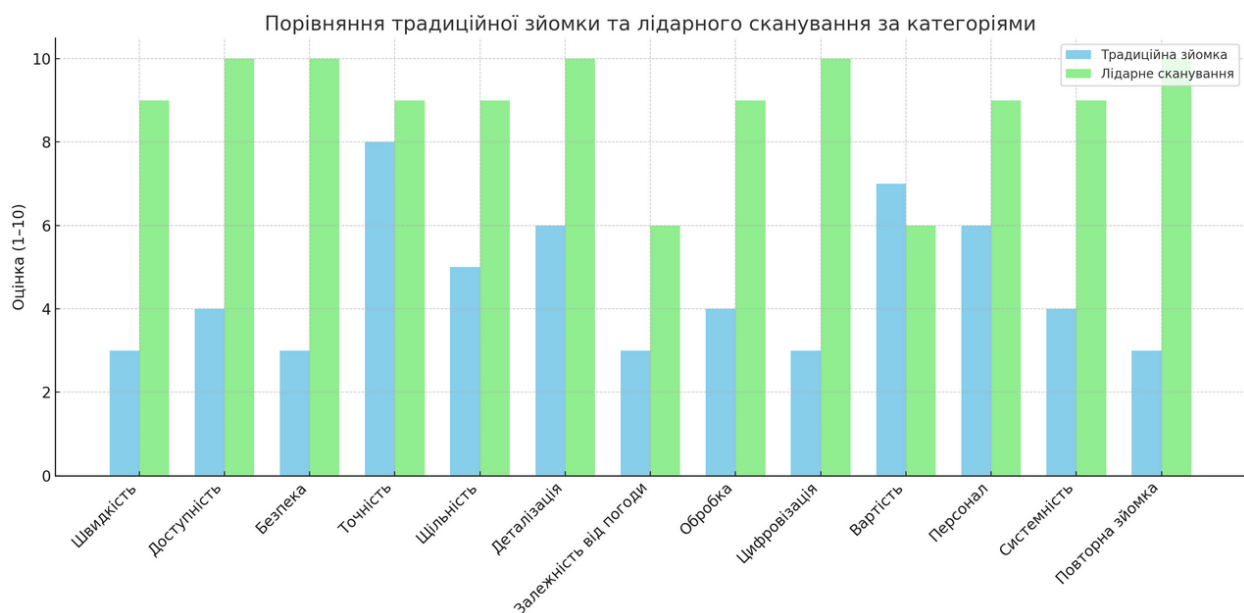


Рис. 1.1 - Порівняння традиційної зйомки та лідарного сканування за категоріями

## 2. Методика створення топографічної основи для проектування ліній електропередач з використанням лідарного сканування

### 2.1. Підготовчий етап: планування топографічної зйомки для ЛЕП

Успішне виконання топографічної зйомки для проектування ліній електропередач (ЛЕП) значною мірою залежить від якісного планування

підготовчого етапу. На цьому етапі визначаються технічні завдання, обираються інструменти та методи збору даних, виконується аналіз місцевості, а також здійснюється підготовка до виконання польових робіт. З огляду на специфіку об'єкта — проектування ЛЕП — особлива увага приділяється довжині траси, складності рельєфу, наявності лісових масивів, водойм, населених пунктів та інженерної інфраструктури. У цьому підрозділі розглянемо ключові елементи планування топографічної зйомки з використанням дрону DJI Matrice 350 RTK та лідару Zenmuse L2.

Першим кроком є формування чіткого технічного завдання, у якому зазначається мета виконання топографічної зйомки, вимоги до точності, масштаб вихідного плану (часто 1:1000 або 1:2000), тип необхідних геоданих (цифрова модель місцевості, горизонталі, профілі, перетини тощо), а також обсяг і склад вихідної документації. Для проектування ЛЕП важливо враховувати потребу в точних абсолютних відмітках для опор, вертикальних профілях та розрахунках просвітів між проводами.

Перед виїздом на місцевість проводиться детальний аналіз району запланованих робіт. Він включає:

- Отримання топографічних та ортофотопланів району (наприклад, з відкритих джерел — Geoportal, OpenStreetMap або місцевих баз даних);
- Аналіз типів поверхні: чи є лісові масиви, відкриті поля, болота, водойми, населені пункти;
- Визначення зон обмеженого доступу — прикордонні зони, санітарні зони, заборонені для польотів території;
- Перевірка метеоумов — оптимальні умови для польотів БПЛА: слабкий вітер (до 5–6 м/с), відсутність опадів, мінімальна хмарність.

Для забезпечення високої точності даних, особливо під час створення цифрової моделі рельєфу, обов'язковим є встановлення або використання вже

наявних геодезичних опорних пунктів. У випадку з Matrice 350 RTK, який підтримує RTK-корекції в режимі реального часу, важливо мати базову станцію або доступ до мережі NTRIP (наприклад, Trimble VRS). Якщо RTK-зв'язок нестабільний або неможливий, застосовується режим РРК (кінематичний постобробіток), для якого точність географічних координат обов'язково повинна бути підтверджена традиційними геодезичними методами — наприклад, GNSS-спостереженнями з двочастотним приймачем.

У зв'язку з тим, що зйомка виконується за допомогою безпілота, необхідно дотримуватись чинних правил авіаційної безпеки та використання БПЛА, зокрема: подання повідомлення до відповідного органу цивільної авіації про виконання польотів, перевірка наявності безпечного повітряного коридору, особливо поблизу аеропортів, повідомлення місцевих адміністрацій або землекористувачів про виконання польотів над їх територією.

Ці заходи знижують юридичні ризики та сприяють безперешкодному виконанню польових робіт.

При підготовці до польових робіт важливо врахувати:

- Доступність місцевості для проїзду автотранспортом;
- Місця безпечного старту та посадки дрона, бажано на відкритих ділянках;
- Наявність мобільного зв'язку для отримання RTK-корекцій у режимі онлайн.

Оператори повинні мати змогу пересуватися по маршруту ЛЕП з урахуванням важкодоступних ділянок, наприклад, ярів, густих лісів або заболочених зон. Також слід передбачити варіанти евакуації у разі непередбачуваних ситуацій.

На завершальному етапі формується конкретне польотне завдання, яке включає:

- Довжину та ширину ділянки зйомки;
- Оптимальну висоту польоту (для Zenmuse L2 — зазвичай 50–120 м);

- Швидкість дрона, перекриття ліній сканування;
- Режими сканування (одноразове чи повторне покриття для підвищення щільності хмари точок);
- Налаштування частоти збору даних.

DJI Matrice 350 RTK у поєднанні з Zenmuse L2 дозволяє досягати щільності хмари точок до 240 000 точок/сек., що достатньо для створення детальної цифрової моделі місцевості навіть у складному рельєфі. Оптимальна висота польоту та швидкість руху обираються залежно від вимог до точності (зазвичай до 5 см по висоті) і типу покриття (ліс, рівнина, забудова).



Рис. 2.1 - Дрон DJI Matrice 350 RTK

## **2.2. Вибір та характеристика обладнання для лідарного сканування**

У сучасній геодезії вибір обладнання є одним із ключових чинників, що визначають точність, ефективність і успішність реалізації проекту. Особливо це стосується завдань, пов'язаних із проектуванням і будівництвом ліній електропередач, де велике значення мають як деталізація рельєфу, так і виявлення потенційних перешкод (рослинність, інженерні споруди, нерівності рельєфу тощо). У зв'язку з цим виникає потреба в комплексному технічному рішенні, що забезпечує збір тривимірних даних місцевості з високою точністю

та швидкістю. Таким рішенням стало використання безпілотного літального апарата DJI Matrice 350 RTK у комбінації з лідарним модулем Zenmuse L2.

Вимоги до обладнання

При виборі обладнання для реалізації проекту були враховані кілька важливих факторів:

- Необхідна точність вимірювань для створення топографічної основи під проектування ЛЕП;
- Великі площі сканування та протяжність маршрутів, які потребують автономності та тривалості польоту;
- Рельєфна та лісиста місцевість, яка ускладнює використання традиційних методів;
- Швидкість виконання робіт, що важливо при стислій логістиці проекту.

Після порівняння доступних рішень було обрано високоточний безпілотник DJI Matrice 350 RTK із встановленим лідарним сенсором Zenmuse L2 — сучасне обладнання, яке забезпечує точне, оперативне та безпечне картографування складних територій.

Безпілотник DJI Matrice 350 RTK створений спеціально для професійного використання в галузях, що потребують високої точності: геодезія, будівництво, енергетика, аварійне реагування. Цей дрон оснащений надсучасною авіонікою, потужною системою позиціонування та модульною архітектурою, що дозволяє швидко інтегрувати спеціалізовані датчики.

