

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва `ІФНТУНГ-ДонНАБА`
Кафедра геодезії та землеустрою**

ЛАБЕНСЬКИЙ Станіслав Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК _____

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

«Оцінка точності та придатності SLAM сканування для побудови
топографічних карт масштабу 1:500 на прикладі території ІФНТУНГ»

Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

Здобувач освітнього рівня: _____ Лабенський

С.Ю. _____

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: КОВТУН Віталій Миронович, канд. техн. наук, ст. викладач

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

_____ **Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

Професор

(посада)

(підпис)

(дата)

Приходько М.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

_____ (посада)

(підпис)

(дата)

(прізвище та ініціали)

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

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва `ІФНТУНГ`
ДонНАБА`

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень магістр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

Освітньо-професійна програма Геодезія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГКЗ

Приходько М. М.

« » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

ЛАБЕНСЬКОМУ Станіславу Юрійовичу

1. Тема роботи «Оцінка точності та придатності SLAM сканування для побудови топографічних карт масштабу 1:500 на прикладі території ІФНТУНГ»

Керівник роботи к. т. н., ст. викладач КОВТУН Віталій Миронович

Наказ ректора від 28.08.2024

2. Термін подання студентом роботи 23.12.2025

3. Вихідні дані для роботи матеріали з переддипломної практики

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

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ 3D-СКАНУВАННЯ

2 МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ 3D-СКАНУВАННЯ ОБ'ЄКТА

3 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ПОБУДОВА 3D-МОДЕЛІ

4 АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ ТА ПОРІВНЯННЯ ІЗ КЛАСИЧНИМИ

МЕТОДАМИ ВИМІРЮВАНЬ

5. Дата видачі завдання 01.12.2025

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання
1	Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Опрацювання рекомендованої літератури. Складання попереднього плану та змісту магістерської роботи	01.12.2025 02.12.2025
2	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ 3D-СКАНУВАННЯ	02.12.2025 05.12.2025
3	МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ 3D-СКАНУВАННЯ ОБ'ЄКТА	06.12.2025 12.12.2025
4	ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ПОБУДОВА 3D-МОДЕЛІ	13.12.2025 17.12.2025
5	АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ ТА ПОРІВНЯННЯ ІЗ КЛАСИЧНИМИ МЕТОДАМИ ВИМІРЮВАНЬ	18.12.2025 20.12.2025
	Оформлення магістерської роботи та додатків до неї, складання висновків.	21.12.2025 22.12.2025

Студент _____ ЛАБЕНСЬКИЙ С.Ю.

Керівник _____ КОВТУН В.М.

АНОТАЦІЯ

Робота включає 74 сторінок текстової частини, 8 таблиць, 13 рисунків та презентаційні матеріали.

У вступі обґрунтовано актуальність застосування сучасних технологій 3D-сканування в геодезії, визначено мету та основні завдання дослідження.

У першому розділі наведено порівняння класичних геодезичних методів із 3D-скануванням та визначено основні сфери застосування тривимірних технологій.

Другий розділ присвячений опису використаного обладнання, характеристиці об'єкта дослідження та умов виконання робіт. Детально розглянуто процес планування сканування, побудову геодезичної основи, виконання польових робіт і попередній контроль точності отриманих даних.

У третьому розділі описано повний цикл камеральної обробки хмар точок: від імпорту й первинної фільтрації до геопросторової прив'язки, редагування та оптимізації даних. Також розглянуто процес векторизації об'єктів, формування тематичних шарів, створення топографічного плану в масштабі 1:500 та підготовку графічних матеріалів у середовищах Digitalis і AutoCAD.

У четвертому розділі виконано порівняльний аналіз результатів, отриманих за допомогою 3D-сканування та традиційних геодезичних методів. Оцінено точність, продуктивність, інформативність даних і економічну доцільність застосування мобільного лазерного сканування, а також зроблено узагальнюючу оцінку ефективності обраної технології.

У висновках узагальнено результати дослідження, підтверджено доцільність використання 3D-сканування для створення великомасштабних топографічних планів та визначено перспективи подальшого розвитку і практичного впровадження отриманих результатів у геодезичній практиці.

Ключові слова: хмара точок, 3D-сканування, векторизація, SLAM, обробка даних, 3DSurvei.

ABSTRACT

The work includes 74 pages of text, 8 tables, 13 figures and presentation materials.

The introduction justifies the relevance of using modern 3D scanning technologies in geodesy and defines the purpose and main objectives of the study.

The first chapter compares classical geodetic methods with 3D scanning and identifies the main areas of application of three-dimensional technologies.

The second chapter is devoted to the description of the equipment used, the characteristics of the research object, and the conditions for performing the work. The process of planning the scanning, constructing the geodetic basis, performing field work, and preliminary control of the accuracy of the obtained data is considered in detail.

The third chapter describes the complete cycle of office processing of point clouds: from import and initial filtering to geospatial referencing, editing, and data optimization. It also covers the process of vectorizing objects, forming thematic layers, creating a topographic plan at a scale of 1:500, and preparing graphic materials in Digitals and AutoCAD environments.

The fourth chapter provides a comparative analysis of the results obtained using 3D scanning and traditional geodetic methods. The accuracy, productivity, informativeness of data, and economic feasibility of using mobile laser scanning are evaluated, and a summary assessment of the effectiveness of the selected technology is made.

The conclusions summarize the results of the study, confirm the feasibility of using 3D scanning to create large-scale topographic plans, and identify prospects for further development and practical implementation of the results obtained in geodetic practice.

Keywords: point cloud, 3D scanning, vectorization, SLAM, data processing, 3DSurvei.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1	11
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ 3D-СКАНУВАННЯ.....	11
1.1 Етапи розвитку геодезії: від давніх часів і до сучасності.....	11
1.2 Принципи роботи лідарних систем.....	14
1.3 Інтеграція SLAM та лідарних технологій. SLAM-лідарні комплекси в геодезії.....	15
1.4. Порівняння класичних геодезичних методів із 3D-скануванням	19
1.5. Сфери застосування 3D-сканування	22
РОЗДІЛ 2.....	26
МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ 3D-СКАНУВАННЯ ОБ’ЄКТА.....	26
2.1. Технічні засоби та обладнання, використані під час виконання робіт ..	26
2.2. Характеристика об’єкта дослідження.....	28
2.3. Планування сканування та схема розміщення контрольних точок	32
2.4. Виконання польових робіт.....	34
2.5. Контроль точності та попередня оцінка якості даних	35
РОЗДІЛ 3.....	38
ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ПОБУДОВА 3D-МОДЕЛІ	38
3.1. Імпорт та первинна фільтрація хмар точок.....	38
3.2. Геопросторова прив’язка та суміщення хмари точок із GNSS-мережею	41
3.3. Редагування, повторна реєстрація та оптимізація хмари точок	43
3.4. Структурування даних та формування тематичних шарів у середовищі 3D Survey	45
3.5. Експорт даних у Digitals та формування топографічного плану	49
3.6. Формування графічних матеріалів та підготовка підсумкової документації в середовищі AutoCAD	54
РОЗДІЛ 4.....	58
АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ ТА ПОРІВНЯННЯ ІЗ КЛАСИЧНИМИ МЕТОДАМИ ВИМІРЮВАНЬ.....	58

4.1. Порівняння кінцевих результатів із традиційними методами знімання	58
4.2. Продуктивність виконання робіт	59
4.3. Інформативність просторових даних та можливість повторного аналізу	60
4.4. Похибки та точність результатів	60
4.4.1. Аналіз похибок для 3D-сканування	61
4.4.2. Аналіз похибок для GNSS-спостережень.....	64
4.4.3. Порівняння результатів	68
4.5. Економічна доцільність використання 3D-сканування	69
4.6. Узагальнююча оцінка ефективності застосування мобільного 3D-сканування	70
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

3D — тривимірний

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) — одночасна локалізація та побудова карти

LiDAR (Light Detection and Ranging) — лазерне зондування та вимірювання відстаней

GNSS (Global Navigation Satellite System) — глобальна навігаційна супутникова система

GPS (Global Positioning System) — глобальна система позиціонування

RTK (Real-Time Kinematic) — режим кінематичних супутникових вимірювань у реальному часі

IMU (Inertial Measurement Unit) — інерціальний вимірювальний модуль

СКП — середньоквадратична похибка

МСК — місцева система координат

CAD (Computer-Aided Design) — автоматизоване проєктування

BIM (Building Information Modeling) — інформаційне моделювання будівель

ГІС — геоінформаційна система

ppm (parts per million) — частин на мільйон

DWG — формат графічних файлів AutoCAD

DXF — формат обміну векторними даними

PDF — формат електронних документів

RGB — колірна модель (червоний, зелений, синій)

ВСТУП

Актуальність обраної теми. Швидкий розвиток цифровізації в сучасній геодезії призвів до суттєвих змін у методах збору, обробки та представлення геопросторової інформації. Одним із найбільш динамічних технологічних рішень, що активно включається в інженерні проекти, є наземне тривимірне (3D) сканування. Цей підхід дозволяє створювати надзвичайно детальні та точні моделі об'єктів у вигляді хмар точок, що значно покращує якість технічних даних і оптимізує вирішення інженерних завдань. Актуальність цього напрямку досліджень зумовлена потребою швидкого, безпечного та надзвичайно точного збору геопросторової інформації на територіях зі складною забудовою, як-от в зоні освітніх установ. Використання 3D-сканера створює можливості для детального аналізу, розробки цифрових копій і підвищення точності геодезичних вимірювань відповідно до сучасних стандартів галузі та глобальної тенденції до цифровізації будівництва й управління простором.

Технічна необхідність. Застосування 3D-сканування викликане потребою виконання ретельних геодезичних робіт в середовищах з високою щільністю інженерних споруд і різнорівневими площинами. Традиційні методи зйомки не завжди забезпечують бажаний рівень повноти інформації й зазвичай вимагатимуть більше часу та людських ресурсів. Наземний 3D-сканер, завдяки високій щільності вимірювань і швидкості збору даних, здатен значно скоротити тривалість польових робіт, покращити точність фіксації деталей та зменшити вплив людського фактора. Це особливо важливо при обстеженні територій із великим потоком людей та техніки або складною конфігурацією будинків.

Мета. Основною метою даного дослідження є теоретичне обґрунтування і практична реалізація технології наземного тривимірного сканування в геодезичних дослідженнях. Важливим аспектом є оцінка точності,

продуктивності та потенціалу використання зібраних даних для вирішення інженерно-технічних задач.

Об'єктом дослідження виступає територія Університету Нафти і Газу, включаючи будівлі, елементи інфраструктури, зелені насадження та відкриті простори як єдиний просторово-інженерний комплекс.

Предметом дослідження є процес проведення тривимірного наземного сканування конкретної місцевості а також способи обробки й аналізу отриманих хмар точок. Окремо розглядається співвідношення отриманих результатів з традиційними геодезичними методами для оцінювання їхньої точності та загальної придатності.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених цілей у цьому дослідженні використовувався набір методів, який можна умовно поділити на теоретичні й емпіричні (польові). До теоретичних належать:

- Системний аналіз: використовувався для визначення й структуризації вимог діючої нормативної бази (ДБН В.1.3-2:2010; ДБН А.2.1-1-2014; інструкції щодо топографічної зйомки).

- Порівняльний аналіз: проводився для порівняння технічних характеристик і економічної ефективності різноманітних методик зйомки (класична тахеометрія, GNSS, 3-D сканування).

- Математико-статистичні методи: застосовувалися для оцінювання точності вимірювань та розрахунку середньоквадратичних похибок.

До емпіричних (польових) можна віднести:

- Метод статичних GNSS спостережень: використовувався разом із GNSS-приймачем для визначення високоточних координат прив'язки.

- Метод кутових засічок: дозволяє обчислювати координати невідомої точки шляхом вимірювання кутів між відомими пунктами.

- Метод тахеометрії (протягнення незамкнутого ходу): передбачає використання електронного тахеометру для формування внутрішньої мережі зйомки.

- Метод полярних координат: визначає позицію точки за відстанню від початку координат і кутами повороту.

- Метод цифрового моделювання: включає використання спеціалізованого програмного забезпечення для створення цифрової моделі рельєфу.

Практичне значення результатів. Отримані результати мають всебічну основу і можуть бути використані для розвитку цієї тематики, розширюючи знання у відповідній сфері.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ 3D-СКАНУВАННЯ

1.1 Етапи розвитку геодезії: від давніх часів і до сучасності

Геодезія, як наука і практика, має унікальне глибоке коріння, бо потреба вимірювати землю, визначати просторові положення, будувати орієнтири і контрольні мережі існувала в багатьох цивілізаціях із найдавніших часів. Упродовж історії відбувалися значні перетворення і еволюція методів, приладів, підходів та технологій. Сьогодні, з урахуванням стрімкого розвитку цифрових технологій, супутникової навігації, автоматизації й обробки даних, геодезія зазнає нових якісних стрибків. В цьому розділі ми розглянемо основні етапи розвитку геодезичної справи, звернувши увагу на ключові методичні, технічні та організаційні зміни.

Давні й класичні етапи

На ранньому етапі розвитку людства основні геодезичні роботи виконувалися засобами, тісно пов'язаними з вимірюванням відстаней, кутів, висот і орієнтуванням ліній на місцевості. За допомогою простої оптики і примітивних приладів – астрономічних чи геометричних, землемірної стрічки або ходової лінії – визначали межі, прокладали шляхи, зводили споруди, орієнтувалися на місцевості. У класичних трактатах описували методи вимірювання горизонтальних і похилих відстаней, побудову трикутних мереж, використання водяного рівня або простих нівелірів. На цьому етапі геодезія тісно перепліталася з топографією, картографією, землеустроєм і будівництвом.

Індустріалізація та механізація геодезичних вимірювань

З розвитком промисловості та масштабних інфраструктурних об'єктів – залізниць, мостів, тунелів, автомагістралей – різко зросли вимоги до точності, швидкості та обсягу геодезичних робіт. З'явилися спеціалізовані інструменти:

електронні тахеометри, автоматизовані нівеліри, далекоміри, теодоліти з фотоелектричним або оптичним відліком. Були запроваджені стандарти точності, допустимі похибки, процедури контролю й обробки результатів вимірювань. Механічна точність, калібрування приладів, лабораторна перевірка і метрологічне забезпечення стали обов'язковими компонентами. Геодезична мережа стала невід'ємною частиною інженерного супроводу масштабних будівельних та промислових проєктів.

Виникнення супутникових і цифрових технологій

У другій половині XX – на початку XXI століття геодезія зазнала справжньої революції: були впроваджені супутникові системи позиціонування (GNSS/GPS), лазерне сканування, безпілотники для аерофотознімання, цифрові тахеометри із записом даних, а також програмне забезпечення для обробки геодезичної і топографічної інформації. Завдяки цьому суттєво зросла продуктивність польових робіт, зменшилися часові витрати, зросла точність і з'явилась можливість охоплення великих територій із автоматизованою обробкою даних. Особливо важливо – координати, визначені супутниковими системами, дозволили створювати мережі з глобальним охопленням. А цифрові системи забезпечили пряме підключення геодезичних даних до CAD, ГІС та інформаційного моделювання об'єктів.

Геодезія в епоху цифрової трансформації

Сьогодні геодезія вступає в нову еру – інтеграція з ІТ-сферою вже не виняток, а норма. Активно впроваджуються такі технології, як інформаційне моделювання будівель (BIM), геоінформаційні системи (ГІС), автоматизовані польові станції, тривимірне лазерне сканування, хмарні сервіси для зберігання, обробки та візуалізації геоданих. Також активно використовуються технології для моніторингу технічного стану споруд, а GNSS, сенсори та дрони забезпечують постійне спостереження за деформаціями об'єктів. Цей етап характеризується глибокою автоматизацією, автономністю систем, цифровою інтеграцією та майже миттєвим аналізом даних.

Основні виклики та перспективи розвитку

Попри технологічні досягнення, перед геодезією стоять серйозні виклики. З одного боку, потрібно забезпечити надвисоку точність і надійність вимірювань у складних умовах: у містах, горах, динамічних середовищах. З іншого – необхідна швидка та безперервна обробка великих обсягів інформації, інтеграція даних, високошвидкісний збір даних. Також змінюється профіль фахівця: сучасний геодезист має володіти не тільки традиційними знаннями, але й працювати з цифровими приладами, програмами, GIS/BIM-системами, 3-D сканерами, дронами, аналізувати дані, тощо. В умовах управління проектами геодезія перетворюється на важливу частину цифрового будівництва та «розумної» інфраструктури, де вимірювання стають частиною єдиного інформаційного потоку. Враховуючи все вищесказане можна зробити висновок,

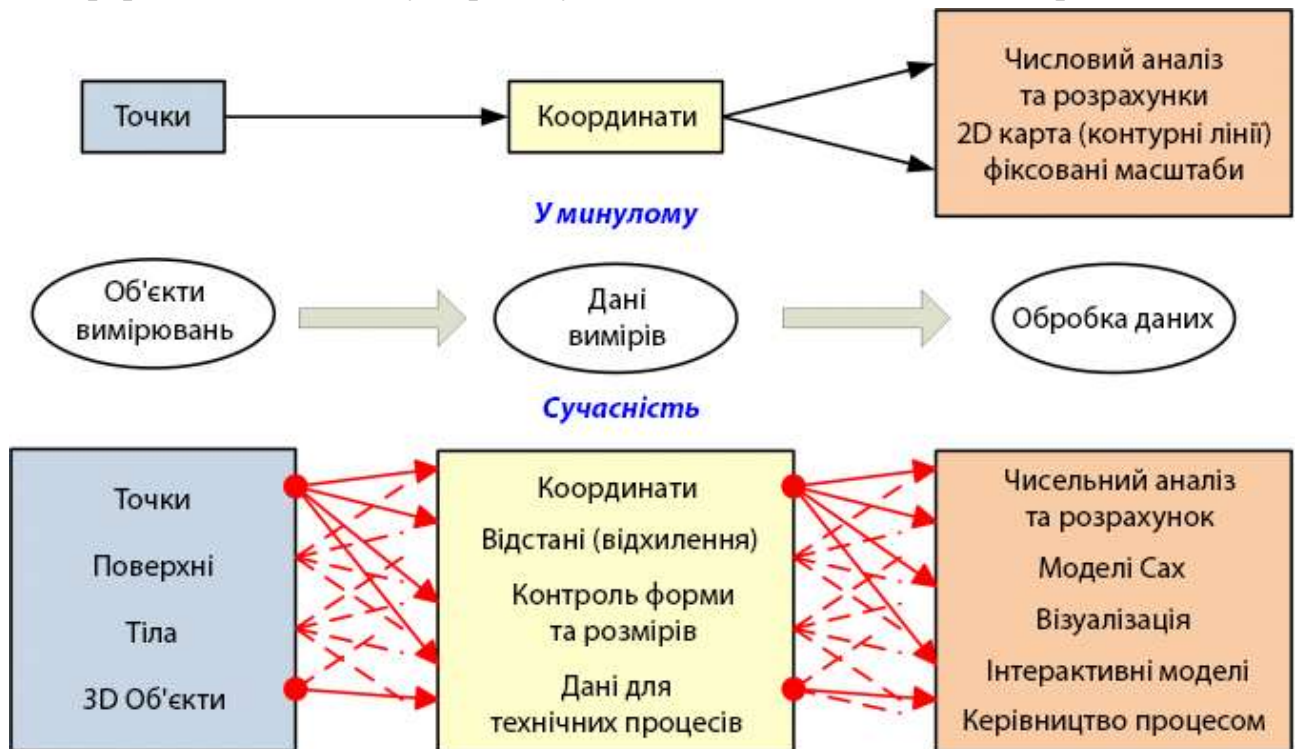


Рис. 1.1 Відмінність геодезичних задач в минулому та сьогодні.

