

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ**

**Факультет геоінформаційних систем та управління територіями
Кафедра геоінформатики і фотограмметрії**

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту
освітньо-кваліфікаційного рівня магістра
на тему:

«Вдосконалення методів автоматизованої обробки LiDAR-даних для
картографування територій»

Виконав: студент II курсу,
групи ГСТм-24
за напрямком підготовки
19 «Архітектура і
будівництво»
193 «Геодезія та землеустрій»
Приходько Н.С,
(прізвище та ініціали
студента)
Керівник:
Горковчук Ю.В. к.т.н.
(прізвище та ініціали,
науковий статус, посада)
Рецензент:
Нестеренко О. В.
(прізвище та ініціали)

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Геоінформатики і фотограмметрії

Освітній рівень: «магістр за ОПП»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: Геоінформаційні системи і технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

доцент., к.т.н. Нестерненко О. В.

“03” грудня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

**ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Приходько Назарій Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: Вдосконалення методів автоматизованої обробки LiDAR-даних для картографування територій

затверджена наказом ректора КНУБА № 1844/22/25 від 31.10.2025

2. Керівник роботи доц., к.т.н. Горковчук Юлія Вікторівна

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту: 04.12.2025

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р. 1. Сучасний стан і тенденції розвитку засобів картографування територій

Р. 2. Методичні засади картографування територій

Р. 3. Вдосконалення методів автоматизованої обробки лідарних даних для картографування територій

Р. 4. Практична апробація засобів автоматизованої обробки лідарних даних для картографування територій

5. Графічний матеріал за розділами

Р. 1. 1.1. Схема принципу роботи LiDAR;

1.2. Приклад картографування території з використанням лідарних даних;

1.3. Порівняльна характеристика програмних засобів для обробки LiDAR-даних.

Р. 2 2.1. Схема класифікації карт і планів;

2.2. Інституційне забезпечення картографування територій;

Р. 3. 3.1. Блок-схема алгоритму автоматизованої обробки;

3.2. Архітектура макросів у MicroStation (VBA, MDL);

3.3. Зображення фрагментів класифікації об'єктів (будівлі, рослинність тощо).

Р. 4. 4.1. Візуалізація результатів (ЦМР, 3D-модель забудови);

4.2. Порівняльна таблиця точності та часу обробки.

6. Календарний план виконання роботи:

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)
Розділ 1. Аналітичний огляд сучасних методів картографування територій та використання LiDAR-даних.	27.10.2025

Розділ 2. Обґрунтування методичних засад і вибір інструментів для обробки LiDAR-даних.	10.11.2025
Розділ 3. Розроблення макросів для автоматизованої обробки та класифікації лідарних даних.	24.11.2025
Розділ 4. Практична апробація методів і оцінка ефективності результатів.	24.11.2025
Остаточне оформлення роботи	07.12.2025
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	08.12.2025
Попередній захист роботи на кафедрі	23.12.2025

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			
Розділ 4.			

8. Дата видачі завдання_

Зав. кафедри _____ Карпінський Ю.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник _____ Горковчук Ю.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Студент _____ Приходько Н.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему:

«Вдосконалення методів автоматизованої обробки LiDAR-даних для
картографування територій»

Приходько Назарій Сергійович

Київ – 2025 р.
**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
проф., д.т.н. Карпінський Ю.О.
“03” грудня 2025 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

«Вдосконалення методів автоматизованої обробки LiDAR-даних для
картографування територій»

Виконала студент групи ГСТм-24
193 «Геодезія та землеустрій»
Геоінформаційні системи і технології
Приходько Н.С.

Керівник: Горковчук Ю.В. , к.т.н.
Ідентичність підтверджую

Київ 2025 р.

РЕЗЮМЕ (summary) <i>до атестаційної випускної роботи студента:</i>		Приходько Назарій Сергійович	
<i>ЗВО</i>	Київський національний університет будівництва і архітектури		
<i>Тема</i>	Вдосконалення методів автоматизованої обробки LiDAR-даних для картографування територій		
<i>Освітній ступінь</i>	Магістр за освітньо-науковою програмою навчання		
<i>Факультет</i>	Геоінформаційних систем та управління територіями		
<i>Кафедра</i>	Геоінформатики та фотограмметрії		
<i>Спеціальність</i>	193 Геодезія та землеустрій		
<i>Керівник</i>	Горковчук Юлія Вікторівна доц. к.т.н.		
<i>Обсяг роботи</i>	<i>пояснювальна записка</i>	<i>розділів</i>	<i>креслень формату A1</i>
	86	4	0
<i>Розділ 1</i>	У першому розділі виконано аналіз сучасних підходів до картографування територій із використанням цифрових технологій дистанційного зондування. Розглянуто фізичні та технологічні основи лідарного знімання, принципи формування хмар точок і їх роль як вихідного джерела просторової інформації. Охарактеризовано основні параметри LiDAR-даних, особливості їх структури та можливості використання у топографічному картографуванні. Також проаналізовано сучасні програмні засоби для обробки лідарних даних та визначено їх місце у загальному картографічному процесі.		
<i>Розділ 2</i>	У другому розділі розглянуто методичні основи картографування територій відповідно до чинної нормативно-правової бази та вимог до точності створення великомасштабних карт і планів. Проаналізовано організаційні та інституційні аспекти картографічної діяльності, а також досвід використання лідарних даних у світовій та вітчизняній практиці. Окрему увагу приділено порівнянню традиційних методів знімання з сучасними лідарними технологіями та обґрунтуванню доцільності їх застосування.		

<i>Розділ 3</i>	Третій розділ присвячено розробленню та вдосконаленню методів автоматизованої обробки лідарних даних. Запропоновано послідовність обробки хмар точок, що включає фільтрацію шумів, автоматизовану класифікацію та формування цифрових моделей місцевості. Описано принципи створення та використання макросів у середовищі MicroStation + TerraScan, які дозволяють оптимізувати процеси класифікації об'єктів і значно скоротити час камеральних робіт.
<i>Розділ 4</i>	У четвертому розділі наведено результати практичної апробації розроблених методів автоматизованої обробки LiDAR-даних. Виконано картографування тестової території Німеччини на основі реальних лідарних даних з подальшим створенням цифрових моделей рельєфу та топографічних матеріалів. Проведено оцінку точності та ефективності отриманих результатів, що дозволило визначити практичну доцільність застосування запропонованих методів.
<i>Висновки по роботі</i>	У магістерській роботі розглянуто та вдосконалено підходи до автоматизованої обробки LiDAR-даних для картографування територій. Запропоновані методи забезпечують підвищення ефективності обробки великих обсягів просторової інформації та покращення якості цифрових картографічних продуктів. Результати практичної апробації підтвердили можливість використання розроблених підходів у сучасній топографо-геодезичній практиці відповідно до вимог чинних нормативних документів.
<p>Ключові слова: LiDAR, лідарні дані, цифрове картографування, автоматизована обробка, хмара точок, топографічні плани, MicroStation, TerraScan.</p> <p>Keywords: LiDAR, lidar data, digital cartography, automated processing, point cloud, topographic mapping., MicroStation, TerraScan.</p>	

Керівник: _____/Горковчук Ю.В./

«11» грудня 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ	14
1.1. Методи та алгоритми сучасного картографування територій	14
1.1.1. Сутність і значення сучасного картографування	14
1.1.2. LiDAR як базовий метод сучасного цифрового картографування	16
1.1.3. Застосування LiDAR у сучасному картографуванні.....	19
1.2. Порівняльний аналіз інструментів картографування територій...	24
Висновки до розділу 1	30
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ	33
2.1. Інституційні засади картографування.....	33
2.2. Досвід картографування територій	41
2.3. Огляд методів обробки лідарних даних.....	46
Висновки до розділу 2	49
РОЗДІЛ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ.....	51
3.1. Розроблення методики картографування територій на основі лідарних даних.....	51
3.2. Удосконалення існуючих методів автоматизованої обробки лідарних даних.....	54
3.3. Розроблення засобів автоматизованої класифікації	58
Висновки до розділу 3	64
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ОБРОБКИ ЛІДАРНИХ ДАНИХ ДЛЯ КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ	66
4.1. Картографування території Німеччини на основі лідарних даних	66
4.2. Оцінка результатів	78

Висновки до розділу 4.	80
ВИСНОВКИ.....	81
Список літератури.....	84
ДОДАТКИ.....	88

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена тим, що в умовах цифрової трансформації геодезії та картографії обсяг лідарних даних стрімко зростає, а традиційні методи ручної обробки виявляються недостатньо ефективними. В Україні все активніше впроваджуються аеролідараційні зйомки для потреб містобудування, моніторингу лісових ресурсів, інженерного проектування та кадастру, однак відсутність уніфікованих державних стандартів і брак автоматизованих рішень ускладнюють широке використання цих даних. Тому розроблення та вдосконалення методів автоматизованої обробки LiDAR-даних є важливим науковим та практичним завданням.

Об’єкт дослідження – картографування територій на основі лідарних даних.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та засоби автоматизованої обробки LiDAR-даних, а також їх застосування для створення топографічних планів і цифрових моделей місцевості.

Мета роботи – удосконалення методів автоматизованої обробки лідарних даних з метою підвищення точності, швидкості та ефективності картографування територій.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку технологій картографування, зокрема застосування LiDAR у світовій та українській практиці.

2. Розглянути методичні та інституційні засади картографування територій, стандарти та вимоги до обробки просторових даних.

3. Дослідити існуючі алгоритми та програмні інструменти для обробки лідарних даних і визначити їхні сильні та слабкі сторони.

4. Розробити та вдосконалити макроси для автоматизованої фільтрації, класифікації та моделювання хмар точок.

5. Виконати практичну апробацію запропонованих методів на реальній території, оцінити точність класифікації та ефективність обробки даних.

Отримані результати роботи спрямовані на підвищення рівня автоматизації картографічних робіт, скорочення часу обробки великих обсягів лідарної інформації та покращення якості цифрових моделей для потреб геодезії, інженерного проектування та управління територіями.

**РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ
РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ КАРТОГРАФУВАННЯ
ТЕРИТОРІЙ**

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ

1.1. Методи та алгоритми сучасного картографування територій

1.1.1. Сутність і значення сучасного картографування

Картографування територій — це комплексний процес збору, обробки, аналізу та візуалізації географічних даних для створення достовірних моделей рельєфу, природних об'єктів і інфраструктури. У минулому цей процес базувався на аналогових методах, таких як топографічна зйомка за допомогою теодолітів і тахеометрів, а результати оформлялися у вигляді паперових карт і планів. З початком епохи цифрових технологій картографія почала трансформуватися: дані стали збиратися за допомогою дистанційного зондування, цифрових тахеометрів, GNSS і лазерного сканування. В останні десятиліття на перший план виходять інтелектуальні автоматизовані методи обробки даних, що дозволяють оперативно створювати високоточні 2D та 3D моделі територій [1,2].

1. Історичний контекст і розвиток цифрового картографування

Перші цифрові карти з'явилися наприкінці XX століття, коли з'явилися персональні комп'ютери, здатні обробляти великі масиви даних. Згодом були розроблені перші ГІС-системи, що дозволяли інтегрувати різні шари інформації: рельєф, мережі інженерних комунікацій, водні об'єкти, транспортні шляхи. Поява LiDAR (Light Detection and Ranging) та UAV (Unmanned Aerial Vehicles) відкрила новий етап розвитку, адже тепер можливо автоматично створювати хмари точок високої щільності, які точно відображають реальну поверхню Землі. Цей підхід дозволяє переходити від плоских карт до тривимірних цифрових моделей, які можна інтегрувати у системи планування міст, ландшафтного моніторингу та природоохоронного контролю [1,3].

2. Сучасні технології картографування

Важливо розмежовувати технології збору просторових даних та технології картографування. У науковій і професійній практиці ці поняття часто плутають, однак з точки зору методології вони виконують різні функції.

Технології збору даних

До них належать:

- LiDAR (Light Detection and Ranging)
- UAV (Unmanned Aerial Vehicles)
- GNSS (Global Navigation Satellite Systems)
- а також фотограмметрія, супутникові знімки, наземне та мобільне лазерне сканування.

Їхня роль: формування вихідних просторових даних, які ще не є картографічними продуктами. Вони забезпечують отримання координат, висот, зображень і хмар точок, але не виконують функцій аналізу і картографічного моделювання.

Технології власне картографування

До технологій картографування належать тільки ті, які забезпечують створення, обробку, аналіз та подання картографічної інформації, і перш за все — це:

ГІС (Геоінформаційні системи)

ГІС є центральною платформою картографічного процесу, оскільки:

- інтегрує всі типи просторових даних (LiDAR, UAV, GNSS, фотограмметрія);
- забезпечує візуалізацію у вигляді карт, планів та тривимірних моделей;
- містить інструменти просторового аналізу;
- дозволяє створювати атрибутивні бази даних;
- підтримує автоматизовану обробку через макроси, скрипти, алгоритми та модулі машинного навчання [1,3].

Технологія	Основне призначення	Переваги	Обмеження
LiDAR	Тривимірне сканування рельєфу та об'єктів	Висока точність, детальні хмари точок	Вартість, великі обсяги даних
UAV	Аерофотозйомка та LiDAR-знімки	Швидкість, доступ до важкодоступних ділянок	Погодні обмеження, потреба у навчанні операторів
GNSS	Геоприв'язка та координатна точність	Точна прив'язка даних	Обмежена точність у густо забудованих районах
ГІС	Інтеграція та аналіз просторових даних	Автоматизація обробки, тематичний аналіз	Потребує висококваліфікованих користувачів

1.1.2. LiDAR як базовий метод сучасного цифрового картографування

Світлове виявлення і визначення дальності, англ. Light Detection and Ranging (LiDAR) — це високоточна технологія дистанційного зондування, яка дозволяє отримувати тривимірні координати об'єктів і поверхні з високою точністю. Метод базується на лазерному скануванні та створенні хмари точок, яка є основою для цифрових моделей рельєфу (ЦМР), цифрових моделей поверхні (ЦМП) та 3D-моделей об'єктів. Принцип роботи LiDAR полягає у наступному: лазерний передавач випромінює короткі імпульси світла, які відбиваються від поверхні та об'єктів. Повернені імпульси фіксуються приймачем, і на основі часу проходження променя визначається відстань до об'єкта. Цей процес дозволяє отримати координати кожної точки (X, Y, Z) із високою точністю.

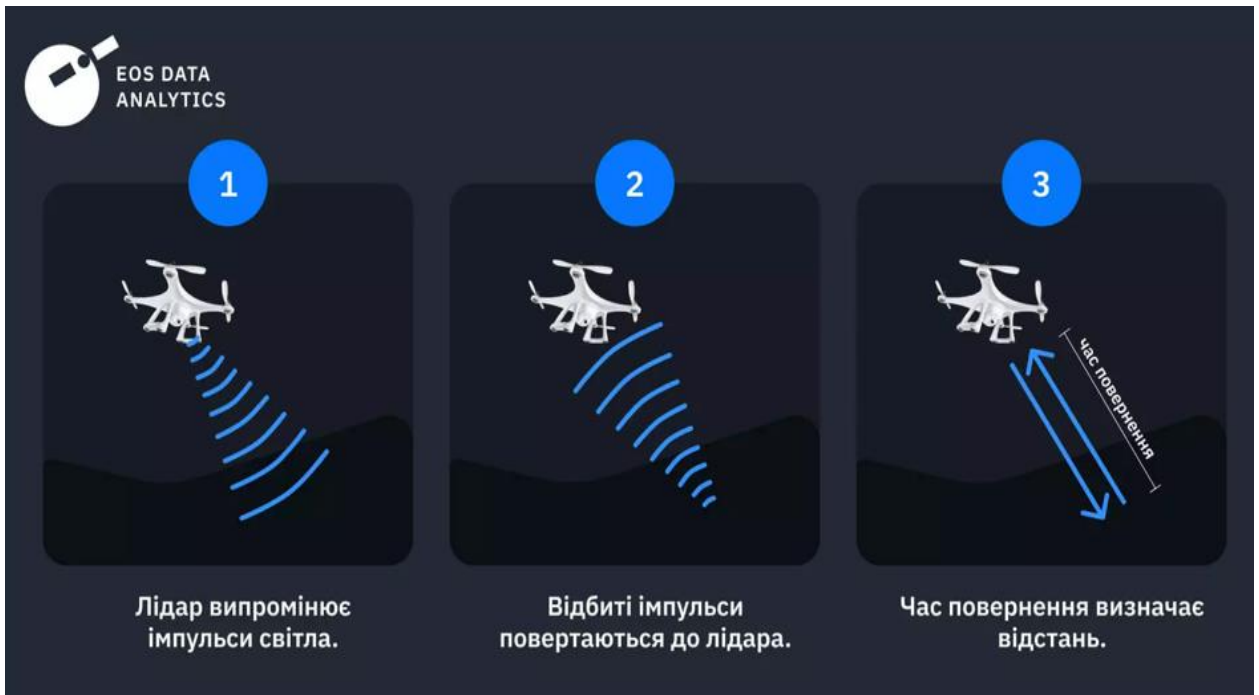


Рис. 1.1 – Принцип роботи LiDAR

Додатково, сучасні LiDAR-системи можуть фіксувати інтенсивність відбитого сигналу, що дозволяє відрізнити різні типи поверхонь (наприклад, бетон, асфальт, листя дерев) та підвищує точність класифікації хмар точок.

Форми застосування LiDAR

1. Aerial LiDAR (ALS) – авіаційне сканування для картографування великих територій. Дозволяє отримувати щільність точок до 10–30 точок/м² і точність до 2–4 см. Використовується для створення топографічних карт, оцінки ландшафтів, лісового покриву та моніторингу змін місцевості.
2. Terrestrial LiDAR (TLS) – наземне сканування, орієнтоване на архітектурні, інженерні та топографічні об’єкти. Підходить для детальної цифрової моделі будівель, інженерних споруд та зон складного рельєфу. Точність TLS може досягати міліметра.
3. Mobile LiDAR (MLS) – мобільні сканери на автомобілях чи транспортних платформах. Використовуються для створення детальних 3D моделей міських вулиць, транспортних коридорів, інфраструктури та дорожніх мереж.

Переваги LiDAR

- Висока точність та щільність хмар точок, що забезпечує деталізацію рельєфу і об'єктів.
- Можливість роботи у будь-яких умовах освітлення, включно з нічним часом.
- Інтеграція з ГІС та іншими програмними платформами для автоматизованого аналізу та моделювання.
- Можливість отримання багат шарових даних: поверхня ґрунту, крони дерев, будівлі та інші об'єкти.
- Підтримка автоматизованих процесів класифікації та машинного навчання для обробки великих масивів точок [4–8].

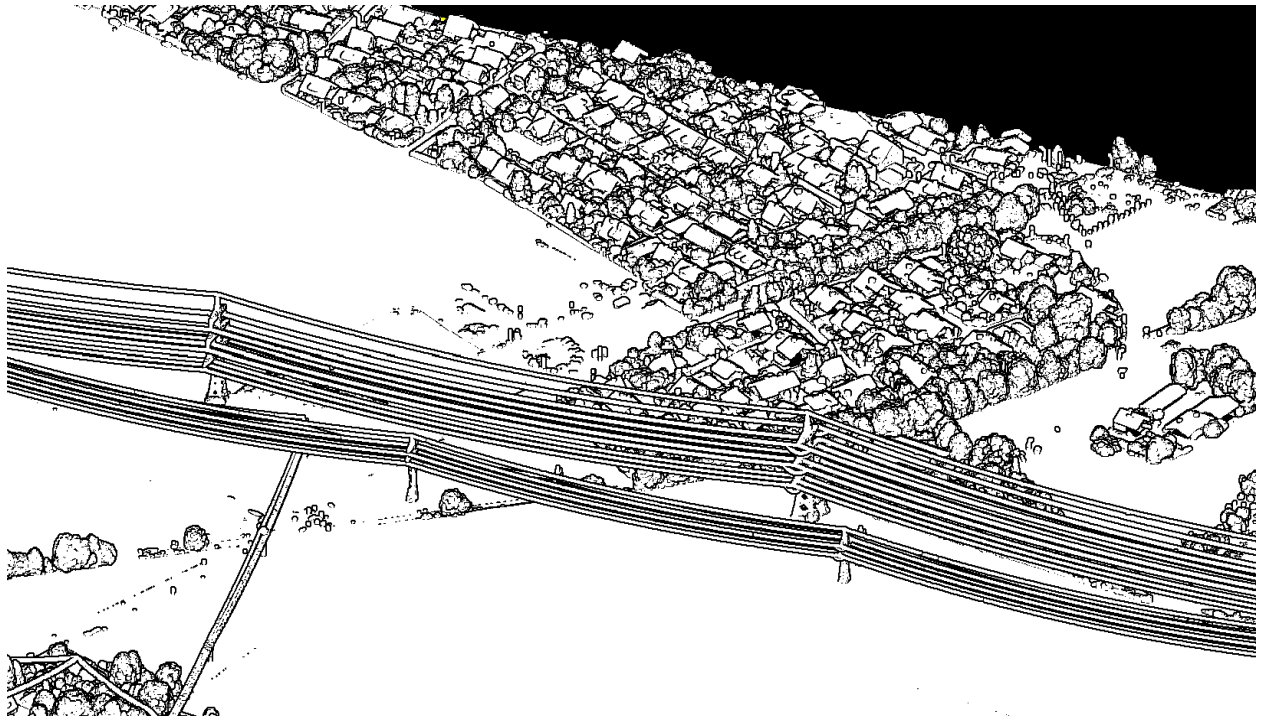


Рис. 1.2 – Відображення хмари точок авіаційного лазерного сканування у ПЗ
MicroStation

Загальні етапи обробки LiDAR даних [9].

1. Попередня обробка: видалення шумів та некоректних точок, корекція відбиттів, калібрування даних.
2. Класифікація об'єктів: виділення ґрунту, рослинності, будівель та інших об'єктів. Методи включають Progressive TIN Densification, висотну фільтрацію та алгоритми машинного навчання.