Основні переваги:

- RTK-позиціонування. Дрон має вбудований RTK-приймач, що дозволяє досягати сантиметрової точності під час польоту. Це особливо важливо для лідарного сканування, адже точність GPS-даних напряду впливає на точність геоприв'язки хмари точок.
- Стабільність у польоті. Завдяки розвиненій системі автопілота та шести датчикам виявлення перешкод, дрон може безпечно виконувати польоти навіть у складних умовах.

- Висока вантажопідйомність. Matrice 350 RTK підтримує встановлення потужних сенсорів, таких як Zenmuse L2, та не втрачає стабільності під час польоту.

- Час автономної роботи до 55 хвилин. Така тривалість дозволяє охоплювати великі ділянки без частих посадок на зарядку.

Ця платформа в поєднанні з правильним плануванням польоту дозволяє виконувати сканування протяжних маршрутів із мінімальними витратами часу та зусиль.

Сенсор Zenmuse L2 — це друга генерація лідарних модулів DJI, яка поєднує передові лазерні технології, оптику та інерційну навігацію в одному пристрої. Завдяки цим можливостям Zenmuse L2 став потужним інструментом для тривимірного картографування, здатним забезпечити високу деталізацію навіть на складному рельєфі.

Чим вирізняється Zenmuse L2:

- Дальність сканування до 450 метрів. Цього достатньо для збирання даних у зонах, недоступних для наземної зйомки.

- Щільність хмари точок до 240 000 точок/сек.. Завдяки високій щільності можна чітко визначити рельєф, окремі об'єкти, будівлі, дерева.

- Підтримка до 5 відбитків. Це дозволяє “бачити” крізь рослинність, що особливо важливо при зйомці трас ЛЕП, які часто проходять через лісисті або зарослі території.

- RGB-камера 20 МП із 4/3 матрицею забезпечує фотографічне супроводження сканування, дозволяючи створювати ортофотоплани або текстуровані 3D-моделі.

- Вбудована інерціальна система (IMU) забезпечує точність вимірювань незалежно від положення дрона у просторі.

Особливість Zenmuse L2 полягає в тому, що дані збираються в реальному часі та одразу синхронізуються з GPS/RTK-позиціонуванням. Це дозволяє значно скоротити час на постобробку і зменшити кількість помилок у даних.



Рис. 2.2 - Лідар Zenmuse L2

Застосування DJI Matrice 350 RTK із Zenmuse L2 дозволяє:

- Виконати швидке сканування кількох кілометрів траси ЛЕП за одну польотну сесію;
- Отримати точну цифрову модель рельєфу, яка дозволяє проектувати опори ЛЕП з урахуванням ухилів, ярів, водойм;
- Виявити перешкоди, які можуть загрожувати безпеці експлуатації ЛЕП (дерева, будівлі, лінії забудови);
- Здійснити контроль обсягів земляних робіт;
- Провести візуальний огляд території завдяки RGB-знімкам високої роздільної здатності.

Такий підхід дозволяє мінімізувати кількість польових виїздів і зменшити участь людського ресурсу в небезпечних зонах.

### **2.3. Розробка та виконання польотного завдання для БПЛА**

Етап розробки та виконання польотного завдання є ключовим у процесі створення топографічної основи за допомогою лідарного сканування. Від правильно спланованої місії залежить точність та повнота отриманих просторових даних. У даному підрозділі розглянемо основні етапи підготовки польотного завдання, вимоги до параметрів польоту, особливості в гірських умовах та процес виконання самих польотів.

Перш за все, до початку будь-яких дій, необхідно вивчити місцевість, на якій планується проведення аерозйомки. Це включає аналіз топографічної ситуації, доступності території, наявності перешкод (високі дерева, лінії електропередач, будівлі), а також потенційні джерела радіоперешкод. Особлива увага приділяється безпеці польотів — як з погляду БПЛА, так і людей або об'єктів на землі. У гірській місцевості необхідно враховувати великі перепади висот, які можуть ускладнити стабільний політ дрона та потребують адаптації траєкторії польоту під рельєф [6].

Наступний етап — планування маршруту польоту. Для цього використовуються програмні засоби (наприклад, DJI Pilot, UgCS, DroneDeploy), у яких задаються такі параметри:

- Висота польоту (в залежності від рельєфу — може варіюватися від 50 до 120 м);
- Швидкість польоту (зазвичай 4–7 м/с);
- Перекриття між маршрутами (оптимально 20–30%);
- Напрямок сканування (вздовж чи впоперек схилів);
- Кількість маршрутів і батарей, необхідних для повного покриття території.

Окремо формується технічне завдання для місії, в якому вказується площа зйомки, координати меж ділянки, технічні характеристики обраного

БПЛА, тип датчика (у нашому випадку — лідар Zenmuse L2), режим зйомки та формат збереження даних. Важливо також передбачити наявність RTK-позиціонування або РРК-обробки для забезпечення точності [8].

Перед польотом виконується ретельна підготовка дрона. До цього належать:

- Перевірка справності обладнання (дрон, лідар, контролери);
- Зарядка та заміна акумуляторів;
- Калібрування ІМУ, компаса та гіроскопів;
- Тестування зв'язку з базовою станцією RTK;
- Завантаження маршруту на контролер.

У момент виконання польотного завдання дрон піднімається в повітря та виконує політ згідно із завантаженим маршрутом. Пілот або оператор спостерігає за процесом у реальному часі через наземну станцію. Особливо важливо в гірських умовах постійно контролювати висоту відносно рельєфу, аби уникнути зіткнень із підвищеннями або деревами. Програмне забезпечення зазвичай враховує дані ЦМР або DEM для адаптивного слідування за поверхнею [9].

У разі великої площі або складної геометрії ділянки виконується кілька польотів з послідовною зміною акумуляторів. Після кожного польоту дані попередньо зберігаються та перевіряються на наявність помилок. У разі виявлення непокритих ділянок планується додатковий політ для їх зйомки.

Завершальним етапом є підтвердження успішності виконання місії. Для цього аналізується лог польоту, покриття території, якість лідарних точок, синхронізація з координатами та стабільність даних. Якщо всі критерії дотримані, матеріали передаються до наступного етапу — обробки та аналізу даних.

У підсумку, грамотно складене польотне завдання є запорукою точного та ефективного збору лідарних даних. Особливо в умовах складного гірського рельєфу необхідна висока увага до деталей маршруту, адаптації висоти та дотримання технічних стандартів польоту.

## 2.4. Обробка та аналіз отриманих лідарних даних

Після завершення польотів із використанням дронів і лідарного сканера розпочинається один із найвідповідальніших етапів — обробка та аналіз отриманих даних. Саме від цього етапу залежить якість топографічної основи, яку буде використано для проєктування ліній електропередач.

Першим кроком є завантаження та систематизація всіх зібраних матеріалів. До обробки потрапляють лідарні скани (хмара точок), GNSS-логи польоту, координати топознаків, журнали польотів та системна інформація (дані IMU, висотомірів, компасів). Усе це об'єднується в єдиний проєкт у програмному забезпеченні, зазвичай це DJI Terra, TerraSolid, або інші спеціалізовані рішення [6].

Далі виконується геоприв'язка хмари точок. Це процес поєднання даних лідара з точними координатами, отриманими з базової RTK-станції або мобільного GNSS-приймача. Без цього етапу неможливо забезпечити високу просторову точність. Програмне забезпечення об'єднує інформацію з усіх сенсорів, щоб відтворити точні положення кожної точки у тривимірному просторі [2].

Після цього починається відсікання шумів. У необробленій хмарі точок завжди присутні помилкові дані: віддзеркалення від блискучих поверхонь, точки, що пройшли крізь листя дерев, сліди від птахів або дрібного сміття в повітрі. Автоматичні алгоритми видаляють такі артефакти, проте іноді потрібне і ручне втручання, особливо в складному рельєфі або лісистих зонах [3].

Після очищення даних починається класифікація хмари точок. Це надзвичайно важливий процес, під час якого кожна точка отримує атрибут приналежності до певного класу: земля, трава, низька/висока рослинність, будівлі, інженерні споруди, дроти, тощо. Класифікація може бути повністю автоматичною, напівавтоматичною або вручну виконуваною залежно від точності, яку потрібно досягти [4].

На основі класифікованих даних створюється цифрова модель рельєфу (ЦМР). Зазвичай вона генерується лише з точок, класифікованих як "земля". Це дозволяє з високою точністю відобразити форму поверхні місцевості, включаючи яри, підвищення, схили та інші рельєфні утворення. У гірській місцевості, де зміни висот мають вирішальне значення для проєктування ЛЕП, точна ЦМР дає змогу виявити оптимальні місця для прокладки траси [5].

Після побудови ЦМР виконується візуальний аналіз та контроль якості. Фахівці переглядають модель, шукаючи можливі помилки класифікації або невідповідності в даних. Якщо є сумнівні ділянки, можуть бути виконані додаткові локальні обробки або навіть повторні польоти [6].