що майбутнє геодезії – це вже не просто вимірювання, а інформаційна платформа для моніторингу, керування і прийняття рішень.

1.2 Принципи роботи лідарних систем

Лідарні технології займають центральне місце у сучасній геодезії та тривимірному просторовому моделюванні, забезпечуючи високу точність, оперативність і масштабованість процесу збору даних у багатоманітних умовах. Принцип функціонування лідару базується на активному методі дистанційного зондування, що передбачає генерацію лазерних імпульсів та реєстрацію їхнього відбиття після взаємодії з навколишніми об'єктами. Основний механізм цього процесу полягає у вимірюванні часу проходження імпульсу від передавача до цілі й назад, що дозволяє визначати точну відстань до кожної точки простору. Ці вимірювання здійснюються з високою частотою – сотні тисяч або навіть мільйони разів на секунду, що сприяє формуванню хмари точок, яка виступає високодетальною цифровою моделлю об'єктів і поверхонь.

Лідарні системи можуть функціонувати в різних режимах, серед яких найчастіше застосовуються time-of-flight, phase-shift та FMCW-метод.

Режим time-of-flight передбачає визначення часу між генеруванням лазерного імпульсу та отриманням його відбиття.

У методі phase-shift розглядається фазовий зсув між випроміненим і прийнятим сигналом, що забезпечує високу точність на коротких дистанціях.

Сучасний варіант, FMCW-лідар, використовує безперервний сигнал із частотним модулюванням, одночасно надаючи дані про відстань і швидкість об'єкта.

Комбінація цих методів у різноманітних конфігураціях, доповнена багатоканальними лазерними системами та розширеними полями огляду, дозволяє виконувати просторове сканування як у статичних, так і в динамічних умовах. Це охоплює великі території, складні промислові зони та урбанізоване середовище.

Сучасні лідарні системи включають не тільки лазерний передавач і приймач, але й численні додаткові компоненти: інерціальні навігаційні системи, супутникові приймачі, гіроскопи, енкодери, стабілізаційні платформи та

обчислювальні модулі для первинної обробки сигналів. Ці елементи забезпечують узгодженість вимірювань, корекцію похибок і геоприв'язку

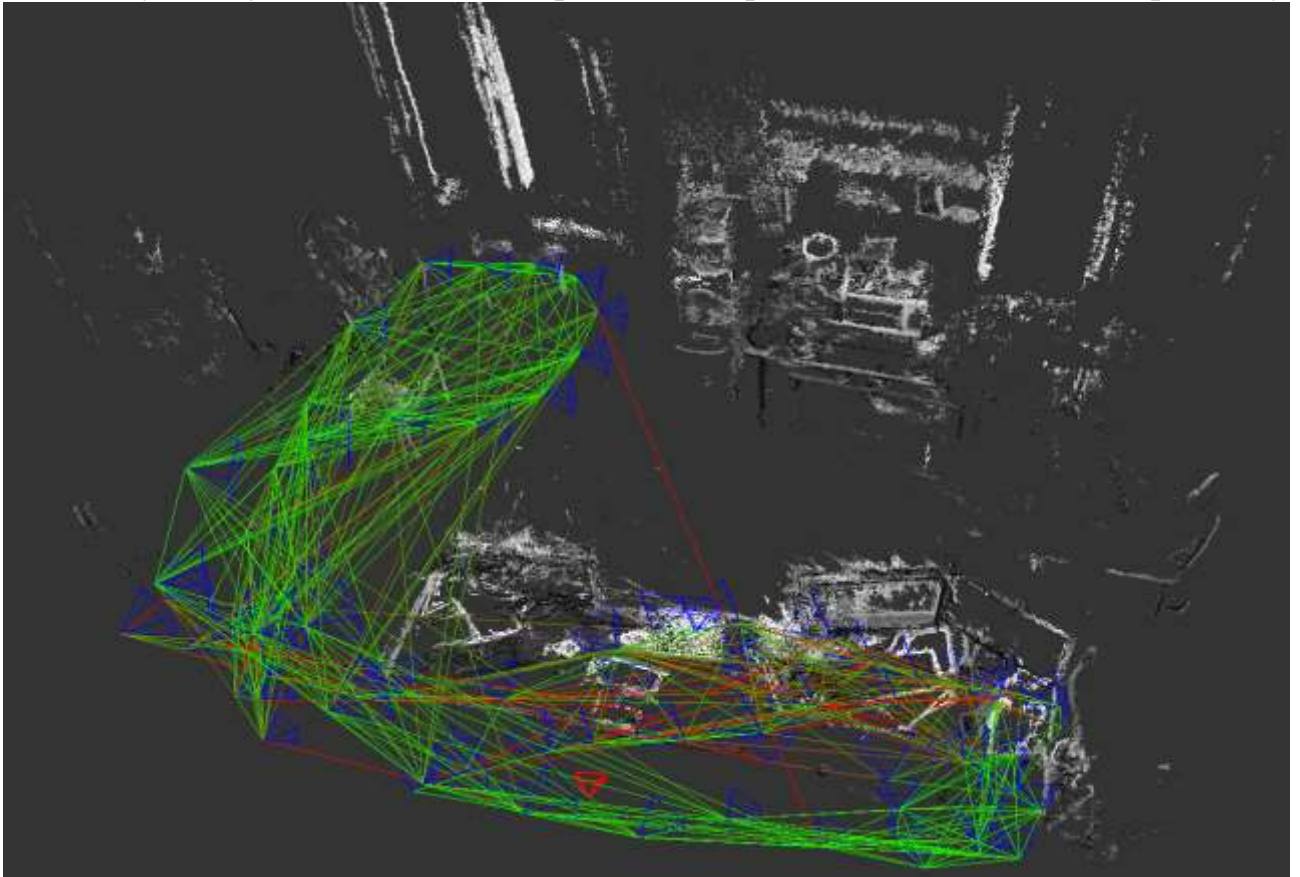


Рис. 1.2 Сканування урбанізованої місцевості

отриманих даних. Якість кінцевої цифрової моделі значною мірою залежить як від точності лазерних вимірювань, так і від синхронізації каналів сенсорів, стабільності руху платформи та ефективності алгоритмів попереднього видалення шумів.

1.3 Інтеграція SLAM та лідарних технологій. SLAM-лідарні комплекси в геодезії

Розвиток робототехніки, автоматизації та мобільного картографування сприяв популяризації технології одночасної локалізації та побудови карти (SLAM – Simultaneous Localization and Mapping). SLAM первісно виник як інструмент автономної навігації роботизованих систем у невідомих просторах

без зовнішньої системи навігаційної прив'язки, такої як GNSS. Технологія дозволяє рухомому об'єкту визначати своє положення та одночасно моделювати навколишнє середовище виключно на основі даних із власних сенсорів. Ця особливість дає змогу виконувати високоточне сканування у підземних тунелях, будівлях або в умовах слабого чи недоступного супутникового сигналу.

Інтеграція SLAM з лідаром стала одним із найважливіших досягнень у сучасних технологіях просторового моделювання. Лідар забезпечує високоточну інформацію щодо відстаней і геометрії оточуючих об'єктів, тоді як алгоритми SLAM виконують обчислення переміщення платформи на основі аналізу послідовностей хмар точок у режимі реального часу. Центральним компонентом роботи SLAM є процес визначення відповідностей (feature-matching), за допомогою якого алгоритм виявляє однакові характеристики між окремими сканами, що дозволяє обчислювати зміни у позиціонуванні сканера. Паралельно створюється карта середовища, яка постійно уточнюється під час кожного циклу вимірювань. Такий підхід не тільки дозволяє реєструвати форму і структуру простору, але й компенсувати накопичення похибок, що є звичайним для інерціальних вимірювань під час руху.

У практичному використанні системи на основі лідару та SLAM можуть функціонувати в кількох режимах. Наприклад, лідарно-інерціальний SLAM об'єднує дані з інерціальної навігаційної системи з аналізом двовимірних або тривимірних сканів, значно підвищуючи надійність і точність визначення траєкторії. Візуально-лідарний SLAM доповнюється інформацією від камер, що додають текстурні деталі й сприяють більш точному розпізнаванню просторових характеристик. У сфері мобільного картографування такі системи успішно використовуються для створення точних моделей коридорів, шахт, технічних приміщень, міських територій, а також складних промислових об'єктів навіть в умовах швидкого переміщення платформи.

Важливим компонентом технології є механізм замикання контуру (loop closure), завдяки якому система розпізнає моменти повторного відвідування вже обстежених ділянок середовища. Це дозволяє переглянути й корегувати

траєкторію руху, усунути накопичені помилки та забезпечити точніше вирівнювання карти. Завдяки технології loop closure інтегровані системи SLAM із лідарами здатні досягати рівня точності, порівнянного зі статичними наземними сканерами, але в динамічніших сценаріях застосування.

Лідарні системи з використанням SLAM стали широко використовуваними в геодезії завдяки їхній здатності забезпечувати деталізацію, оперативність і адаптивність. Сучасні мобільні картографічні платформи мають можливість фіксувати дані зі швидкістю сотень тисяч або навіть мільйонів точок на секунду, що суттєво зменшує тривалість польових робіт у порівнянні з традиційними методами. Вони також забезпечують можливість реального створення 3D-моделей, виконання інвентаризації об'єктів, оцінки деформацій конструкцій, моніторингу технічного стану споруд і створення цифрових двійників територій.

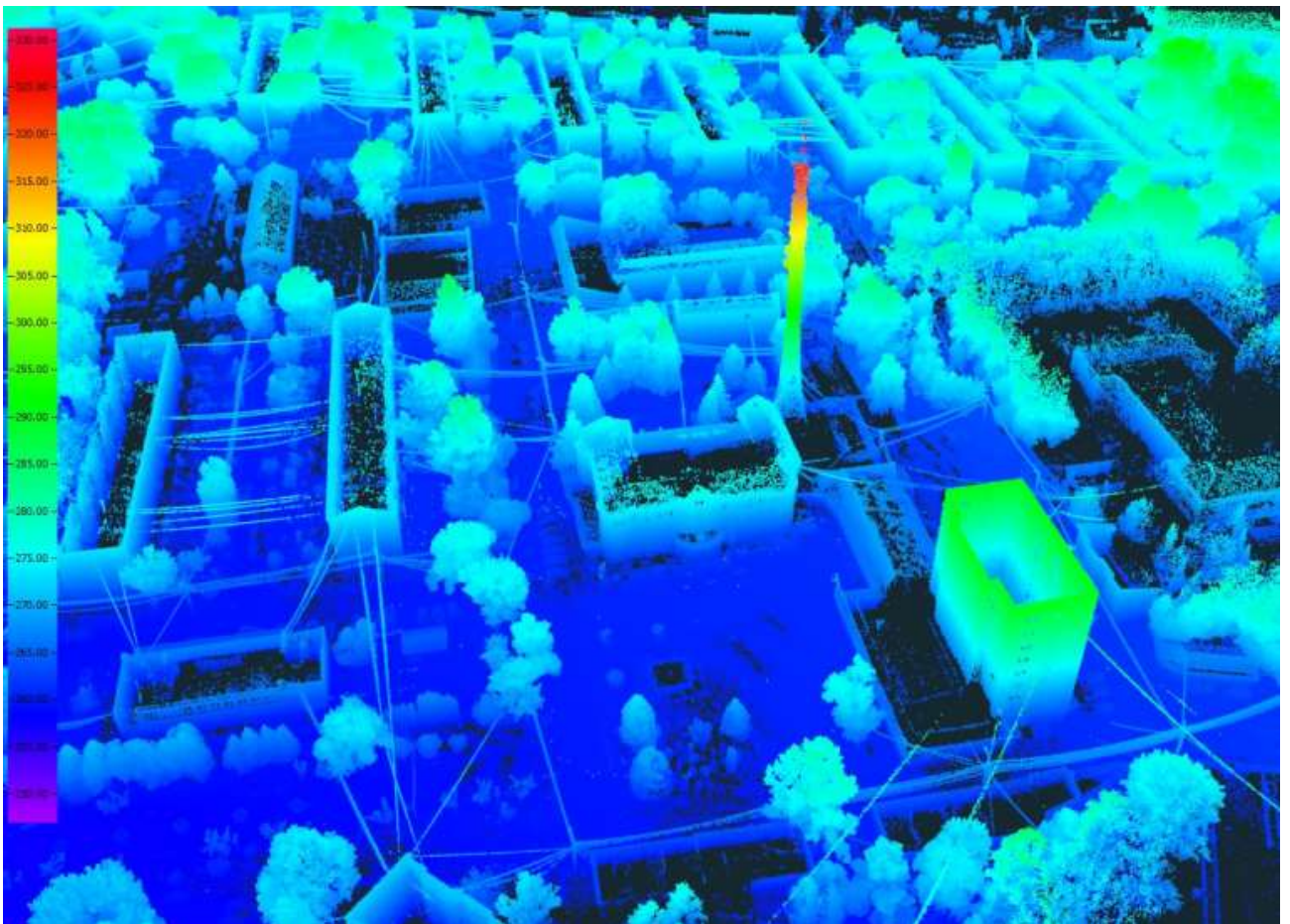


Рис. 1.3 Хмара точок з висотним кодуванням

Крім того, поєднання лідару зі SLAM сприяло впровадженню інноваційних підходів у просторове моделювання, зокрема через застосування методів машинного навчання для автоматичної класифікації точок, сегментації просторів та ідентифікації об'єктів. Використання алгоритмів штучного інтелекту дозволяє покращити якість сканування при низькій текстурності поверхонь, компенсувати вплив шумових факторів або складних умов освітлення. Ці переваги роблять технологію незамінною в таких галузях, як транспортна інфраструктура, містобудування, архітектурний аналіз і моніторинг природного середовища.

Поява переносних 3D-сканерів, рюкзакових модулів та компактних автономних роботизованих платформ суттєво змінила підхід до збору просторових даних. У таких системах технологія SLAM фактично стала ключем до безперервного орієнтування та отримання тривимірного уявлення про навколишній простір. Вона дає змогу оператору вільно пересуватися територією без довгих процедур калібрування чи налаштування, що помітно прискорює виконання польових робіт. Завдяки цьому фахівець може зосередитися не на підготовчих етапах, а на тому, щоб отримати якісний результат за мінімальний час.

У сучасних дослідженнях велика увага приділяється тому, щоб зробити SLAM-алгоритми більш стійкими до непередбачуваних змін середовища – руху людей, техніки чи інших динамічних об'єктів. Все частіше такі системи поєднують декілька сенсорів у єдину інформаційну модель. Так звані мультисенсорні конфігурації поєднують GNSS, IMU, камерні системи, одометрію та картографічні дані, створюючи максимально надійну схему позиціонування навіть у складних умовах. Для геодезії це означає можливість будувати високоточні тривимірні моделі міських просторів, промислових зон, лісових масивів та розгалужених підземних мереж – тобто тих об'єктів, де традиційні методи вимірювання працюють із суттєвими обмеженнями.

Поєднання лідарних технологій зі SLAM уже сьогодні можна назвати одним із найважливіших кроків у розвитку 3D-картографування та сучасної геодезії. Висока щільність хмари точок, здатність працювати у режимі реального

часу, автономність і гнучкість таких систем фактично формують новий стандарт просторового моделювання. Цей підхід відкриває широкі можливості для цифрової трансформації територіальних досліджень, технічного моніторингу та аналітики. У результаті формується принципово нова парадигма тривимірного відтворення – швидка, точна та пристосована до інтеграції з цифровими сервісами, які визначатимуть технологічний розвиток у найближчі роки.

1.4. Порівняння класичних геодезичних методів із 3D-скануванням

Коли говорять про геодезію, часто мають на увазі щось дуже усталене, перевірене десятиліттями, майже класичне у всіх сенсах. Теодоліти, нівеліри, рейки, розбивочні роботи – усе це складає основу професії, яку важко уявити без точності, витривалості та уважності. Однак за останні приблизно два десятиліття геодезія почала стрімко змінюватися, і зміни ці настільки суттєві, що інколи виникає враження, ніби сама дисципліна поступово створює нову власну інтерпретацію простору. Однією з найбільш помітних трансформацій стало запровадження різних технологій 3D-сканування, які часто порівнюють із традиційними методами, хоча по суті вони виконують ті ж завдання, але зовсім по-іншому. Саме тому порівняння класичних підходів і тривимірного сканування варто розглядати не лише як чергове зіставлення обладнання, а радше як аналіз двох світоглядів у рамках однієї професії.