3. Геоприв'язка: інтеграція сканів у єдину систему координат, перевірка точності.
4. Створення цифрових моделей (ЦМР, ЦМП) та 3D моделей об'єктів.
5. Автоматизація та аналіз: застосування макросів, нейронних мереж та автоенкодерів для обробки великих масивів даних [7,8].

Виклики та перспективи технології LiDAR.

- Висока вартість обладнання та ліцензій.
- Великий обсяг даних, що потребує потужних обчислювальних ресурсів.
- Неоднорідність форматів (LAS, LAZ, XYZ).
- Необхідність кваліфікованого персоналу для роботи з обробкою та аналізом даних.
- Перспективи розвитку: інтеграція з ГІС, автоматизована класифікація хмар точок, застосування у смарт-сіті, екологічному моніторингу та плануванні територій.

1.1.3. Застосування LiDAR у сучасному картографуванні

LiDAR — універсальний інструмент, який застосовується в широкому спектрі картографічних і прикладних задач завдяки здатності швидко і з високою точністю вимірювати тривимірну форму поверхні й об'єктів. Нижче наведено детальний розгляд ключових напрямків застосування, робочі процедури, вимоги до даних, типові показники якості та практичні зауваження.

Основними напрямками застосування LiDAR є створення топопланів та цифрових моделей місцевості (DTM/DEM/DSM), а також детальних міських 3D-моделей. Топоплани та цифрові моделі місцевості використовуються для побудови карт різних масштабів – від детальних планів із масштабом 1:500–1:5 000 до регіональних карт із масштабом 1:25 000 і більше. Щільність хмари точок для таких робіт зазвичай коливається від 5 до 20 точок на квадратний метр, а для детальніших планів вона має бути не менше 20–30 точок/м². Міські 3D-моделі дозволяють відтворювати будівлі, вулиці та іншу міську інфраструктуру у тривимірному вигляді. Для точного моделювання фасадів

потрібна щільність хмари близько 10–50 точок/м², а для вулиць та доріг – приблизно 10–20 точок/м².

Що стосується сфер застосування, то LiDAR використовується для топографічного картування та планування забудови, для аналізу рельєфу, гідрологічних моделей, оцінки похилів і ерозії. У лісовому моніторингу технологія дозволяє вимірювати висоту дерев і крон, оцінювати щільність насаджень та біомасу, що дає змогу планувати рубки, контролювати лісові ресурси та здійснювати екологічний моніторинг. У транспортному секторі LiDAR застосовується для картування доріг, залізниць, мостів і тунелів, оцінки профілів, обсягів земляних робіт та моделювання трас, що допомагає при проектуванні, будівництві та контролі транспортної інфраструктури. Крім того, повторні LiDAR-зйомки дозволяють контролювати деформації та проводити дослідження геодинаміки: відстежувати переміщення схилів, дамб, кар'єрів та інших інженерних споруд, визначати зсуви та планувати заходи безпеки.

Таким чином, LiDAR об'єднує можливості високоточного картографування, тривимірного моделювання та моніторингу природних і штучних об'єктів, забезпечуючи ефективну роботу у різних сферах – від містобудування та інфраструктури до лісового господарства та геодинамічних досліджень.

Робочі процедури LiDAR (детально)

1. Планування зйомки

- Визначення мети зйомки: який продукт потрібен (DTM, 3D-модель, профілі, моніторинг).
- Вибір платформи: ALS, TLS, MLS, UAV-LiDAR залежно від масштабу та бюджету.
- Проектування маршруту або траєкторії польоту: забезпечення перекриття (60–80 % для ALS), врахування рельєфу та умов освітлення.

- Планування технічних параметрів: частота пульсації, дальність сканування, кут огляду сенсорів.

2. Збір даних

- Виконання польотів, об'їздів або сканування.
- Калібрування GNSS/IMU систем для точного позиціонування.
- Збір метаданих: дата, час, атмосферні умови, висота польоту.
- Контроль первинної якості хмари під час збору.

3. Попередня обробка даних

- Імпорт файлів LAS/LAZ у програмне забезпечення.
- Фільтрація шумів і аномалій (стовпи, птахи, літаки).
- Перевірка системи координат, вирівнювання з реальними геодезичними точками.
- Калібрування інтенсивності відбитого сигналу для подальшого аналізу.

4. Реєстрація та зшивка наборів

- Використання алгоритмів ICP або feature-based registration для зшивки кількох сканів.
- Прив'язка до контрольних точок (GCP) для підвищення точності.
- Перевірка залишкових помилок та рівномірності розподілу точок.

5. Класифікація та генерація продуктів

- Базова класифікація: Progressive TIN, CSF для ґрунту, вегетації, будівель.
- Покращена класифікація: ML / Deep Learning (PointNet, KPConv) для складних середовищ.
- Генерація цифрових моделей: DTM, DSM, 3D-моделі (LOD).
- Екстракція контурів, створення профілів, аналіз змін для повторних зйомок.

6. Контроль якості та експорт

- Перевірка точності за контрольними точками (RMSE).
- Оцінка логічної узгодженості шарів, перевірка на пропуски та шум.
- Експорт у GIS (SHP, GDB), CAD (DGN/DXF), публікація для веб-ГІС.

Таблиця 1.2

Застосування	Мінімальна щільність (точок/м ²)	Сфера застосування / призначення хмари
Топоплани / Цифрові моделі рельєфу (DEM/DTM/DSM)	5–20	Створення цифрових моделей місцевості, топографічних карт, планування будівництва, аналіз рельєфу, моделювання водозборів і ерозії
Міські 3D-моделі	10–50 (для фасадів ≥ 20)	Моделювання будівель та інфраструктури, містобудівне планування, енергетика, комунальні мережі, оцінка тіньових зон
Лісовий моніторинг	4–12	Оцінка висоти дерев і крон, щільності насаджень, обсягів біомаси, вертикальна структура лісу, лісові інвентаризації
Транспортна інфраструктура	10–30	Проектування та аналіз доріг, залізниць, мостів і тунелів, оцінка обсягів земляних робіт, трасування, моделювання зон підтоплення та ерозії
Контроль деформацій і геодинаміка	будь-яка (чим більше точок, тим точніше)	Моніторинг переміщень схилів, дамб, кар'єрів та інженерних споруд, оцінка стабільності територій, контроль геодинамічних процесів

Джерела та обґрунтування для щільності точок і сфер застосування LiDAR

1. Топоплани / DTM / DEM / DSM (5–20 точок/м², для детальних планів ≥ 20 –30 точок/м²)

Практика: повітряне сканування ALS для великих площ; TLS / MLS для локальних ділянок;

Наукові джерела: Baltsavias, 1999; Huuuprä et al., 2008;

Стандарти та рекомендації: ASPRS LiDAR Guidelines, ISO 16739;

Обґрунтування: мінімальна щільність точок визначена для забезпечення достатньої роздільної здатності цифрових моделей рельєфу та точності похилів.

2. Міські 3D-моделі (10–50 точок/м² для фасадів; ~10–20 для вулиць)

Практика: мобільне та аерознімальне сканування для моделювання міст (MLS + ALS), фотограмметрія для текстур фасадів;

Наукові джерела: Vosselman & Maas, 2010; Oude Elberink & Vosselman, 2011;

Обґрунтування: щільність точок визначає деталізацію фасадів і вулиць, дозволяє створювати LOD1–LOD3 моделі будівель та інфраструктури.

3. Лісовий моніторинг та оцінка біомаси (4–8 точок/м² для крон; ≥10 для точної біомаси)

Практика: повітряне ALS для великих площ; TLS для калібрування моделей біомаси;

Наукові джерела: Lefsky et al., 2002; Нууррә et al., 2008;

Обґрунтування: щільність точок обрана для точного відображення крон дерев і вертикальної структури лісу, забезпечення адекватного розподілу біомаси.

4. Транспорт (10–30 точок/м²)

Практика: MLS та TLS для доріг, мостів, тунелів;

Нормативні джерела: ASCE Guidelines, Eurocodes;

Обґрунтування: щільність хмари забезпечує точність поперечних та поздовжніх профілів, а також контроль обсягів земляних робіт.

5. Контроль деформацій і геодинаміка (будь-яка щільність; чим більше точок, тим точніше)

Практика: повторні сканування ALS/TLS/MLS для time-series аналізу;

Наукові джерела: Jaboyedoff et al., 2012; Crosetto et al., 2016;

Обґрунтування: чим більша щільність, тим точніше визначаються дрібні зміни рельєфу та переміщення споруд, забезпечується надійний контроль деформацій.

1.2. Порівняльний аналіз інструментів картографування територій

На сьогодні існує кілька ключових програмних комплексів:

Таблиця 1.3

Програмний комплекс	Розробник	Основне призначення	Особливості	Базові функції оброблення хмари	Базові функції моделювання / креслення	Орієнтовна вартість
MicroStation + TerraScan	Bentley Systems	Обробка та класифікація LiDAR	Підтримка VBA, MDL; високоточні макроси	Фільтрація шумів, класифікація, генерація DTM/DSM, редагування точок	Побудова 3D-моделей, профілі, ізолінії, креслення CAD	Висока (~\$10,000–15,000 ліцензія)
ArcGIS Pro	Esri	Геоаналітика, моделювання рельєфу	Python, ModelBuilder	Імпорт LAS/LAZ, обробка хмар точок, геоаналіз	Генерація DTM/DSM, 3D-візуалізація, карти, профілі	Середня (~\$1,500/рік підписки)
QGIS + PDAL / LAStools	Open Source	Open-source обробка даних	Підтримка скриптів Python	Конверсія форматів, фільтрація, класифікація, агрегація точок	Побудова DEM/DTM, прості 3D-візуалізації, експорт у GIS/CAD	Безкоштовно
CloudCompare	Open Source	3D-візуалізація хмар точок	Висока швидкість	Імпорт/експорт хмар, вирівнювання, реєстрація, обчислення хмарних відстаней	3D-моделі, обчислення об'ємів, профілі, візуалізація	Безкоштовно
Global Mapper	Blue Marble	Побудова ЦМР, експорт ГС-даних	Простий інтерфейс	Імпорт LAS/LAZ, редагування хмар, базова класифікація	DEM/DTM, профілі, карти, базове креслення	Середня (~\$500–600 ліцензія)

MicroStation — це інженерна платформа CAD/GIS, яка використовується для проектування, 3D-моделювання та обробки просторових даних. Пакет TerraScan забезпечує глибоку інтеграцію LiDAR-інструментів: класифікацію, фільтрацію, генерацію моделей рельєфу, побудову профілів та зрізів.

Переваги:

підтримка макросів VBA та модулів MDL для автоматизації процесів;
сумісність з іншими Bentley-продуктами (InRoads, OpenCities);
можливість створення власних алгоритмів класифікації;

точність розрахунків — до 3 см у плані і 5 см по висоті.

У середовищі MicroStation користувач може створити макрос для класифікації точок за висотою та інтенсивністю відбиття, що суттєво скорочує час обробки даних [9].

Порівняльна характеристика програм для роботи з LiDAR-даними.

Обробка даних лазерного сканування вимагає потужного програмного забезпечення, яке здатне працювати з великими масивами хмар точок (іноді до кількох мільярдів записів), виконувати фільтрацію, класифікацію, побудову цифрових моделей рельєфу (ЦМР) і поверхні (ЦМП), а також інтегрувати результати в геоінформаційні системи (ГІС).

Сучасні ПЗ розрізняються за функціональністю, швидкістю, точністю алгоритмів класифікації, підтримкою стандартів LAS/LAZ і можливістю автоматизації обробки.

Таблиця 1.4

Програма	Основні можливості	Переваги	Недоліки	Сфера застосування
MicroStation (VBA, MDL)	Візуалізація, редагування, написання макросів для автоматизації, побудова ЦМР	Гнучкість, можливість створення власних інструментів, інтеграція з іншими модулями	Потребує навичок програмування, висока вартість ліцензії	Картографія, геодезія, інфраструктурні проекти

Продовження таблиці 1.4

TerraScan	Спеціалізована класифікація хмар точок, автоматизовані алгоритми	Висока точність, оптимізовані інструменти для LiDAR	Працює як надбудова до MicroStation, окремо не функціонує	Геодезія, топографія, створення ЦМР
ArcGIS Pro	Просторовий аналіз, моделювання рельєфу, генерування поверхонь класифікація точок	Широкі аналітичні можливості, інтеграція з базами даних	Висока вартість, складність для новачків	Геоінформаційні системи, моніторинг довкілля
QGIS (LAsTools, PDAL)	Відкриті інструменти для обробки LiDAR, підтримка різних форматів	Безкоштовність, розширюваність, велика спільнота	Менш зручний інтерфейс, потребує налаштувань	Наукові дослідження, навчання, моніторинг
CloudCompare	Відкрита 3D-візуалізація, порівняння хмар точок, базова класифікація	Легка у використанні, безкоштовна, швидка робота	Обмежені можливості для великих проєктів	Візуалізація, аналіз 3D-моделей, навчальні завдання

Порівняльний аналіз і рекомендації

1. За функціональністю

Функції програмних комплексів для LiDAR можна поділити на три основні групи:

- Обробка хмари точок – фільтрація шумів, класифікація, зшивка сканів;
- Моделювання/креслення – створення цифрових моделей місцевості (DTM/DSM), 3D-моделей, профілів, екстракція контурів;
- Просторовий аналіз – аналіз рельєфу, зонування, геоаналітика.

Найповніший набір функцій надають TerraScan та ArcGIS Pro. Вони підтримують повний робочий цикл – від імпорту LAS/LAZ до генерації ЦМР та векторизації.

Для навчальних або дослідницьких цілей підходить QGIS із плагінами LAStools або PDAL, які забезпечують доступ до базових функцій обробки та моделювання хмар точок без фінансових витрат.

2. Точність обробки

Програмні засоби не змінюють самі дані, але методи обробки визначають, наскільки якісно хмари точок трансформуються у цифрові моделі. TerraScan та RiPROCESS забезпечують високоточну класифікацію поверхні та будівель завдяки оптимізованим алгоритмам для роботи з великими наборами авіаційного LiDAR.

3. Зручність користування

Інтерфейс і робочий процес залежать від задач і досвіду користувача. Global Mapper та CloudCompare підходять для швидкого перегляду та первинної обробки, а Pix4Dmapper зручний для польових зйомок і роботи з даними з дронів.

4. Продуктивність

Програми відрізняються за здатністю опрацьовувати великі масиви даних. TerraScan у поєднанні з MicroStation ефективно працює з хмарами точок розміром у мільярди записів. QGIS та ArcGIS Pro ефективні для менших наборів (до 10–20 млн точок), при більших обсягах швидкість роботи знижується.

5. За ціною і відкритістю.

Open-source інструменти (QGIS, PDAL, CloudCompare) дозволяють впроваджувати нові алгоритми, проте не мають потужних засобів для повної автоматизації, як у TerraScan чи ArcGIS Pro.

Проблеми інтеграції LiDAR у картографічний процес

Інтеграція LiDAR у сучасне картографування стикається з низкою комплексних проблем, що мають як технічний, так і організаційний характер.

Таблиця 1.5

Категорія проблеми	Опис	Приклади / наслідки
Організаційні	Обмеження, пов'язані з ресурсами та управлінням	Висока вартість обладнання та ПЗ, потреба в навчанні персоналу, тривалі строки проєктів, необхідність координації між підрозділами
Технічні	Проблеми з самим обладнанням та даними	Великий обсяг даних, обмеження по дальності та точності сканування, залежність від GNSS/IMU, погодні умови під час збору
Методичні / аналітичні	Пов'язані з обробкою та аналізом даних	Складність класифікації хмар точок, потреба в специфічних алгоритмах для різних типів об'єктів (ліс, міська забудова, транспорт), перевірка якості та точності, інтеграція з іншими ГІС/моделями
Фінансові / економічні	Оцінка вартості та рентабельності проєктів	Високі витрати на ліцензії ПЗ, сервісне обслуговування обладнання, обробку великих хмар точок, необхідність дорогого зберігання даних
Екологічні / зовнішні	Обмеження зовнішніми факторами	Погодні умови, густі лісові насадження, міські "тіні" для лазера, сезонні обмеження для польотів UAV-LiDAR

LiDAR-сканери, UAV-системи та мобільні платформи є дорогими і потребують значних фінансових вкладень. Наприклад, навіть портативні LiDAR-системи для дрібних проєктів коштують десятки тисяч доларів США, а професійні мобільні системи для масштабного картографування можуть сягати сотень тисяч. Крім того, ліцензійне програмне забезпечення для

обробки даних (TerraScan, MicroStation, CloudCompare) потребує регулярного оновлення та технічної підтримки [10].

Неоднорідність форматів даних

LiDAR-дані постачаються у різних форматах (LAS, LAZ, XYZ, E57), що ускладнює їх обробку та інтеграцію в єдину систему ГІС. Кожен формат має свої особливості щодо зберігання координат, відбиттів лазера та інтенсивності сигналу. Це створює необхідність у додаткових конвертаціях та перевірках якості даних, що може призводити до втрати точності [10].

Відсутність єдиного державного стандарту обробки LiDAR-даних

В Україні досі немає затверджених на рівні держави стандартів для обробки хмар точок. Відсутність регламентованих методик ускладнює масове впровадження LiDAR у національні проєкти топографії та кадастру. У багатьох країнах світу існують стандарти ISO та OGC для обробки LiDAR-даних, що забезпечують сумісність і уніфікацію, але їхня адаптація в Україні поки що обмежена [10,11].

Великий обсяг обчислень

Обробка хмар точок є ресурсомісткою: 1 км² території може містити понад 1–2 млн точок. Для аналізу таких даних необхідні потужні робочі станції з високопродуктивними процесорами, відеокартами та оперативною пам'яттю. Додатково важлива оптимізація алгоритмів, щоб уникнути тривалого часу обробки та падіння продуктивності [10].

Необхідність високої кваліфікації персоналу

Обробка LiDAR вимагає знань у кількох сферах: геодезія, картографія, ГІС, програмування макросів (VBA, MDL) та навички роботи з 3D-моделюванням. Недостатній рівень підготовки кадрів може призвести до помилок у класифікації, невірної інтерпретації рельєфу або втрати даних [12].

Технічні обмеження та специфіка застосування

При використанні UAV-LiDAR обмеження накладає погодні умови: туман, дощ, сильний вітер можуть знизити точність знімання [10].

Для щільної урбанізованої території потрібна додаткова пост-обробка для відокремлення будівель, дерев та інженерних мереж [12].

Масштабні лісові території вимагають адаптивних алгоритмів фільтрації та класифікації точок, щоб точно виділити крону дерев, підлісок та ґрунт

Висновки до розділу 1

Сучасне картографування територій суттєво змінилося з переходом від аналогових методів до цифрових технологій, що дозволяють отримувати високоточні 2D та 3D моделі рельєфу, об'єктів і інфраструктури. Впровадження дистанційного зондування, GNSS, UAV та LiDAR забезпечило швидке й точне збирання просторових даних, а інтеграція з ГІС і сучасними алгоритмами обробки дозволяє автоматизувати створення цифрових моделей та їх подальший аналіз.

LiDAR є ключовим інструментом сучасної картографії, оскільки дозволяє отримувати детальні хмари точок для цифрових моделей місцевості, 3D моделей міської забудови, лісових насаджень та транспортної інфраструктури.

Програмне забезпечення для обробки LiDAR-даних (MicroStation + TerraScan, ArcGIS Pro, CloudCompare, QGIS та ін.) різняться за функціональністю, точністю та продуктивністю. Вибір інструментів залежить від масштабу завдання, ресурсів та досвіду користувача.

Серед сучасних тенденцій виділяються інтеграція LiDAR з неймережами та алгоритмами штучного інтелекту для автоматичної класифікації об'єктів, обробка великих даних у хмарних сервісах, а також участь у глобальних проєктах моніторингу біомаси та рельєфу. Водночас залишаються виклики: високі витрати на обладнання та ПЗ, великий обсяг даних, потреба у кваліфікованих кадрах, погодні та сезонні обмеження, а також відсутність єдиних державних стандартів обробки LiDAR-даних в Україні.

Таким чином, сучасне картографування з використанням LiDAR та цифрових технологій є ефективним, високоточним та перспективним напрямом геоінформаційної науки, що сприяє розвитку просторового

планування, екологічного моніторингу та інноваційних рішень у сфері управління територіями.

**РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ
КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ**

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ

2.1. Інституційні засади картографування

Інституційні засади картографування територій – це система організаційно-правових, науково-технічних та методичних принципів, що регулюють створення та використання карт. Це включає: визначення правового статусу геодезичних даних та картографічної інформації; створення державних та спеціалізованих установ (наприклад, для геодезії, картографії, земельного кадастру), які відповідають за збір, обробку та розповсюдження даних; встановлення стандартів та методик картографування, включаючи вибір картографічних проєкцій (наприклад, УСК2000 в Україні), систем координатної прив'язки та способів картографічного зображення.

Ключові аспекти інституційних засад:

Правова основа:

Нормативно-правові акти, що визначають право проведення робіт та використання результатів:

Закон України «Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність» : Основний закон, який встановлює, що роботи можуть виконувати як державні підприємства (підпорядковані Держгеокадастру), так і приватні суб'єкти господарювання за наявності відповідних дозволів та кваліфікації. Регулює ліцензування та загальні правила діяльності [13].

Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» (НДГД) : Визначає правові засади створення, функціонування та розвитку НДГД, регулює механізми використання та інтеграції геопросторових даних у різних сферах [14].

Постанови Кабінету Міністрів України : Деталізують закони, встановлюючи порядки загальнодержавного картографування та функціонування НДГД [15].

Земельний кодекс України та Закон України «Про Державний земельний кадастр» : Визначають використання картографічної основи для ведення земельного кадастру [16].