У фінальній частині обробки виконується експорт результатів у формати, придатні для подальшого використання. Зазвичай це LAS/LAZ, TIFF, DEM, а також DXF/DWG, які сумісні з CAD та GIS-програмами. Такі дані стають основою для цифрування, трасування, аналізу прокладення ЛЕП та інженерного проєктування [7].

У підсумку, обробка та аналіз лідарних даних — це складний, багатоступеневий процес, який вимагає точності, уваги до деталей і доброго розуміння як польових умов, так і програмних алгоритмів. Саме на цьому етапі сирі мільйони точок перетворюються на чітку та зрозумілу просторову модель, з якою можна працювати інженерам та проєктантам.

## **2.5. Використання даних для створення топографічної основи під ЛЕП**

Проєктування та будівництво ліній електропередач (ЛЕП) є складним інженерним процесом, який вимагає максимально точної інформації про топографічні, географічні та антропогенні характеристики території. Особливо важливу роль відіграє створення якісної топографічної основи — комплексу просторових даних, на підставі яких визначаються траса проходження ЛЕП, місця встановлення опор, зони розміщення трансформаторних підстанцій, та

враховуються обмеження, пов'язані з рельєфом місцевості, об'єктами природного середовища або забудовою.

У цьому контексті лідарне сканування з використанням безпілотників, зокрема дронів типу DJI Matrice 350 RTK з модулем Zenmuse L2, забезпечує новий рівень деталізації та точності даних. Отримані за допомогою таких систем 3D-моделі місцевості та поверхні дозволяють інженерам-геодезістам формувати реалістичне уявлення про ділянку, попередньо оцінити можливі труднощі під час будівництва, провести аналіз перешкод і з великою впевненістю приймати проектні рішення.

Процес починається зі збору первинної хмари точок під час обльоту території. Безпілотник, оснащений лідаром, рухається за заданими маршрутами, здійснюючи десятки тисяч лазерних імпульсів на секунду, які відбиваються від поверхонь і фіксують відстань до об'єкта. За рахунок високої щільності сканування та точності GNSS-модуля дрон фіксує положення кожної точки у просторі з точністю до кількох сантиметрів.

Після збору даних інформація імпортується до програмного забезпечення для обробки (наприклад, DJI Terra, Pix4D, або TerraSolid), де виконується:

- фільтрація шуму;
- класифікація точок за типами поверхонь (грунт, рослинність, будівлі, лінії електропередач);
- побудова цифрової моделі рельєфу (ЦМР) — "оголеної" поверхні землі;
- створення цифрової моделі поверхні (ЦМП) — із включенням всіх об'єктів;
- генерація топографічних карт, ортофотопланів і 3D-візуалізацій.

На базі побудованої цифрової моделі місцевості виконується створення топографічної основи, яка включає:

- контурну основу — лінії рельєфу, ізогіпси, плоскі точки;

- планові об'єкти — дороги, будівлі, гідрографічні елементи;
- інженерні елементи — електролінії, труби, паркани, колодязі тощо;
- висотні позначки — ключові репери, точки встановлення опор;
- геодезичні мережі — пункти GPS-контролю, які можуть бути використані для подальших вимірів.

Уся ця інформація інтегрується в геоінформаційну систему, де вона стає основою для аналітичного моделювання.

Дані лідарного сканування забезпечують безперервний профіль рельєфу, що дозволяє обрати найоптимальніше розташування траси. На етапі проєктування враховується:

- крутість схилів і можливість встановлення опор;
- глибина ярів, ям та заглиблень;
- висотні перепади, які можуть ускладнити натягування кабелів;
- наявність природних перешкод — лісів, водойм, боліт.

За допомогою ПЗ AutoCAD Civil 3D або аналогічного інженери формують поздовжній та поперечний профілі траси, здійснюють розрахунок висот проводів, визначають тип і висоту опор, та прораховують необхідну кількість прольотів.

Цифрова модель поверхні дозволяє також визначити: небезпечні об'єкти, розташовані близько до траси (наприклад, будівлі або дерева, що можуть впасти на лінію), потенційні зони обриву лінії у випадку лавин, зсувів чи підтоплень, перетини з іншими комунікаціями (газопроводи, ЛЕП, дороги), що вимагають додаткових узгоджень.

Особливо важливим є аналіз зони провисання проводу. Для кожного відрізка ЛЕП визначаються мінімальні безпечні відстані до землі, будівель та водних поверхонь. Дані, отримані з лідарного сканування, дозволяють точно

визначити ці параметри ще на етапі проєктування, уникнувши дорогих помилок.

Топографічна основа, створена за результатами лідарного сканування, використовується не лише на етапі проєктування, але й: для трасування лінії в польових умовах, контролю точності встановлення опор, при виконанні земляних робіт — викопування фундаментів, підготовки майданчиків, при моніторингу прогресу будівництва (повторні обльоти дозволяють порівнювати реальний стан із планом), внесення змін у проєктну документацію, якщо виникають неочікувані перешкоди.

Оскільки будівництво може тривати місяцями, а рельєф чи забудова території змінюється, лідарне сканування дозволяє оперативного оновлювати топографічну основу. Повторний обліт дрону, наприклад через кожні 30 днів, дозволяє: оновити модель рельєфу, зафіксувати зміни у забудові, перевірити відповідність виконаних робіт проєкту, надати замовнику об'єктивну інформацію про прогрес.

У порівнянні з традиційною тахеометричною зйомкою або GNSS-методами, лідарне сканування дає більшу точність та деталізацію (можна зафіксувати об'єкти від 1–2 см), швидкість виконання — сканування 1 км<sup>2</sup> займає менше 1 години, а також доступ до важкодоступних ділянок — болота, ліси, ярки, економію витрат (зменшується кількість виїздів геодезистів), одна зйомка може використовуватись для різних цілей: проєктування, моніторинг, звітність.

### **3. Практичне застосування лідарного сканування дрона для створення топографічної основи проєктуванні ЛЕП.**

#### **3.1. Підготовка до зйомки: розвідка місцевості та планування польотів**

Практичне застосування лідарного сканування при створенні топографічної основи для проєктування лінії електропередач завжди

починається з виїзду на об'єкт і реконструювання місцевості. Особливо це критично у випадках, коли мова йде про складний рельєф, а саме гірську місцевість. У такій ситуації правильне планування польотів, розуміння структури ландшафту та потенційних перешкод стає визначальним фактором для якісного збору даних.

У нашому випадку об'єктом дослідження була ділянка в гірській місцевості, де прокладання нової лінії електропередач вимагало особливої точності. При першому виїзді на місце стало очевидно, що рельєф має різкий перепад висот, густу лісистість на окремих схилах, ділянки з кам'янистим ґрунтом і навіть сліди старих зсувів. Також місцями спостерігалися заболочені улоговини та стрімкі яри, які могли не тільки ускладнити польоти, а й вплинути на подальше проектування траси ЛЕП.

Перша задача — провести візуальне реконструювання. Ми здійснили кілька піших маршрутів по ділянці, щоб оцінити прохідність, виявити природні бар'єри, визначити можливі зони втрати сигналу GPS. Навіть високоточна апаратура типу RTK може давати збої в ущелинах або під щільною кроною дерев, тому важливо було наперед оцінити ризики. Особливу увагу ми звернули на вершини та підніжжя схилів, оскільки саме там можливе утворення «мертвих зон», які дрон може пропустити під час автоматизованого польоту.

Під час огляду використовувались планшети з офлайн-мапами, де в реальному часі фіксувалися ключові точки маршруту, складні ділянки, об'єкти, які потребують окремої уваги при скануванні. Ми також фотографували підозрілі геоморфологічні утворення, які могли бути небезпечними для прокладання лінії або створювати перешкоди для польоту. Наприклад, одна ділянка виявилась значно зарослою самосійним лісом, який не був відображений на попередніх картах. Це вимагало змін у плані польоту та збільшення щільності сканування на цій ділянці.

Після розвідки ми розпочали формування маршруту польотів. Для цього використовували супутникові знімки, топографічні карти, цифрові

моделі рельєфу з відкритих джерел, а також наші власні спостереження. Було важливо врахувати характер рельєфу — гірська місцевість вимагала сегментації території на кілька незалежних зон польоту. В межах однієї зони могли бути присутні й високі схили, і вузькі ущелини, тому польоти планувалися з урахуванням різниці висот.

Основні параметри польотів визначались індивідуально для кожної ділянки:

- Висота польоту — для рівних плато становила 100 м, а для гірських схилів зменшувалася до 60–70 м для збереження якості хмари точок.
- Напрямок маршрутів — переважно перпендикулярно до напрямку схилів, щоб уникнути спотворення рельєфу.
- Перекриття смуг — встановлювалося щонайменше 70% для гірських ділянок і 50% для рівнин, що дозволяло зберігати повне покриття навіть при зміні висоти дрона через перепади рельєфу.
- Довжина місій — залежала від типу території: на важких ділянках обмежувалась до 10 гектарів, щоби скоротити час у повітрі на одному заряді акумулятора та уникнути похибок.