У класичній геодезії основа – це послідовні вимірювання конкретних точок. І як би технології не удосконалювались, а принцип залишається майже незмінним: є обрана точка, на яку ставлять віху, геодезист візує приладом і фіксує значення. Потім – наступна точка. І так десятки, сотні разів, залежно від складності об'єкта. Така технологія передбачає повну залежність якості від людського фактора: від того, як геодезист поставить відбиття, чи добре він бачить рейку, чи не помилився у записах, чи правильно визначив конфігурацію маршруту. Це потребує дисципліни, уважності та доволі багато часу. Якщо, наприклад, потрібно зняти фасад старої будівлі або складний інженерний вузол,

доведеться вручну визначати всі характерні точки, а це фізично обмежує деталізацію.

На цьому тлі 3D-сканування виглядає зовсім іншим підходом. Його філософія – не вибір точок, а тотальне захоплення простору. Сканер, незалежно від моделі, працює за схожим принципом: він виконує неймовірно велику кількість вимірів за дуже короткий час, формуючи хмару точок, яку вже потім обробляють. Ця хмара і є фактично цифровим відбиттям об'єкта. Тут уже не йдеться про вибір опорних точок – сканер знімає все, що бачить, і часто навіть більше, ніж потрібно. Це звучить ефектно, але за цим стоїть важливе практичне значення: геодезист працює не з окремими точками, а з повною геометрією.

У класичних методах вимірювань є очевидна перевага: вони забезпечують винятково високу точність окремих точок. Тахеометр чи нівелір дозволяють контролювати справді мінімальні відхилення, що важливо під час будівництва або моніторингу деформацій. Це передбачає наявність мережі, реперів, жорсткого зв'язку між точками. Проте така точність обмежена саме тим, що вимірюється лише те, що було вибрано вручну. Можна зняти хоч 500 точок на фасаді – але це не дасть повної картини, коли об'єкт має складний рельєф чи нерівності, які не завжди можна помітити візуально.

3D-сканування в цьому сенсі не змагається за кожен окрему десятку міліметра, але виграє завдяки обсягу й повноті. У багатьох практичних ситуаціях ця повнота важливіша, ніж «ювелірна» точність. Наприклад, коли потрібно відтворити історичний фасад для реставрації, саме хмара точок дозволить побачити всі дрібні викривлення, провали, тріщини, які класичні прилади просто не вловлюють. Додайте до цього обмежений час, у який потрібно вкластися, і вибір стає очевидним: сканування дає змогу за кілька хвилин отримати те, на що тахеометр витратив би години або навіть дні.

Окремим моментом є умови роботи. Класичним приладам потрібна видимість між точкою і приладом. У густому лісі або виробничому приміщенні з великою кількістю обладнання це стає або вкрай складним, або взагалі неможливим. 3D-сканери, особливо ті, що працюють разом зі SLAM, поведуться

в таких умовах неймовірно «вільно»: вони здатні працювати там, де відсутній GPS, де немає прямої візирної лінії, де простір хаотичний. Саме такі системи дають можливість знімати підземні колектори, гірничі виробки, старі архітектурні комплекси, де традиційні методи були б надто повільними або зовсім безрезультатними.

Класична геодезія – це ремесло, яке формувалось поколіннями. Багато хто довіряє тільки тому, що можна повністю контролювати вручну. Тому до сканування інколи ставляться з осторогою або з недовірою. Вважається, що все занадто автоматизовано. Однак практика показує, що ці технології не замінюють класичні методи, а розширюють їх. Наприклад, часто під час складних обстежень спочатку закладають опорні точки традиційним методом, а потім виконують сканування – і отримана модель виявляється прив'язаною дуже точно.

Ще один важливий момент – камеральна обробка. Класична геодезія не потребує таких величезних обчислювальних ресурсів: розрахунки координат займають хвилини, максимум години. Натомість 3D-сканування генерує гігантські масиви даних, які потрібно не просто зберегти, а обробити, зшити, очистити й перетворити у придатний формат. Це інколи займає навіть більше часу, ніж сама зйомка, й потребує добре підготовленого спеціаліста. Тобто сканування виграє у полі, але вимагає більше уваги на етапі камеральних робіт.

Попри це, тенденція останніх років очевидна: більшість компаній активно переходять на технології сканування. Причина проста – вони швидкі, гнучкі та дозволяють вирішувати завдання, які класичними методами або надто дорогі, або занадто трудомісткі. Проте це не означає, що традиційні методи зникають. Навпаки, вони стають основою для контролю точності, для побудови опорних мереж і для всіх випадків, де критично важлива метрична надійність.

Сканування і класична геодезія часто працюють разом – і саме в цьому полягає майбутнє галузі. Якщо раніше геодезисти виконували знімання на замовлення і бюджет був обмежений, то тепер виникла можливість створювати цифрові двійники територій, споруд, промислових майданчиків. Хмара точок стала своєрідним «полігоном» для інженерів, архітекторів, реставраторів, які

можуть працювати з моделлю так, ніби мають об'єкт перед собою. Це відкриває величезний потенціал: від швидкої інвентаризації до аналізу аварійних ситуацій, від BIM-моделювання до геомоніторингу.

Підсумовуючи, можна сказати, що різниця між класичними методами й 3D-скануванням полягає не лише у технічних можливостях, а й у способі мислення. Перші роблять акцент на конкретних контрольних точках, другі – на повній геометрії простору. Класична геодезія дає найвищу точність у вузлових місцях, сканування – найбільшу повноту даних. Комбінація цих підходів дає оптимальний результат, і саме так працюють сучасні геодезичні підприємства.

1.5. Сфери застосування 3D-сканування

Технології просторового зчитування наразі охопили таку широку сферу, що їх використання вже давно вийшло за межі суто класичних геодезичних робіт. Спочатку ці інструменти були винайдені з метою формування високоточних електронних макетів місцевості, проте 3D-сканери поступово еволюціонували у всеосяжний метод фіксації об'ємів, який демонструє однаково ефективність як на відкритих просторах, так і всередині заплутаних інженерних конструкцій. У сучасному світі сканування виступає не просто як спосіб вимірювання, а як базова технологія, що слугує підґрунтям для функціонування безлічі напрямків – від проектування будівель до промислового конструювання.

Одним із найактивніше розвинених напрямків є сфера зведення споруд та мистецтва архітектурного проектування. При роботі над реставрацією старовинних будівель або проведенні технічної інвентаризації новітніх об'єктів виникає неминуча потреба у володінні максимально достовірними геометричними відомостями. Лазерне сканування дає змогу створювати високо деталізовані моделі фасадів, несучих елементів, складних інженерних вузлів, рівночасно надаючи інструмент для верифікації відповідності виконаних робіт проектним кресленням. Для архітекторів та осіб, що займаються проектуванням, це означає можливість оперувати фактичними, а не уявними даними, що суттєво

підвищує надійність проєктної документації та мінімізує імовірність виникнення помилок вже на стадії будівництва.

Ключовою сферою застосування можливостей 3D-зчитування є промисловий сектор, зокрема машинобудування, нафтогазова галузь, енергетика та важка промисловість. У цих умовах сканери залучають для обліку наявного устаткування, визначення актуальних геометричних характеристик конструкцій, а також для моніторингу стану трубопроводів та технологічних ліній. Вагома перевага полягає в тому, що сканування об'єктів із складною геометрією можна здійснити без переривання робочого циклу. Це дає змогу виробничим комплексам отримати тривимірні макети апаратури без загрози безпеці персоналу та без простоїв, що є критично важливим для підприємств із безперервним виробничим процесом.

Окремою та надзвичайно об'ємною площиною впровадження слугують містобудування та ведення інфраструктурних проєктів. Сканування інтенсивно використовують для створення електронних моделей транспортних розв'язок, мостових переходів, автомобільних шляхів, мереж підземних комунікацій та цілих міських кварталів. Сукупність отриманої інформації лягає в основу планування осучаснень, оцінки фактичного стану споруд та перевірки відповідності їх експлуатаційним нормам. Для органів муніципального управління та комунальних служб це стає дієвим механізмом інвентаризації, що дозволяє більш обґрунтовано управляти інфраструктурними активами та прогнозувати їх подальший розвиток.

Значне поширення 3D-зчитування отримало також у сферах геології, гірничодобувної промисловості та для спостереження за природними явищами. Лазерні системи застосовуються для аналізу схилів, кар'єрів, гірських відвалів, прибережних ліній та інших динамічних природних утворень. Висока точність моделювання дозволяє фіксувати найдрібніші зміни поверхні, що має вирішальне значення для передбачення небезпечних геологічних процесів. На шахтах і в підземних виробках наземні та портативні сканери забезпечують

швидкий збір даних про заплутану геометрію порід без необхідності залучення робітників у потенційно небезпечні зони.

У контексті збереження культурної спадщини 3D-сканування перетворилося на один із головних інструментів як фіксації, так і реставрації об'єктів. Хоча це може видаватися неочевидним, саме ця технологія дає змогу створити точну цифрову репліку архітектурних шедеврів, скульптур, експонатів музеїв або історичних споруд, що зазнали руйнування з плином часу чи внаслідок людської діяльності. Сформовані цифрові моделі використовуються для аналізу стану пам'ятки, ідентифікації критичних пошкоджень, а також для віртуальної чи фізичної реставрації втрачених частин.

У галузі транспорту 3D-сканування також займає важливу позицію. Воно знаходить застосування під час інспектування залізничних шляхів, тунельних систем, мостових споруд, аеропортів та портових комплексів. Формування високоточних цифрових макетів сприяє з'ясуванню реального профілю колії, виявленню деформацій полотна, аналізу габаритів та контролю необхідних параметрів безпеки. Крім того, отримана інформаційна база інтегрується із системами управління транспортними потоками та планування необхідних інженерних заходів.

Не варто також ігнорувати застосування сканування у сферах криміналістики та аналізу наслідків надзвичайних подій. Лазерне зчитування забезпечує швидку та безпомилкову фіксацію місця автокатастрофи, обвалу чи іншого інциденту. На противагу звичайним фотографіям, хмара точок зберігає точні просторові співвідношення об'єктів, роблячи подальшу реконструкцію подій максимально достовірною.

Протягом останніх років спостерігається стрімкий розвиток використання сканувальних технологій у сільському господарстві та ландшафтній архітектурі. Аналіз рельєфу місцевості, моделювання систем іригації, дослідження процесів ерозії – уся ця діяльність значно прискорюється завдяки наявності деталізованих тривимірних моделей. Для аграрного сектору також цінною є можливість оцінки

об'ємів для зберігання врожаю, моніторингу стану посівів та підготовки земельних ділянок до обробки.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ 3D-СКАНУВАННЯ ОБ'ЄКТА

2.1. Технічні засоби та обладнання, використані під час виконання робіт

Для реалізації комплексу польових та камеральних робіт у межах даного дослідження було застосовано сучасні засоби вимірювання та цифрового опрацювання геопросторової інформації. Використане обладнання забезпечувало необхідний рівень точності, оперативності та стабільності отриманих результатів, що є критично важливим при створенні топографічних планів великого масштабу та проведенні детального аналізу території.

Таблиця 2.1 Характеристика GNSS-приймача AlphaGEO (α -GEO) Matrix II

Характеристика	Значення
Тип приймача	Геодезичний двочастотний GNSS RTK-приймач
Супутникові системи	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Кількість каналів	800+
Точність RTK (планове положення)	8–10 мм + 1 ppm
Точність RTK (висота)	15–20 мм + 1 ppm
Точність статики	3 мм + 0.5 ppm (план), 5 мм + 0.5 ppm (висота)
Час ініціалізації	8–15 с
Режими роботи	RTK Rover, Base, Static, PPK
Комунікації	Bluetooth, Wi-Fi, GSM 4G, UHF
Пам'ять	8–16 ГБ
Робоча температура	–30...+65 °C
Маса	~1 кг
Час автономної роботи	до 12 год
Програмне забезпечення	AlphaGEO Field, SurvX, Carlson
Особливості	Підтримка IMU, стабільність фіксу у складних умовах, захист IP67

Одним із ключових інструментів була GNSS/RTK система AlphaGEO (α -GEO) Matrix II, яка використовувалася для створення опорної мережі контрольних точок. Це приймач подвійної частоти із підтримкою сучасних супутникових систем (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), що дозволяє отримувати координати у режимі RTK з точністю на рівні ± 8 – 10 мм по плану та ± 15 – 20 мм по висоті за сприятливих умов спостереження. Висока швидкість ініціалізації, стійкість до короткочасних перешкод та можливість роботи у польових умовах без тривалої підготовки роблять його ефективним інструментом для побудови локальної геодезичної мережі. У роботі GNSS-приймач забезпечував визначення координат 38 опорних точок, які стали основою для подальшої прив'язки результатів сканування.

Другим основним інструментом був ручний 3D-сканер Lixel L2, який забезпечував мобільне лазерне сканування території. Це компактний LiDAR-комплекс нового покоління, побудований на принципі активного зондування з високою частотою збору точок. Сканер оснащений SLAM-модулем, що дає змогу виконувати просторове позиціонування навіть у середовищах, де GNSS-сигнал є нестабільним або недоступним — наприклад, у вузьких проходах, внутрішніх дворах, серед щільної забудови. Lixel L2 забезпечує щільність хмари до кількох сотень тисяч точок за секунду, а точність реконструкції геометрії об'єктів досягає сантиметрового рівня. Завдяки невеликій вазі та автономності сканер можна використовувати у динамічному режимі, що значно прискорює робочий процес і дозволяє охоплювати складні ділянки без побудови складної тахеометричної мережі.

Таблиця 2.2 Технічні характеристики ручного 3D-сканера Lixel L2

Параметр	Характеристика
Тип сканера	Ручний мобільний лазерний сканер (SLAM-LiDAR)
Метод сканування	Лазерне сканування з використанням алгоритму SLAM для побудови траєкторії руху
Дальність вимірювання	до 120 м (у залежності від умов освітлення та відбивної здатності поверхні)

Параметр	Характеристика
Частота збирання точок	320 000 – 600 000 точок/с
Точність локальної реконструкції	± 1 – 3 см (за умови якісної прив'язки до опорних точок)
Похибка накопичення при русі	до 1% від пройденої відстані (типово для портативних SLAM-систем)
Тип датчика	Лідарний модуль з круговим оглядом та корекцією руху
Додаткові сенсори	IMU (інерційний модуль), RGB камера (у моделях з кольоризацією)
Формати експорту	LAS, LAZ, PLY, E57, TXT
Програмне забезпечення	LIXEL Studio (первинна обробка та реєстрація хмар точок)
Час автономної роботи	2–4 години (залежно від конфігурації)
Вага приладу	близько 1.2 кг
Спосіб пересування під час сканування	Ручна переноска оператором або монтаж на рюкзакову платформу
Режим роботи	Реальний час (Real-Time SLAM), можливість попереднього перегляду траєкторії
Області застосування	Геодезія, архітектура, BIM, інженерні комунікації, інвентаризація

Для уточнення координат окремих точок, перевірки точності та прокладання незамкнутого ходу застосовувався електронний тахеометр Leica. Тахеометр дозволив отримати “еталонні” значення для порівняння з даними, отриманими 3D-скануванням. Його середня точність кутових вимірювань становила 2–5", а лінійних — на рівні 1–2 мм + 2 ΔL (відносна похибка), що відповідає вимогам до побудови високоточних локальних мереж та забезпечення необхідної планово-висотної точності для масштабу 1:500.

2.2. Характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження у дипломній роботі є територія та прилеглі ділянки Університету нафти і газу, які представляють собою комплекс споруд навчального, наукового й адміністративного призначення. Ця територія має свої

особливості, що формують специфічні умови для виконання геодезичних робіт і застосування технологій 3D-сканування. Університет розташований у межах міської забудови, де поєднуються як сучасні будівельні елементи, так і об'єкти, створені кілька десятиліть тому. Це створює різноманітний просторовий ландшафт, який одночасно є і зручним для навчальних досліджень, і достатньо складним для повноцінної технічної апробації інноваційних методів вимірювання.



Рис. 2.3 Університет Нафти і Газу м. Івано-Франківськ

Територія університету має змішаний характер рельєфу. Хоча значна його частина розташована на рівнинній ділянці, невеликі перепади висот, характерні для передгірних регіонів Прикарпаття, усе ж простежуються. Саме ці незначні зміщення рельєфу створюють додатковий інтерес для геодезичних досліджень, оскільки дають можливість перевірити точність та стійкість цифрових моделей при їх створенні методами лазерного сканування. Водночас територія університету не є повністю відкритою: між будівлями розташовані зелені насадження, малі архітектурні форми, паркові зони та технічні споруди, які утворюють перешкоди для супутникових GNSS-сигналів. Це робить

температуру, супроводжуються підвищеною вологістю, частими дощами та туманами, що теж впливають на якість лазерних вимірювань, особливо на більших дистанціях.