Регулювання питань власності та доступу до геопросторових даних:

Дані , створені за бюджетні кошти, як правило, є державною власністю. Приватні дані можуть належати їх творцям, з урахуванням вимог щодо держтаємниці. Авторське право на картографічну продукцію також захищається [17].

Доступ : Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» встановлює принцип широкого, відкритого та безкоштовного доступу до більшості геопросторових даних через систему онлайн-сервісів, за винятком інформації з обмеженим доступом (держтаємниця). Порухення правил роботи з даними тягне за собою юридичну відповідальність [18, 19]

Організаційна структура:

Державні органи

Ключовими державними органами є:

Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру (Держгеокадастр) : Центральний орган виконавчої влади, який реалізує державну політику у сферах земельних відносин, землеустрою, топографо-геодезичної та картографічної діяльності, а також веде Державний земельний кадастр. Вона координується Кабінетом Міністрів України через Міністра аграрної політики та продовольства [20].

Державна служба морського та річкового транспорту України (Морська адміністрація) : У сфері її управління є гідрографічна діяльність, зокрема навігаційно-гідрографічне забезпечення мореплавства [21].

Державне агентство водних ресурсів України (Держводагентство) : Відповідає за реалізацію державної політики у сфері управління, використання

та відтворення поверхневих водних ресурсів, що опосередковано стосується гідрографії внутрішніх вод [22].

Спеціалізовані наукові та виробничі підприємства

До організаційної структури входять державні та приватні підприємства, що виконують профільні роботи:

Державне науково-виробниче підприємство «Картографія» (ДНВП «Картографія») : Займається розробленням та виданням тематичних картографічних творів, створенням цифрових та електронних карт, географічних інформаційних систем [25].

Державне підприємство «Науково-дослідний інститут геодезії та картографії» : Проводити науково-дослідну діяльність у сферах геодезії, картографії, фотограмметрії та геоінформатики [26].

Державна установа «Держгідрографія» : Науково-виробничий комплекс, що входить до сфери управління Державної служби морського та річкового транспорту України та відповідає за навігаційно-гідрографічне забезпечення морських шляхів [28].

Приватні суб'єкти господарювання : Численні приватні геодезичні та землевпорядні компанії, які мають відповідні сертифікати та дозволи на проведення робіт.

Міжнародні організації, що координують картографічну діяльність

На міжнародному рівні координація та стандартизація здійснюється через:

Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) : Розробляє міжнародні стандарти, що використовуються і в Україні, зокрема у сфері геопросторових даних (наприклад, серія стандартів ISO 19100). Україна представлена ISO своїм національним органом стандартизації [23, 24].

Міжнародна гідрографічна організація (ІНО) : Встановлює міжнародні стандарти для гідрографічних зйомок та морських карт [28].

Європейська асоціація національних картографічних організацій (EuroGeographics) : Сприяє обміну досвідом та співпраці між національними картографічними, кадастровими та земельними органами Європи [29].

Науково-технічна база:

Сучасна українська картографія та геодезія ґрунтується на впровадженні високотехнологічних рішень, що забезпечують точне вимірювання, обробку та аналіз просторових даних. Одним із ключових напрямів є використання супутникових систем GNSS/GPS, які забезпечують високу точність геодезичних вимірювань, підтримку державних геодезичних мереж та точне позиціонування під час польових робіт. Ці дані інтегруються у геоінформаційні системи (ГІС), що дозволяє здійснювати комплексний аналіз, управління та візуалізацію просторової інформації, зокрема в рамках Національної інфраструктури геопросторових даних (НІГД).

Дистанційне зондування Землі з використанням супутникових та аерофотознімків високої роздільної здатності забезпечує регулярне оновлення картографічної основи, контроль за змінами землекористування та моніторинг розвитку територій. Для локальних та важкодоступних ділянок активно застосовуються безпілотні авіаційні комплекси (БПЛА), що дозволяють створювати ортофотоплани та тривимірні моделі місцевості. Лазерне сканування (LiDAR) забезпечує отримання високоточних хмар точок рельєфу та об'єктів, що є критично важливим для інженерних проєктів та містобудівного планування.

Для забезпечення якості та сумісності даних впроваджуються стандартизовані методи збору, обробки, зберігання та візуалізації. В Україні застосовуються національні стандарти ДСТУ, гармонізовані з міжнародними стандартами ISO серії 19100. Сучасні системи управління базами даних та хмарні технології забезпечують ефективне зберігання великих обсягів геопросторової інформації, а єдині правила візуалізації та умовні позначення гарантують зрозуміле відображення даних у паперовому та цифровому

форматі. Регулярне оновлення інформації здійснюється за рахунок державних програм моніторингу, планових робіт та автоматизованих процесів, що дозволяє підтримувати актуальний стан кадастрів, реєстрів та топографічних карт [23-27].

Методична складова:

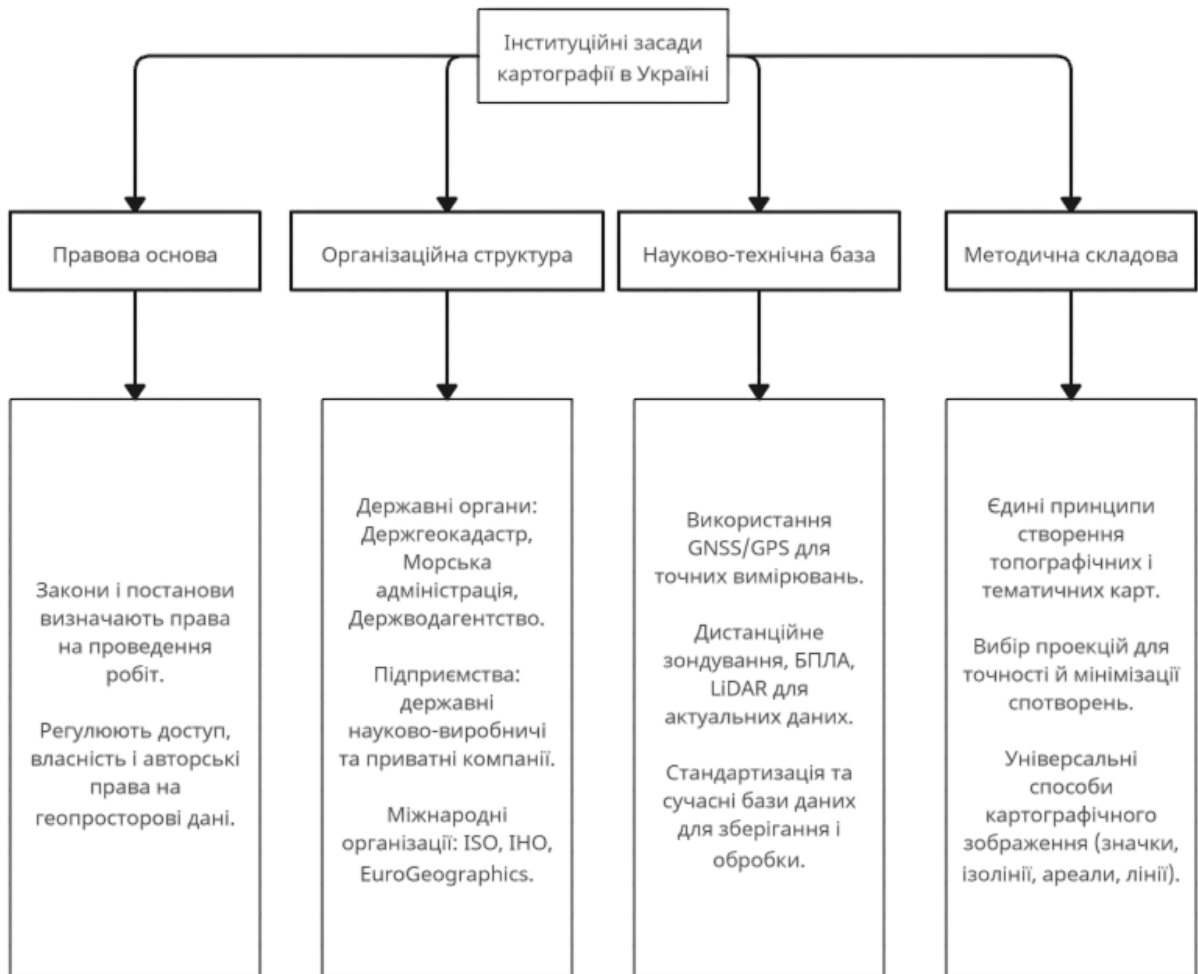
Методична складова картографування в Україні передбачає встановлення єдиних принципів створення карт різного призначення та масштабу. До них належать топографічні карти, які формуються для загальнодержавних потреб та характеризуються високою точністю й деталізацією, а також тематичні карти, що відображають конкретні явища або дані, такі як геологічні, ґрунтові, туристичні чи адміністративно-територіальні [23, 39].

Вибір картографічної проекції є ключовим етапом розробки карт, оскільки будь-яка проекція спричиняє певні спотворення. В Україні для створення топографічних карт переважно використовується рівнокутна поперечна циліндрична проекція Гаусса–Крюгера, яка дозволяє мінімізувати спотворення на локальних територіях та забезпечує збереження кутів, що є критично важливим для великомасштабного картографування та ведення кадастру. Для карт меншого масштабу або тематичних карт застосовуються інші проекції, які можуть зберігати площі або відстані залежно від мети карти [23, 29].

Для забезпечення однозначності та зрозумілості картографічної продукції розроблені універсальні способи картографічного зображення. До них відносяться значки, що позначають об'єкти, які не можуть бути відображені у масштабі карти, ізолінії (горизонталі) для відображення рельєфу чи неперервних явищ, ареали для виділення територій поширення певних характеристик, якісний фон для відображення адміністративного поділу регіонів та лінійні знаки для представлення довгих об'єктів, таких як дороги, річки чи кордони [23, 28].

Детальні стандарти у сфері геоінформатики, що регламентують методичні підходи та забезпечують сумісність картографічних даних, описані в навчальному посібнику «Основи ГІС. Стандартизація географічної інформації» [23].

Схема 2.1



Сучасні картографічні продукти включають традиційні карти та плани, а також цифрові й електронні карти, просторові дані та цифрові моделі місцевості. Надійність геоінформаційних рішень залежить від точності, достовірності та узгодженості карт з координатними системами, що має вирішальне значення для аналізу територій, моніторингу ландшафтів, планування інфраструктури та управління ресурсами.

В Україні нормативна база картографування визначає стандарти масштабів, точності та висотної прив'язки карт і планів. Наприклад, топографічні карти виконуються у таких масштабах: 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:250 000, 1:500 000 і 1:1 000 000. Кожен масштаб передбачає різний рівень деталізації та призначений для специфічних завдань — від відображення окремих будівель та ландшафтних елементів до регіонального або національного планування. Зокрема, карта масштабу 1:10 000 є базовою для національної інфраструктури просторових даних (NSDI), оскільки вона дозволяє інтегрувати інші картографічні та цифрові продукти у єдину систему координат.

Інституційні засади картографування охоплюють кілька ключових напрямів:

Нормативна база та стандарти

- Встановлення вимог до точності координат і висотних позначок;
- Стандарти на формати даних:

LAS/LAZ → американські стандарти LiDAR.

SHP → американський формат ГІС (ESRI).

GeoTIFF → американський растровий формат з геоприв'язкою.

В Україні ці формати використовуються у рамках національної інфраструктури геопросторових даних (NSDI), часто з додатковим дотриманням стандартів ISO 19100, OGC та INSPIRE (європейські стандарти сумісності геоданих) [30-32].

- Вимоги до метаданих, що супроводжують картографічні продукти: дата створення, автор, щільність даних, точність вимірювань.

Національна інфраструктура просторових даних (NSDI)

- Формування єдиної системи збору, обробки та зберігання геопросторових даних;
- Забезпечення сумісності картографічних продуктів між державними органами, бізнесом та науковими установами;

- Впровадження принципів відкритих даних та стандартів ISO 19100, OGC, INSPIRE.

Технологічні вимоги та інтеграція сучасних методів

- Використання геоінформаційних систем (ГІС) для обробки, аналізу та візуалізації даних;
- Інтеграція традиційного картографування з сучасними технологіями дистанційного зондування та LiDAR;
- Автоматизовані процедури контролю якості картографічних даних, включаючи топологічну перевірку та оцінку точності.

Застосування LiDAR у картографуванні

Використання лазерного сканування (LiDAR) дозволяє значно підвищити точність і деталізацію картографічних продуктів. LiDAR-дані формують хмари точок з високою щільністю — десятки та сотні точок на квадратний метр, що забезпечує створення детальних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та місцевості (ЦММ). Основні переваги LiDAR:

- Висока точність і деталізація: кожна точка містить координати x , y , z та інтенсивність відбиття, що дозволяє відтворювати об'єкти з великою точністю;
- Швидкість збору даних: один прольот літальної платформи охоплює великі території, зменшуючи час польових робіт;
- Автоматизація обробки: алгоритми та макроси дозволяють фільтрувати шум, класифікувати об'єкти та формувати 3D-моделі автоматично;
- Сумісність з ГІС: хмари точок інтегруються у національні координатні системи та поєднуються з супутниковими та аерофотознімками;
- Метадані та стандарти: кожна хмара точок супроводжується інформацією про дату збору, щільність, точність і джерело даних.

2.2. Досвід картографування територій

У сучасній картографії спостерігається помітний перехід від класичних методів збирання інформації до використання високотехнологічних способів збору даних. До таких сучасних технологій належать космознімки, аерозйомка, безпілотні літальні апарати (БПЛА), LiDAR, наземне лазерне сканування та тахеометрична зйомка. У рамках цієї роботи основна увага приділяється застосуванню LiDAR для картографування територій.

LiDAR-технологія (Light Detection and Ranging) дозволяє отримувати високоточні хмари точок, які містять координати X, Y, Z та інтенсивність відбиття лазерного променя. Це дає змогу створювати детальні цифрові моделі рельєфу та місцевості, що недосяжно для традиційних аерофотознімків.

Досвід застосування LiDAR в Україні

В Україні LiDAR активно інтегрується у державні та наукові проєкти. За даними звітів ICACI “Cartographic Activities in Ukraine 2019–2023” [33]:

- Впроваджуються цифрові топографічні карти та ЦМР, інтегровані у національні ГІС.
- Проводиться цифровізація регіональних картографічних матеріалів для порівняльного аналізу змін ландшафту та урбанізації.
- Використовуються алгоритми обробки хмар точок, включаючи автоматизовані макроси та скрипти для класифікації будівель, рослинності та рельєфу.

Це дозволяє не тільки відстежувати зміни територій у часі, але й інтегрувати картографічні дані у планування розвитку міст, інженерних мереж та природоохоронних програм.

Таблиця 2.1

Сфера застосування	Світова практика	Українська практика
3D-моделі будівель	Висока точність, автоматизована класифікація	Створення ЦМР і цифрових карт міст
Лісовий моніторинг	Оцінка щільності, висоти дерев, біомаси	Контроль лісового покриву, інвентаризація
Транспортна інфраструктура	Моделювання тунелів, мостів, трас	Планування доріг та інженерних об'єктів
Класифікація об'єктів	Supervised/unsupervised, машинне навчання	Макроси MicroStation, автоматизоване виділення об'єктів

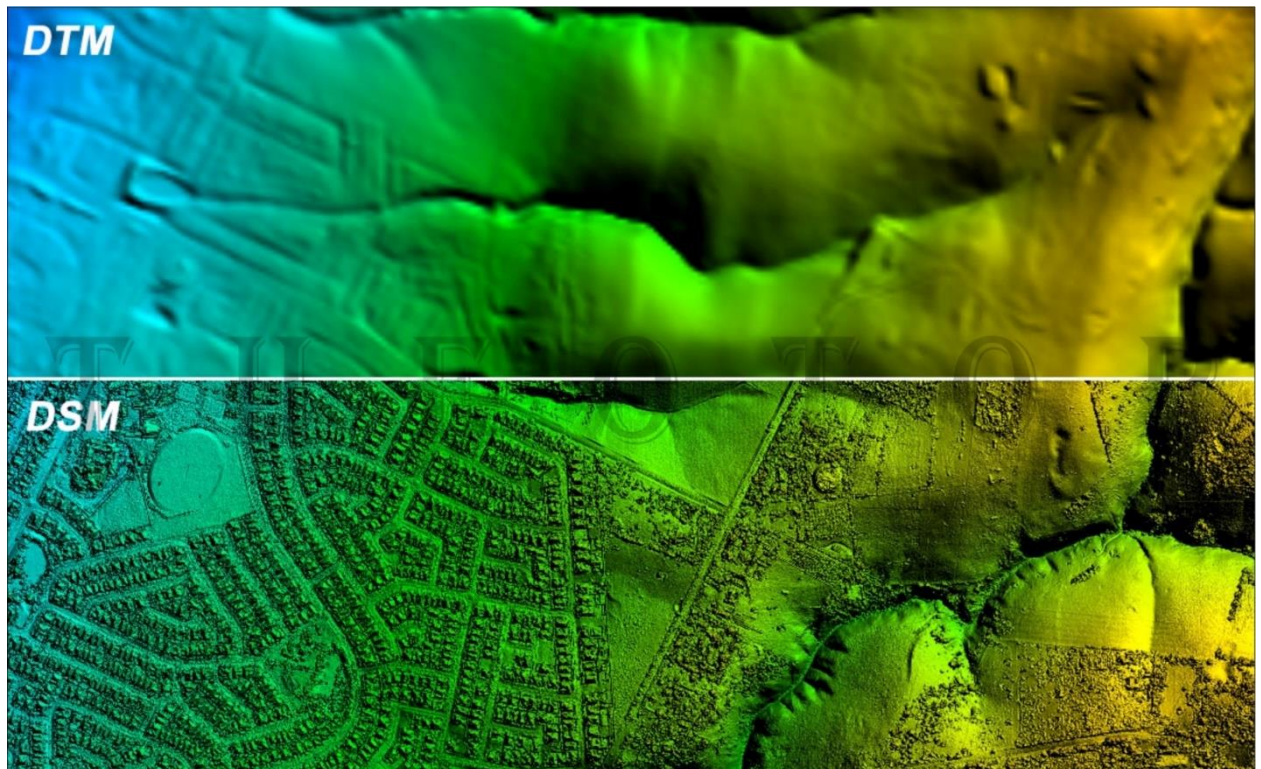


Рис. 2.1 Цифрова модель рельєфу та місцевості [34].

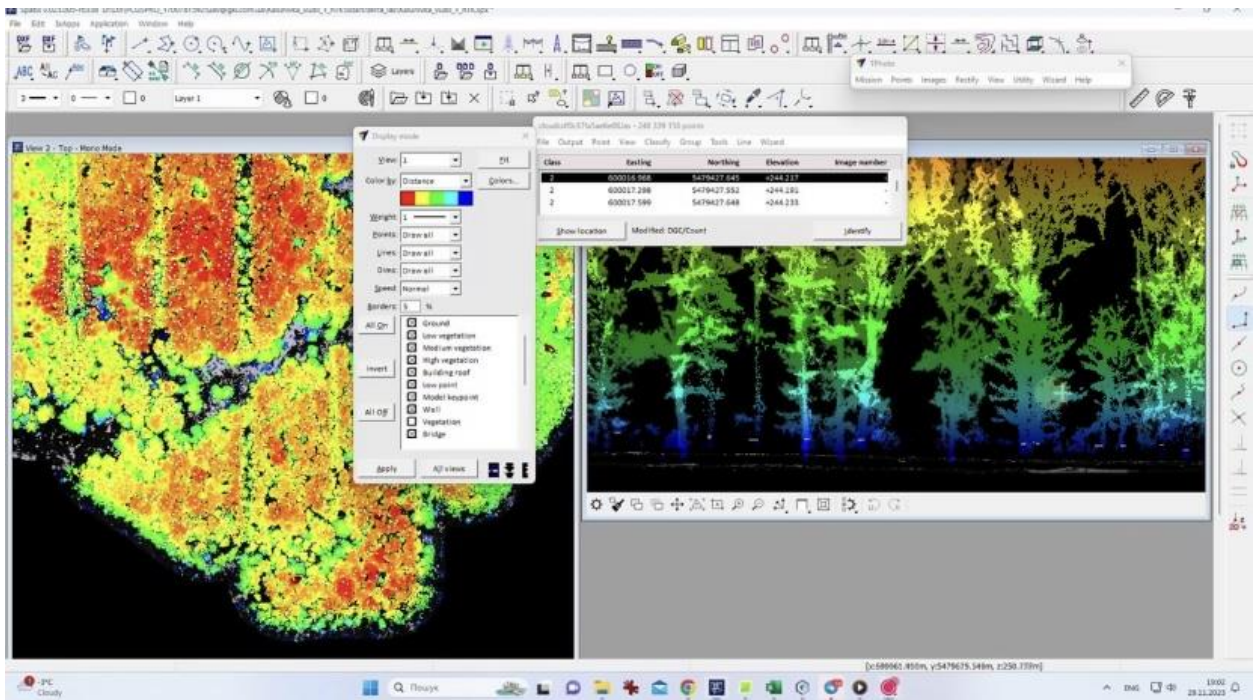


Рис. 2.2 визначення запасу деревини за допомогою лазерного сканування LIDAR [35].



Рис. 2.3 Планування доріг та інженерних об'єктів [36].