Для планування місій використовувалось спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяло враховувати цифрову модель рельєфу — наприклад, DJI Terra. Завдяки цьому маршрути польотів формувались з дотриманням постійної відстані від земної поверхні, а не просто за фіксованою висотою, що критично важливо в умовах гірської місцевості.

Також було проведено попереднє зонування об'єкта: його поділили на ділянки з однаковою геоморфологічною структурою — рівнини, схили, лісисті ділянки, зони з ймовірними підземними водами. Це дозволило ефективніше планувати обсяг майбутніх робіт, час, необхідний на кожну місію, і кількість акумуляторів для польотів.



Рис. 3.1 – Підготовча робота зображення контуру зйомки в QGIS.

Окрему увагу приділили метеоумовам. У гірській місцевості ситуація з погодою змінюється дуже швидко: зранку — ясне небо, вже за годину — хмари, вітер або навіть короткочасний дощ. Тому моніторинг прогнозів виконувався щогодини. Польоти планувались тільки на стабільні періоди без опадів і поривів вітру понад 7–8 м/с. Також враховували напрямок сонячного освітлення, щоб уникнути засвічених ділянок і тіней, які можуть впливати на точність даних. [26]

Завдяки детальній підготовці та правильно розробленому маршруту польотів вдалося досягти повного покриття всієї території, уникнути зон зі спотвореним рельєфом і забезпечити стабільну якість лідарних даних, незважаючи на складний гірський ландшафт.

### 3.2. Розміщення топознаків і координування

Після того як маршрут польотів було сплановано, наступним кроком стала підготовка до просторового прив'язування лідарного сканування. Без цього вся зібрана інформація залишалася б лише «плаваючою» хмарою точок без чіткої географічної координатної системи. Тож починається етап розміщення топонімів та визначення їх точних координат.

Топоніми — це спеціальні наземні орієнтири, які використовуються як контрольні точки. У польових умовах це можуть бути пластикові або тканинні мішені геометричної форми (найчастіше хрести або круги), які мають контрастний колір (зазвичай чорний на білому тлі) і добре видно з повітря. Основна вимога до топоніма — чіткість, помітність з висоти та стабільність положення.

У нашому випадку мішені мали форму рівностороннього хреста, виготовленого з щільного вінілу. Їхнє розміщення по території виконувалося за наступним принципом: одна мішень приблизно на кожні 5–7 гектарів, із обов'язковим урахуванням зміни рельєфу. Особливу увагу ми приділяли зонам переходу — наприклад, межах між лісом і відкритими територіями, краям схилів, підвищенням, де могли спостерігатися відхилення в лінійності лідарних точок через зміну кута сканування.

Розкладання топонімів відбувалося вручну. Команда вийшла на маршрут, попередньо завантаживши орієнтовні точки з картографічного ПЗ у GNSS-приймач. У польових умовах це виглядало досить просто: на заздалегідь відібраній ділянці розгорталась мішень, фіксувалася натяжка, щоб уникнути зміщення від вітру або рельєфу, і одразу ж виконувалась фіксація її координат.

Для координування мішеней використовувалась технологія RTK (Real-Time Kinematic), яка забезпечує високу точність (до 1–2 см). В якості мобільного приймача ми використовували GNSS-приймач із підтримкою RTK-модуля, який працював у парі з базовою станцією. У разі, коли поблизу не було мережі мобільного RTK або доступу до інтернету, ми встановлювали власну

базову станцію, використовуючи трипод і заздалегідь обраховану координату. Сигнал RTK передавався бездротово через внутрішній радіомодем.



Рис. 3.2 – Вигляд топознака із ортофотоплану.

Визначення координат виконувалося в польовому ПЗ, яке дозволяло фіксувати точки у реальному часі, вносити атрибути (назва топознака, якість сигналу, статус приймача) і одразу ж зберігати координати у форматах, сумісних із подальшим обробленням даних. Для надійності кожену точку фіксували з витримкою не менше 5 секунд, що давало змогу отримати стабільний сигнал і уникнути похибок при постобробці. [29]

Враховуючи особливості гірської місцевості, ми зіткнулися з кількома проблемами, які довелося вирішувати безпосередньо на місці. Наприклад, у вузьких ущелинах сигнал супутника міг втрачатися або спотворюватися, що призводило до неможливості отримати RTK-фіксацію. У таких випадках застосовувалась постобробка даних (PPK), коли сигнал записується у приймач, а координата обчислюється після повернення до офісу. Також використовували відбивачі для маркерів, які не можна було залишити надовго, — це особливо актуально в районах, де є ризик вандалізму або діяльності диких тварин.

Для максимальної точності координування було створено систему перехресної перевірки: деякі точки дублювалися — тобто встановлювалися по дві мішені на одній ділянці з невеликим зсувом, щоб у разі втрати одного — інший слугував резервною міткою. Такий підхід дозволив уникнути необхідності повторного виїзду на об'єкт у разі помилок або втрат даних.

T.14	5364658.8939 m	5345317.454 m	394.75 m	394.719965 m	-0.025135 m	0.021441 m	-0.025135 m	0.013464 m	0.028504 m	70.89
T.15	5364706.4069 m	5345319.3639 m	391.79 m	391.762597 m	-0.031303 m	0.005661 m	-0.031303 m	0.018047 m	0.036119 m	72.13
T.16	5364783.8843 m	5344693.8654 m	373.34 m	373.324702 m	-0.015898 m	0.04798 m	-0.015898 m	0.014779 m	0.021696 m	73.71
T.17	5364842.4387 m	5344164.6939 m	376.48 m	376.475574 m	-0.001126 m	0.040909 m	-0.001126 m	0.012364 m	0.012401 m	73.73
T.18	5364885.191 m	5344189.1895 m	375.72 m	375.723319 m	0.006119 m	0.06759 m	0.006119 m	0.01501 m	0.016201 m	73.8
T.19	5365142.2895 m	5343816.0814 m	364.48 m	364.480341 m	0.005341 m	0.074957 m	0.005341 m	0.018639 m	0.019361 m	61.16
T.20	5365317.713 m	5343350.2886 m	377.08 m	377.081691 m	-0.000109 m	0.050016 m	-0.000109 m	0.017173 m	0.017147 m	83.63
T.21	5365455.5015 m	5343076.724 m	383.13 m	383.134876 m	0.008976 m	0.056687 m	0.008976 m	0.012782 m	0.015605 m	85.3
T.22	5365484.0318 m	5342590.5643 m	383 m	383.028349 m	0.025349 m	0.076987 m	0.025349 m	0.013362 m	0.028649 m	74.46
T.23	5365445.092 m	5342592.862 m	382.07 m	382.099689 m	0.027789 m	0.086151 m	0.027789 m	0.013659 m	0.030956 m	63.22

Рис. 3.3 – Список контрольних точок хмари точок.

Окремо варто зазначити, що правильне розміщення топонімів суттєво впливає на подальшу якість обробки. Якщо маркер розташований під кутом, не видно центр, або він накритий гілками дерев — у скануванні він може бути спотворений або зовсім не виявлений. Тому кожна мішень ретельно фотографувалася перед злетом дрона — це дозволяло під час обробки виявити потенційні проблеми і швидко їх виправити.

Після завершення координування всі дані були експортовані у формат .csv з зазначенням точок у системі координат WGS 84, а також у місцеву систему координат за потреби. Цей файл слугував базою для подальшої геоприв'язки лідарної хмари точок і цифрової моделі рельєфу, що генерувалась на основі результатів сканування.

Таким чином, етап розміщення топонімів та їх координування є невід'ємною складовою польових робіт із використанням лідарного сканування. Саме завдяки якісно підготовленій сітці маркерів можлива висока точність і просторове позиціонування результатів зйомки, що в подальшому забезпечує коректне створення топографічної основи для проектування ЛЕП.

### **3.3. Виконання польотів з лідаром**

Після того як було проведено розвідку місцевості, встановлено топознаки й визначено їх точні координати, настає ключовий етап — безпосереднє виконання лідарного сканування. Саме в цей момент розпочинається практична реалізація всього запланованого: запуск дрона, польоти за заданим маршрутом і збір великого обсягу просторових даних.

У нашому проєкті ми використовували високотехнологічний комплект: дрон DJI Matrice 350 RTK у парі з лідарною системою Zenmuse L2. Це обладнання спеціально створене для складних завдань у геодезії та картографії. Особливістю цього тандему є не лише точність вимірювань, а й стабільна робота в умовах гірської місцевості, де складний рельєф і природні перешкоди створюють додаткові труднощі.