Табл 2.1 Кліматична структура м. Івано-Франківськ

Місяць	Сер. Температу́ра, °С	Min. Температура, °С	Max. Температу́ра, °С	К-сть опадів, мм	Вологість, %
Січень	-3.2	-6.2	-0.3	40	80
Лютий	-1.8	-5.2	1.6	44	79
Березень	2.5	-1.9	6.8	55	75
Квітень	9.1	3.7	14.1	60	68
Травень	14.3	8.8	18.9	87	69
Червень	17.7	12.7	22	97	71
Липень	19.5	14.7	23.8	105	73
Серпень	19.1	14.2	23.6	73	71
Вересень	14.3	9.9	18.7	68	73
Жовтень	8.7	4.9	12.9	53	77
Листопад	3.8	0.8	7.2	48	82
Грудень	-0.9	-3.6	1.8	48	79

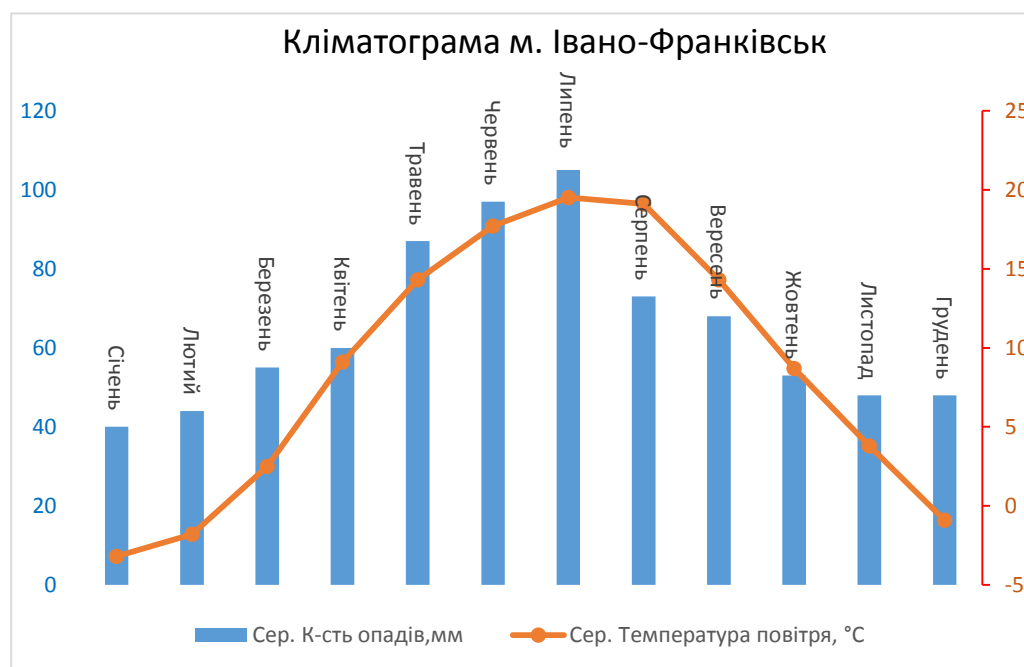


Рис. 2.3 Кліматограма м. Івано-Франківськ

Щодо забудови, то територія університету поєднує кілька навчальних корпусів різної висоти, лабораторні приміщення, спортивну інфраструктуру та

допоміжні будівлі. Їхні геометричні та архітектурні особливості роблять територію досить складною для знімання, адже тут є як прості прямолінійні фасади, так і елементи зі складною формою: лоджії, балкони, виступи, переходи та різноманітні конструктивні деталі. Саме така різноманітність дозволяє продемонструвати, наскільки ефективно лазерне сканування фіксує навіть найменші фрагменти будівель, які важко охопити традиційними інструментами.

Додатковою особливістю є наявність дерев, кущів, газонів та інших елементів ландшафтного дизайну, що частково затіняють будівлі й створюють нетривіальне середовище для вимірювання. З одного боку, рослинність ускладнює зйомку, адже листя та гілки є поганими відбивачами лазерного променя. З іншого боку, саме такі умови дозволяють проаналізувати ефективність сканера у складних просторових ситуаціях, наближених до реальних виробничих умов.

Важливо зазначити, що територія університету має характерну інфраструктурну організацію: наявні дороги, пішохідні маршрути, відкриті й напівзакриті двори, технічні під'їзди та внутрішні майданчики. Усі ці елементи створюють своєрідну «тестову зону» для дослідження можливостей тривимірного сканування. Робота у таких умовах дозволяє перевірити, як сканер поводить себе при різних відстанях, кутах нахилу, ступені відбиття поверхні, а також при наявності великих об'єктів поруч або на задньому плані.

Таким чином, територія Університету нафти і газу є багатокомпонентним середовищем, в якому поєднані природні, архітектурні та технічні чинники, що створюють широкий спектр задач для геодезичних вимірювань. Саме через таку різноманітність цей об'єкт є особливо цінним для досліджень, пов'язаних із технологіями 3D-сканування, оскільки дозволяє оцінити їхні можливості в умовах, наближених до повсякденної інженерної практики.

2.3. Планування сканування та схема розміщення контрольних точок

Планування сканування території університету вимагало попереднього продуманого підходу до побудови опорної геодезичної основи, оскільки саме від

правильності вибору контрольних точок залежала подальша можливість точно прив'язати отриману хмару точок до єдиної координатної системи. Робота розпочиналася зі створення системи контрольних точок, для яких першочергово визначали координати в полі за допомогою GNSS/RTK приймача AlphaGEO (α -GEO) Matrix II. Використання RTK-режиму дозволило в реальному часі отримати координати точок із сантиметровою точністю, що було важливо для подальшого узгодження даних наземного сканування. Точки розташовували таким чином, щоб вони рівномірно охоплювали територію університетського комплексу, забезпечували максимальну видимість та створювали геометрично стабільну основу для наступних вимірювань.



Рис. 2.4 Схема GNSS-прив'язки контрольних точок

Попри достатню точність RTK-визначення, GNSS-координати не завжди гарантували ідеальну узгодженість усієї мережі для з'єднання в єдину локальну систему. Тому після первинної розмітки проводилася додаткова деталізація мережі за допомогою електронного тахеометра, який дозволяв побудувати локальний незамкнутий хід між частиною контрольних точок. Такий підхід давав можливість уточнити окремі координати, усунути потенційні систематичні зсуви та підвищити загальну надійність мережі. Незамкнутий хід прокладали по доступних і відкритих ділянках території, вибираючи точки так, щоб забезпечити хорошу видимість між стоянками інструмента та реперами. Дані тахеометричного ходу використовувалися надалі для узгодження GNSS-вимірів і формування остаточного набору координат, придатних для використання як опорних.

Після того як координати контрольних точок були остаточно визначені і перевірені, розпочався етап планування сканування ручним 3D-сканером Lixel L2. Особливістю цього сканера є те, що він здатний працювати на основі SLAM-алгоритмів, тому вимагав безперервного руху оператора по маршруту, що забезпечує повне охоплення території. Ключовим моментом на цьому етапі було забезпечення постійної видимості хоча б кількох контрольних міток, щоб під час постобробки можна було виконати точну трансформацію хмари точок у локальну систему координат. Маршрути сканування прокладали з урахуванням розташування будівель, зелених насаджень та інженерних споруд — так, щоб мінімізувати можливість втрати трекінгу SLAM-системи.

2.4. Виконання польових робіт

Польовий етап складався з ряду дій, спрямованих на отримання максимально повної та структурованої просторової інформації. Спочатку проводили маркування контрольних точок на місцевості, після чого здійснювали GNSS-спостереження і тахеометричні вимірювання, які забезпечили необхідну геодезичну базу для подальшого сканування. Усі точки перевірялися повторними вимірами, а результати відразу ж фіксувалися в польовому журналі.

Наступним кроком було фактичне сканування території за допомогою ручного 3D-сканера Lixel L2. Оператор рухався за заздалегідь запланованою траєкторією, уникаючи зон із недостатньою текстурою або поганим освітленням, оскільки це могло негативно вплинути на слем-локалізацію. Рух був плавним і рівномірним, щоб уникнути втрати трекінгу та забезпечити коректне злиття сканів. Кожен сегмент зйомки перевірявся на наявність «дір» або зміщень перед переходом до наступної ділянки.

На завершальному етапі польових робіт проводився технічний огляд отриманого матеріалу: оцінювалася присутність шумових фрагментів, правильність замикання «слеми» та якість покриття всієї території. Особливу увагу приділяли перевірці відповідності контрольних точок, які слугували основою для геометричного вирівнювання.

2.5. Контроль точності та попередня оцінка якості даних

Контроль точності даних, отриманих у процесі лазерного сканування, є невід'ємним етапом для будь-якого геодезичного дослідження, незалежно від складності об'єкта чи типу застосованого обладнання. Хоча сучасні сканери, зокрема портативні моделі на кшталт Lixel L2, забезпечують високу щільність вимірювань та досить стабільну якість реєстрації просторових поверхонь, сам факт інструментальної модерності не гарантує автоматично відповідність даних вимогам точності. Саме тому після завершення польових робіт проводиться ретельна процедура первинного аналізу, метою якої є перевірка геометричної узгодженості, відповідності хмар точок контрольним маркам та узагальнена оцінка того, наскільки отриманий матеріал придатний до подальшої камеральної обробки.

Оскільки прив'язка сканів виконувалася через GNSS/RTK-спостереження та внутрішню інерційно-лідарну обробку сканера, першим етапом перевірки стало співставлення фактичних координат контрольних точок із координатами, які були відтворені після реєстрації сканів. Таке порівняння дозволяє визначити, наскільки стабільно сканер працював у полі та чи не відбулося накопичення

помилки внаслідок руху, нерівномірного освітлення або особливостей рельєфу. В окремих випадках, особливо коли об'єкт містить вузькі проходи або різкі зміни висот, характерним явищем може бути дрібне дрейфування траєкторії, тому оцінювання точності проводиться не лише в абсолютних значеннях, але і через перевірку відносних зміщень між сегментами хмари точок.

Для попередньої оцінки якості широко використовують відхилення між вимірними та очікуваними координатами у вигляді середньоквадратичної похибки. Формально це обчислюється через стандартне вираження:

$$m = \sqrt{\frac{\sum(v_i)^2}{n}}$$

де v_i — різниця між координатою, отриманою зі сканування, і координатою контрольної точки;

n — кількість спостережень.

Цей показник дозволяє отримати узагальнену характеристику точності, яка не залежить від того, в який саме момент роботи виникло потенційне відхилення — на початку, у середині або наприкінці траєкторії сканування. У разі, якщо значення середньоквадратичної помилки перевищує допустимі норми або суттєво відрізняється від очікуваного для конкретної моделі сканера, проводиться додатковий аналіз причин: перевіряється коректність реєстрації стоянок, якість GPS-сигналу на момент фіксації контрольних точок, відповідність умовам зйомки, а також правильність початкового виконання GNSS/RTK-спостережень.

Окрім цього, для оцінки відтворюваності хмари точок у межах площин або лінійних елементів об'єкта проводиться локальний аналіз геометричної гладкості. Наприклад, на території університету присутні протяжні горизонтальні поверхні — сходи, бордюри, фасадні лінії, — вони є природними геометричними орієнтирами для аналізу стабільності даних. У випадку нерівномірного сканування або помилок траєкторії такі об'єкти матимуть

«хвилястість» або розриви, що добре виявляються при накладанні паралельних зрізів хмари точок.

Для додаткової перевірки точності нерідко використовують оцінку відносних зміщень між окремими «пакетами» сканованих даних. У разі застосування ручного сканера, такого як Lixel L2, кожна зміна положення оператора під час руху створює окрему ділянку, яку алгоритм SLAM реєструє та поєднує з попередньою. Оцінювання точності включає аналіз того, чи існують візуальні або числові зсуви між суміжними ділянками. Якщо SLAM-алгоритм працює коректно, шви між сегментами хмари точок майже невидимі і не впливають на загальну інтерпретацію моделі.

Ще одним важливим аспектом є перевірка рівня шуму. Лідарний сигнал завжди містить певний відсоток некоректних вимірів, особливо на поверхнях зі слабкою відбивною здатністю або у випадках, коли оператор рухається швидко. Попередній аналіз шуму здійснюється через визначення точок, що значно відхиляються від локальної поверхні. Якщо кількість таких точок не перевищує статистично допустимих значень, хмара даних вважається якісною та придатною до подальшої обробки.

Також здійснюється аналіз цілісності сканованої області — чи немає у хмарі «провалів», небезпечних розривів або ділянок із недостатньою щільністю точок. Такі проблеми можуть виникати через те, що лазер не зміг охопити певний фрагмент об'єкта через перешкоди або відбиття променя. У випадках, коли такі розриви суттєві, сканування може вимагати повторного проходу. Для об'єктів університетського середовища це особливо актуально, оскільки сканер може втрачати частину даних біля скляних фасадів, металевої огорожі чи густої зелені.

Після завершення всіх описаних перевірок проводиться інтегральна оцінка відповідності отриманих даних поставленим завданням. Якщо точність координат контрольних точок, геометрична узгодженість, рівень шуму та щільність хмари точок перебувають у межах прийнятних норм, дані допускаються до подальшої камеральної обробки, включно з побудовою цифрових моделей поверхні, планів, розрізів та 3D-візуалізацій.

РОЗДІЛ 3

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ПОБУДОВА 3D-МОДЕЛІ

3.1. Імпорт та первинна фільтрація хмар точок

Процес камеральної обробки мобільного тривимірного сканування традиційно розпочинається з імпорту вихідної хмари точок у спеціалізоване програмне середовище. У цьому випадку весь комплекс робіт виконувався в програмному забезпеченні LIXEL STUDIO, яке є базовим компонентом для обробки даних, отриманих ручним сканером Lixel L2. На відміну від статичних систем, де обсяг інформації формується послідовно й прив'язується до фіксованих стоянок, мобільне сканування генерує великі масиви даних у режимі неперервного руху, тому система імпорту має забезпечувати стабільне розпізнавання треків, синхронізацію часових міток та узгодження сенсорних записів у єдину структуру.

На початковому етапі файли сканування були експортовані зі сканера у форматі .las, який широко використовується в системах 3D-обробки. Це дало можливість зберегти вихідну геометрію без перетворень та забезпечити сумісність із зовнішніми програмами на подальших кроках. Після імпорту кожен блок даних був перевірений на відповідність параметрам знімання — зокрема, значенням частоти сканування, щільності точок та наявності обривів у траєкторії. Іноколи мобільні сканери можуть формувати надлишкові сесії або дублікати ділянок, тому LIXEL STUDIO автоматично виконує внутрішню інвентаризацію та пропонує об'єднувати фрагменти, якщо їхня топологія збігається.

Характерною особливістю роботи з мобільними хмарами є наявність шумів, які з'являються навіть при незначних змінних факторах — рух операторів, дрібні коливання освітлення, перешкоди на шляху променя, віддзеркалення від поверхонь. Тому вже на етапі первинного завантаження виникає потреба виконати фільтрацію точок, які потенційно можуть

спотворювати модель. Система LIXEL STUDIO пропонує кілька методів очищення, і найпершим застосовується фільтр порогових інтенсивностей. Лазерний промінь відбивається від різних поверхонь з різною силою, тому точки з аномально низькою або надто високою інтенсивністю можна вважати недостовірними — їх вилучають або згладжують.

Після цього проводиться просторова фільтрація, яка дає можливість прибрати поодинокі точки, що не мають ближніх сусідів. У програмі застосовується метод аналізу локальної густини: якщо навколо точки радіусом 10–15 см не знайдено необхідного мінімуму сусідів, то така точка класифікується як шум. Особливо актуально це у середовищі, де є рослинність, дрібне сміття або високі контрастні елементи. Під час сканування території університету були зафіксовані подібні об'єкти — тонкі гілки дерев, дроти, фрагменти рекламних банерів. Після очистки їхній вплив на модель суттєво зменшився.

Окремий етап первинної обробки — вирівнювання та стабілізація траєкторії руху сканера. Мобільний сканер Lixel L2 працює на основі алгоритму SLAM, який визначає положення оператора за змінами у структурі навколишньої хмари точок. Проте в умовах щільної забудови можливі локальні зсуви. У нашому випадку LIXEL STUDIO проводив реконструкцію траєкторії шляхом порівняння фрагментів сканування, що перетинаються: якщо один і той самий об'єкт був відсканований кілька разів із різних ракурсів, система автоматично виявляє його та пропонує корекцію для узгодження позицій.

Після стабілізації траєкторії була виконана глобальна фільтрація, яка включає декілька типів згладжування. По-перше, це фільтрація за дистанцією, що дозволяє усунути точки, що виникли через некоректне відбиття лазера. Наприклад, під час проходження біля скляних фасадів траплялися «фантомні» дублікати об'єктів, оскільки промінь відбивався кілька разів. По-друге, проводилось згладжування «сходинок» — невеликих перепадів у моделі, що інколи з'являються у місцях швидкої зміни напрямку руху оператора. Програма аналізувала локальну площинність та формувала оптимізовані поверхні.

Ще одним важливим аспектом первинної фільтрації є усунення динамічних об'єктів. У нашій зйомці таким об'єктом були люди, які періодично проходили територією університету. Оскільки SLAM не розпізнає рухомі точки як окремі класи, вони можуть потрапляти до хмари. LIXEL STUDIO має спеціальний модуль, який аналізує темп зміни точок: якщо кластер зміщується у просторі в темпі, не властивому нерухомим конструкціям, він автоматично маркується як динамічний. Застосування цієї опції дозволило майже повністю позбутися «розмитих силуетів», що могли негативно вплинути на подальшу векторизацію.

Після завершення первинного очищення хмара точок була приведена до єдиної структури та готова до подальшої обробки. На цьому етапі формується так звана базова модель, яка представляє собою оптимізований набір геометричних даних без прив'язки до координатної системи. Така модель відображає реальний стан місцевості, але поки що не співвідноситься з глобальною просторою системою. Саме тому наступним кроком є геоприв'язка, яка базується на координатах 38 опорних точок, отриманих під час GNSS-спостережень у системі МСК26.

У процесі імпорту координати точок контролю завантажуються у програмне середовище та співставляються з відповідними маркерами, які були встановлені на території під час сканування. LIXEL STUDIO виконує трансформацію — від просторової моделі сканера до локальної геодезичної системи. Цей процес включає обчислення параметрів апроксимації: зсуву, масштабного коефіцієнта та кутів повороту між моделлю та опорною мережею. За потреби програма дає можливість вручну коригувати прив'язку, якщо деякі точки мають системні відхилення через похибки GNSS або через недостатню видимість маркерів у сканері.

3.2. Геопросторова прив'язка та суміщення хмари точок із GNSS-мережею

Процес геопросторової прив'язки хмари точок є одним із найважливіших етапів камерального опрацювання даних мобільного лазерного сканування. Незважаючи на те, що сучасні сканувальні платформи часто здатні проводити первинне самовирівнювання й формувати внутрішню координатну систему, для геодезичних задач цього недостатньо, оскільки кінцевий продукт має відповідати державним або локальним системам координат. Саме тому на території дослідження заздалегідь була створена GNSS-мережа з використанням 38 опорних точок, що забезпечило можливість виконати точну просторову прив'язку хмари точок, отриманої за допомогою ручного сканера Lixel L2.