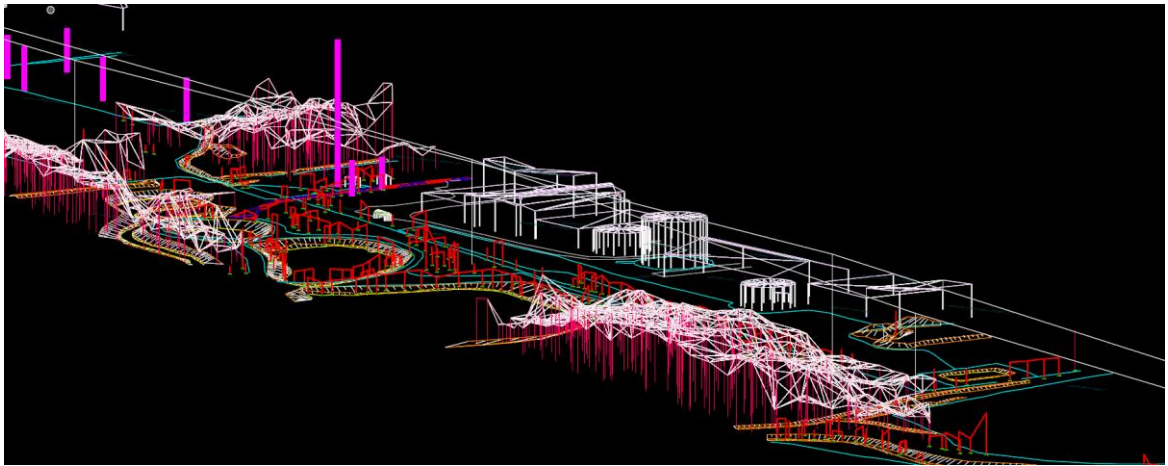


Рис. 2.4 Цифрова топографічна карта [36].

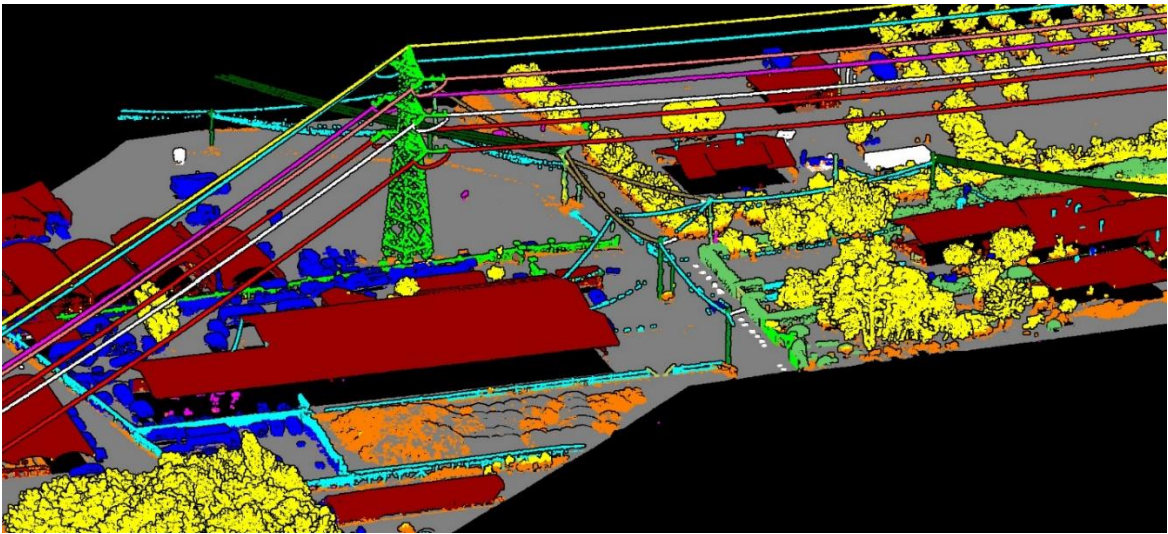


Рис. 2.5 Детальна класифікація об'єктів [36].

LiDAR застосовується у світі та в Україні, демонструючи відмінності у підходах. У світовій практиці технологія використовується для створення точних 3D-моделей будівель, моніторингу лісів, моделювання транспортної інфраструктури, аналізу змін території та класифікації об'єктів за допомогою машинного навчання. В Україні LiDAR застосовують головним чином для створення цифрових моделей рельєфу та карт міст, контролю лісового покриву, планування доріг і інженерних об'єктів, а також автоматизованого виділення об'єктів за допомогою макросів і MicroStation. Отже, українська практика фокусується на інтеграції даних у національні ГІС та управлінні територіями [37].

Основні відмінності між традиційним картографуванням і LiDAR

Таблиця 2.2

Параметр	Традиційні методи	LiDAR	Пояснення / Переваги
Тривалість роботи	За даними Rock Robotic: 5–7 днів для 100 акрів (≈ 40 га) [38]	Rock Robotic дає: для LiDAR-дрона — 3–4 години на місці (установки + політ) для 100 акрів. [38]	LiDAR значно скорочує час: замість багатьох днів польових робіт — лише кілька годин
Точність позиційна	Горизонтальна: $\pm 1-2$ см вертикальна: $\pm 1-2$ см [39, 40]	Горизонтальна: $\sim 1,7$ см вертикальна: $\sim 6,6$ см [39, 40]	Традиційні методи точніші для окремих точок, але LiDAR забезпечує щільну хмару даних по всій території
Обробка даних	Ручна: введення точок, креслення контурів, підрахунок висот	Автоматизована: хмара точок, фільтрація шумів, класифікація об'єктів	LiDAR ефективніший: скорочує людську працю та прискорює обробку
Візуалізація і моделювання	2D-топоплани, профілі	3D-моделі рельєфу, цифрові карти, інтеграція в ГІС	LiDAR кращий для тривимірного моделювання і цифрового аналізу
Виділення об'єктів	Ручне визначення будівель, доріг, рослинності	Автоматичне: класифікація хмари точок (грунт, рослинність, будівлі)	LiDAR дозволяє швидко і автоматично виділяти об'єкти
Оновлення даних	Потрібна повторна польова зйомка	LiDAR-зйомку можна повторювати легко, швидко оновлювати карти	LiDAR зручніший для регулярного моніторингу змін
Вартість	Висока через тривалість польових робіт	Початкові витрати на обладнання, але економія на великих площах і повторних зйомках	LiDAR економічніший для великих площ і частих оновлень; традиційні методи дешевші на маленьких ділянках

Точність традиційних методів становить горизонтально $\pm 1-2$ см, вертикально $\pm 1-2$ см. Вона досягається завдяки прямим вимірам із використанням тотальної станції або GPS-ровера, що забезпечує високу точність у окремих точково вимірюваних об'єктах. Проте така методика непрактична для великих територій через тривалість польових робіт та необхідність встановлення маркерів, а також може залежати від людського фактору, який впливає на точність через можливі зсуви або помилки при ручному кресленні.

Точність LiDAR, яку забезпечують дрони, становить горизонтально близько 1,7 см і вертикально приблизно 6,6 см. Вона забезпечується щільною хмарою точок, автоматизованим скануванням та використанням GPS/IMU на борту дрона, що дозволяє однорідно охоплювати всю територію, включно з важкодоступними ділянками та простором під кроною дерев. LiDAR дозволяє швидко будувати цифрові моделі рельєфу та картографічні дані з автоматичним виділенням об'єктів. Основним обмеженням є те, що вертикальна точність трохи гірша, ніж у традиційних методів для окремих точок, вона може залежати від калібрування обладнання та погодних умов. [41].

2.3. Огляд методів обробки лідарних даних

Обробка LiDAR-даних є ключовим етапом у цифровому картографуванні, оскільки саме вона перетворює первинну хмару точок у повноцінні цифрові моделі рельєфу, цифрові моделі поверхні, тривимірні моделі будівель та інші тривимірні просторові моделі, які відтворюють реальні об'єкти та території у трьох вимірах і можуть використовуватися для аналізу, планування, моніторингу та інтеграції у геоінформаційні системи. LiDAR-сканування генерує мільйони або навіть мільярди точок, що описують геометрію території, тому процес їхньої обробки потребує високого рівня автоматизації, точності та оптимізації обчислень. [42-44].

Нижче наведено основні процеси алгоритмічної обробки LiDAR-даних, що реалізуються у програмних комплексах MicroStation + TerraScan, ArcGIS, CloudCompare, Global Mapper, Pix4D, тощо.

Процес: Імпорт та фільтрація даних.

Основні дії: Завантаження початкових LAS/LAZ-файлів із урахуванням правильної системи координат (WGS84, UTM, локальні системи), перевірка геоприв'язки та орієнтації хмари точок, первинна очистка від шумів і артефактів, таких як атмосферні перешкоди, пил, дим, птахи, транспортні засоби, тимчасові об'єкти. Видалення аномальних точок ("викидів") за висотою, інтенсивністю або щільністю. Застосування фільтрів щільності та висоти для забезпечення рівномірності хмари та підготовки її до подальшого аналізу. Контроль якості даних перед наступними етапами.

Результат: Очищена і перевірена хмара точок, придатна для геометричного, просторового та аналітичного оброблення, без шумових і аномальних даних.

Процес: Реєстрація хмар точок.

Основні дії: Визначення та розмітка контрольних точок (GCP) на місцевості або на основі GPS/IMU даних, попереднє вирівнювання хмар, щоб підготувати їх до точного зшивання. Застосування алгоритмів вирівнювання, таких як ICP (Iterative Closest Point) для геометричного наближення хмар, Feature-based registration для вирівнювання за ключовими ознаками (будівлі, дороги, рельєф), Bundle adjustment для виправлення похибок GPS/IMU та оптимізації позицій сенсорів. Перевірка точності та суміщення результатів, корекція за потреби.

Результат: Одна узгоджена хмара точок у глобальній системі координат, без розривів і з правильним суміщенням між зйомками з різних позицій або польотів.

Процес: Класифікація хмари точок.

Основні дії: Присвоєння кожній точці класу об'єкта, наприклад ґрунт, вода, рослинність, будівлі, штучні об'єкти. Використання алгоритмів PTD (Progressive TIN Densification) для виділення землі через побудову TIN, CSF (Cloth Simulation Filtering) для пошуку рельєфу шляхом моделювання “натягу тканини”, а також методів глибокого навчання (PointNet, KPConv, PointCNN) для розпізнавання об'єктів за просторовими та спектральними ознаками. Контроль та ручна корекція класів у складних ділянках, наприклад там, де дерева перекривають будівлі або вода накладається на ґрунт.

Результат: Структурована хмара точок із присвоєними кодами класів, наприклад 2 — земля, 6 — будівлі, 5 — дерева, 9 — вода, готова для побудови цифрових моделей та аналізу.

Процес: Створення цифрових моделей місцевості (DEM, DTM, DSM).

Основні дії: Інтерполяція висот на основі класифікованих точок для побудови регулярної сітки із кроком 0.25–1 м, створення TIN-моделі (трикутничової мережі) для точного відтворення рельєфу та поверхонь, генерація ізоліній та 3D-поверхні. Виконання перевірки точності моделей шляхом порівняння з контрольними точками або польовими вимірами. Створення DEM (Digital Elevation Model) для рельєфу, DTM (Digital Terrain Model) без об'єктів, DSM (Digital Surface Model) з урахуванням будівель, дерев та інших елементів.

Результат: Цифрові моделі місцевості та поверхонь, придатні для ГІС-аналізу, планування, проектування, моделювання водозборів, оцінки ризиків ерозії та інших інженерних задач.

Процес: Векторизація та експорт.

Основні дії: Автоматичне визначення контурів будівель, доріг, зелених зон, генерація ліній рельєфу та особливих точок, таких як вершини або опори. Експорт результатів у формати DXF, SHP, DGN, GDB для використання у ГІС та САД-системах. Перевірка топології та суміщення з іншими шарами даних,

виправлення помилок, контроль правильності зв'язків та неприривності ліній. Підготовка векторних шарів для аналітики, проектування, кадастрових і інженерних задач.

Результат: Готові високоточні векторні шари, які можна інтегрувати у ГІС-проекти, САД-системи, виконувати аналіз території та планування інфраструктури [45, 46].

Висновки до розділу 2

LiDAR-технологія дозволяє отримувати високоточні цифрові моделі рельєфу, місцевості та 3D-моделі об'єктів, що значно підвищує якість картографічних продуктів порівняно з традиційними методами. У світі LiDAR активно використовують для моніторингу лісів, аналізу транспортної інфраструктури та змін ландшафтів, тоді як в Україні його застосування зосереджене на створенні цифрових карт міст, контролі лісового покриву та автоматизованій класифікації об'єктів.

Обробка LiDAR-даних потребує спеціального програмного забезпечення, потужного обладнання та високої кваліфікації персоналу, а відсутність державних стандартів ускладнює масове впровадження. Водночас технологія забезпечує швидкий збір великих обсягів даних, автоматизацію обробки та інтеграцію результатів у ГІС, а подальший розвиток включає використання штучного інтелекту, оптимізацію алгоритмів та стандартизацію процесів.

РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ

РОЗДІЛ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ

3.1. Розроблення методики картографування територій на основі лідарних даних

Методика створення топографічного плану масштабу М1:500 передбачає обробку хмари точок, отриманої за допомогою лідарних систем (LiDAR) на борту літальних платформ або безпілотних літальних апаратів (БПЛА), та формування цифрових моделей рельєфу і об'єктів місцевості у середовищі MicroStation з використанням TerraScan.

Основна мета — отримати точний топографічний план, який відображає рельєф, забудову, зелені насадження та інші елементи місцевості.

1. Підготовка та імпорт даних

Збір даних: LiDAR-зйомка проводиться за допомогою літальних платформ або БПЛА, результати експортуються у формат LAS/LAZ.

Імпорт у TerraScan/MicroStation

Параметри імпорту включають:

- вибір координатної системи;
- фільтрацію попередніх некоректних даних;
- попередній перегляд щільності та розподілу точок.

Результат: структурована хмара точок, готова до очищення та класифікації.

2. Попередня фільтрація шумів

Перед побудовою топографічного плану необхідно видалити некоректні дані, що не відображають реальні об'єкти.

Методи фільтрації:

- Висота: відсіювання точок, що знаходяться поза діапазоном очікуваної висоти рельєфу та об'єктів.
- Інтенсивність відбиття: відкидаються точки з аномально низькою або високою інтенсивністю сигналу.
- Щільність: ізоляція точок, які не мають сусідів у заданому радіусі.

Результат: чиста та однорідна хмара точок, готова до класифікації.

1. Класифікація об'єктів

Для топографічного плану важливо розподілити точки за класами:

Таблиця 3.1

Клас	Метод виділення
Ґрунт	Відбір нижніх точок хмари; застосування алгоритмів побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР); врахування локальних нахилів та рельєфних форм для точного визначення поверхні.
Будівлі	Висотна фільтрація для виділення піднятих структур; аналіз форми даху та контуру будівлі; побудова 3D-моделі даху для точного топоплану.
Рослинність	Аналіз висоти та щільності точок для виділення дерев та кущів; застосування класифікації за типом рослинності (ліс, паркова зона, поодинокі дерева); врахування розподілу точок у 3D-просторі для визначення крони.
Водні об'єкти	Виявлення зон із низьким відбиттям лазерного сигналу та відносно плоским рельєфом; контроль відображення для точного контуру водойм; інтеграція з ЦМР для розмежування берегової лінії.
Інженерні споруди (мости, опори, трубопроводи)	Виявлення об'єктів за формою, висотою та топологічними ознаками; застосування САД-топології для уточнення контурів; побудова окремих 3D-моделей споруд для інтеграції в топоплан.
Лінії електропередач	Висотна та просторово-геометрична фільтрація для виділення проводів та опор; аналіз послідовності точок уздовж траєкторії ЛЕП; інтеграція з іншими об'єктами топоплану для коректного відображення мереж.
Тимчасові об'єкти (автомобілі, контейнери, будівельні конструкції)	Висота та щільність точок для виявлення нетривалих об'єктів; класифікація як "тимчасові" та видалення з фінального топоплану; застосування алгоритмів детекції аномалій у хмарі точок.

Інструменти:

- TerraScan: автоматичні алгоритми класифікації.
- MicroStation макроси: автоматичне присвоєння класів для великого обсягу даних.

Результат: хмара точок структурована за класами для подальшої побудови моделей.

4. Побудова цифрових моделей

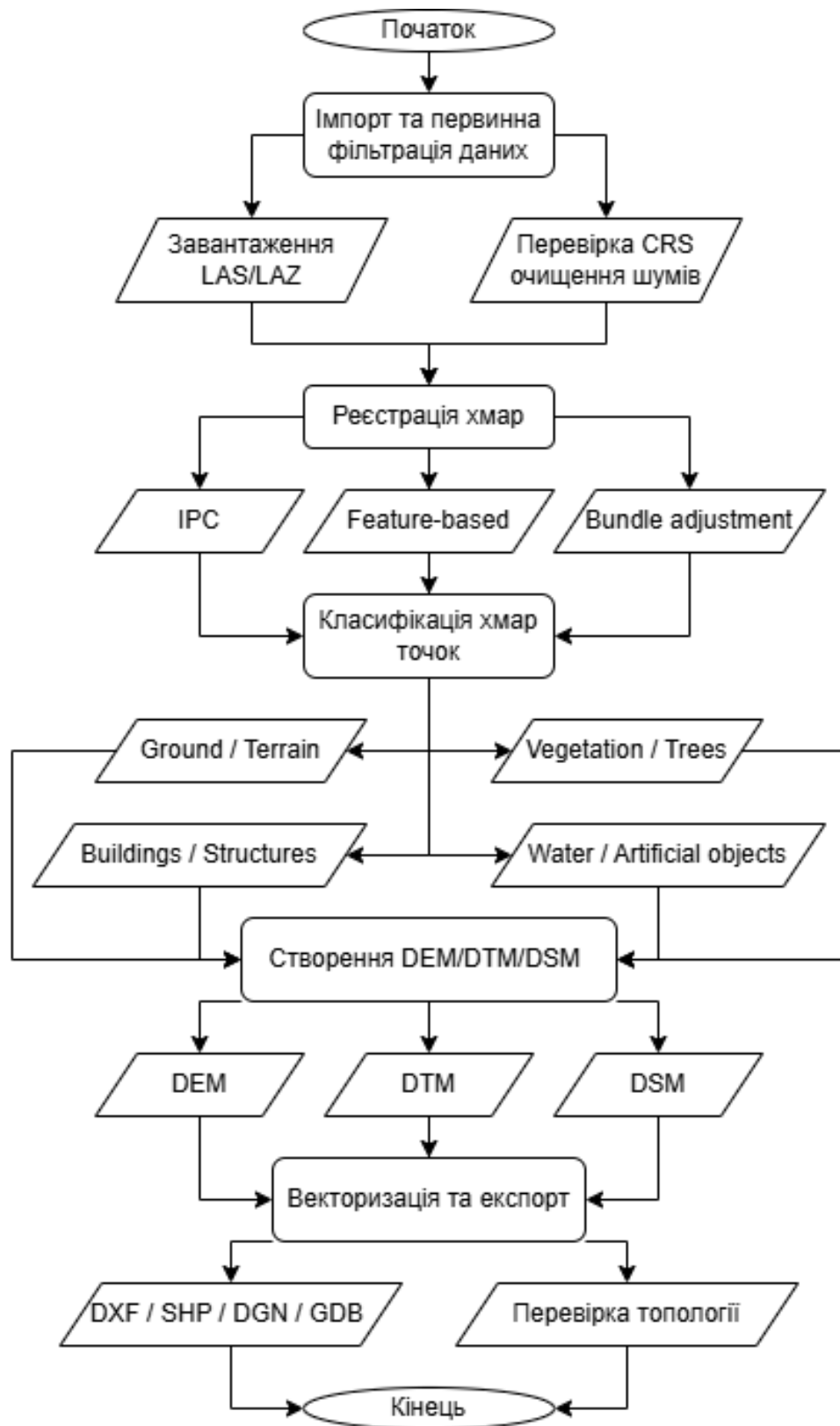
- Цифрова модель рельєфу:
 - Використання точок ґрунту для створення TIN;
 - Сгладжування нерівностей та видалення залишкових шумів.
- Цифрова модель місцевості:
 - Інтеграція даних про будівлі, рослинність, водні об'єкти;
 - Побудова 3D-моделі для візуалізації рельєфу та забудови.

Результат: топографічна основа масштабу М1:500, що включає точний рельєф, будівлі та елементи природного середовища.

5. Формування топографічного плану М1:500

- Проекція ЦМР та ЦММ на площину плану;
- Виділення горизонталей (ізоліній) із кроком, що відповідає масштабу М1:500 (зазвичай 0.5–1 м);
- Нанесення об'єктів (будівлі, дороги, дерева, водні об'єкти) відповідно до їхніх класів;
- Вивірка точності — перевірка відповідності місцевості, корекція артефактів.

Результат: готовий топографічний план масштабу М1:500, який можна використовувати для проектування, геодезичних робіт та планування території [47].



3.2. Удосконалення існуючих методів автоматизованої обробки лідарних даних

Макроси (Macros) у TerraScan / MicroStation являють собою автоматизовані сценарії, які дозволяють об'єднати численні інструменти

обробки хмар точок у єдиний процес, що виконується без необхідності ручного контролю на кожному етапі. Основною метою макросів є значне прискорення обробки LiDAR-даних, підвищення точності класифікації об'єктів та стандартизація робочого процесу, що особливо важливо при обробці великих масивів даних. Макроси забезпечують можливість пакетної обробки файлів LAS/LAZ, автоматичного підвантаження даних із збереженням структури та метаданих, а також дозволяють повторювати складні операції у будь-якій послідовності, заданій користувачем.

Ключовою функцією макросів є попередня фільтрація хмари точок, яка включає автоматичне видалення некоректних або ізольованих точок, що виникають через артефакти сенсорів, відблиски сонця, рух тварин або транспортних засобів. Фільтрація виконується за критеріями висоти, інтенсивності відбиття та щільності точок, що значно підвищує однорідність хмари та полегшує подальшу класифікацію. Макроси автоматично визначають ключові класи об'єктів, такі як ґрунт, будівлі, рослинність, водні об'єкти та лінійні структури, застосовуючи як стандартні алгоритми TerraScan (Progressive TIN Densification, CSF — Cloth Simulation Filtering), так і спеціалізовані методи виділення об'єктів за висотою, щільністю або просторовими характеристиками. Для будівель макроси формують трикутну сітку поверхні на основі точок ґрунту, враховують контури дахів та висотні відмінності, для рослинності використовуються алгоритми, що дозволяють диференціювати низьку рослинність, кущі, середні та високі дерева, а водні об'єкти виділяються за низьким відбиттям лазерного сигналу та плоским рельєфом. Лінійні структури, наприклад лінії електропередач, ідентифікуються за прямолінійністю та специфічними висотними профілями.