Перед кожним польотом виконується повна перевірка обладнання. Спочатку — огляд корпусу дрона, стан пропелерів, перевірка кріплень лідарної системи. Далі — перевірка акумуляторів: вони повинні бути повністю заряджені, без перегріву, з однаковим рівнем заряду на кожному блоці. Оскільки тривалість одного польоту в горах може бути меншою через зміну висоти, ми заздалегідь підготували змінні комплекти батарей та мобільну зарядну станцію, щоб не витратити час даремно.

Також обов'язковими є калібрування IMU (інерційного модуля) та компаса. У гірських умовах через наявність магнітних аномалій або масивів з металовмісними породами компас може працювати з похибкою, тому калібрування виконується перед кожним новим запуском.

Щойно все перевірено — відбувається зліт. Політ виконується повністю в автоматичному режимі за заздалегідь завантаженим маршрутом. Оператор стежить за польотом через планшет або ноутбук у ПЗ DJI Pilot, контролюючи швидкість, висоту, якість сигналу GPS, стан батареї та відображення траєкторії.

Зазвичай тривалість одного польоту становить 20–25 хвилин. Після цього дрон автоматично повертається на стартову позицію (точку Home), де ми

виконуємо швидку заміну батарей, не вимикаючи обладнання. Після цього — знову зліт, і політ продовжується з наступної місії.

Лідар Zenmuse L2 виконує сканування в режимі 360°, охоплюючи широку смугу рельєфу під час руху дрона. У нашому випадку ми налаштували систему на щільність 400 000 точок за секунду, що забезпечило високу деталізацію рельєфу, рослинності, забудови. Завдяки можливості проникнення променів крізь крони дерев ми змогли зафіксувати не лише верхній шар лісу, а й рельєф під ним, що особливо важливо при проектуванні ЛЕП.

Оператор постійно контролює, щоб дрон не пропустив жодної ділянки. Якщо з якихось причин — збій у зв'язку, порив вітру, зміна рельєфу — маршрут порушується, ми миттєво коригуємо політ або плануємо нову місію. У нашому випадку кілька разів виникала потреба виконати повторний обліт ділянок із різким перепадом висот: дрон не встигав налаштувати висоту вчасно, і зона покриття виявлялась неповною.

Середня швидкість польоту	4,78 м/с
Висота полоту	61,75 м
Діаметр наземного променя	74 мм*24 мм
Кут огляду	70°*3°
Частота імпульсу	240 кГц
Швидкість сканування	1200 кГц
Режим сканування	<b>Повторюваний</b>

Рис. 3.5 – Параметри польоту.

Також важливо враховувати погодні умови. У горах вітрове навантаження може змінюватися за кілька хвилин. Ми стикалися з ситуацією,

коли через сильний боковий вітер дрон зміщувався від курсу, і сканування йшло нерівно. У таких випадках політ переривався, і ми чекали на стабілізацію погодних умов. Для безпеки було встановлено обмеження: автоматичне повернення при вітрі вище 10 м/с.



Рис. 3.4 – Підготовка початку польотів

Особливу увагу ми приділяли візуальному контролю стану мішеней топонімів у реальному часі. Під час польоту ми порівнювали відеопотік з камер дрона з картою розміщення мішеней, щоб упевнитися: усі вони добре видно й будуть враховані при обробці.

Після завершення всіх польотів ми перевірили повноту покриття території, використовуючи попередній перегляд хмари точок. У ПЗ можна було миттєво побачити, чи є прогалини між смугами, чи є ділянки з меншою щільністю сканування. Лише після того, як ми впевнились у повноті даних, техніка була згортана й повернення в офіс розпочато.

Сумарно, вся ділянка (понад 50 гектарів у гірській місцевості) була охоплена за три польових дні, з виконанням понад 25 окремих польотів. Усе обладнання працювало стабільно, а головне — ми досягли основної мети: зібрали точні, щільні, геоприв'язані лідарні дані, які стануть базою для створення топографічної основи.

### 3.4. Завантаження та первинна обробка даних

Коли польоти завершено, здається, що головне вже позаду. Але насправді найвідповідальніша частина тільки починається — це обробка лідарних даних, від якої залежить, чи отримаємо ми якісний цифровий рельєф і придатну до використання топографічну основу. Першим кроком стає завантаження всіх даних, отриманих під час польотів.

У нас було кілька джерел інформації: по-перше, лідарні скани, які зберігаються на внутрішній пам'яті Zenmuse L2 або на SD-карті; по-друге, GNSS-логи, що містять інформацію про маршрут дрона та поправки RTK; і по-третє — файл координат топознаків, які використовувалися для просторового прив'язування хмари точок. Усі ці файли необхідно скомпонувати в одному робочому середовищі.



Рис. 3.6 – Частина готового ортофотоплану.

Ми використовували програмне забезпечення DJI Terra, яке спеціально адаптоване для роботи з лідарними даними, отриманими з DJI-обладнання. Спочатку в нього імпортуються всі польотні місії. Програма автоматично читає маршрут, висоту польоту, кут нахилу лідару, швидкість дрона, кількість отриманих точок. Далі завантажуються GNSS-логи, і система починає синхронізацію даних.

На цьому етапі програма поєднує координати з геопросторовими даними, тобто прив'язує хмари точок до реального положення у просторі. Якщо координати було зібрано з використанням RTK, цей процес відбувається напівавтоматично. Якщо ж використовувався PPK (постпроцесинг), потрібна попередня обробка GPS-логів у спеціалізованих утилітах.

Після геоприв'язки всі отримані хмари точок формуються в єдиний масив. Це десятки мільйонів, а іноді і сотні мільйонів точок, кожна з яких має X, Y, Z-координати, а також атрибути: інтенсивність відбитого сигналу, номер імпульсу (первинний або вторинний), кольорову інформацію (RGB), якщо вона зчитувалась одночасно. На вигляд це схоже на хмару мікроскопічних крапок, що повторюють форму рельєфу, дерев, будівель. [30]

Наступним критично важливим кроком є видалення шумів. Не всі точки, які записав лідар, корисні. Часто система фіксує артефакти: точки, що утворилися внаслідок відбиття лазера від листя, гілок або навіть крапель дощу. Іноді потрапляють помилкові відображення від хмар або пролітаючих птахів. Частина точок «висить у повітрі» або має хибну висоту. Усе це — шум.

Спеціальні фільтри в програмному забезпеченні автоматично знаходять такі точки. Наприклад, алгоритм аналізує, наскільки точка відрізняється від середнього значення для своєї локальної групи. Якщо різниця велика — точка вважається підозрілою і видаляється. Ми застосовували як автоматичні фільтри, так і ручну перевірку ділянок, де шум був особливо помітний, наприклад, над скельними виступами чи ущелинами.

Після цього настає первинна класифікація — один із найважливіших етапів. Суть класифікації в тому, щоб розділити всі точки за типами поверхні:

земля, рослинність, споруди, лінії електропередач, дерева, шляхова інфраструктура тощо. Це не просто зручно — без класифікації неможливо побудувати точний цифровий рельєф.

Система використовує комбінацію кількох ознак: висота точки, щільність оточуючих точок, інтенсивність сигналу, форма поверхні. Наприклад, рослинність зазвичай має пухкий вигляд — точки розкидані вертикально. Будівлі — чіткі межі, рівна площина. Земля — рівна або плавно похила поверхня з високою щільністю точок. Програма автоматично виділяє класи, але ми завжди перевіряємо вручну.

Уже після класифікації починає вимальовуватися рельєф місцевості: гори, западини, схили, тераси, плато. Особливо добре видно це в гірській місцевості, де зміна висот чітко фіксується в хмарі точок. За правильного налаштування кольорової палітри програма може показати рельєф у псевдокольорах — від синього (найнижчі точки) до червоного (найвищі вершини). Це дає змогу одразу оцінити структуру території.

Окремо ми перевіряли, як система відпрацювала по зонах перетину рельєфу з лісовими масивами. Саме там зазвичай виникають складності — лідар повинен пройти крізь листя, але не завжди це вдається. У таких випадках ми вручну доопрацьовували класифікацію, додаючи точки до шару «земля» або прибираючи зайві з шару «низька рослинність».

Ще одним важливим кроком було співставлення хмари точок з топознаками, координати яких ми визначили на етапі польових робіт. Ці мітки використовуються як контрольні точки — їх порівнюють із відповідними точками в хмарі, щоб переконатися в точності геоприв'язки. Якщо розбіжність перевищує 5 см — потрібно шукати помилку в GNSS або в налаштуваннях моделі.