Перед початком сканування кожна опорна точка була визначена у системі координат МСК-26. Це було необхідно для забезпечення коректного суміщення майбутніх просторових даних, оскільки мобільне сканування формує модель без прив'язки до реальних геодезичних систем. Збирання GNSS-даних здійснювалося в режимі RTK, що дозволило отримати координати з точністю, достатньою для задач крупномасштабного топографічного знімання. Особливу увагу приділялось вибору місць під опорні точки: вони були розташовані так, щоб охоплювати всю територію, забезпечувати надійне «закріплення» хмари точок і створювати максимально жорстку геометричну схему.

Однією з особливостей виконаних робіт було те, що частина GNSS-точок слугувала не тільки контрольними, а й початковими для побудови невеликого тахеометричного ходу. Це було зроблено для підвищення точності суміщення та можливості порівняння різних джерел даних між собою. Незамкнутий хід дозволив перенести координати GNSS-точок у внутрішні системи прив'язки Lixel Studio, а також виконати незалежну перевірку точності.

Прив'язка виконувалася шляхом визначення відповідності між фактичними положеннями контрольних точок у просторі та їх відображенням у моделі. LIXEL STUDIO дозволяє здійснювати як автоматизоване, так і ручне встановлення таких відповідностей, що дає змогу досягти більшої точності у

випадку, коли певні опорні точки були частково закриті або представлені в хмарі точок неоднозначно.

Ключовим етапом геопросторової прив'язки є розв'язання трансформційної задачі. Хмара точок повинна бути перенесена з локальної сканерної системи координат у державну систему. Для цього використовується жорстка просторово-лінійна трансформація, яка ґрунтується на семи параметрах: трьох зміщеннях, трьох кутах повороту та одному масштабі. Щоб ці параметри були визначені з достатньою точністю, необхідно мати мінімум три опорні точки, але на практиці для стабільності розв'язку використовується значно більша їх кількість. У нашому випадку застосування 38 GNSS-точок дозволило рівномірно розподілити їх по всій площі сканування, що зменшило вплив локальних похибок.

Після виконання трансформації у програмному середовищі проводиться оцінка залишкових похибок. Для кожної контрольної точки обчислюється різниця між «еталонним» положенням (отриманим у результаті GNSS-спостережень) та її положенням у трансформованій хмарі точок. Відхилення розглядаються як кількісний критерій якості прив'язки. Значення залишкової похибки зазвичай не повинні перевищувати точність GNSS-визначення, оскільки сама хмара точок формується з точністю до кількох сантиметрів залежно від умов руху сканера.

Цей аналіз дозволяє відразу оцінити, чи існують проблеми з деформаціями моделі, чи немає «зсувів» на окремих ділянках, а також чи не сталися помилки при визначенні контрольних точок. У нашому випадку залишкові похибки не виходили за межі прийнятних значень і однаково розподілялися по території, що свідчить про якісне виконання польових робіт і коректність трансформації.

Після успішного суміщення хмара точок фактично переходить у новий стан — тепер це не просто геометричний набір точок, а просторово прив'язана модель, яка може бути використана в будь-яких геодезичних, картографічних чи інженерних задачах. На цьому етапі робота з даними стає значно універсальнішою: їх можна експортувати у форматах LAS, LAZ, XYZ або

завантажувати в AutoCAD, 3DSurvey, чи інші програми, створювати 3D-моделі, виконувати векторизацію, тощо.

Важливо підкреслити, що якість геопросторової прив'язки істотно впливає на увесь подальший процес обробки даних. Якщо на цьому етапі будуть допущені похибки, то вони автоматично перейдуть у всі наступні результати: цифрові моделі рельєфу, креслення, геометричні побудови та аналітичні розрахунки. Тому попри загальну швидкість мобільного сканування, етап прив'язки залишається одним із найбільш відповідальних і потребує як якісних GNSS-вимірювань, так і уважної камеральної роботи.

Окремо слід зазначити, що територія дослідження характеризується складною міською забудовою, що створює як переваги, так і певні труднощі під час прив'язки. З одного боку, велику кількість будівель, парканів і конструкцій створює чіткі орієнтири, які полегшують ідентифікацію положення. З іншого — GNSS-спостереження в умовах щільної забудови можуть бути заваджені. Тому виконання тахеометричного ходу, який дублює частину GNSS-точок, було обґрунтованим рішенням, що дозволило порівняти та підвищити загальну надійність схеми.

3.3. Редагування, повторна реєстрація та оптимізація хмари точок

Після завершення первинного імпорту даних та базової фільтрації хмари точок настає один із найбільш трудомістких і технічно відповідальних етапів камеральної обробки — редагування, уточнення та оптимізація отриманої моделі. Незалежно від того, наскільки якісно була виконана зйомка і наскільки стабільно працювала SLAM-система сканера, «сира» хмара точок завжди містить певні похибки, шум, локальні перекося або елементи, які потребують корекції. Особливо це стосується великих територій зі складним рельєфом, зон із густою забудовою, місць із нестабільними світловими умовами та ділянок, де оператор змушений був рухатися з різною швидкістю чи робити зупинки.

У програмному середовищі LIXEL STUDIO, яке застосовувалося для обробки даного проекту, присутній широкий набір інструментів для глибокої

обробки хмар точок. Після автоматичного зшивання фрагментів сканування SLAM-алгоритм створює траєкторію руху оператора й формує цілісну модель простору. Однак навіть при наявності алгоритму замикання контуру (loop closure) у моделі можуть виникати мікропохибки — це природний результат інерційної складової руху, різких змін траєкторії, коливань під час зйомки та аналітичних спрощень у роботі сенсорів. Саме тому повторна реєстрація й редагування є обов'язковими.

Редагування хмари починається з візуального аналізу та пошуку локальних деформацій. Наприклад, на ділянках із різними рівнями освітлення або на вузьких проходах можуть виникати легкі «розтягнення» контурів, які не завжди помітні при первинному огляді, але стають очевидними при збільшенні масштабу поверхні. У LIXEL STUDIO передбачено можливість сегментування хмари точок на окремі смуги, що дозволяє аналізувати їхню відповідність між собою й давати оцінку відхиленню локальних площин. Цей етап часто потребує кількох ітерацій, оскільки якість реєстрації залежить від правильного співставлення площин, ліній, характерних точок та контурів.

Основна частина роботи з повторної реєстрації пов'язана із суміщенням фрагментів хмари точок на основі алгоритмів пошуку відповідностей. У сучасних програмних пакетах для цього найчастіше застосовують модифікований алгоритм ICP (Iterative Closest Point). Він полягає в послідовному зіставленні найближчих точок у двох наборах даних та в обчисленні мінімальної трансформації, яка дозволяє звести їх у загальну систему координат. У LIXEL STUDIO ICP реалізований таким чином, що користувач може сам обирати ділянки, які вважає найбільш стабільними — наприклад, фасади будівель, асфальтовані покриття, великі вертикальні конструкції, що не змінюють положення у часі. Це дає змогу уникнути впливу рухомих об'єктів: автомобілів, пішоходів, тварин або рослинності, які створюють хаотичні вибірккові точки.

Окремим етапом є видалення шумів. У випадку мобільного сканування шум може проявлятися у вигляді одиничних точок, «висячих» над поверхнею, хаотичних смуг або повторних накладень. Також інколи трапляються артефакти

від блискучих чи скляних поверхонь: вікна, блискучі дахи, автомобільні дзеркала, металеві огорожі. Усі ці елементи можуть суттєво спотворити геометрію моделі та завадити подальшій векторизації. Тому застосовуються алгоритми статистичної фільтрації, що аналізують відстані до сусідніх точок, або радіальні фільтри, які виявляють аномально віддалені значення.

Після видалення шуму проводиться оптимізація структури хмари. У деяких випадках її потрібно «розрідити» — зменшити кількість точок без втрати геометричної інформативності. Це дозволяє зменшити обсяг файлів, прискорити їх обробку в 3DSurvey та AutoCAD і полегшити роботу з великими територіями. Проте надмірне розрідження може негативно вплинути на відображення складних об'єктів, наприклад дрібних елементів інженерних мереж або крон дерев. Тому зменшення щільності виконується вибірково — для великих рівних площин, таких як дорожнє покриття, фасади без декору, під'їзні шляхи або відкриті майданчики.

Подальша оптимізація включає також виправлення локальних сегментів, які могли бути зміщені через швидкість руху оператора чи ротацію приладу під час сканування. Для цього використовуються спеціалізовані інструменти вирівнювання площин, ліній та поверхонь. Наприклад, плоскі елементи — фасади, підпірні стінки, бордюри, бетонні площадки — використовуються для побудови локальної системи координат. Це допомагає «витягнути» невеликі деформації та зробити модель максимально точною перед переходом до етапу векторизації.

3.4. Структурування даних та формування тематичних шарів у середовищі 3D Survey

Після виконання попередніх етапів обробки хмари точок — очищення, геопросторової прив'язки та оптимізації — наступним важливим етапом стало створення структурованої векторної моделі в середовищі 3D Survey. На цьому етапі здійснювалося формування тематичних шарів, які виконували роль логічного розподілу об'єктів місцевості та забезпечували зручність подальшої

постобробки в програмному комплексі Digital, де відбувалося остаточне оформлення топографічного плану.

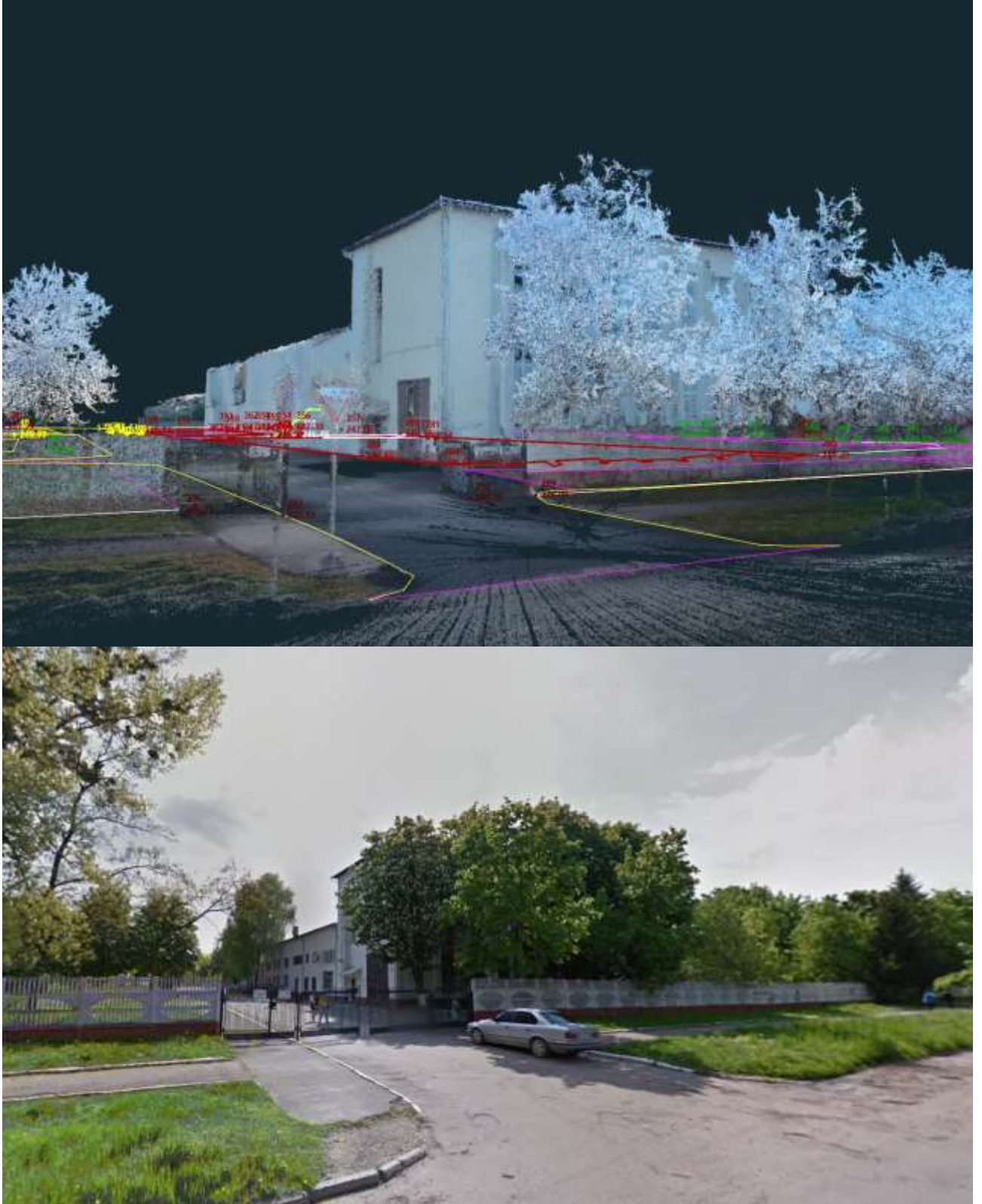


Рис.3.2 Співставлення 3D-сканування з фотографією місцевості

Процес роботи в 3D Survey був побудований таким чином, щоб максимально спростити перехід від хмари точок до впорядкованої векторної моделі. Значний обсяг інформації, характерний для щільних сканувальних даних, вимагає чіткого поділу за типами об'єктів, і саме тому кожна група елементів переносилася у свій окремий шар. Такі шари створювалися у форматі DXF, що дозволяє забезпечити сумісність з широким спектром САД-систем та геоінформаційних платформ. У межах одного проєкту було створено десятки шарів із різними параметрами стилю, що в цілому сформувало структуровану та логічно впорядковану модель об'єкта.

У процесі векторизації використовувалися різні типи графічних примітивів. Лінії формували контури будівель, огорож, бордюрів, інженерних комунікацій, межі доріжок та інших протяжних елементів. Полігональні об'єкти застосовувалися для площинних елементів — таких як відмостки, площадки, зелені зони або великі конструкції з регулярною геометрією. Точкові об'єкти використовувалися для фіксації дрібних елементів благоустрою: електричних опор, люків, окремих дерев, тощо. Колові примітиви давали змогу точно позначати об'єкти з геометричною симетрією — наприклад, оглядові колодязі, круглі клумби та технічні елементи інфраструктури.

Кожен шар мав власні налаштування товщини ліній, кольору та типу відображення, що давало змогу розділити об'єкти за тематикою й підвищити читабельність моделі. Наприклад, контури будівель зазвичай виконувалися товстішою лінією темного кольору, щоб створити акцент. Комунікації, навпаки, позначалися тонкими, часто пунктирними лініями, що дозволяло чітко візуально відокремити їх від елементів благоустрою. Зелені насадження переважно виділялися зеленими або світлими тонами, залежно від щільності елементів на плані.

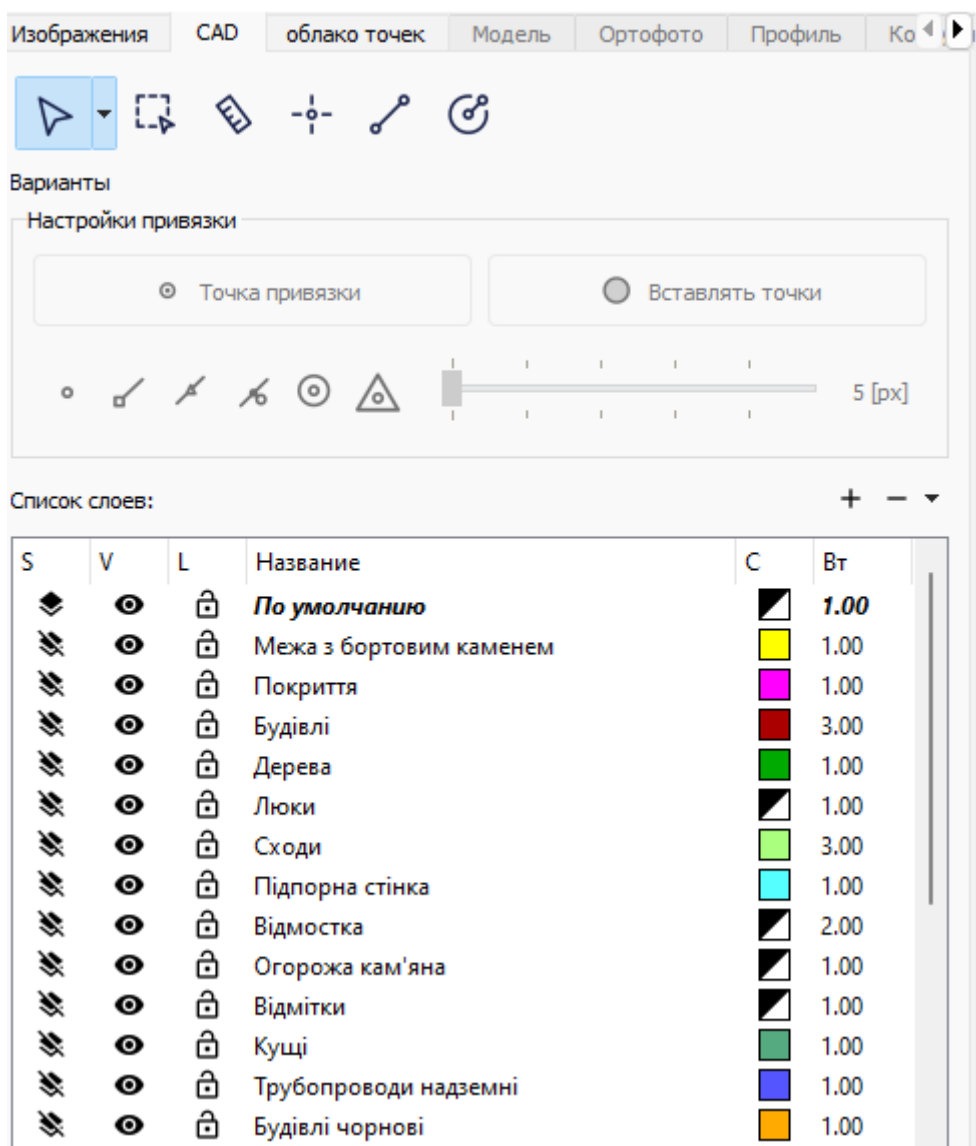


Рис. 3.3 Список шарів векторизації

Такий підхід до шарів не був суто косметичним — він виконував важливе функціональне завдання. Під час роботи з великою хмарою точок та значною кількістю векторних елементів виникає потреба в ефективному керуванні відображенням. У 3D Survey можна швидко приховувати або активувати конкретні шари, зосереджувати увагу на певній групі об'єктів, не відволікаючись на зайві деталі. Це особливо важливо під час деталізації складних ділянок, наприклад місць перетину доріжок, зон з розміщенням кількох комунікацій, вузлів із щільною забудовою чи просторово насичених фрагментів, де точок сканування тисячі на квадратний метр.