Макроси дозволяють створювати цифрові моделі поверхні (TIN, DEM, DTM, DSM) та векторні контури об'єктів безпосередньо у середовищі TerraScan / MicroStation. Вони автоматично формують полігони будівель, лінійні об'єкти, контури доріг та інші елементи рельєфу, які можна інтегрувати в 3D-сцену або подальший ГІС-аналіз. Макроси також

забезпечують повторюваність процесів: однаково налаштовані сценарії можна застосовувати до різних ділянок та проєктів, що підвищує ефективність та стандартизацію обробки.

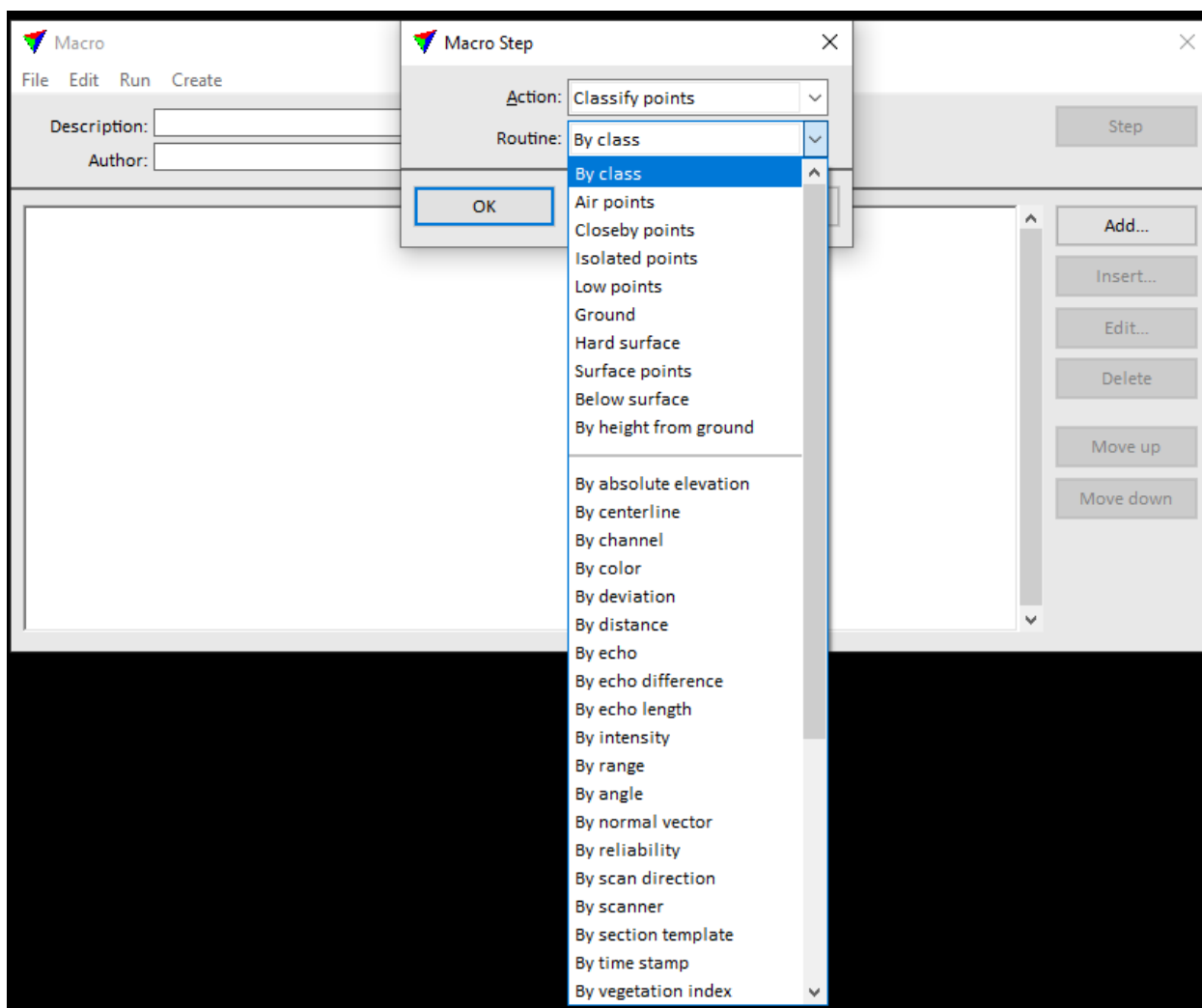


Рис. 3.1 Вікно Macro з модулями та інструментами.

Інструменти, що входять у макроси, включають команди для автоматичної фільтрації шумів, класифікації точок за класами, виділення будівель та дахів, формування моделей рельєфу, розпізнавання дерев і кущів, генерації контурів будівель, доріг та інших об'єктів. Модулі макросу об'єднують ці інструменти у логічні блоки, наприклад модуль попередньої обробки, модуль класифікації ґрунту, модуль виділення будівель та модуль створення цифрових моделей. Кожен інструмент у макросі має параметри, які можна налаштовувати під конкретні дані, наприклад порогові значення висоти, щільності, площі або інтенсивності, що дозволяє коректно обробляти хмари точок різної якості та конфігурації.

Використання макросів значно полегшує роботу операторів, дозволяючи виконувати великі обсяги завдань швидше та з меншою кількістю помилок. Макроси можна застосовувати як у повністю автоматичному режимі, так і у напівавтоматичному, поєднуючи з ручними інструментами TerraScan для корекції окремих об'єктів або складних ділянок. Крім того, макроси дозволяють навчати користувачів створювати власні сценарії, що підвищує ефективність командної роботи та економить час на повторювані операції. Завдяки використанню макросів можна одночасно обробляти великі масиви даних, відновлювати класи ґрунту, будівель та рослинності, автоматично формувати цифрові моделі та інтегрувати результати в 3D-сцену для подальшого аналізу та візуалізації. Макроси забезпечують високу ефективність обробки, стандартизовані результати та можливість масштабування робіт на великі території.

Впровадження макросів обов'язково прискорює ключові етапи обробки LiDAR-даних. Завдяки можливості пакетної обробки великої кількості файлів скоротився час імпорту даних із декількох годин до 1–1,5 години на квадратний кілометр. Повністю автоматизована попередня фільтрація шумів дозволила зменшити кількість некоректних точок із 1200 до 150 на км², що значно підвищило якість хмари точок. Автоматизація класифікації об'єктів забезпечила підвищення точності виділення будівель з 55% до 70%, а рослинності — з 70% до 89%, завдяки врахуванню висотних та просторових характеристик хмари точок.

Створення цифрових моделей рельєфу та об'єктів стало швидким та інтегрується у MicroStation, що забезпечує зручну візуалізацію території у 3D-просторі, а також подальший аналіз і планування інженерних мереж.

Таблиця 3.2

Параметр	До вдосконалення	Після вдосконалення	Коментар

Швидкість обробки	~5 год/квадратний км	~2-2.5 год/квадратний км	Пакетна обробка і макроси
Точність класифікації будівель	55%	70%	Краще виділення дахів і контурів
Точність класифікації рослинності	70%	89%	Розподіл по висоті і щільності точок
Кількість некоректних точок	1200 на км ²	150 на км ²	Покращена фільтрація шумів
Автоматизація процесу	часткова	повна	Всі ключові етапи керуються макросами

3.3. Розроблення засобів автоматизованої класифікації

У межах магістерської роботи було здійснено розробку та впровадження макросів для автоматизованої класифікації об'єктів на території дослідження з використанням програмного комплексу MicroStation + TerraScan. Основна мета полягала у прискоренні обробки хмар точок, підвищенні точності виділення ключових класів об'єктів — будівель і рослинності, а також у забезпеченні автоматичного формування цифрових моделей рельєфу та забудови для подальшого аналізу та візуалізації.

Процес розробки макросів включав кілька основних етапів:

1. Попередня обробка хмари точок

На початковому етапі макроси автоматично імпортують дані LAS/LAZ, усувають шуми та некоректні точки (ізольовані точки в повітрі, артефакти сенсорів). Використовується автоматична фільтрація за висотою, інтенсивністю відбиття та відстанню до сусідніх точок. Це дозволяє отримати однорідну хмару точок, підготовлену для подальшої класифікації, а також забезпечує стабільність алгоритмів на наступних етапах.

2. Класифікація ґрунту

Макрос автоматично виділяє точки ґрунту, застосовуючи алгоритм Progressive TIN Densification, який формує трикутну сітку поверхні на основі нижніх точок хмари. Це дозволяє створити базову цифрову модель рельєфу (ЦМР), яка слугує основою для подальшої інтеграції інших класів об'єктів. Додатково на цьому етапі контролюється однорідність висотних значень та виключаються аномальні точки, які можуть вплинути на точність моделей.

3. Класифікація будівель

Макрос для будівель поєднує висотну фільтрацію та алгоритми виділення контурів дахів. Будівлі автоматично ідентифікуються за планарністю поверхні, геометричними розмірами та відмінностями у висоті від ґрунту. Результати класифікації формують 2D-полігони контурів, які одночасно інтегруються у 3D-моделі будівель у MicroStation, забезпечуючи можливість подальшої візуалізації та точного аналізу просторових взаємозв'язків.

4. Класифікація рослинності

Макрос для рослинності використовує висотні та просторові параметри точок для поділу рослинності на класи:

- до 1 м — низька рослинність і кущі,
- 1–15 м — середня деревна рослинність,
- понад 15 м — високі дерева.

Додатково алгоритм аналізує щільність точок для виділення окремих деревних кластерів, що дозволяє формувати точні цифрові моделі рослинності та оцінювати покриття території. Розподіл за висотою та щільністю забезпечує коректну інтеграцію рослинності у 3D-сцену з врахуванням просторової структури лісового покриву.

5. Пакетна обробка та автоматизація

Розроблені макроси дозволяють автоматизувати ключові етапи обробки хмар точок та зменшити ручне втручання оператора. Вони забезпечують пакетну обробку файлів LAS/LAZ, автоматичну фільтрацію шумів, класифікацію ґрунту, рослинності та будівель, а також інтеграцію результатів у 3D-моделі для подальшого просторового аналізу. Параметри кожного

інструменту в макросі налаштовуються під конкретну ділянку, що дозволяє ефективно працювати з різними типами даних і підвищує точність результатів.

Перший макрос: класифікація шумів, ґрунту та рослинності

Перший макрос включає модулі та інструменти, які виконують:

Попередню обробку хмари точок, з автоматичною фільтрацією шумів за висотою, інтенсивністю відбиття та відстанню до сусідніх точок, що дозволяє видаляти некоректні точки, ізольовані точки та артефакти сенсорів;

Класифікацію ґрунту, яка застосовує алгоритм Progressive TIN Densification для формування базової цифрової моделі рельєфу;

Класифікацію рослинності, що дозволяє диференціювати низьку рослинність, кущі, середні та високі дерева на основі висоти та щільності точок, забезпечуючи коректну інтеграцію рослинності у 3D-сцену.

Цей макрос значно полегшує роботу оператора, дозволяючи обробляти великі об'єми даних за короткий час та зменшуючи ймовірність помилок. Він підтримує пакетну обробку, що скорочує час імпорту файлів до 1–1,5 години на квадратний кілометр, а також забезпечує повторюваність і стабільність результатів.

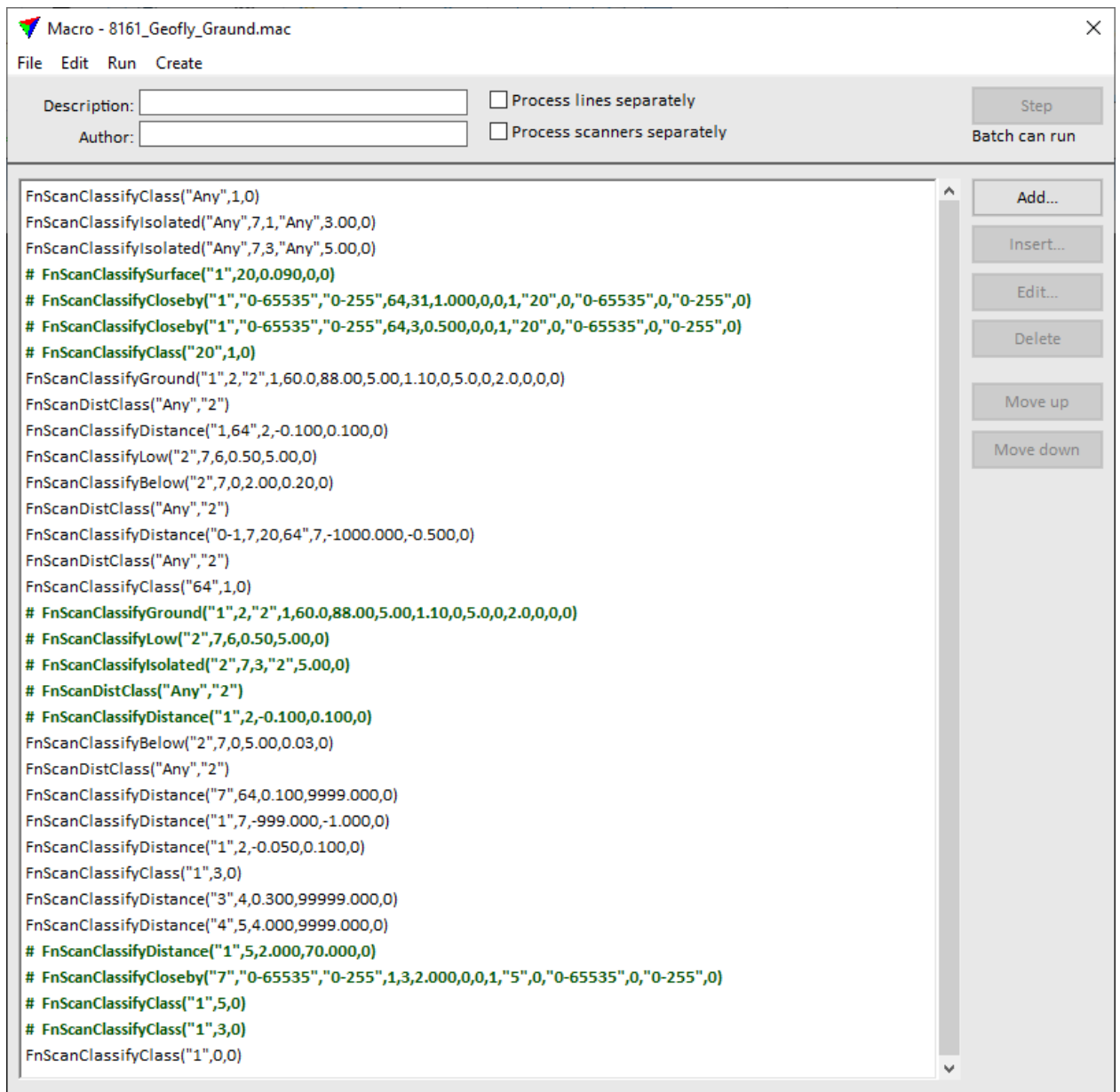


Рис. 3.2 – Вікно першого макросу з модулями та інструментами для класифікації шумів, ґрунту та рослинності.

Другий макрос: класифікація будівель з урахуванням нахилу даху

Другий макрос спеціально розроблений для автоматизованої класифікації будівель. Він використовує модулі та інструменти, що визначають:

Висотні та просторові характеристики будівель, планарність поверхні та геометричні розміри;

Нахил даху, з розподілом на два класи: від 0 до 15 градусів та понад 15 градусів, що дозволяє точніше формувати контури дахів і 3D-моделі будівель;

Автоматичне формування 2D-полігонів контурів будівель для подальшої інтеграції у MicroStation.

Цей макрос дозволяє ефективно відновлювати дані про будівлі, прискорює класифікацію та зменшує ручну обробку. Він може працювати як самостійно, так і паралельно з іншими макросами, забезпечуючи комплексний підхід до обробки об'єктів забудови.

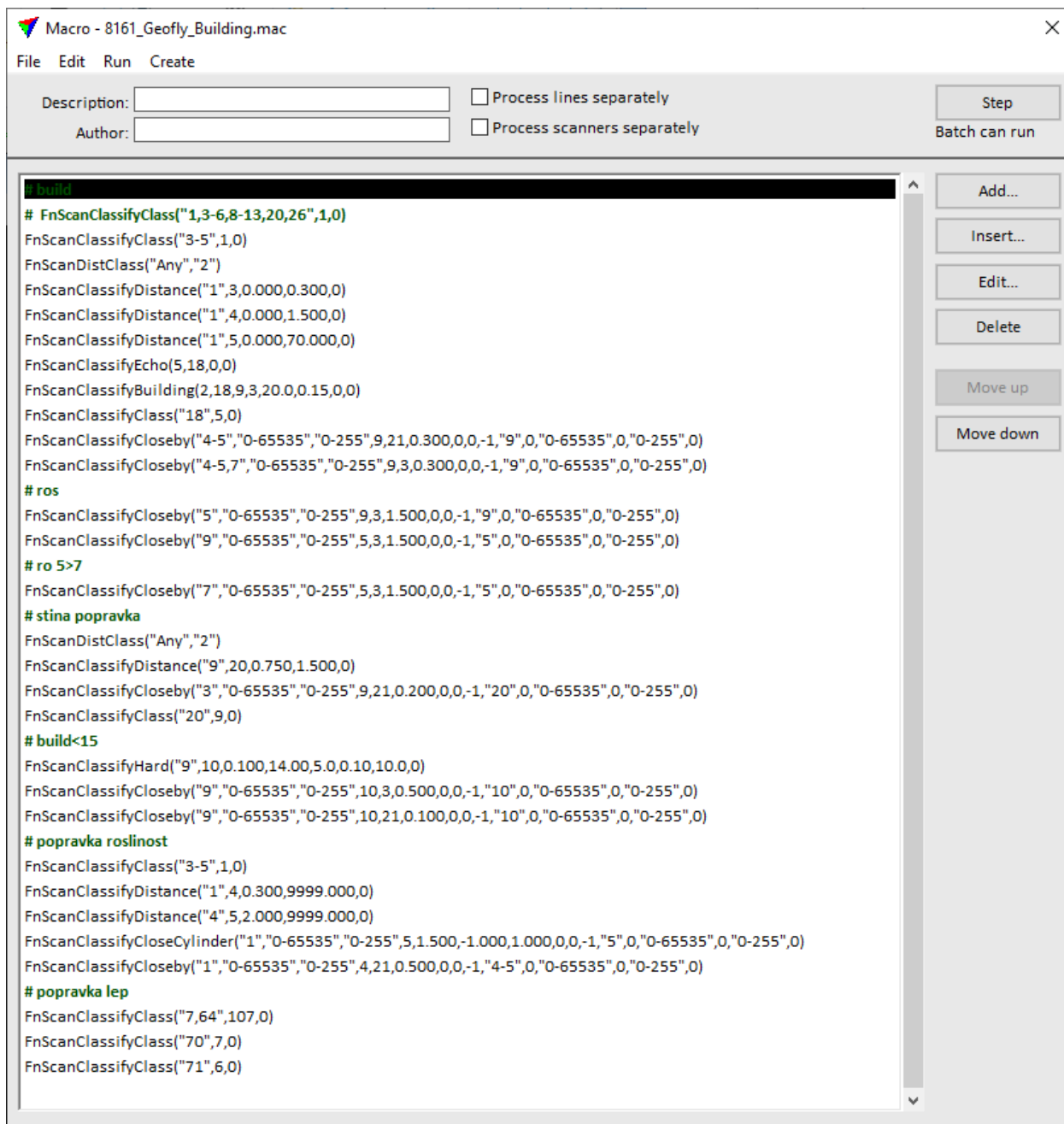


Рис. 3.3 – Вікно другого макросу з інструментами для класифікації будівель з урахуванням нахилу даху.

Розроблені макроси показали високу ефективність у практичній роботі: вони скорочують час обробки великих масивів даних, підвищують точність класифікації об'єктів і дозволяють інтегрувати результати у 3D-середовище

для подальшого просторового аналізу, візуалізації та планування інженерних мереж..

Основні засоби класифікації об'єктів у MicroStation + TerraScan

Таблиця 3.3

Засіб Інструмент /	Тип об'єкта	Призначення	Коментар Особливості /
Progressive TIN Densification	Ґрунт	Побудова очищеної цифрової моделі рельєфу	Поступове ущільнення триангуляційної сітки дозволяє виокремити точки земної поверхні
Фільтрація	Шуми	Відділення високих антропогенних об'єктів	Працює за принципом порогових значень висоти
Макроси для класифікації	Будівлі / Рослинність	Автоматизація обробки та класифікації точок	Підтримує параметризацію за висотою, густотою, площинністю
Vectorization	Будівлі	Генерація контурів споруд після класифікації	Формує полігони, що можуть бути імпортовані у САПР
Класифікація рослинності	Дерева / Чагарники	Виявлення та структуризація об'єктів рослинного покриву	Використовує аналіз інтенсивності, висоти та щільності
3D- моделювання	Рельєф / Будівлі / Рослинність	Створення візуальної цифрової сцени	Забезпечує інтерактивне представлення результатів обробки

Слід зазначити, що у межах цієї роботи не розглядаються детально всі інструменти та параметри, що входять до складу макросів. Кожен макрос містить велику кількість модулів та інструментів з численними налаштуваннями, що забезпечують автоматизовану класифікацію шумів, ґрунту, рослинності та будівель. Класи та результати роботи макросу можна фізично переглянути на основі скріншотів, проте докладний опис кожного інструменту, його параметрів і алгоритмів застосування виходить за межі

даної роботи. Основне завдання макросів — забезпечити швидку, ефективну та повторювану обробку хмар точок, полегшити роботу оператора та інтегрувати результати у цифрові моделі, що використовуються для подальшого аналізу, візуалізації та планування.