Після завершення цього етапу ми мали вже не просто «сиру» хмару точок, а першу версію структурованої моделі місцевості, яка лягатиме в основу створення цифрової топографічної карти та трасування ЛЕП. Далі на нас чекала ще детальніша обробка — побудова DTM, контурів, об'єктів на плані

— але вже на цьому етапі було видно форму рельєфу, напрямки схилів, долини, вершини. Це вже був результат, на який можна спиратись.

### 3.5. Формування цифрової моделі рельєфу та цифрування

Початкову обробку виконуємо у програмному середовищі Spatix — національному ГІС-продукті, який забезпечує підтримку українських координатних систем, інтеграцію з кадастровими ресурсами та стабільну роботу з великими об'ємами просторової інформації. Після імпорту хмари точок у Spatix розпочинається етап сортування за класами. Хоча попередня класифікація часто здійснюється ще під час польоту, для досягнення високої точності її доопрацьовують вручну. Основна мета — виділити клас "земля", оскільки саме ці точки використовуються для формування цифрової моделі рельєфу, яка відображає фактичну поверхню землі без урахування рослинного покриву та інфраструктурних елементів.

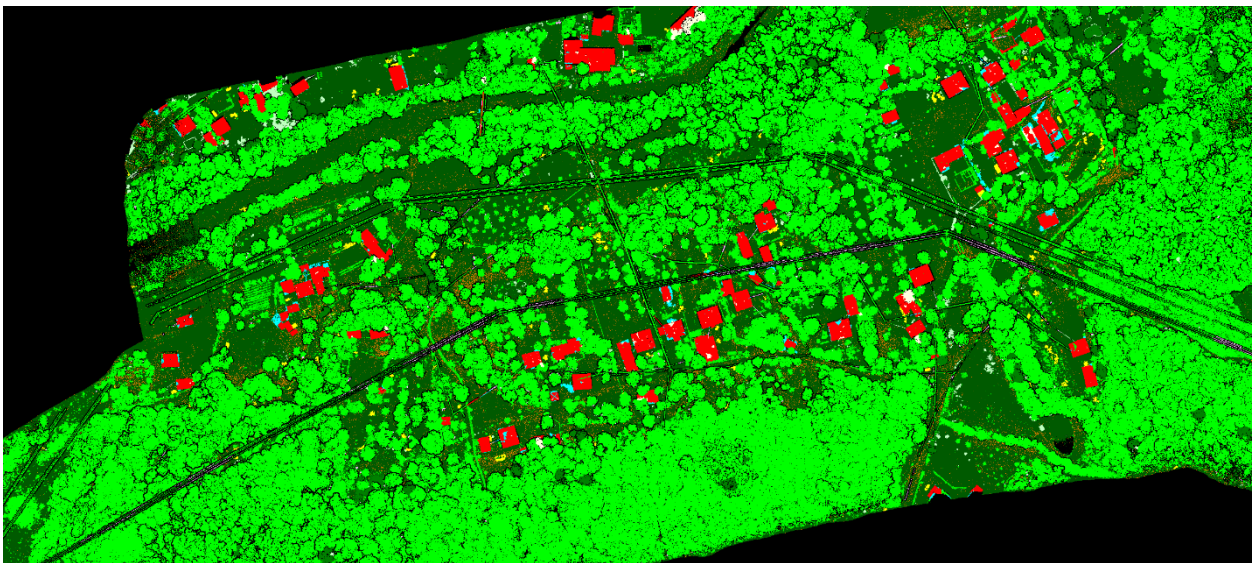


Рис. 3.7 – Цифрування хмари точок у програмі Spatix.

Побудова моделі рельєфу здійснюється за допомогою алгоритму TIN — триангуляційної нерегулярної мережі. Цей метод формує поверхню, що складається з трикутників, які поєднують точки з урахуванням висоти, утворюючи суцільне цифрове полотно. У гірських районах важливо забезпечити щільне розміщення вузлів мережі в місцях значних перепадів

висот, таких як яри чи ущелини, щоб рельєф був змодельований якомога точніше.

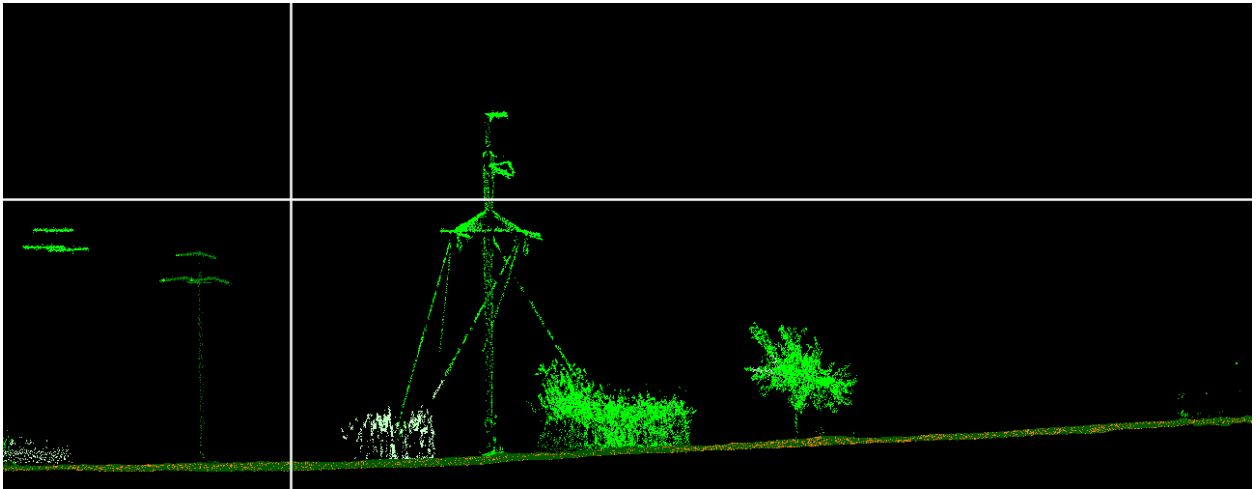


Рис. 3.8 – Зображення перерізу хмари точок у програмі Spatix

Після побудови моделі виконується її візуальний та статистичний аналіз. Виявляються й виправляються аномалії, наприклад провали, артефакти або нетипові укуси, які можуть виникнути через недостатнє перекриття або похибки в класифікації. У складних ділянках допускається використання інструментів ручного редагування.

Одним із важливих завдань на цьому етапі є генерація горизонталей — ліній, що з'єднують точки однакової висоти. У Spatix ця операція автоматизована. Для інженерного проєктування ЛЕП зазвичай обирається інтервал 0.5 метра або 1 метр. У нашому випадку, через складний рельєф місцевості, було використано інтервал 0.5 метра, що забезпечує високу деталізацію моделі. Горизонталі експортуються у формати DXF або SHP для подальшої роботи у CAD або ГІС-системах.

Далі переходимо до векторизації, яку виконуємо у програмному забезпеченні 3Dsurvey. Цей інструмент є професійним середовищем для обробки фотограмметричних і лідарних даних і має зручні інструменти для векторизації. Після імпорту ортофото та хмари точок у програму здійснюється їх геопросторова прив'язка. Завдяки інструментам векторизації можна вручну обвести і позначити всі об'єкти, що мають значення для проєкту: існуючі лінії

електропередач і електроопори, дороги — як асфальтовані, так і ґрунтові, водні об'єкти, такі як річки, струмки, канали, межі ділянок, елементи забудови — будівлі, паркани, склади та інші. Кожен об'єкт позначається як окрема векторна сутність з визначеним типом, атрибутивною інформацією, координатами та, за потреби, додатковими характеристиками, як-от площа або довжина. [31]

Наступний етап — формування поздовжніх профілів та поперечних перерізів рельєфу, що є критично важливими для проєктування ЛЕП. У 3Dsurvey профілі генеруються автоматично на основі вказаної траси. На кожному профілі автоматично відображається рельєф, наявність рослинності, інфраструктурні об'єкти та водні перешкоди. Ці профілі експортуються у форматах PDF або CAD і передаються проєктантам.



Рис. 3.9 – Хмара точок у програмі 3DSurvey.

Фінальна частина обробки здійснюється у ГІС-середовищі QGIS або ArcGIS. Усі векторні та растрові дані, підготовлені у Spatix та 3Dsurvey, об'єднуються в єдиний геопросторовий проєкт — топографічну основу. На цьому етапі перевіряється правильність атрибутивної інформації, структуруються шари: цифрова модель рельєфу, горизонталі, дороги, будівлі, лінії електропередач, водні об'єкти. Наноситься система умовних позначень,

оформлюються легенди. За потреби формуються вихідні карти в масштабах 1:2000 або 1:5000, відповідно до технічного завдання або запитів замовника. Дані експортуються у форматах GPKG, DXF, PDF, SHP, які зручні для подальшої роботи інженерів.