Варто також підкреслити, що формат DXF був обраний не випадково. Це один із найбільш універсальних форматів обміну графічною інформацією, який бездоганно підтримується в програмному комплексі Digital, де в подальшому здійснювалося нанесення умовних знаків відповідно до нормативних вимог масштабів 1:500. Завдяки цьому перехід між програмами був безпроблемним: усі шари відкривалися з точно збереженою структурою, стилями та геометрією. У Digital уже проводилася чистова постобробка та доповнення плану умовними позначеннями відповідного масштабу.

Окремої уваги потребує той факт, що створення добре структурованої шарової моделі значно прискорювало подальшу роботу з оформленням. Завдяки чіткому поділу на тематичні групи оператор у Digital міг вмикати лише потрібні набори об'єктів — наприклад, лише комунікації або лише зелені насадження — і працювати з ними окремо, не ризикувавши порушити загальну геометрію інших елементів. Це робило увесь процес топографічного оформлення більш передбачуваним, впорядкованим і контрольованим.

Такий підхід також покращує керованість великих графічних проектів та значно підвищує ефективність камерального опрацювання матеріалів мобільного лазерного сканування.

3.5. Експорт даних у Digital та формування топографічного плану

Процес підготовки топографічного плану масштабу 1:500 на основі хмари точок, отриманої з мобільного лазерного сканування, є комплексною процедурою, що вимагає ретельної послідовності дій і узгодженості між кількома програмними середовищами. Експорт у Digital — один із ключових етапів цієї роботи, адже саме це програмне забезпечення містить повний набір інструментів для створення топографічних планів відповідно до чинних українських нормативів. На цьому етапі відбувається остаточна структуризація відфільтрованих та промаркованих даних, їх узгодження з умовними знаками, перевірка читабельності та точності, а також підготовка до фінального креслення.



Рис. 3.4.1 Хмара точок в 3DSurvei

На попередніх етапах векторні примітиви — будівельні контури, лінії огорож, осі дорожніх покриттів, елементи інженерних мереж, окремі точки рослинності — розміщуються на тематичних шарах із відмінними кольоровими схемами та графічними параметрами. Це робиться не лише для внутрішньої зручності під час камеральної обробки, але й для того, щоб під час імпорту в Digitalis програма коректно інтерпретувала типи об'єктів.

У процесі експорту DXF-файл повинен містити чітку структуру шарів. Як правило, кожен шар відповідає певному тематичному класу об'єктів: «Будівлі», «Огорожі», «Дороги», «Тротуари», «Комунікації підземні», «Дерева», «Антропогенні об'єкти» і тому подібне. Така класифікація забезпечує безконфліктну передачу інформації між програмами й дозволяє одразу після імпорту провести автоматичне накладення бібліотеки умовних позначень Digitalis. У цьому середовищі кожний графічний елемент отримує не просто форму лінії чи полігону, а семантичне значення, що відповідає вимогам законодавства щодо топографічних карт та планів.

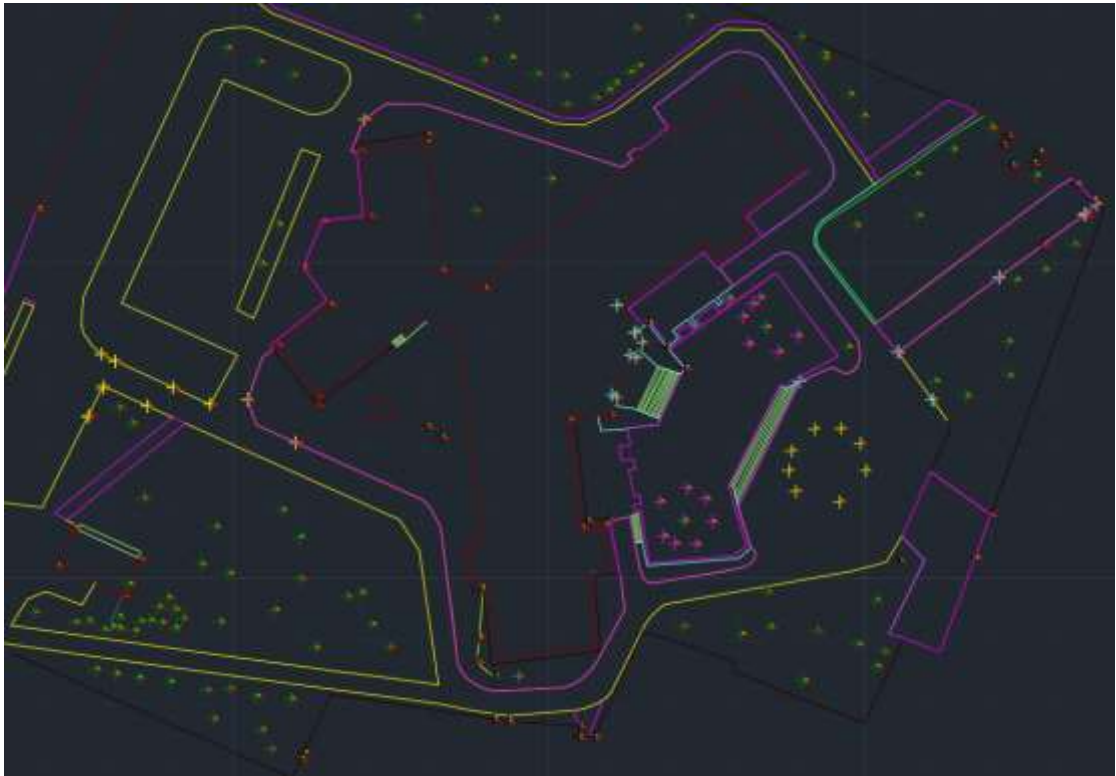


Рис. 3.4.2 DXF файл з оцифрованою ситуацією

Сам процес імпорту в DigitalS потребує певної уважності. Програма пропонує кілька алгоритмів інтерпретації даних, і важливо правильно визначити, який із них дозволить найкоректніше прив'язати всі векторні елементи до відповідних типів об'єктів. Наприклад, контур будівлі, який у 3D Survey позначений замкнутим полігоном з певним кольором, у DigitalS має бути не просто полігональною фігурою, а об'єктом типу «Будівля» зі стандартною заливкою та атрибутивними параметрами. Так само лінійні об'єкти, що позначають межі тротуарів або бордюрів, повинні автоматично потрапити на відповідний шар, котрий уже містить у собі нормативні позначення.

Після імпорту обов'язково виконується етап первинної перевірки. На цьому етапі оператор переглядає, чи всі об'єкти коректно інтерпретовані, чи не загубилися дрібні елементи, чи не виникли випадкові геометричні викривлення. Часто доводиться вручну уточнювати типи деяких об'єктів, оскільки не всі елементи автоматично класифікуються без помилок. Наприклад, дрібні елементи

рослинності інколи визначаються як точки без семантики, тому необхідно вручну присвоювати їм символ «Дерево» або «Чагарники».

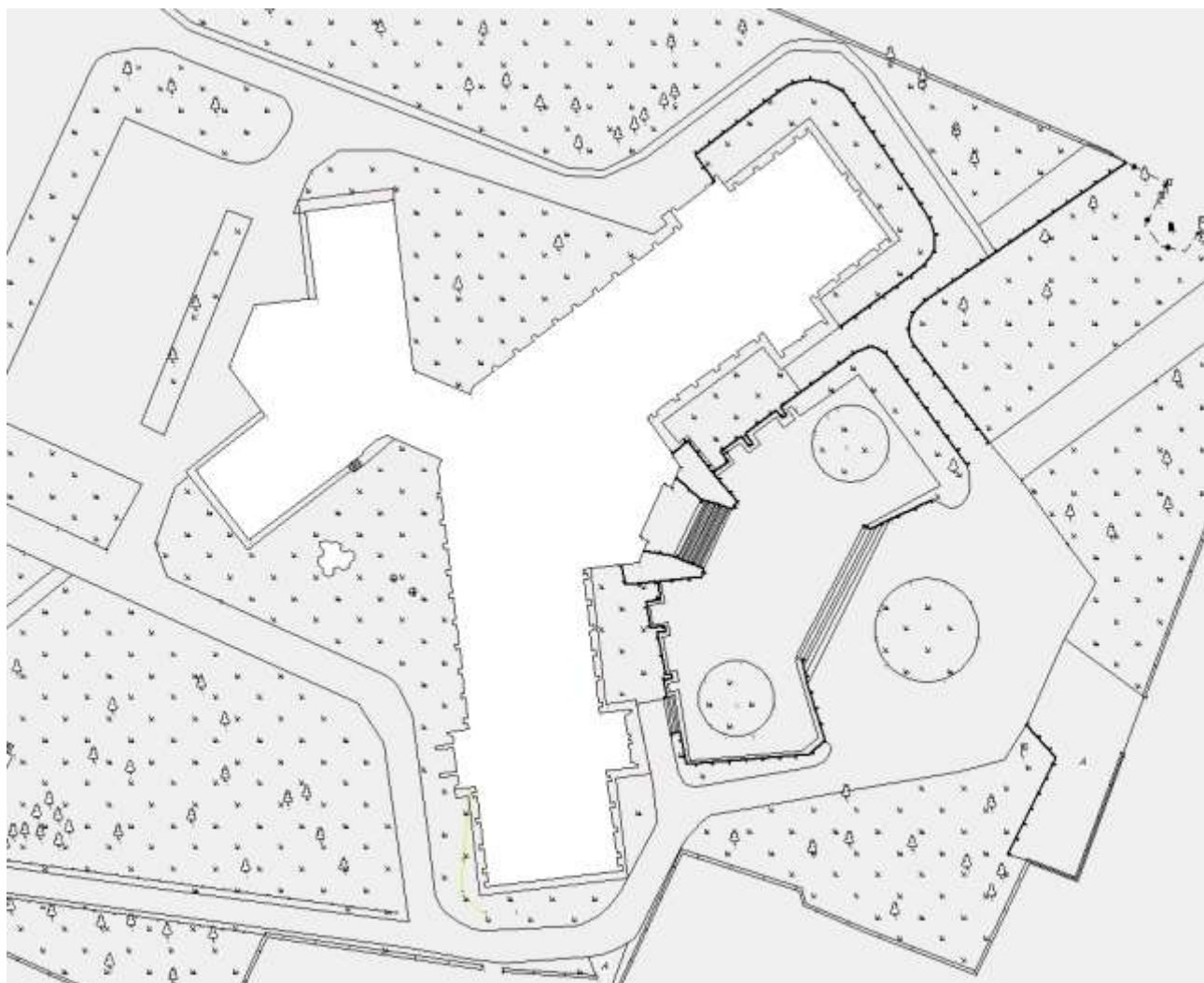


Рис. 3.4.3 Класифікація ліній відповідними умовними позначеннями в DigitalS

Однією з важливих частин роботи є підписування об'єктів. DigitalS дозволяє прив'язувати текстові написи до векторних елементів автоматично, однак інколи виникає потреба вручну коригувати розташування написів, особливо в місцях щільної забудови або на перетині кількох лінійних об'єктів. Для масштабу 1:500 важливо, щоб підписи не накладалися один на одного та не перекривали дрібні деталі. Правильна структуризація підписів значно впливає на читабельність кінцевого плану.

Окрема увага приділяється висотним позначкам. Оскільки вихідні дані отримані з лазерного сканування та GNSS, у Digitals необхідно перевірити коректність висотних параметрів, прив'язаних до точок рельєфу. Програма дозволяє автоматично створювати горизонталі на основі хмари точок або векторизованих даних, проте частіше оператор коригує їх вручну, щоб уникнути зайвих переломів або некоректних плавних переходів. Для масштабу 1:500 рекомендована висота перерізу рельєфу зазвичай становить 0.5м.

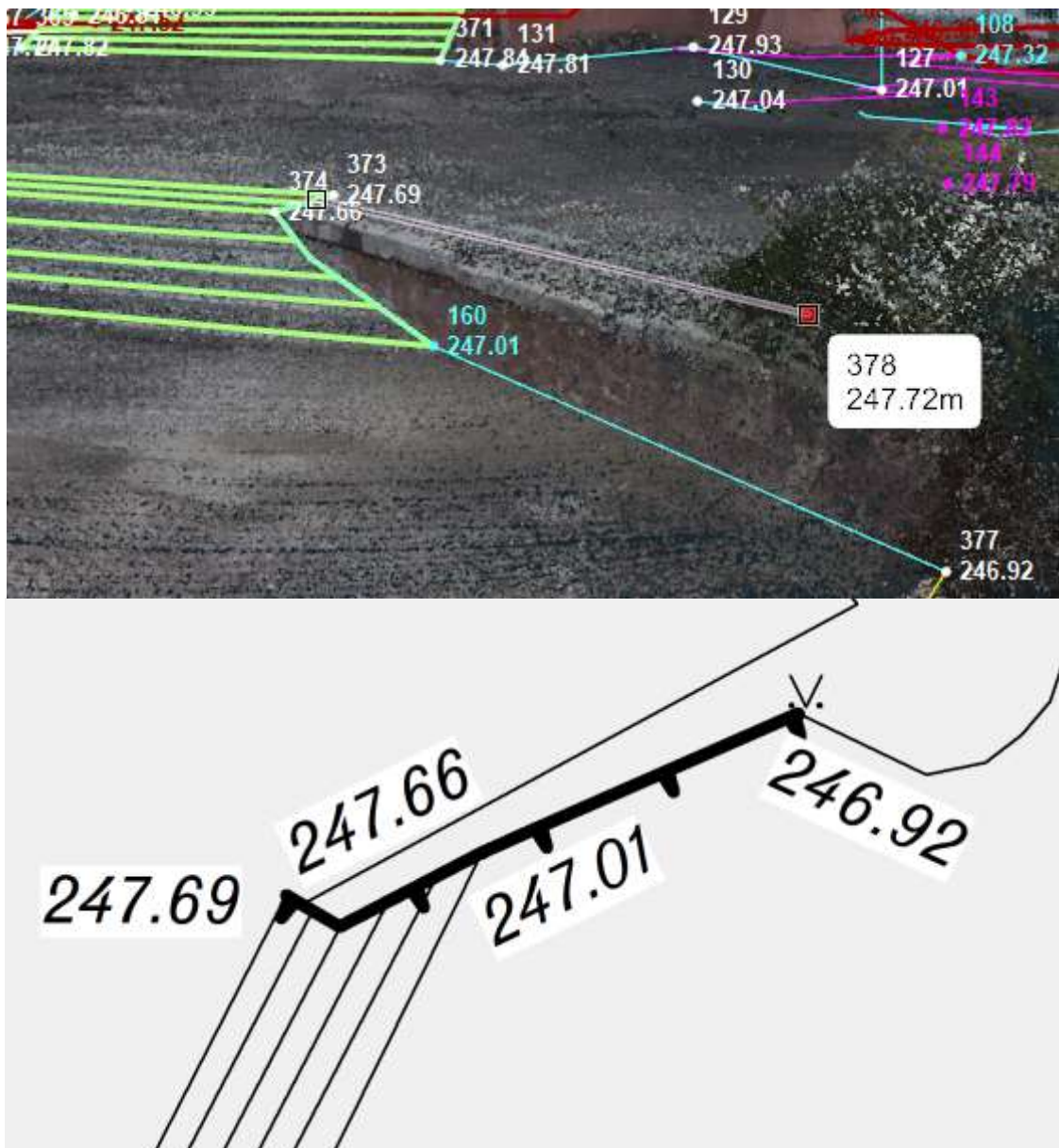


Рис.3.5 Частина сходової в середовищі 3DSurvei та Digitals

Після завершення всіх редагувальних операцій відбувається фінальне структурне узгодження плану. На цьому етапі перевіряється, чи всі об'єкти

відповідають типовим умовним знакам, чи всі написи розташовані коректно, чи не переплутані атрибути інженерних мереж. Digitala також дозволяє виконати попередній перегляд друку, що дає змогу побачити, як виглядатиме план на папері. У разі потреби здійснюється корекція товщини ліній, зміна шрифтів або перенесення підписів.

Ще однією особливістю роботи у Digitala є можливість експортувати результат у кількох форматах. Законодавчо затвердженим є друкований або PDF-варіант топографічного плану з рамкою і всіма обов'язковими підписами. Проте часто виникає потреба експорту в DXF або DWG для подальшого оформлення у зовнішніх редакторах. Такий підхід дозволяє гарантувати повну сумісність з Autodesk AutoCAD або іншими CAD-системами, які використовуються при оформленні технічної документації.

Завершення роботи над топографічним планом у Digitala фактично завершує ключовий етап створення картографічного продукту на основі мобільного лазерного сканування. Важливою перевагою цього підходу є те, що уся інформація формується в єдиному цифровому середовищі, що дозволяє мінімізувати кількість помилок, пов'язаних із перенесенням даних між програмами, та значно підвищує точність фінального продукту. Завдяки структурованому підходу, правильному розподілу шарів, узгодженню атрибутів і коректному накладенню умовних позначень вдається отримати топографічний план, що відповідає вимогам нормативних документів і при цьому чітко відображає фактичний стан території.