Висновки до розділу 3

У результаті проведеної роботи було детально досліджено та описано методику обробки LiDAR-даних у середовищі MicroStation + TerraScan, що застосовувалася під час виробничої практики. Основна увага приділялася засобам класифікації об'єктів, автоматизації обробки та побудові 3D-моделей рельєфу й забудови.

Впроваджені макроси та алгоритми дозволили значно спростити роботу з хмарою точок, підвищити ефективність класифікації та забезпечити формування базових цифрових моделей для подальшого аналізу та моделювання.

Таким чином, отримані результати створюють надійну основу для подальшого практичного застосування LiDAR-технологій у картографуванні територій та дають змогу більш точно і швидко виконувати завдання, пов'язані з просторовим аналізом і 3D-моделюванням об'єктів.

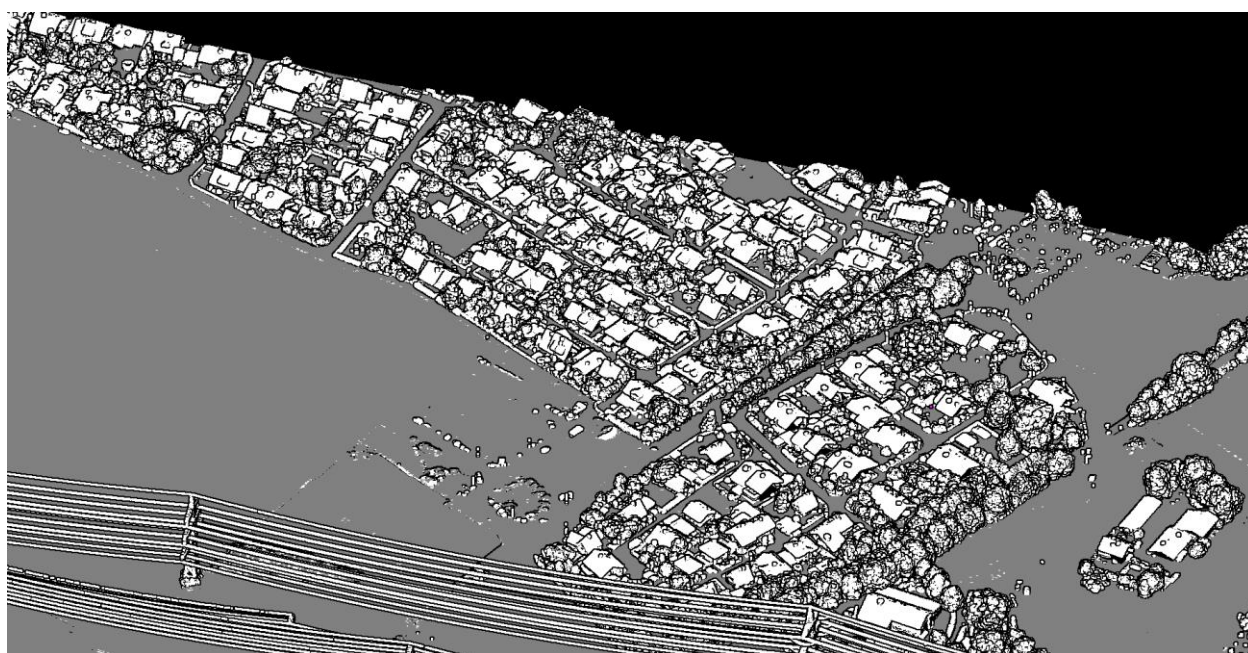
**РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ ЗАСОБІВ
АВТОМАТИЗОВАНОЇ ОБРОБКИ ЛІДАРНИХ ДАНИХ
ДЛЯ КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ**

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ОБРОБКИ ЛІДАРНИХ ДАНИХ ДЛЯ КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ

4.1. Картографування території Німеччини на основі лідарних даних

У межах магістерської роботи було проведено практичну апробацію розроблених макросів на території Німеччини із використанням лідарних даних. Основною метою цього етапу було тестування макросів на різних ділянках, автоматизована тематична класифікація хмар точок та формування цифрових моделей рельєфу і 3D-моделей забудови для подальшого аналізу та візуалізації.

Для виконання обробки спершу підготовлено хмару точок у нульовому класі, де всі точки ще не класифіковані. На цьому етапі хмара відображає початкову структуру даних без будь-якого поділу на класи об'єктів, що дозволяє оцінити вихідний стан лідарної інформації.



Малюнок 4.1 – Хмара точок у нульовому класі.

Далі застосовано розроблені макроси для тематичної класифікації. Перший макрос об'єднує інструменти для виділення шумів, ґрунту та рослинності. Після виконання макросу хмара точок отримує структуровану

тематичну форму, де різні класи об'єктів візуально відокремлені: шумові точки ізольовані та виключені, точки ґрунту виділені для подальшого створення цифрової моделі рельєфу, а рослинність поділена на низьку, середню та високу за висотними параметрами.

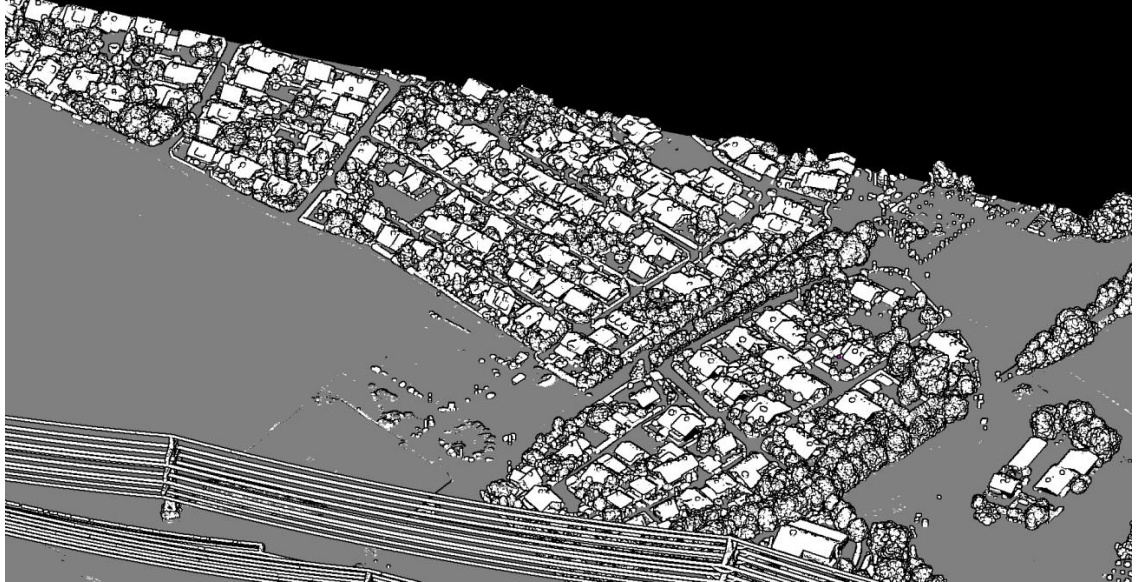


Рис. 4.2 Хмара точок після відділення шумів і ґрунту від 0 класу.

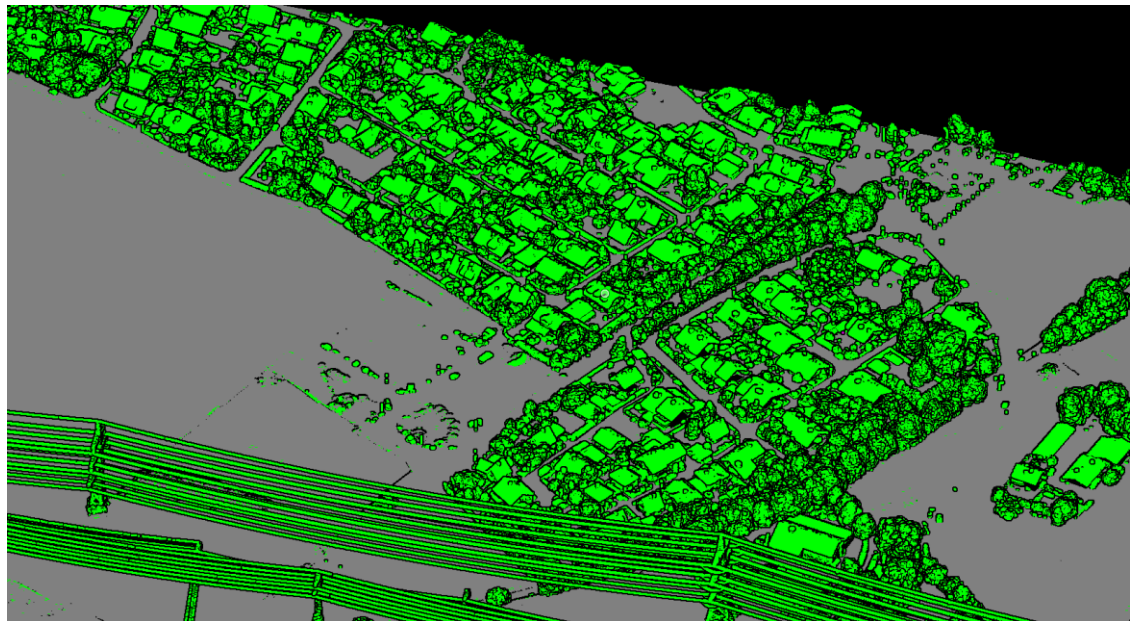


Рис. 4.3 Хмара точок після класифікації рослинності.

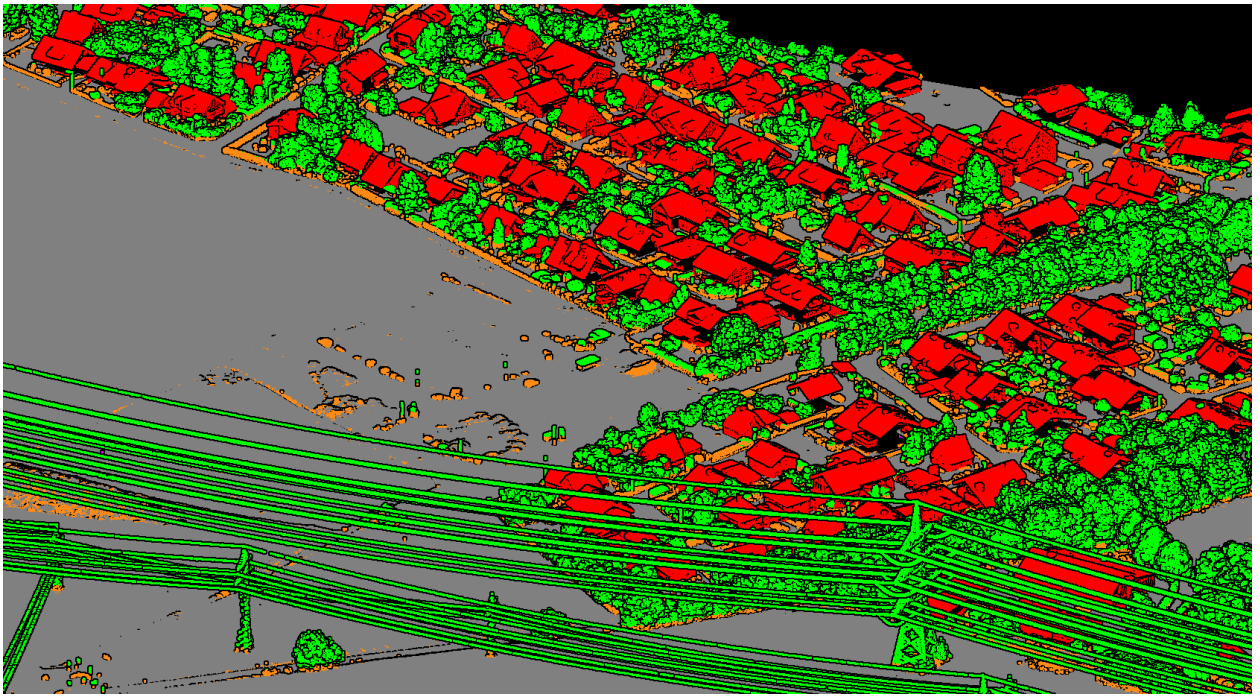


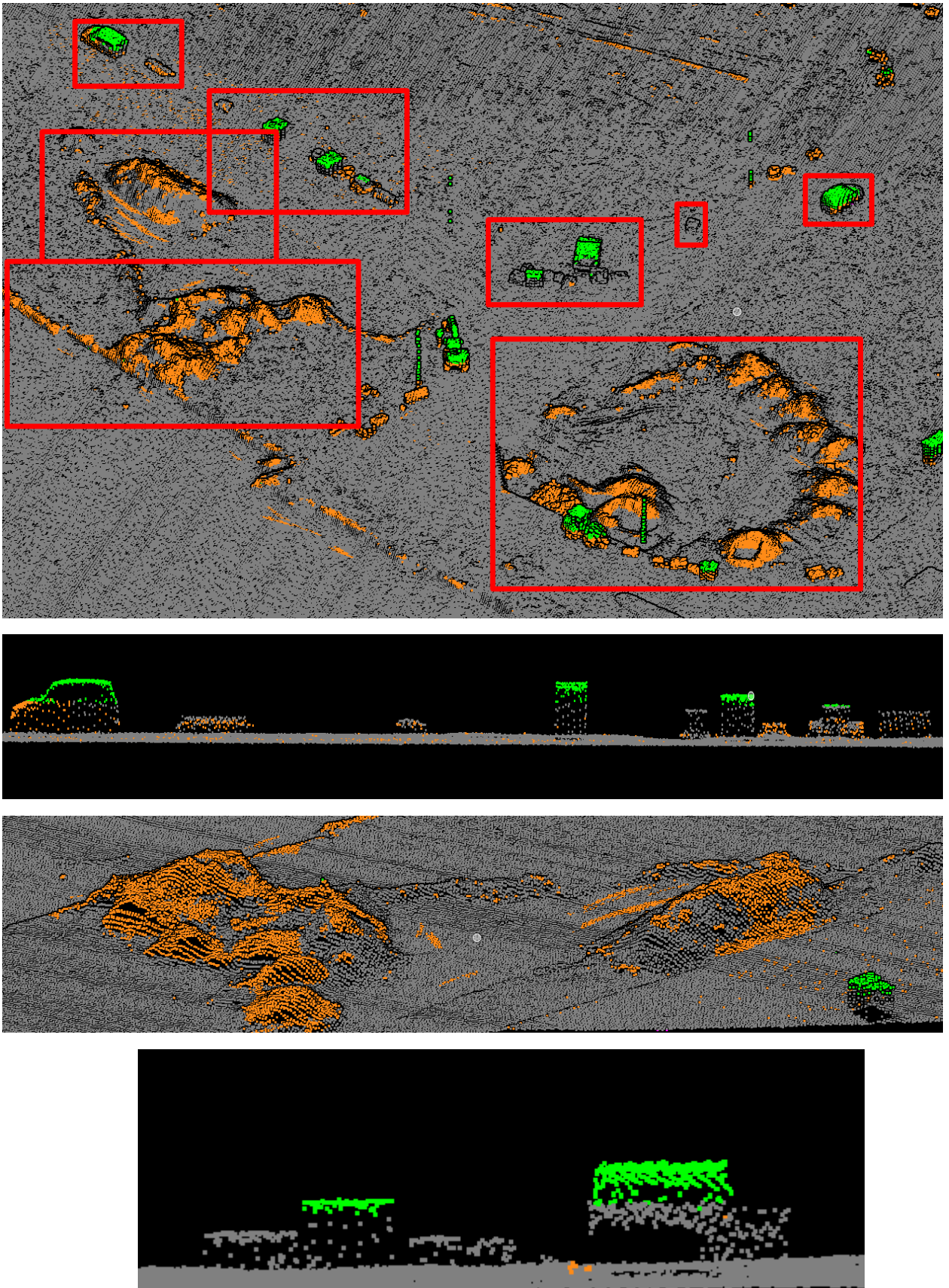
Рис. 4.4 Хмара точок після класифікації макросом.

Code	Description	Draw	Lvl	Color
0	0_	Not set	1	
1	1_uniclass	Not set	92	
2	2 GROUND	Not set	2	
3	3 LOW VEG	Not set	3	
4	4 MID VEG	Not set	4	
5	5 HIGH VEG	Not set	5	
6	6 BUILDING	Not set	6	
7	7 LOW_POINTS	Not set	7	

Рис. 4.5 Умовні позначення класів.

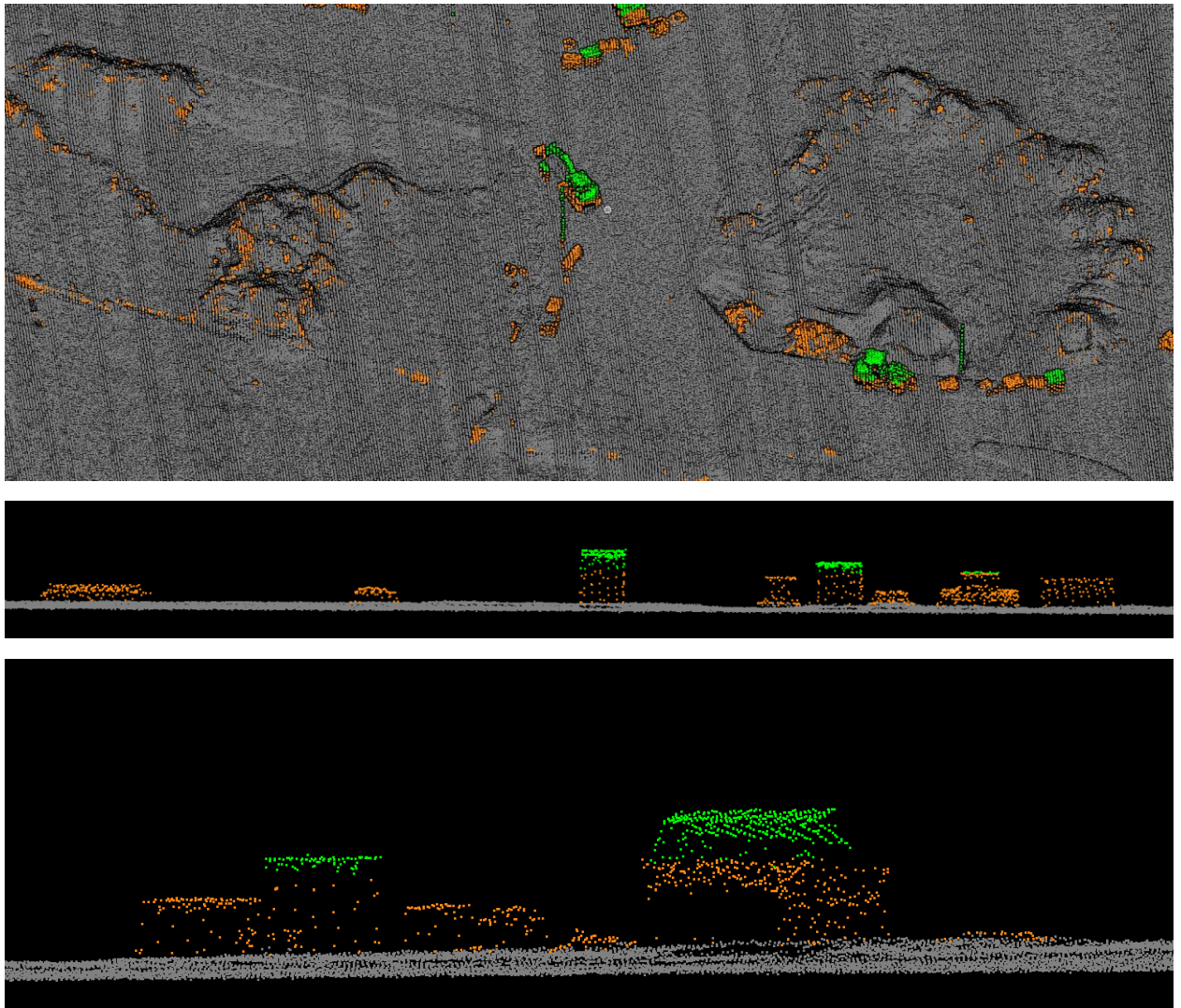
На малюнку видно гарно класифіковану забудову, яка була оброблена макросом.

Для демонстрації окремих випадків некоректної класифікації підготовлено хмару точок із помилками у виділенні ґрунту та об'єктів рослинності. Цей приклад ілюструє необхідність додаткового макросу для корекції.



Рисю. 4.6 – Хмара точок з помилковою класифікацією об'єктів та ґрунту.

Виправлення некоректно класифікованих ділянок здійснено за допомогою додаткового макросу, який був розроблений автором роботи. Макрос автоматично відновлює класи ґрунту, коректно інтегрує точки рослинності та шуму, забезпечуючи однорідність хмари та правильну тематичну структуру.



Малюнок 4.7 – Хмара точок після використання макросу на відновлення точок ґрунту.

Після тематичної класифікації проведено створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) та 3D-моделі забудови. Ці моделі формуються на основі правильно класифікованих точок ґрунту та будівель. Цифрова модель рельєфу дозволяє відтворювати рельєфну структуру території, а 3D-модель забудови відображає просторову структуру будівель з урахуванням контурів та висот.