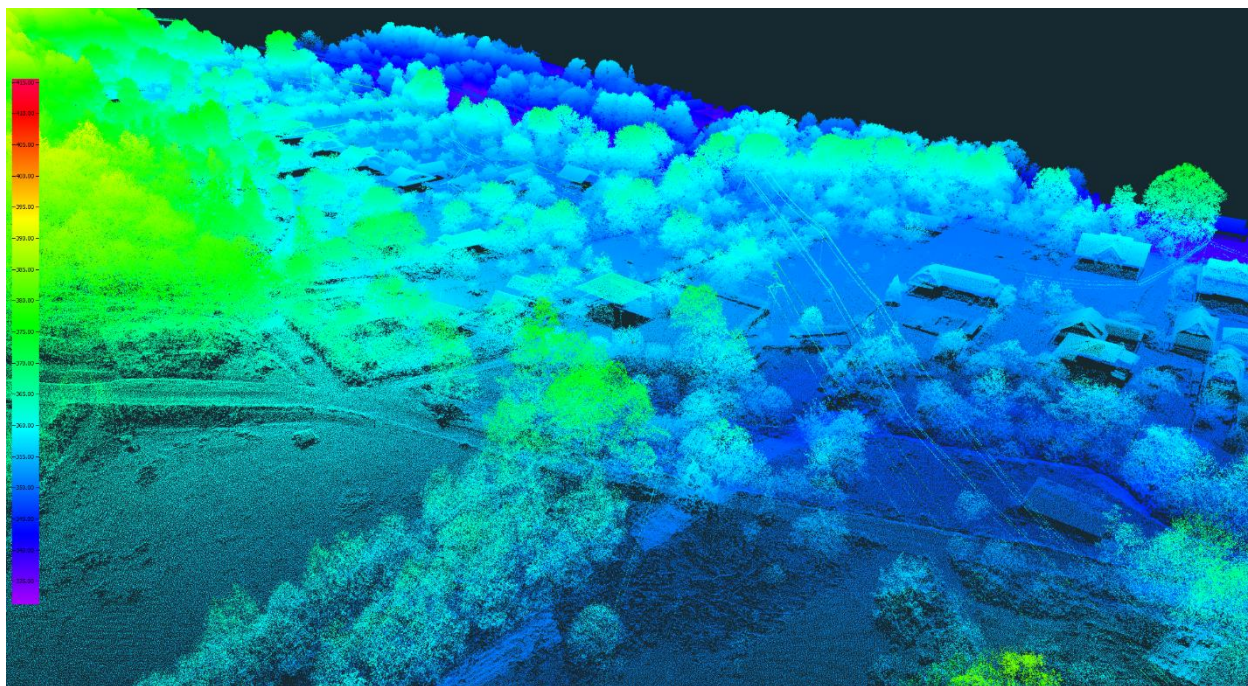


Рис. 3.10 – Колірна гама хмари точок у програмі 3DSurvey.

Таким чином, процес формування цифрової моделі рельєфу та цифрування — це послідовна, багатоетапна робота, що поєднує сучасні програмні рішення, практичний досвід і знання інженера. Завдяки ефективному використанню Spatix, 3Dsurvey, QGIS та ArcGIS створюється точна, надійна і зручна у користуванні топографічна основа, яка дозволяє максимально точно враховувати реальні особливості місцевості при проєктуванні ліній електропередач, навіть у складних гірських умовах.

### **3.6. Завершальний етап: створення топооснови для проєкту ЛЕП**

Після того, як цифрову модель рельєфу сформовано, горизонталі побудовано, а об'єкти векторизовано, дані імпортуються у програмне середовище Digitals. Ця система широко застосовується для топографічного

креслення, зокрема в межах України, та забезпечує високу точність та відповідність до вимог державних стандартів картографії. Перед завантаженням даних здійснюється перевірка форматів — зазвичай це DXF, SHP або GPKG, отримані з QGIS, 3Dsurvey або Spatix. У Digitals кожен шар отримує свій стиль відображення: дороги позначаються суцільними лініями певного кольору, рельєф передається за допомогою горизонталей з підписами висот, будівлі вказуються у вигляді прямокутників з контуром та номером, лінії електропередач — пунктирними або лініями зі спеціальними символами.

Digitals дозволяє проводити візуальну верифікацію відповідності масштабів і точності нанесення об'єктів. Тут здійснюється ручна перевірка правильності нумерації контурів, топографічних підписів, атрибутивної інформації. Усі об'єкти, які мають просторове значення — лінії, будівлі, огорожі, водні об'єкти — переводяться у відповідні картографічні умовні позначення згідно з інструкцією з топографічного знімання у масштабі 1:2000 або 1:5000. При виявленні невідповідностей (наприклад, некоректного розміщення умовного знака або нестачі атрибутів) інформація редагується вручну.

Наступним кроком є експорт узгодженої топографічної основи у формат, придатний для подальшої інженерної роботи. Тут використовується середовище AutoCAD — найпоширеніше програмне забезпечення для підготовки креслень у галузі будівництва та електроенергетики. У AutoCAD завантажуються підготовлені шари — переважно у форматі DXF або DWG, які були попередньо перевірені у Digitals. У цьому середовищі здійснюється фінальне оформлення креслення: встановлюється масштаб, додаються рамки та штампи, вставляються підписи і примітки згідно з технічним завданням.

Особливу увагу приділяють правильності просторової прив'язки — координати всіх об'єктів повинні відповідати системі УСК-2000 або іншим, що вимагаються нормативною документацією. У AutoCAD також перевіряється сумісність з іншими інженерними файлами, які можуть використовуватися під час проектування — наприклад, трасами ЛЕП, під'їзними шляхами, схемами

опор тощо. Якщо потрібно, креслення поділяється на аркуші відповідного формату (A1, A0), наносяться сітки координат, і проводиться нумерація блоків карти.

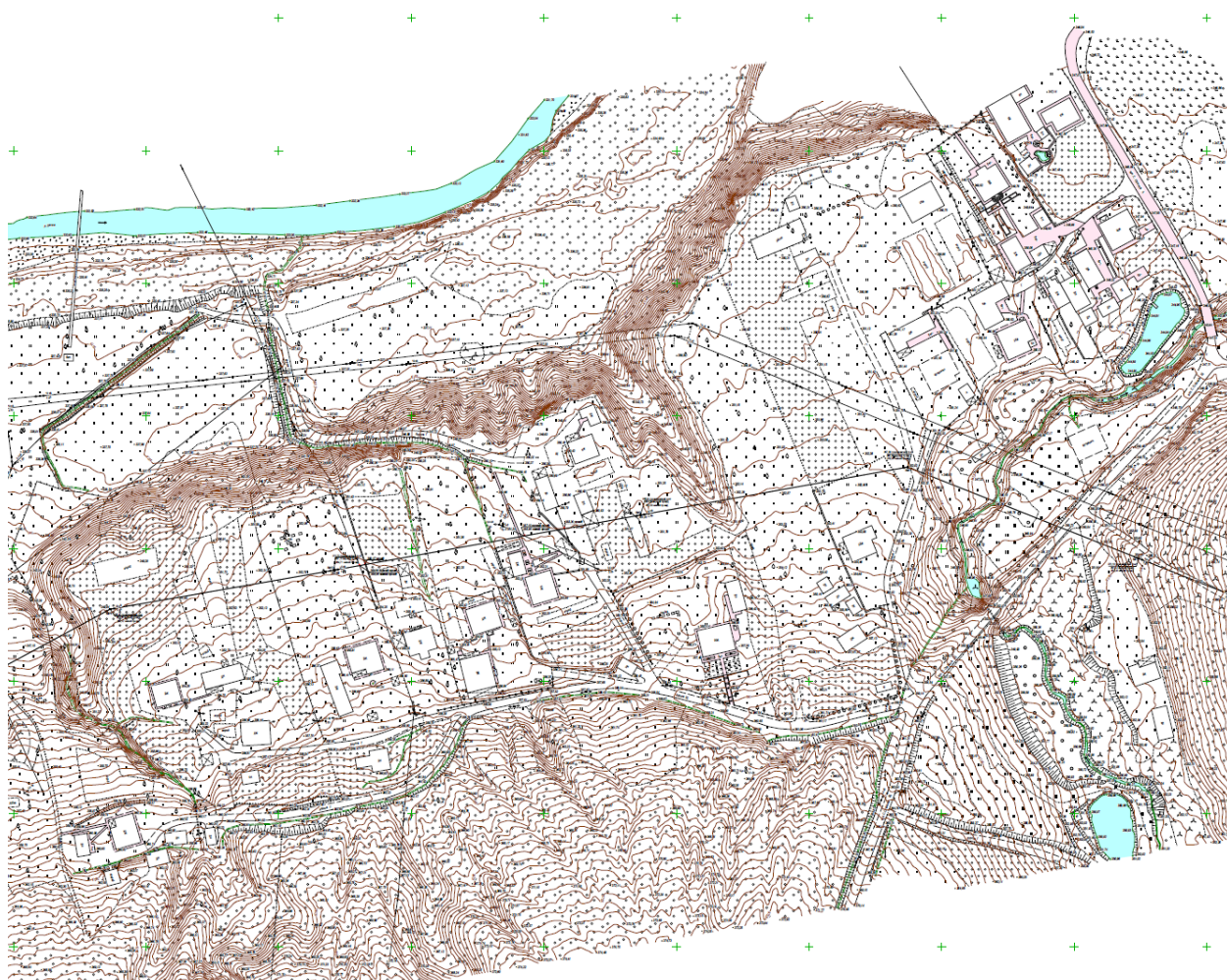


Рис. 3.11 – Частина готового топографічного знімання.