3.6. Формування графічних матеріалів та підготовка підсумкової документації в середовищі AutoCAD

Після завершення камеральної обробки хмари точок, векторизації окремих об'єктів та попереднього структурування даних у 3D Survey й Digitala, наступним етапом стала підготовка остаточного графічного матеріалу у форматах, придатних для передачі проектним організаціям та технічним службам. У більшості випадків саме наявність акуратно оформлених креслень,

створених за всіма нормативними вимогами, є фінальним і найвідповідальнішим кроком у всьому комплексі геодезичних робіт. Саме тому було прийнято рішення виконувати завершальне оформлення топографічного плану в Державній системі координат МСК-26 за допомогою програмного забезпечення AutoCAD, яке залишається найбільш універсальним та поширеним інструментом для графічного моделювання у сфері будівництва, землеустрою та інженерної геодезії.

Робота в AutoCAD вимагала ретельної підготовки, оскільки вихідні дані з Digitals надходили у вигляді структурованого набору шарів та окремих класів об'єктів, які необхідно було привести до єдиної системи оформлення. Попередній експорт даних із Digitals у формат DWG дозволив зберегти логічну структуру елементів — будівлі, огорожі, зелені насадження, дорожні покриття та комунікації були отримані у вигляді лінійних і полігональних графічних примітивів. Однак їхнє подальше оформлення вимагало стандартизації: зміни товщини ліній, підбору кольорів, дотримання масштабу, встановлення коректних підписів та вставлення умовних позначень відповідно до вимог топографічного креслення масштабу 1:500.

На початку робіт у середовищі AutoCAD була створена базова структура шаблону креслення, яка включала робочий простір у вкладках «Model» та «Layout». Модуль Model використовувався для розміщення усіх графічних даних у натуральному масштабі — 1:1. Тут виконувалося основне компоновання об'єктів, перевірка їхньої геометричної точності та відповідності координат. Особливу увагу приділяли коректності розташування будівельних контурів, ліній комунікацій та елементів благоустрою, оскільки саме вони становлять основу практично будь-якого інженерного аналізу.

Окремим етапом стала перевірка відповідності товщини ліній нормативним вимогам. Для топографічного плану масштабу 1:500 товщина ліній має бути не тільки структурована, але й легко читатися в друкованому вигляді. також дало змогу зберегти чіткість усіх його елементів після експорту в PDF.

Після впорядкування інформації у просторі Model почався найвідповідальніший етап — створення креслень у вкладці Layout. Саме тут формувалась остаточна подача матеріалу, призначеного для друку або передачі замовнику. У Layout був створений видовий екран (Viewport), який давав змогу відобразити необхідну область моделі в масштабі 1:500. Використання видового екрана було критично важливим, оскільки давало змогу змінювати відображення моделі без її геометричної трансформації. Масштаб задавався вручну, із точністю до четвертого знаку, що забезпечувало максимальну відповідність установленим вимогам.

Оформлення рамки креслення проводилося за регламентованими стандартами, включаючи встановлення зовнішнього контуру, внутрішньої робочої області та обов'язкового штампа в правому нижньому куті. Штмп містив такі дані: назву об'єкта знімання, найменування організації, масштаб, координатну систему, інформацію про виконавця, дату виконання робіт та номер аркуша. Завдяки функціоналу AutoCAD вдалося легко адаптувати штамп під конкретні вимоги університету та передбачити можливість автоматичного оновлення параметрів для кількох аркушів

Після формування рамки були розміщені додаткові елементи: умовні позначення, підписи вулиць, нумерація будинків, маркування інженерних мереж. Усі підписи наносилися у просторі Model, що дало змогу зберегти їхній вигляд незмінним при масштабуванні видового екрана. Такий підхід також дозволив уникнути зміщення тексту під час подальшої конвертації креслення з DWG у PDF.

Важливим етапом було налаштування друку. Усі параметри друку — від формату аркуша до кольорової палітри — задавалися вручну. Кольорова палітра STB-файлу визначала, які шари у підсумковому документі будуть друкуватись товстою або тонкою лінією, а також те, як елементи креслення відображатимуться при друкуванні у чорно-білому режимі. Правильно налаштовані параметри забезпечили однаково чіткий та зрозумілий вигляд плану як у електронному вигляді, так і у паперовому.

Після завершення оформлення топографічний план було експортовано у формат PDF. Такий формат найчастіше використовується проектними та експертними організаціями, оскільки є універсальним, не вимагає спеціального встановленого програмного забезпечення та добре зберігає якість графічних елементів. Паралельно із PDF-файлом було створено фінальний DWG-файл, який зазвичай передається разом із додатковими матеріалами — хмарами точок, текстовими звітами та іншим.

Важливо підкреслити, що підсумковий документ, сформований у AutoCAD, виконує не лише роль візуального продукту, але й стає основою для подальших інженерних рішень. Саме від якості оформлення залежить, чи зможе проектувальник успішно використовувати креслення у своїх розрахунках. Універсальність форматів DWG та PDF — одна з головних причин, чому AutoCAD сьогодні використовують майже усі інженерні спеціальності.

РОЗДІЛ 4.

АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ ТА ПОРІВНЯННЯ ІЗ КЛАСИЧНИМИ МЕТОДАМИ ВИМІРЮВАНЬ

4.1. Порівняння кінцевих результатів із традиційними методами знімання

Знімання, виконане 3D-сканером Lixel L2, показало істотні відмінності в структурі та деталізації одержаних даних у порівнянні з класичними тахеометричними та GNSS-методами. Традиційні способи передбачають покрокове визначення окремих характерних точок рельєфу та ситуації, що часто потребує фізичного встановлення віхи у кожній позиції. Внаслідок цього створена модель містить лише ті елементи, які були спеціально проміряні та задокументовані виконавцем, тобто залежить від суб'єктивного бачення виконавця і його здатності правильно вибрати ключові точки місцевості.

Метод мобільного сканування формує іншу природу просторових даних: замість окремих вибіркового вимірів формується густий набір тривимірних координат (хмара точок), який охоплює всю територію з однаковою щільністю збирання інформації. За рахунок цього модель місцевості стає повною та інформативною, незалежно від того, чи помітив виконавець певний елемент у момент знімання.

Особливо помітна різниця проявляється у складних зонах забудови, де велика кількість дрібних деталей — виступів фундаменту, елементів огорожі, відступів фасадів, дрібних комунікаційних колодязів, сходів чи деталей благоустрою — часто не потрапляють у класичні знімання через низьку вибірковість вимірів. 3D-сканер у такому середовищі забезпечує повне охоплення території без необхідності додаткових промірів.

Якісний відрив між методами найбільш відчутний під час подальшої камеральної обробки. Коли традиційні дані обмежені декількома сотнями точок, сканування надає десятки або сотні тисяч вимірів. Це дає можливість

багаторазово повертатися до об'єкта без потреби повторного виїзду на місцевість. У разі необхідності визначити, наприклад, висоту цоколя, фактичну ширину проходу, розмір виступу або параметри зелених насаджень — вся інформація уже міститься в хмарі точок, і може бути оперативно витягнута без додаткових польових робіт.

4.2. Продуктивність виконання робіт

Продуктивність є одним із ключових критеріїв для порівняння технологій. Досвід виконання сканування території університету підтвердив, що мобільний сканер дозволяє суттєво скоротити тривалість польових робіт.

Для виконання аналогічної топографічної зйомки у класичний спосіб (GNSS + тахеометр) знадобилося б орієнтовно 1–2 дні безперервної роботи, враховуючи встановлення та прив'язку пунктів, проміри рельєфу, дослідження елементів благоустрою, роботу із завадами у вигляді транспортних засобів або щільної забудови. Крім того, у разі виникнення необхідності уточнення окремих ділянок або проміру пропущеного елемента потрібно було б виконувати повторні виїзди.

Застосований 3D-сканер дозволив виконати всю польову частину робіт протягом трьох годин — включно зі скануванням, встановленням контрольних точок та уточненням їхнього просторового положення. Значне скорочення часу роботи пов'язане із тим, що оператору не потрібно встановлювати віху та фіксувати кожен характерну точку окремо — достатньо пройти по території з обладнанням, а решту робить сканер.

Таким чином, мобільне сканування забезпечує скорочення польових робіт у 6–8 разів, що суттєво впливає на загальну організацію виконання проєкту, планування людських ресурсів та економію часу в умовах реальних виробничих завдань.

4.3. Інформативність просторових даних та можливість повторного аналізу

Хмара точок, отримана в результаті сканування, містить величезний обсяг просторової інформації, що забезпечує можливість аналізувати об'єкт повторно, повертаючись до нього в будь-який момент — уже без фізичного виїзду на місцевість. Це особливо важливо у таких ситуаціях:

- необхідність уточнення окремих параметрів, пропущених у первинному зніманні;

- виконання додаткових технічних розрахунків (висота парпетів, ширини проїздів тощо);

- аналіз об'єктів у важкодоступних місцях, де класичні методи вимірювань потребують значних витрат часу або спеціального обладнання;

- документування стану території на певну дату для подальшого використання у проектуванні та експертній діяльності.

На відміну від ручного проміру, де оператор вибирає конкретні точки, сканування фіксує все, що потрапляє у поле зору датчика. Саме тому така форма знімання дозволяє використовувати зібрані дані не лише для цілей того конкретного проєкту, але і для майбутніх реконструкцій, технічних обстежень, перевірки деформацій та створення детальних цифрових моделей навколишнього середовища.

4.4. Похибки та точність результатів

Оцінка точності є одним з ключових етапів аналізу результатів просторових вимірювань, оскільки дозволяє зрозуміти, наскільки отримані значення відповідають реальному положенню об'єктів у природі. У рамках цієї роботи за еталон (reference) прийнято координати, визначені тахеометричною зйомкою, яка забезпечує стабільну та передбачувану точність у польових умовах. Саме ці значення використовуються для зіставлення з даними, отриманими методом 3D-сканування та GNSS-спостережень.

Оскільки лідарні системи є чутливими до факторів середовища (структура поверхні, кут падіння променя, відстань до об'єкта), а GNSS-приймачі — до геометрії супутникової групи та локальних перешкод сигналу, важливо встановити, наскільки кожен метод забезпечує потрібний рівень точності для створення топографічного плану у масштабі 1:500. Згідно з чинними нормативами України, для такого масштабу допускаються наступні середньоквадратичні похибки:

- в плані (X,Y): $m_{xy} \leq \pm 0,20$ м;
- по висоті (H): $m_H \leq \pm 0,10$ м.

4.4.1. Аналіз похибок для 3D-сканування

У таблицях нижче наведені обчислені різниці між тахеометричними координатами та координатами, отриманими у результаті сканування. Це дає змогу оцінити, наскільки рівномірно та стабільно поводить себе сенсор лідару при вимірюваннях.

У наведених розрахунках еталонними (базовими) значеннями координат вважалися результати, отримані тахеометричним ходом, оскільки саме тахеометр забезпечує стабільну інструментальну точність та є нормативно визнаним засобом для створення локальних планово-висотних мереж. Саме тому всі відхилення для GNSS-та 3D-сканувальних вимірювань оцінювалися відносно тахеометричних координат як найнадійнішого контрольного набору.

Таблиця 4.3 Координати контрольних точок (тахеометром та сканером)

№ точки	Контрольні точки тахеометр			Контрольні точки Scan		
	X(TAX)	Y(TAX)	H(TAX)	X(Scan)	Y(Scan)	H(Scan)
1	5421838.643	296105.888	248.284	5421838.630	296105.895	248.285
2	5421864.424	296116.999	248.449	5421864.440	296117.007	248.436
3	5421852.276	296171.724	248.773	5421852.288	296171.729	248.759
4	5421881.704	296142.632	248.529	5421881.710	296142.636	248.522
5	5421896.973	296112.918	248.522	5421896.970	296112.906	248.531
6	5421917.42	296098.511	248.415	5421917.408	296098.524	248.416
7	5421914.364	296073.818	248.392	5421914.378	296073.819	248.402
8	5421890.574	296059.38	248.388	5421890.555	296059.364	248.383
9	5421851.007	296043.438	248.124	5421850.989	296043.448	248.114

10	5421964.808	296092.921	248.133	5421964.791	296092.937	248.129
11	5421983.883	296130.603	248.381	5421983.897	296130.615	248.379
12	5421963.752	296183.904	248.403	5421963.740	296183.920	248.393
13	5421922.216	296177.209	248.793	5421922.194	296177.229	248.792
14	5421885.889	296254.332	248.809	5421885.875	296254.327	248.795
15	5421925.995	296257.474	248.449	5421926.001	296257.470	248.446
16	5421944.304	296212.354	248.434	5421944.289	296212.338	248.435
17	5422023.26	296116.47	246.912	5422023.250	296116.490	246.923
18	5422090.441	296147.106	246.592	5422090.446	296147.096	246.589
19	5422068.351	296177.567	246.682	5422068.372	296177.585	246.670
20	5422047.977	296206.811	247.116	5422047.962	296206.795	247.128
21	5421994.447	296175.616	247.466	5421994.430	296175.613	247.470
22	5422122.079	296186.493	246.444	5422122.069	296186.487	246.441
23	5422092.509	296215.16	246.683	5422092.509	296215.150	246.673
24	5422143.021	296218.176	246.524	5422143.013	296218.167	246.533
25	5422172.956	296176.016	246.152	5422172.934	296176.009	246.164
26	5422124.333	296253.76	246.462	5422124.348	296253.756	246.458
27	5422173.927	296264.619	246.096	5422173.941	296264.597	246.084
28	5422171.901	296305.611	245.888	5422171.917	296305.590	245.877
29	5422160.499	296349.394	246.919	5422160.480	296349.392	246.931
30	5422159.415	296376.957	246.865	5422159.427	296376.937	246.874
31	5422123.923	296333.951	247.624	5422123.912	296333.968	247.620
32	5422102.676	296359.251	246.479	5422102.669	296359.254	246.481
33	5422083.25	296282.412	246.956	5422083.271	296282.430	246.947
34	5422199.31	296250.316	246.237	5422199.330	296250.314	246.231
35	5422244.976	296191.057	246.337	5422244.972	296191.053	246.331
36	5422289.022	296067.562	246.124	5422289.029	296067.553	246.125
37	5422240.853	296111.425	246.344	5422240.868	296111.407	246.338
38	5422266.751	296048.624	246.305	5422266.741	296048.612	246.297

Таблиця 4.2 Похибки між тахеометричними та сканерними координатами

№ точки	Δ ,мм			Δ^2 ,мм		
	ΔX	ΔY	ΔH	ΔX^2	ΔY^2	ΔH^2
1	-13	7	1	169	49	1
2	16	8	-13	256	64	169
3	12	5	-14	144	25	196
4	6	4	-7	36	16	49
5	-3	-12	9	9	144	81
6	-12	13	1	144	169	1
7	14	1	10	196	1	100
8	-19	-16	-5	361	256	25
9	-18	10	-10	324	100	100

10	-17	16	-4	289	256	16
11	14	12	-2	196	144	4
12	-12	16	-10	144	256	100
13	-22	20	-1	484	400	1
14	-14	-5	-14	196	25	196
15	6	-4	-3	36	16	9
16	-15	-16	1	225	256	1
17	-10	20	11	100	400	121
18	5	-10	-3	25	100	9
19	21	18	-12	441	324	144
20	-15	-16	12	225	256	144
21	-17	-3	4	289	9	16
22	-10	-6	-3	100	36	9
23	0	-10	-10	0	100	100
24	-8	-9	9	64	81	81
25	-22	-7	12	484	49	144
26	15	-4	-4	225	16	16
27	14	-22	-12	196	484	144
28	16	-21	-11	256	441	121
29	-19	-2	12	361	4	144
30	12	-20	9	144	400	81
31	-11	17	-4	121	289	16
32	-7	3	2	49	9	4
33	21	18	-9	441	324	81
34	20	-2	-6	400	4	36
35	-4	-4	-6	16	16	36
36	7	-9	1	49	81	1
37	15	-18	-6	225	324	36
38	-10	-12	-8	100	144	64
Σ				7520	6068	2597

З таблиці 4.2 сума квадратів відхилень по X, Y, H:

$$\sum_{i=1}^n X_{Scan}^2 = 7520 \text{ мм};$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{Scan}^2 = 6068 \text{ мм};$$

$$\sum_{i=1}^n H_{Scan}^2 = 2597 \text{ мм}.$$

Знаходимо СКП(середню квадратичну похибку) по X, Y, H, що знаходиться на основі різниць між отриманими значеннями та еталонними:

$$m_{X(Scan)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X^2}{n}} = \sqrt{\frac{7520}{38}} = 14\text{мм};$$

$$m_{Y(Scan)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y^2}{n}} = \sqrt{\frac{6068}{38}} = 13\text{мм};$$

$$m_{H(Scan)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n H^2}{n}} = \sqrt{\frac{2597}{38}} = 8\text{мм}.$$

Нев'язка в плані(СКП XY):

$$m_{XY(Scan)} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2} = \sqrt{14^2 + 13^2} = 19\text{мм}.$$

Просторова (3D-позиційна) СКП:

$$m_{XYH(Scan)} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 + m_H^2} = \sqrt{14^2 + 13^2 + 8^2} = 21\text{мм}.$$

4.4.2. Аналіз похибок для GNSS-спостережень

GNSS-вимірювання також зіставлялися з тахеометричними, щоб оцінити їх придатність для виступання в ролі опорної мережі для геопросторової прив'язки сканування.