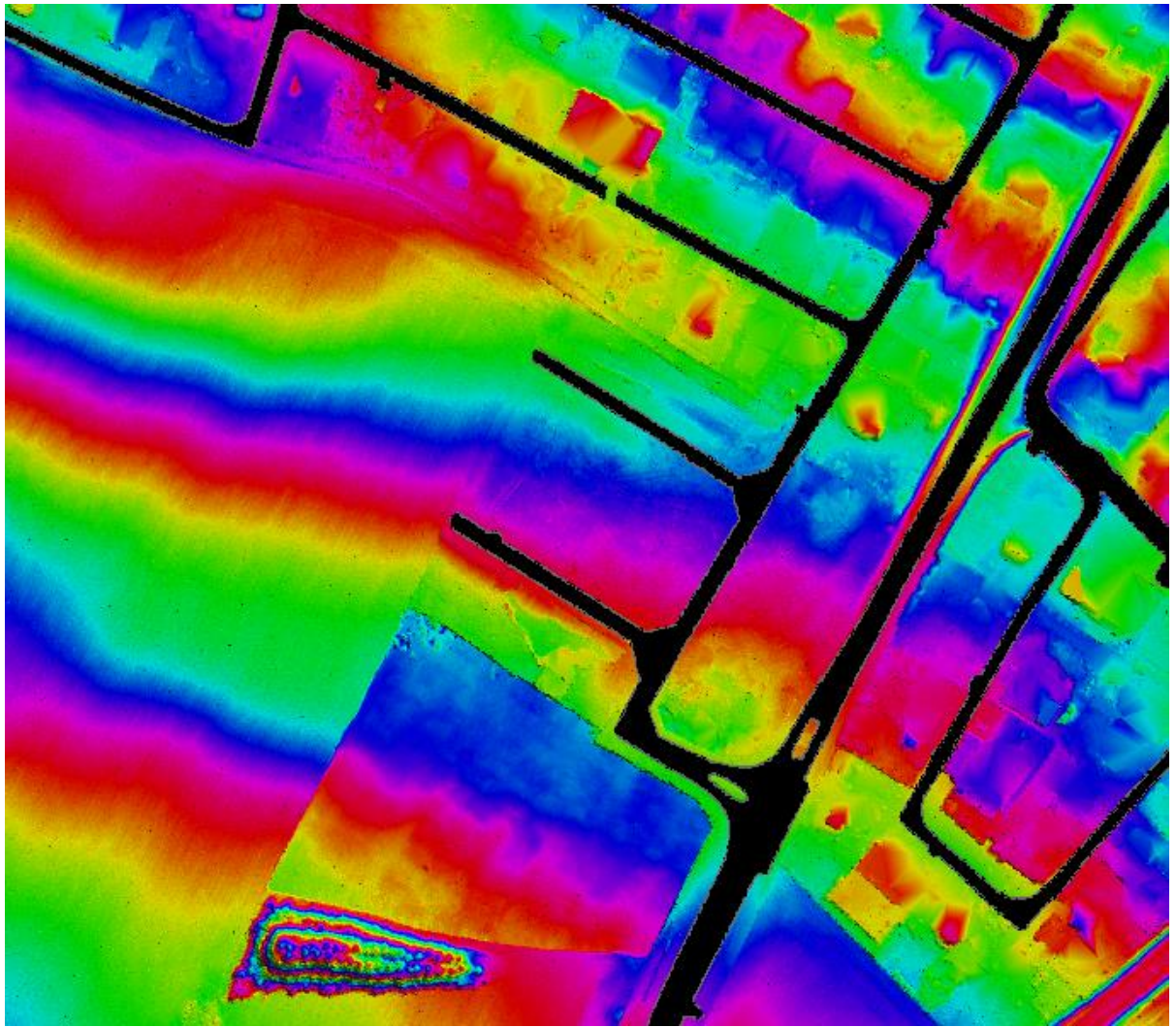


Рис. 4.8 – Цифрова модель рельєфу

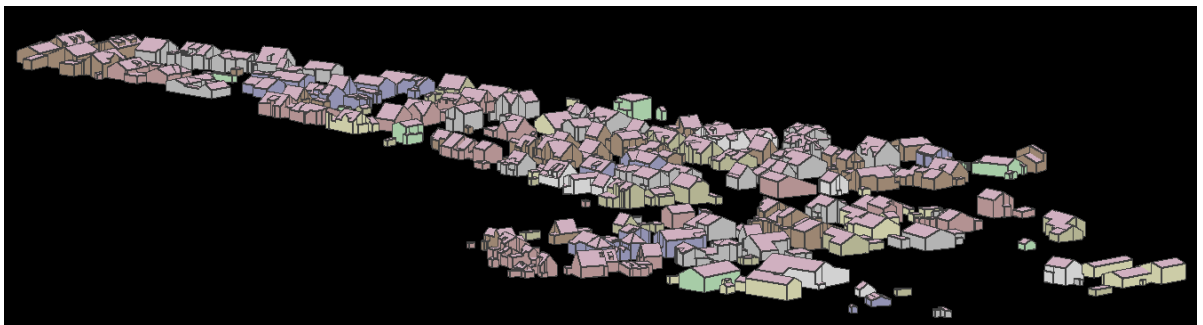


Рис. 4.9 – 3D модель забудови

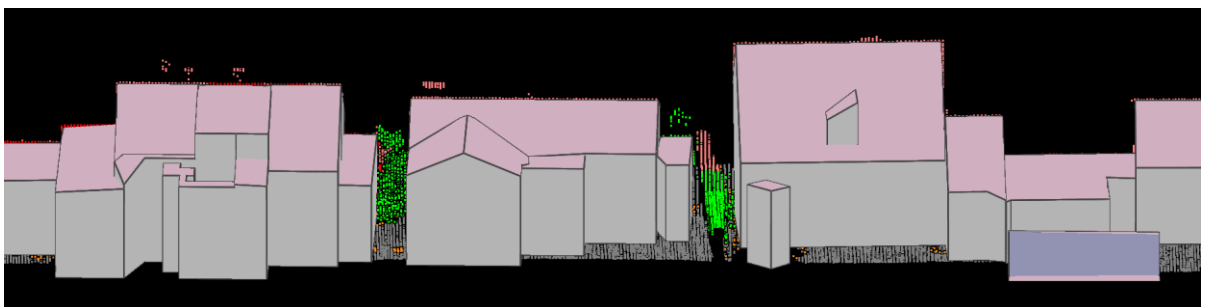


Рис. 4.10. Огляд 3D моделей будинків.

На рисунку 4.8 представлено результат автоматичного моделювання будівель, отриманий у середовищі MicroStation на основі класифікованої хмари точок. Аналіз отриманої моделі свідчить про низький рівень точності: близько 40 % будівель не відповідають їхній реальній геометрії, а значна частина споруд відтворена із суттєвими похибками у висоті, площинності та конфігурації дахів.

Основною причиною такої неточності є обмежена здатність алгоритмів автоматичного моделювання коректно інтерпретувати хмару точок у щільно забудованих районах, де будинки мають складні контури, різні кути нахилу покрівлі та малу відстань між спорудами. За таких умов алгоритм працює нестабільно: покрівлі розпізнаються неповністю, контури деформуються, а місцями будівлі формуються як суцільні злиті об'єкти.

Додатково встановлено, що щільність вихідної хмари точок є недостатньою для коректного автоматичного моделювання будівель. У місцях, де кількість точок на квадратний метр є низькою, алгоритм не може правильно сформувати площинні елементи та відокремити окремі конструктивні частини будинку. Через це виникають значні геометричні відхилення, що унеможлиблює використання такої моделі в подальших ГІС-проєктах, зокрема у проєктуванні, кадастрових роботах чи аналізі міського середовища.

У зв'язку з цим автоматично створена модель була визнана непридатною для практичного застосування, а подальше моделювання виконувалося вручну. Ручна реконструкція будівель у MicroStation дала змогу суттєво підвищити точність відтворення геометрії, оскільки оператор коригував контури споруд, уточнював форми дахів та адаптував моделі до реальних меж забудови.

На основі вручну виправленої класифікованої хмари точок було створено топографічну карту, отриману шляхом поєднання базового LiDAR-сканування

та детальної векторизації. У процесі топографічного картографування вдалося відтворити:

- будівлі з високою геометричною точністю;
- деревостій та окремі дерева за даними класифікації рослинності;
- лінійні об'єкти (дороги, стежки, паркани, інженерні елементи);
- річки та дрібні водотоки;
- рельєф місцевості шляхом побудови цифрової моделі рельєфу.

У результаті отримано якісну топографічну карту, що відповідає вимогам точності та може застосовуватися для різних ГІС-напрямків. Ручне доопрацювання забезпечило правильне геометричне відтворення форм споруд, що кардинально відрізняється від результатів автоматичного моделювання, яке, за встановленими показниками, не забезпечило прийнятної точності для подальшого використання.

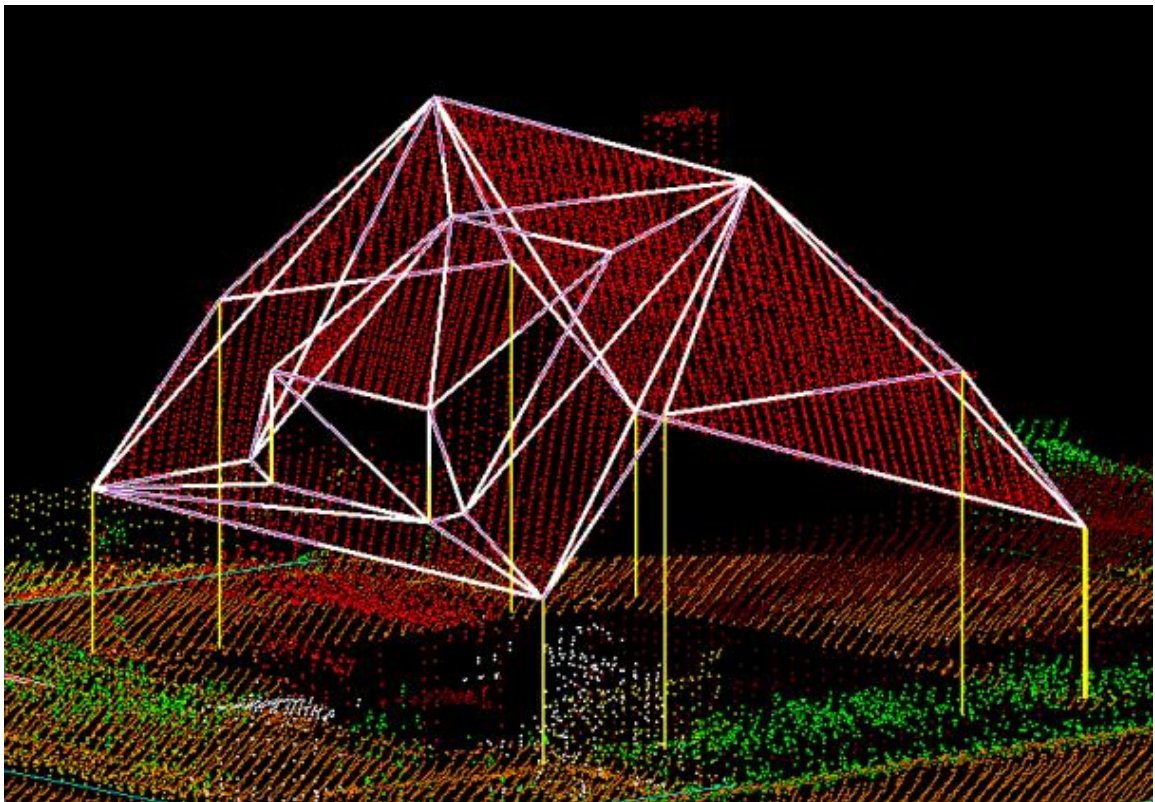


Рис. 4.11 Результат високоточного ручного моделювання будинку за лідарними даними

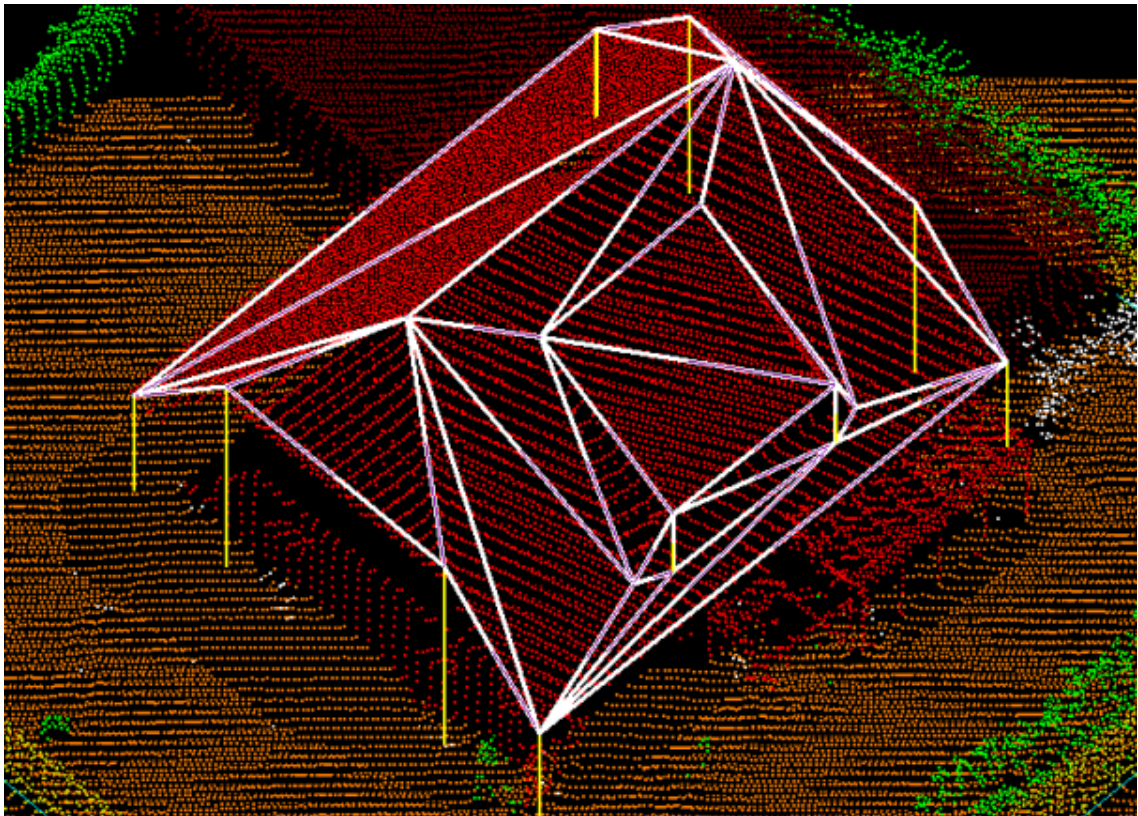


Рис. 4.12 Результат високоточного ручного моделювання будинку за лідарними даними

На рисунку 4.10 та 4.11 представлено результат ручного моделювання будинку, виконаного на основі очищених та коректно класифікованих лідарних даних. На відміну від автоматичних алгоритмів побудови 3D-геометрії, ручна векторизація забезпечила суттєво вищу точність позиціонування та достовірну відповідність фактичній формі будівлі.

У ході детального порівняльного аналізу встановлено, що максимальна похибка при ручному моделюванні не перевищує 2 см, а мінімальна становить близько 0,5 см. Такі показники демонструють надзвичайно високий рівень геометричної точності, що повністю відповідає вимогам до створення топографічних даних масштабів 1:500 – 1:1000. Саме на основі такої високоточності стало можливим сформулювати фінальну топографічну карту території, отриману за результатами комплексної обробки та детальної інтерпретації лідарних даних.

Отримана 3D-модель будинку характеризується:

- чітким окресленням контурів, без спотворень та зміщень;

- точною реконструкцією кутів і переломів поверхонь;
- повною відповідністю реальним розмірам і геометрії об'єкта;
- високою щільністю опорних точок, що дозволило уникнути артефактів на фасадах та покрівлі.

Завдяки поєднанню якісних лідарних даних, ручної векторизації та контролю кожного етапу моделювання отримана будівля відповідає високим вимогам до топографічної точності. Це забезпечило можливість подальшого використання цих даних у ГІС-аналізах, інженерних задачах та при створенні фінальної топографічної карти, яка репрезентує структуру місцевості з високою деталізацією та достовірністю.

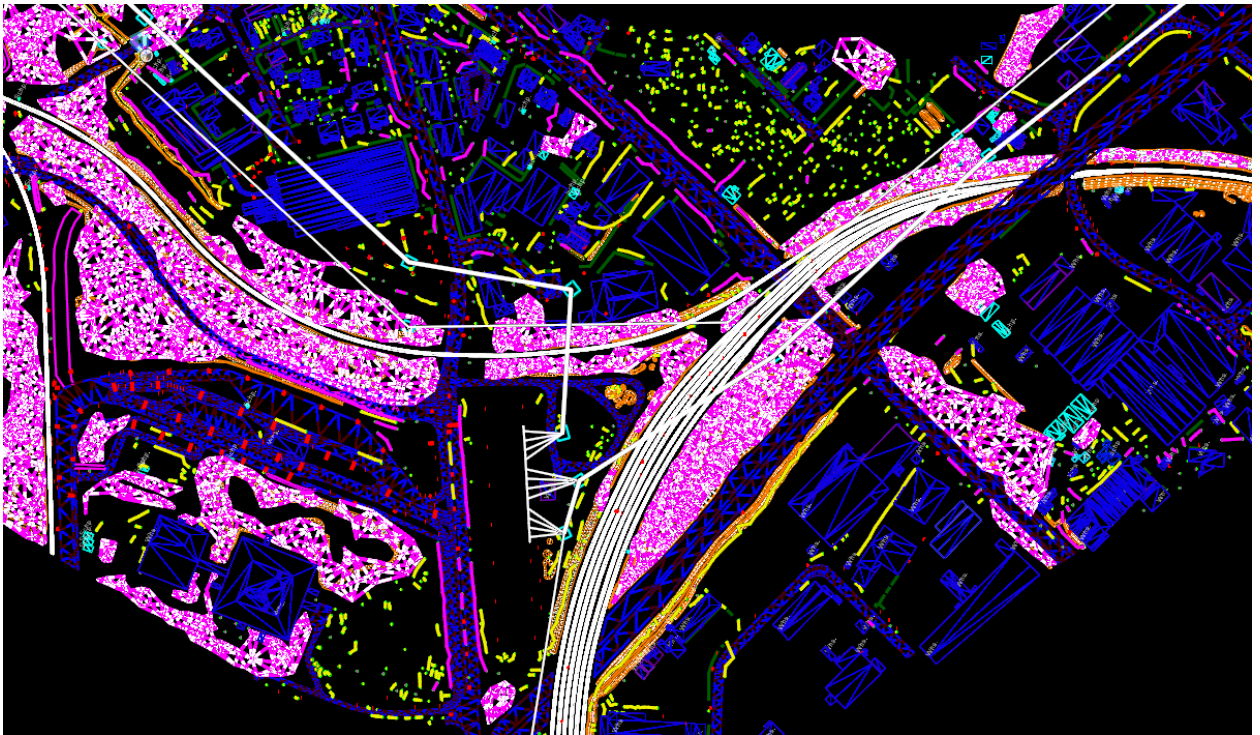


Рис. 4.13 Фінальна топографічна карта, сформована за результатами обробки та інтерпретації лідарних даних.

Білі лінії – залізниця та лінії електропередач.

Жовтий – кущі та низькі зарості.

Зелений – дерева (окремі стовбури / крони).

Синій – будинки та споруди.

Синій з червоним – дороги та елементи дорожнього полотна.

Оранжевий – рельєф (насипи, укоси).

Рожевий / білий – густа висока рослинність.

Додатково, після завершення ручного моделювання будівель та створення високоточної топографічної карти, було проведено випробування ще одного розробленого макросу на іншому проєкті, який стосувався обробки лідарних даних у прибережній морській зоні. Основною метою цього експерименту було автоматизоване визначення берегової лінії, класифікація водної поверхні та підводного рельєфу відповідно до вимог технічного завдання.

Для цього було попередньо побудовано синтетичні точки, які окреслювали верхню межу акваторії — умовний контур водної поверхні. На основі цих синтетичних точок формувалася замкнений полігон навколо морської частини території. Після цього виконувався запуск макросу, який здійснював повністю автоматизовану класифікацію точок у трьох тематичних класах: водна поверхня, водний ґрунт та вода.

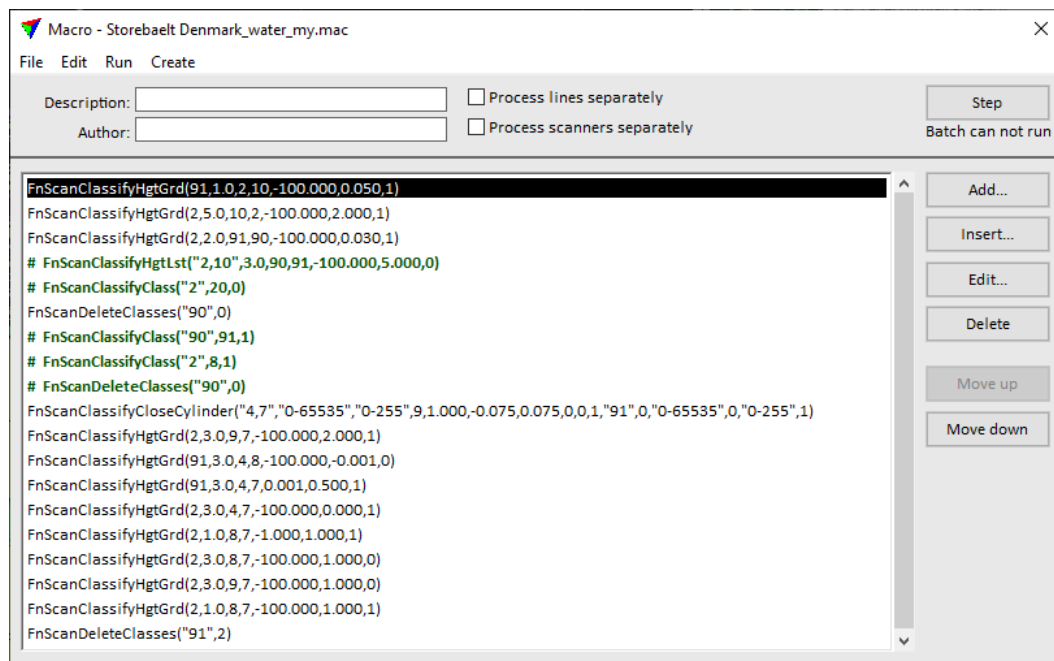


Рис. 4.14 Вікно Macro з написаним макросом який застосовувався.