Фінальний результат — це цифрова топооснова у вигляді CAD-файлу з усіма необхідними шарами: рельєф, горизонталі, гідрографія, дорожня мережа, межі ділянок, існуюча забудова, енергетична інфраструктура. Така топооснова є завершеним інженерним документом, придатним для безпосереднього використання при трасуванні, аналізі прокладення ЛЕП, проектуванні опор та визначенні зон обмеження забудови. Вона також може бути передана як у цифровому вигляді, так і роздрукованою на планах для польової роботи або погодження в органах контролю.

Таким чином, програми Digital і AutoCAD виступають завершальними ланками у ланцюжку обробки лідарних даних — від збору до оформлення результатів. Саме завдяки цим інструментам формується повноцінна і точна топографічна основа, яка відповідає усім сучасним вимогам проектування інженерних мереж, зокрема ліній електропередач, у складних природних умовах, таких як гірська місцевість.

## ВИСНОВОК

У процесі виконання дипломної роботи було досліджено теоретичні, методологічні та практичні аспекти створення топографічної основи для проєктування та будівництва ліній електропередач з використанням лідарного сканування. Мета роботи полягала в тому, щоб проаналізувати ефективність сучасних геодезичних методів, зокрема лідару, у контексті підвищення точності, швидкості та безпеки топографічних зйомок, а також довести доцільність їхнього впровадження в інженерну практику.

Початковим етапом дослідження став огляд сутності топографічної зйомки як базового інструменту геодезичного забезпечення проєктів, зокрема тих, що стосуються масштабних інфраструктурних об'єктів. Було встановлено, що якісна топографічна основа є критично важливою для ефективного проєктування ЛЕП, оскільки вона дозволяє точно визначати рельєф місцевості, розміщення природних та штучних об'єктів, оцінювати потенційні ризики та оптимізувати майбутнє будівництво.

У межах дослідження було проаналізовано існуючі методи топозиомки, серед яких особливу увагу приділено лідарній технології. Встановлено, що на відміну від класичних підходів, таких як тахеометрична зйомка чи GNSS-вимірювання, лідарне сканування дозволяє з високою швидкістю та точністю отримувати тривимірні просторові дані про рельєф місцевості навіть у складних природних умовах. Завдяки здатності лазерного імпульсу проникати крізь рослинний покрив, лідар дозволяє фіксувати саме земну поверхню, що робить його особливо цінним для формування цифрової моделі рельєфу.

Практична частина дипломної роботи була присвячена використанню комплексу DJI Matrice 350 RTK із сенсором Zenmuse L2. Було виконано моделювання робочого процесу, що включає підготовку місії, виконання польоту, збір лідарних даних, класифікацію хмари точок та створення цифрової моделі рельєфу. Проведене сканування показало, що лідарна система дозволяє охопити великі площі за короткий проміжок часу, при цьому забезпечуючи високу щільність та точність вимірювань. Цифрова модель

рельєфу, сформована за результатами обробки, відповідала вимогам до топографічної основи для проєктування ЛЕП, у тому числі в частині геометричної точності, наявності повного охоплення ділянки та розділення наземних і надземних об'єктів.

Окремо варто наголосити на безпечності виконання зйомки з використанням БПЛА. В умовах складного рельєфу або в зонах із підвищеним ризиком, як-от схили, болота, ділянки з електромережами, лідарне сканування дає змогу повністю уникнути безпосереднього перебування людини на об'єкті. Така особливість підвищує рівень безпеки робіт і дозволяє залучати фахівців до виконання завдань в офісному середовищі.

Також встановлено, що цифрова модель рельєфу, створена на основі лідарних даних, є не лише основою для традиційного креслення топографічних планів, а й ключовим інструментом у цифровому проєктуванні. Вона може бути легко інтегрована у CAD- і BIM-системи, слугуючи базою для розрахунків, аналізу альтернативних варіантів прокладання ЛЕП, оцінки впливу на навколишнє середовище та майбутнього управління об'єктом. Це відкриває нові можливості у сфері цифрового моделювання інфраструктури.

Проведений аналіз також показав, що лідарне сканування має значний економічний ефект. Завдяки зменшенню тривалості польових робіт, зниженню потреби у великій кількості персоналу та високій продуктивності обладнання, загальні витрати на геодезичне забезпечення проєкту можуть бути оптимізовані без втрати якості. Це особливо важливо в умовах реалізації великих проєктів, які охоплюють десятки або сотні кілометрів трасування ЛЕП.

Таким чином, результати дослідження дозволяють зробити узагальнений висновок про те, що лідарне сканування є сучасним, надійним і ефективним методом створення топографічної основи для проєктування та будівництва ліній електропередач. Воно забезпечує поєднання високої точності, деталізації, оперативності та безпечності при виконанні зйомки. Крім того, лідарна технологія добре інтегрується з іншими цифровими

інструментами, що робить її частиною загальної стратегії цифрової трансформації галузі геодезії, будівництва та енергетики. На підставі виконаної роботи можна з упевненістю рекомендувати використання лідарного сканування як стандартного підходу при виконанні топографічної зйомки для потреб енергетичної інфраструктури, а також розглядати його як платформу для розвитку нових напрямів у галузі точного просторового моделювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. DJI Terra. Official Software Documentation. – DJI, 2023.
2. ASPRS. LAS Specification – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2019. [2]
3. Meng, X., Currit, N., & Zhao, K. (2010). Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, 2(3), 833–860.
4. Sithole, G., & Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(1-2), 85–101.
5. Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2018). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press.
6. Kraus, K., & Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(4), 193–203.
7. Esri. ArcGIS Pro Documentation. – <https://pro.arcgis.com>
8. DJI. Zenmuse L2 User Manual. – DJI Enterprise, 2023.
9. UgCS User Guide. SPH Engineering, 2022.
10. Trimble Inc. (2022). Introduction to GNSS. <https://www.trimble.com/gnss>
11. Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying*, 4th Edition. Wiley.
12. DJI. (2023). Zenmuse L2 — Product Overview. <https://www.dji.com/zenmuse-l2>
13. ASPRS. (2021). Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. <https://www.asprs.org>
14. NASA EarthData. (2020). LiDAR remote sensing. <https://earthdata.nasa.gov>
15. Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15.

16. Agisoft LLC. (2024). Metashape Professional Edition. <https://www.agisoft.com>
17. RIEGL. (2022). VMX-2HA Datasheet. <https://www.riegl.com>
18. Trimble. (2021). MX9 Mobile Mapping System. <https://geospatial.trimble.com>
19. Leica Geosystems. (2023). Leica TS16 Robotic Total Station. <https://leica-geosystems.com>
20. ESRI. (2024). ArcGIS Pro Documentation. <https://pro.arcgis.com>
21. QGIS. (2024). User Manual and Features. <https://qgis.org>
22. Google Developers. (2024). Google Earth Engine Documentation. <https://developers.google.com/earth-engine>
23. DJI. (2023). *Matrice 350 RTK – продукція DJI*. <https://www.dji.com/matrice-350-rtk>
24. DJI. (2023). *Zenmuse L2 – Лідарна система*. <https://www.dji.com/zenmuse-l2>
25. Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape User Manual*. [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_8\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_8_en.pdf)
26. Pix4D. (2023). *Pix4Dmapper – Photogrammetry software*. <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>
27. CloudCompare. (2022). *CloudCompare – Open Source 3D point cloud processing software*. <https://www.danielgm.net/cc/>
28. Rapidlasso GmbH. (2022). *LAStools*. <https://rapidlasso.com/lastools/>
29. Бондаренко О. В., Іщенко С. А. Цифрові моделі місцевості у геоінформаційних системах. — Київ: Либідь, 2020. — 212 с.
30. Марчук А. С. Методи векторизації топографічних даних: аналіз і практика // Вісник геодезії та картографії. — 2022. — №2. — С. 34–42.
31. Petrov M., Lukin S. Efficient LiDAR Data Classification and DEM Creation in Spatix and 3Dsurvey // Remote Sensing Review. — 2021. — Vol. 15(3). — P. 145–162.