Таблиця 4.3 Координати контрольних точок (тахеометром та GNSS приймачем)

№ точки	Контрольні точки тахеометр			Контрольні точки GNSS		
	X(TAX)	Y(TAX)	H(TAX)	X(GNSS)	Y(GNSS)	H(GNSS)
1	5421838.643	296105.888	248.284	5421838.629	296105.9	248.279
2	5421864.424	296116.999	248.449	5421864.413	296117	248.457
3	5421852.276	296171.724	248.773	5421852.263	296171.7	248.781
4	5421881.704	296142.632	248.529	5421881.7	296142.6	248.53
5	5421896.973	296112.918	248.522	5421896.974	296112.9	248.523
6	5421917.42	296098.511	248.415	5421917.433	296098.5	248.41
7	5421914.364	296073.818	248.392	5421914.357	296073.8	248.397

8	5421890.574	296059.38	248.388	5421890.56	296059.4	248.382
9	5421851.007	296043.438	248.124	5421851.002	296043.4	248.117
10	5421964.808	296092.921	248.133	5421964.809	296092.9	248.14
11	5421983.883	296130.603	248.381	5421983.896	296130.6	248.388
12	5421963.752	296183.904	248.403	5421963.753	296183.9	248.401
13	5421922.216	296177.209	248.793	5421922.21	296177.2	248.783
14	5421885.889	296254.332	248.809	5421885.901	296254.3	248.817
15	5421925.995	296257.474	248.449	5421925.986	296257.5	248.439
16	5421944.304	296212.354	248.434	5421944.313	296212.4	248.433
17	5422023.26	296116.47	246.912	5422023.254	296116.5	246.919
18	5422090.441	296147.106	246.592	5422090.439	296147.1	246.582
19	5422068.351	296177.567	246.682	5422068.349	296177.6	246.68
20	5422047.977	296206.811	247.116	5422047.962	296206.8	247.118
21	5421994.447	296175.616	247.466	5421994.451	296175.6	247.476
22	5422122.079	296186.493	246.444	5422122.092	296186.5	246.451
23	5422092.509	296215.16	246.683	5422092.524	296215.2	246.675
24	5422143.021	296218.176	246.524	5422143.036	296218.2	246.516
25	5422172.956	296176.016	246.152	5422172.948	296176	246.149
26	5422124.333	296253.76	246.462	5422124.338	296253.8	246.453
27	5422173.927	296264.619	246.096	5422173.912	296264.6	246.102
28	5422171.901	296305.611	245.888	5422171.915	296305.6	245.881
29	5422160.499	296349.394	246.919	5422160.507	296349.4	246.916
30	5422159.415	296376.957	246.865	5422159.42	296377	246.86
31	5422123.923	296333.951	247.624	5422123.926	296334	247.614
32	5422102.676	296359.251	246.479	5422102.667	296359.2	246.48
33	5422083.25	296282.412	246.956	5422083.24	296282.4	246.957
34	5422199.31	296250.316	246.237	5422199.312	296250.3	246.237
35	5422244.976	296191.057	246.337	5422244.978	296191.1	246.328
36	5422289.022	296067.562	246.124	5422289.013	296067.6	246.126
37	5422240.853	296111.425	246.344	5422240.847	296111.4	246.346

38	5422266.751	296048.624	246.305	5422266.748	296048.6	246.301
----	-------------	------------	---------	-------------	----------	---------

Таблиця 4.4 Похибки між тахеометричними та координатами GNSS приймача

№ точки	Δ ,мм			Δ^2 ,мм		
	ΔX	ΔY	ΔH	ΔX^2	ΔY^2	ΔH^2
1	-14	-10	-5	201	98	23
2	-11	-8	8	121	72	60
3	-13	-5	8	166	28	61
4	-4	-7	1	18	53	1
5	1	4	1	1	17	1
6	13	5	-5	158	26	28
7	-7	14	5	55	197	21
8	-14	10	-6	200	95	34
9	-5	8	-7	22	67	53
10	1	-10	7	0	102	51
11	13	-3	7	181	9	50
12	1	4	-2	2	17	5
13	-6	-2	-10	35	4	94
14	12	15	8	145	215	65
15	-9	-1	-10	78	1	94
16	9	11	-1	73	120	1
17	-6	-15	7	32	212	48
18	-2	-8	-10	4	62	97
19	-2	-6	-2	4	35	4
20	-15	-13	2	211	171	3
21	4	11	10	13	125	91
22	13	-9	7	167	75	55
23	15	-5	-8	223	24	57
24	15	2	-8	216	4	66
25	-8	3	-3	60	7	7
26	5	3	-9	26	12	89
27	-15	-14	6	214	189	39
28	14	6	-7	201	34	52
29	8	6	-3	57	38	12
30	5	8	-5	25	60	21
31	3	14	-10	9	195	94
32	-9	-13	1	84	167	1
33	-10	10	1	99	110	1
34	2	-13	0	2	159	0

35	2	11	-9	6	111	78
36	-9	-11	2	77	122	3
37	-6	0	2	39	0	5
38	-3	-7	-4	11	45	20
Σ				3235	3079	1486

З таблиці 4.4 сума квадратів відхилень по X, Y, H:

$$\sum_{i=1}^n X_{Scan}^2 = 7520 \text{ мм};$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{Scan}^2 = 6068 \text{ мм};$$

$$\sum_{i=1}^n H_{Scan}^2 = 2597 \text{ мм.}$$

Знаходимо СКП(середню квадратичну похибку) по X, Y, H:

$$m_{X(GNSS)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X^2}{n}} = \sqrt{\frac{3235}{38}} = 9 \text{ мм};$$

$$m_{Y(GNSS)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y^2}{n}} = \sqrt{\frac{3079}{38}} = 9 \text{ мм};$$

$$m_{H(GNSS)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n H^2}{n}} = \sqrt{\frac{1486}{38}} = 6 \text{ мм.}$$

Нев'язка в плані(СКП XY):

$$m_{XY(GNSS)} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2} = \sqrt{9^2 + 9^2} = 14 \text{ мм.}$$

Просторова (3D-позиційна) СКП:

$$m_{XYH(GNSS)} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 + m_H^2} = \sqrt{9^2 + 9^2 + 6^2} = 13 \text{ мм.}$$

4.4.3. Порівняння результатів

Порівняння точності, отриманої різними методами знімання, є ключовим етапом оцінювання достовірності кінцевого геопросторового продукту. У межах виконаного дослідження еталонні координати були отримані шляхом високоточної тахеометричної зйомки, яка забезпечує стабільну планову точність на рівні кількох міліметрів та традиційно використовується як опорний метод у геодезичній практиці. Саме ці значення прийнято як еталонні, відносно яких оцінювалася точність GNSS/RTK та мобільного 3D-сканування.

Порівняння було виконано за трьома основними компонентами: планові координати (X, Y) та висота (H). Для кожної точки розраховано різниці між еталонними тахеометричними координатами та результатами GNSS/RTK і 3D-сканування. Далі для кожного методу визначено середньоквадратичні похибки m_x , m_y , m_H , а також комплексні просторові показники m_{xy} та m_{xyH} , що дозволяє оцінити загальний рівень точності.

Таблиця 4.5 Порівняння точності методів

Метод	m_x (мм)	m_y (мм)	m_H (мм)	m_{xy} (мм)	m_{xyH} (мм)	Вимоги до точності
GNSS/RTK	9	9	6	13	14	Повністю відповідає
3D-сканування	14	13	8	19	21	Повністю відповідає

Дані свідчать, що GNSS/RTK демонструє досить стабільні планові похибки на рівні ≈ 14 мм, а висотні — близько 6 мм. Значення $m_{xyH} \approx 13$ мм підтверджує, що GNSS-приймач забезпечує точність, яка повністю відповідає вимогам для масштабів 1:500. Невеликі відхилення, що спостерігаються у деяких точках, зумовлені короткочасними флуктуаціями супутникового сигналу та мультипасовим ефектом у зоні щільної забудови.

Метод мобільного 3D-сканування дав схожі планові відхилення ($m_x \approx 14$ мм, $m_y \approx 13$ мм), що є очікуваним через накопичення помилок у траєкторії руху платформи та обмеження SLAM-алгоритмів у складних геометричних умовах. Висотна точність при цьому залишилася на рівні 8 мм, що є надзвичайно хорошим показником для мобільного сканування. Загальна 3D-похибка $m_{XYZ} \approx 21$ мм підтверджує, що метод повністю задовольняє нормативи точності.

У класичних геодезичних методах точність значною мірою залежить від кваліфікації виконавця, правильності встановлення віхи, стабільності тримання рейки, відсутності зміщень під час наведення та від вибору характерних точок. Усі ці фактори є людським внеском, що може призвести до локальних похибок навіть при використанні високоточних приладів.

У випадку 3D-сканування вплив людського фактору мінімізується. Точність визначається властивостями сенсора, які є стабільними та повторюваними. Контрольні точки GNSS/RTK або тахеометричної зйомки застосовуються лише для приведення даних до єдиної системи координат та корекції загальних зміщень.

4.5. Економічна доцільність використання 3D-сканування

Економічна ефективність застосування мобільного лазерного сканування має дві сторони. З одного боку, обладнання є досить дорогавартісним, що створює бар'єр для невеликих компаній. Для повноцінної роботи системи необхідно придбати:

- 3D-сканер;
- GNSS-приймач;
- ліцензійне програмне забезпечення для обробки хмари точок;
- високопродуктивний комп'ютер із потужною графічною підсистемою;
- містке сховище для довготривалого зберігання великих масивів даних.

З іншого боку, під час реального виробництва такі системи дозволяють суттєво скоротити час польових робіт, зменшити кількість повторних виїздів, мінімізувати витрати, пов'язані з помилками вручну проведених вимірювань, та підвищити якість кінцевого продукту.

У випадку великих об'єктів та складних територій саме економія часу та зменшення трудових витрат стають головною причиною впровадження технології. Для невеликих підприємств придбання мобільного сканера може бути невиправданим, проте для компаній, що виконують системні геодезичні роботи, це рішення є доцільним у довгостроковій перспективі.

4.6. Узагальнююча оцінка ефективності застосування мобільного 3D-сканування

На основі проведених досліджень, порівнянь і аналізу отриманих результатів можна сформулювати такі узагальнення:

Якість просторових даних, отриманих у результаті сканування, повністю задовольняє потреби топографічного знімання масштабу 1:500, забезпечуючи детальність, яку складно досягнути класичними методами.

Швидкість збору інформації значно перевищує можливості GNSS або тахеометричної зйомки, що дозволяє застосовувати технологію у проєктах, де обмежені часові рамки.

Інформаційна насиченість хмари точок створює основу для численних видів аналізу, що робить 3D-сканування універсальним інструментом для багатофункціональних об'єктів.

Технологія дозволяє зменшити залежність результату від людського фактору, що покращує точність і повторюваність промірів.

ВИСНОВКИ

У межах даної магістерської роботи було здійснено комплексне дослідження можливостей використання технологій тривимірного сканування на території університету та проведено порівняльний аналіз результатів, отриманих методами класичної геодезії та мобільного лазерного сканування. Проведене дослідження дозволило продемонструвати, що сучасні системи 3D-сканування, зокрема ручний сканер Lixel L2 у поєднанні зі SLAM-алгоритмами та GNSS-прив'язкою, здатні забезпечувати значно вищу оперативність, деталізацію та інформаційну насиченість геопросторових даних у порівнянні з традиційними методами.

У ході роботи були виконані польові спостереження, створено опорну GNSS-мережу, проведено збір хмар точок та повний цикл камеральної обробки – від фільтрації та класифікації первинних даних у LIXEL Studio до векторизації в 3D Survey та оформлення топографічного плану у Digitals та AutoCAD. Аналіз точності підтвердив, що отримані результати відповідають вимогам до топографічних планів масштабу 1:500.

Особливо цінним аспектом є можливість повторної інтерпретації вже зібраних даних без необхідності повертатися на місцевість. Хмара точок забезпечує фіксацію величезної кількості мікродеталей – від висоти цоколів, радіусів елементів благоустрою до точного положення дрібних об'єктів, які класичні тахеометричні вимірювання можуть пропустити або інтерпретувати з меншою точністю. Технологія дозволяє створювати цифрові двійники об'єктів, що є важливим для університетської інфраструктури, реконструкцій, моніторингу стану споруд та перспективних інженерних рішень.

Разом із тим у роботі виявлено й низку обмежень: висока вартість обладнання та програмного забезпечення, потреба у високопродуктивній комп'ютерній техніці, залежність сканера від GNSS-прив'язки, а також суттєві вимоги до зберігання великих обсягів просторових даних. Для невеликих

компаній чи поодиноких проєктів така технологія може бути економічно недоцільною.

У результаті проведеного порівняння встановлено, що класичні методи залишаються необхідними для робіт високої точності у локальних задачах, а також у ситуаціях, де сканування є надлишковим або технічно складним. Проте 3D-сканування демонструє переконливу перевагу щодо оперативності, повноти інформації, можливостей подальшої векторизації та універсальності використання даних.

Підсумовуючи результати роботи, можна стверджувати, що впровадження мобільного лазерного сканування на території університету є виправданим та перспективним кроком. Технологія забезпечує високу точність, значно скорочує тривалість польових робіт, створює новий рівень інформативності даних та підтримує сучасні вимоги до інфраструктурних проєктів і цифрової трансформації університетського середовища. Проведене дослідження підтвердило практичну значущість, технічну ефективність та наукову цінність поєднання традиційних і інноваційних геодезичних методів у професійній діяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ, 2016. URL: https://kubg.edu.ua/images/stories/podii/2017/06_21_posylannia/dstu_8302.pdf (дата звернення: 16.12.2025). kubg.edu.ua
2. Про затвердження Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 : Наказ Мінагрополітики від 17.04.2025 № 1675 // База даних «Законодавство України» / ВРУ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0868-25> (дата звернення: 16.12.2025). Закон України
3. Про затвердження Інструкції з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98) : Наказ Укргеодезкартографії від 09.04.1998 № 56 // База даних «Законодавство України» / ВРУ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0393-98> (дата звернення: 16.12.2025). Закон України
4. ДБН В.1.3-2:2010. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві // Єдина державна електронна система у сфері будівництва. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199637436816688486?doc_type=2 (дата звернення: 16.12.2025). e-Construction
5. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність : Закон України від 23.12.1998 № 353-XIV // База даних «Законодавство України» / ВРУ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/353-14> (дата звернення: 16.12.2025).
6. Про національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13.04.2020 № 554-IX // База даних «Законодавство України» / ВРУ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/554-20> (дата звернення: 16.12.2025).
7. Умовні знаки для топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. Київ : Міністерство екології та природних ресурсів України, 2001. 359 с. URL: <https://nvkarta.com/project/library/uploads/geography/map->

[standart/%5Bstandards%5D%5Btopography%5D%5B2001%5D-umovni-znaky-5000.pdf](#) (дата звернення: 16.12.2025).

8. ДСТУ Б Б.1.1-17:2013. Умовні позначення графічних документів містобудівної документації. URL: [Про прийняття національного стан... | від 01.04.2013 № 119](#) (дата звернення: 16.12.2025).

9. Магістерська робота: написання, оформлення, захист : методичні рекомендації для слухачів магістратури за спеціальністю 281 "Публічне управління та адміністрування" [видання друге, доповнене] / упорядники Д.І. Дзвінчук, А.В. Мазак. Івано-Франківськ, 2020. 47 с.

10. Віват А., Літинський В., Колгунов В., Покотило І. Дослідження точності визначення координат GNSS методом в режимі RTK. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2011. №74. С.52-59.

11. Костецька Я., Пішко Ю., Гешель Д. Залежність точності визначення положення пунктів у супутникових мережах від тривалості сеансів спостережень. *Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва*. Львів: Видавництво Львівської політехніки. - 2011. - Вип. II (22). - С. 96-102.

12. Pakshyn M. та ін. Estimation of earth's surface moves and deformation of the territory of mine "Khotin" of Kalush-Golinsky field by method of radar interferometry // *Geodesy and Cartography*. 2019. Vol. 45(1). P. 37–42. DOI: 10.3846/gac.2019.6300.

13. Геодезичний енциклопедичний словник. / За ред. Володимира Літинського – Львів: Євросвіт, 2001. – 668 с.

14. Pylypiuk R., Burak K., Pylypiuk R., Grytsyuk T., Kovtun V., Turyanytsya M. Position determination of the national reference ellipsoid of Ukraine for the results of GNSS observations // *Archives of Institute of Civil Engineering*. 2016. No. 22. P. 63–70. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/115777> (дата звернення: 16.12.2025).

15. Reha M. (2012). Analysis of the Accuracy of Terrestrial Laser Scanning Measurements.

16. Daniel H., Burcu A., Pingbo T., (2010). Using laser scanners for modeling and analysis in architecture, engineering, and construction. 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS).
17. Christoph H., Hans N., Andreas W., (2016). Calibration of Terrestrial Laser Scanners.
18. Шумаков Ф.Т. Супутникова геодезія. Конспект лекцій / Федір Шумаков – Харків: ХНАМГ., 2009. – 88с.
19. Гофманн-Велленгоф Бернард. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика. / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Колінз. Переклад з англ. мови за ред. Акад. НАНУ Я.С. Яцківа, - К.: Наукова думка, 1996. – 380
20. Рій І.Ф., Бочко О. І., Біда О.Ю. Електронні геодезичні прилади: навч. пос. І.Ф. Рій, О. І. Бочко, О.Ю. Біда – Львів: «ГАЛИЧ-ПРЕС», 2021. – 336с.: іл.
21. Черняга П.Г. Супутникова геодезія. Навчальний посібник / П.Г. Черняга, І.М. Бялик, Р.М. Янчук. 2-ге вид., без змін – Рівне: НУВГП, 2014. – 222 с.
22. GEOFORUM'2025. Програма конференції (09–11 квітня 2025 р., Львів–Брюховичі). URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/03/PROGRAM_2025.pdf (дата звернення: 16.12.2025).
23. XXVIII МНТК «ГЕОФОРУМ 2025». URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/11/1_50.pdf (дата звернення: 16.12.2025).
24. Ковтун В. М. (профіль ІФНТУНГ: перелік вибраних публікацій та наукових інтересів) : вебсторінка. URL: <https://nung.edu.ua/person/kovtun-vitaliy-mironovich> (дата звернення: 16.12.2025).
25. *Оптимізація знімання та 3D-реконструкції ручним лазерним сканером* // Магістерська робота. — УДК 528.4. — Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2024 р.