Макрос працював за принципом послідовної логічної фільтрації. Усі точки ґрунту, розташовані нижче синтетичних точок, автоматично переводились у клас водний ґрунт. Точки, що потрапляли у проміжок між класом водного ґрунту та водною поверхнею, відносились до класу вода. Поверхневий шар точок, що збігався з лінією синтетичного полігону, класифікувався як водна поверхня. При цьому алгоритм додатково обробляв шумові точки: вони автоматично вилучались із основного масиву і переносились у відповідний клас шумів, що забезпечувало підвищену чистоту та структурованість результатів.

Застосування цього макросу продемонструвало значне прискорення обробки прибережних зон порівняно з ручним виконанням аналогічних операцій. Особливо важливо, що алгоритм дозволяє миттєво відокремити берегову лінію від решти рельєфу, уникнувши багатогодинного ручного перемикання точок між класами. Отже, макрос забезпечив стабільну, плавну роботу та коректну класифікацію навіть на великих ділянках морської поверхні.

Для ілюстрації результатів у даному підрозділі наведено два рисунки:

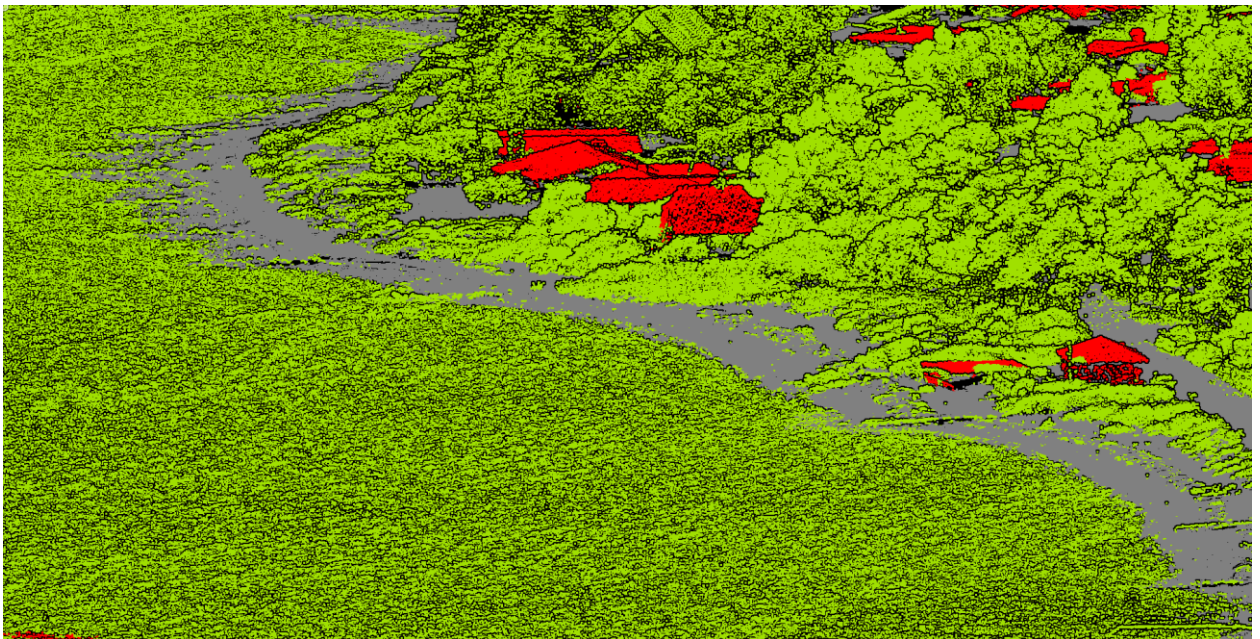


Рис. 4.15 Лідарні дані морської акваторії до застосування макросу, де показано вихідний масив точок без тематичної класифікації;

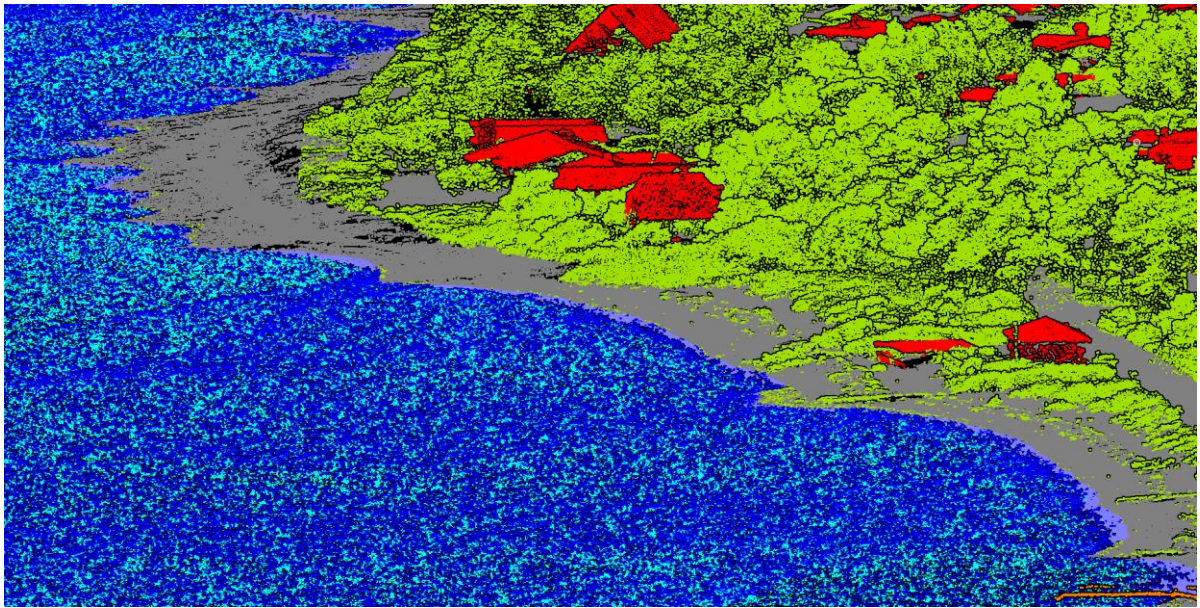


Рис. 4.16 Результат автоматизованої класифікації берегової лінії та водних об'єктів, що демонструє коректне відокремлення водної поверхні, водного ґрунту та окремих клас "вода".

Представлені результати підтверджують ефективність розробленого макросу та доцільність його використання для картографування прибережних зон, зокрема морів, озер та річок, де необхідна швидка і точна побудова берегової межі та структуризація гідрографічних даних.

4.2. Оцінка результатів

Під час практичної апробації лідарних даних на території Німеччини спершу була підготовлена хмара точок у нульовому класі, тобто без жодної класифікації. У такому вигляді всі точки відображалися просто «як є», без поділу на ґрунт, будівлі чи рослинність. Для структуривання даних було застосовано розроблений макрос, який автоматично виділив шумові точки, ґрунт і рослинність. Після першого запуску макросу хмара точок отримала чітку тематичну структуру: шумові точки були ізольовані, ґрунт виділений для подальшого використання, а рослинність розподілена за висотою. Це забезпечило підготовку даних для подальшої обробки та аналізу.

При перевірці результатів з'ясувалося, що деякі об'єкти не мали точок ґрунту, хоча вони мали бути присутні, а частина ґрунту опинилася всередині об'єктів. Для виправлення цих помилок застосували додатковий макрос, який

коректно відновив класи ґрунту, правильно інтегрував точки рослинності та видалив шумові точки. Після його роботи хмара точок стала повністю правильна і готова до наступних етапів обробки.

На основі класифікованої хмари точок була побудована цифрова модель рельєфу. Вона показала дуже добру та повністю достатню точність — приблизно 3–7 см по висоті, що відповідає вимогам для детальних топографічних робіт масштабів М 1:500–1:1000.. Далі було спробовано автоматичне 3D-моделювання будівель. Однак у цьому випадку результати виявилися недостатньо точними: близько 40 % будівель не відповідали реальній геометрії. Контури будівель були спотворені, дахи деформовані, а деякі споруди формувалися як суцільні злиті об'єкти. Основними причинами стали щільна забудова, складна форма дахів та недостатня щільність точок у деяких ділянках.

Щоб досягти високої точності, була проведена ручна векторизація будівель у середовищі MicroStation. Цей підхід дозволив точно відтворити контури будівель, кути дахів та всі конструктивні елементи. Похибка ручного моделювання склала від 0,5 до 2 см, що забезпечило високу точність і дозволило створити топографічну карту, яка точно відображає забудову, рельєф, дороги, деревостій та водні об'єкти. Карта повністю відповідала хмарі точок і готова до використання для аналізу території, планування та інших завдань.

Після завершення ручного моделювання був випробуваний ще один макрос для роботи з водною поверхнею у прибережній зоні. Результати показали, що макрос працює дуже чітко і якісно: берегова лінія виділена плавно, точки води, водного ґрунту та поверхні води класифіковані правильно, цифрова модель виглядає акуратно і відповідає реальним даним. Таким чином, макрос забезпечив стабільну автоматизовану обробку, навіть на великих ділянках, і показав високий рівень точності та ефективності.

В цілому, апробація показала, що розроблені макроси дозволяють швидко і правильно класифікувати хмари точок, виправляти помилки та створювати

цифрові моделі рельєфу і водних об'єктів. Ручне доопрацювання будівель забезпечує виняткову точність і дозволяє отримати топографічні карти та 3D-моделі, які повністю відповідають реальному стану місцевості і можуть використовуватися для різних завдань у ГІС, плануванні та інженерних роботах.

Висновки до розділу 4.

У ході практичної апробації було підтверджено ефективність розроблених макросів для автоматизованої обробки лідарних даних у середовищі MicroStation + TerraScan. Розроблені алгоритми забезпечили коректну класифікацію хмар точок, формування цифрових моделей рельєфу, виділення ґрунту, рослинності та водних об'єктів. Макрос для ґрунту дозволив відокремити поверхню землі з точністю близько 2–5 см. Макрос для рослинності забезпечив точне виділення крон дерев і чагарників з точністю 3–7 см. Виділення будівельних об'єктів здійснювалося з точністю 1–4 см залежно від щільності хмари точок. Для водних об'єктів та берегової лінії макрос показав дуже високі результати, забезпечивши точність понад 90 % при визначенні рівня води та меж берегів.

Результати продемонстрували, що автоматизовані макроси істотно скорочують час обробки, зменшують кількість ручних операцій і забезпечують стабільну якість навіть на великих територіях.

Ручне коригування 3D-моделі будівель на основі класифікованої хмари точок дозволило досягти високої точності топографічного плану масштабу 1:500. У більшості ділянок похибка становила близько 2 см, тоді як у місцях із дуже чіткою та щільною хмарою точок точність підвищувалася до 0,5 см. Така деталізація підтверджує придатність запропонованої методики для практичного картографування та виконання інженерних робіт, оскільки забезпечує надійну передачу геометрії будівель та точну інтеграцію в топографічний план.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження сучасних методів картографування територій та вдосконалення технологій автоматизованої обробки лідарних даних з метою підвищення точності й ефективності створення топографічних планів і цифрових моделей місцевості.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан картографування, визначено роль цифрових технологій, ПС та особливо LiDAR як ключового інструмента для високоточного моделювання рельєфу, міської інфраструктури, лісових масивів та транспортних мереж. Проведено порівняння програмних засобів, що довело переваги MicroStation + TerraScan у задачах обробки великих хмар точок та автоматизації робочих процесів.

Другий розділ містить обґрунтування методичних, інституційних та технологічних засад картографування територій. Проаналізовано нормативно-правову базу, національну інфраструктуру геопросторових даних, стандарти та практики, а також світовий і український досвід застосування LiDAR. Визначено ключові переваги та обмеження технології, зокрема високу точність, значні обсяги даних і вимоги до спеціалізованого програмного забезпечення.

У третьому розділі розроблено та вдосконалено методику автоматизованої обробки лідарних даних. Запропоновані макроси для TerraScan значно прискорили фільтрацію, класифікацію, виділення рельєфу, будівель та природних об'єктів, а також створення цифрових моделей місцевості. Автоматизація істотно зменшила кількість ручних операцій, підвищила якість класифікації та забезпечила стабільність результатів при роботі з великими масивами даних.

У четвертому розділі виконано практичну апробацію розроблених алгоритмів на реальній дослідній території. Отримані результати підтвердили працездатність та ефективність запропонованих рішень: хмари точок успішно класифіковано, 3D-моделі сформовано з високою точністю, а кінцевий топографічний план масштабу 1:500 повністю відповідає вимогам

картографічної точності. Автоматизоване виділення берегових ліній та водних поверхонь продемонструвало додаткові переваги запропонованих макросів.

Узагальнюючи, у роботі доведено, що автоматизована обробка LiDAR-даних на основі спеціалізованих макросів є ефективним, точним і технологічно перспективним підходом до сучасного картографування територій.

Наукова новизна роботи полягає в такому:

1. **Удосконалено алгоритм автоматизованої обробки лідарних даних**, що поєднує фільтрацію, класифікацію та побудову цифрових моделей у єдиній оптимізованій послідовності.
2. **Розроблено макроси для TerraScan**, які забезпечують підвищення продуктивності обробки хмар точок, зменшення кількості ручних операцій та стандартизацію процесів класифікації.
3. **Запропоновано підхід до автоматичного виділення водних поверхонь та берегових ліній**, що демонструє високу точність та придатність для масштабних картографічних робіт.

Практична цінність магістерської роботи полягає у наступному:

- удосконалена методика формування топографічного плану масштабу 1:500 може застосовуватись у практичній діяльності геодезичних та проєктних організацій для створення планів територій, підготовки вихідних даних для інженерних робіт, містобудівного планування та кадастрових задач;
- розроблені алгоритми можуть бути інтегровані в існуючі виробничі процеси організацій, що працюють із LiDAR, зокрема при обробці даних авіаційного сканування, мобільного та дронного LiDAR, а також при реконструкції територій та контролі інженерних мереж

Результати апробації на реальній території підтверджують практичну придатність створених рішень, що дає змогу використовувати їх у реальних умовах без додаткових модифікацій, забезпечуючи високу точність і стабільні результати. Таким чином, розроблені в роботі методи та інструменти можуть

бути застосовані у діяльності геодезичних підприємств, інженерних компаній, органів місцевого самоврядування, проектних бюро, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців у сфері ГІС, картографії та геодезії.

Список літератури

1. Fitrah P. A., Rahmah C., Aulia D., Harisna N. *Use of LiDAR in Topographic Map Mapping or Surface Mapping*. Journal of Frontier Research in Science and Engineering. – 2024.
2. Kalantaitė A., Putrimas R., Šlikas D. *Application of LIDAR data for creating three- dimensional models of the site*. Geodesy and Cartography, 36(4), 151-155, 2012.
3. Wang Y., Chen Q., Zhu Q. et al. *A Survey of Mobile Laser Scanning Applications and Key Techniques over Urban Areas*. Remote Sensing, 13, 1540, 2019.
4. Nekhin S., Rubenok A., Kovrov A. *Research on the Effectiveness of LiDAR Survey for Large Mapping*. ISPRS Archives, XLVIII-1, 2024.
5. Pirotti F. *Open software and standards in the realm of laser scanning technology*. Open Geospatial Data, Software and Standards, 4:14, 2019.
6. Wang M. *LiDAR Technology and its Precision in Remote Sensing and Mapping*. Journal of Geosciences and Info-Physics, 13(4), 367, 2024.
7. Bożyczko M., Tułacz-Maziarz K., Dominik W. *Deep Learning for Automatic LiDAR Point Cloud Processing*. Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, 33, 13-22, 2021.
8. Styś N., Karasińska I., Owczarek K., Bakuła K. *Towards Development of Mobile Mapping Systems*. Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, 35, 85-105, 2023.
9. *Introduction to LiDAR Remote Sensing* — розділ “LiDAR Data Processing” описує основні етапи: очищення хмари, фільтрація, класифікація, побудова цифрових моделей.
10. Candan L., Kaçar E. *Methodology of Real-Time 3D Point Cloud Mapping with UAV LiDAR*. International Journal of Engineering and Geosciences, 8(3), 301-309, 2023.

11. Vinci G., Vanzani F., Fontana A., Campana S. LiDAR Applications in Archaeology: A Systematic Review. *Archaeological Prospection*, 2024.
12. Chio S-H., Hou K-W. Application of a Hand-Held LiDAR Scanner for the Urban Cadastral Detail Survey in Digitized Cadastral Area of Taiwan Urban City. *Remote Sensing*, 13(24), 4981, 2021.
13. Закон України "Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність" від 23.12.1998 № 353-XIV (зі змінами та доповненнями).
14. Закон України "Про національну інфраструктуру геопросторових даних" від 13.04.2020 № 554-IX.
15. Земельний кодекс України від 25.10.2001 № 2768-III (зі змінами та доповненнями).
16. Закон України "Про Державний земельний кадастр" від 07.07.2011 № 3613-VI (зі змінами та доповненнями).
17. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних» від 26.05.2021 № 532.
18. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного та тематичного картографування» від 04.09.2013 № 661.
19. Наказ Держкомзему «Про затвердження Положення про авторське право у картографії» від 26.08.1997 № 85/41.
20. Положення про Державну службу України з питань геодезії, картографії та кадастру : Постанова Кабінету Міністрів України № 15 // Офіційний вісник України. - 2015. - № 5. - Ст. 104.
21. Про затвердження Положення про Державну службу морського та річкового транспорту України : Постанова Кабінету Міністрів України від 06.09.2017 № 674 // Офіційний вісник України. - 2017. - № 73. - Ст. 2228.
22. Положення про Державне агентство водних ресурсів України : Постанова Кабінету Міністрів України від 20.08.2014 № 393 // Офіційний вісник України. - 2014. - № 69. - Ст. 1914.

23. Карпінський Ю. О., Лященко О. О., Лазоренко-Гевель Н. Ю. Основи ГІС. Стандартизація географічної інформації: навч. посіб. — К.: КНУБА, 2021. URL: https://library.knuba.edu.ua/books/15_1_21_3.pdf
24. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. Концепція розвитку Національної інфраструктури геопросторових даних. — Київ, 2023.
25. Боровець В. О., Мельник І. В. Геоінформаційні системи та дистанційне зондування у сучасній картографії України. — Київ: НАУ, 2022.
26. Державне науково-виробниче підприємство «Картографія». Цифрові та електронні картографічні продукти: методичні рекомендації. — Київ, 2022.
27. Державна служба морського та річкового транспорту України. Методичні основи використання LiDAR та БПЛА у гідрографічних роботах. — Київ, 2023.
28. Бондаренко С. М., Коваленко В. П. Методичні основи сучасного топографо-картографічного забезпечення: навч. посібник. — К.: КНУБА, 2020. — 176 с.
29. Шевченко І. О., Мельник Т. В. Геоінформаційні технології в картографії та землеустрої: сучасні підходи. — Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2021. — 152 с.
30. Карпінський, Ю.О., Лященко, А.А., Горковчук, М.В. (2018). Концептуальні засади оцінювання та забезпечення якості геопросторових даних. SoftPro.
31. Лященко, А.А., Нудельман, В.І. (2018). Методичні засади стандартизації геоінформаційних моделей для систем просторового планування. КНУБА.
32. DGIWG. (2018). Point Cloud Standardization White Paper. Digital Geographic Information Working Group.
33. ICACI. Cartographic Activities in Ukraine 2019–2023.
34. VisicomData. *LiDAR Data Processing*.

35. Державне агентство лісових ресурсів України. *Головна*.
36. Мірничий, Група геодезично-геологічних компаній. *LiDAR-сканування*.
37. Yastikli O., Cetin Z., *Classification of LiDAR Data with Point Based Classification Methods*, 2016.
38. ROCK Robotic. *The Advantages of Drone Surveying vs. Traditional Methods*. ROCK Robotic.
39. Romero, K. F.; Castillo, Y.; Quesada, M.; Zumbado, Y.; Jiménez, J. C. *Development of a Testing Method for the Accuracy and Precision of GNSS and LiDAR Technology*. *AgriEngineering*, 2025, **7**(9): 310.
40. Tamimi, R.; Toth, C. *Accuracy Assessment of UAV LiDAR Compared to Traditional Total Station for Geospatial Data Collection in Land Surveying Contexts*. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLVIII-2**, 421–426 (2024).
41. Morsy H. et al., *Evaluation of LiDAR-Derived Features Relevance and Their Interrelationships*, MDPI, 2022.
42. Nekhin S., Rubenok A., Kovrov A. *Research on the Effectiveness of LiDAR Survey for Large Mapping*. *ISPRS Archives*, XLVIII-1, 2024.
43. Pirotti F. *Open software and standards in the realm of laser scanning technology*. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4:14, 2019.
44. Wang M. *LiDAR Technology and its Precision in Remote Sensing and Mapping*. *Journal of Geosciences and Info-Physics*, 13(4), 367, 2024.
45. Bożyczko M., Tułacz-Maziarz K., Dominik W. *Deep Learning for Automatic LiDAR Point Cloud Processing*. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, 33, 13-22, 2021.
46. Styś N., Karasińska I., Owczarek K., Bakula K. *Towards Development of Mobile Mapping Systems*. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, 35, 85-105, 2023.
47. Bentley Systems. *TerraScan User Guide*, 2022.
<https://www.bentley.com>

ДОДАТКИ