

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**Факультет геоінформаційних систем та управління територіями**

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до дипломного проекту (роботи)  
освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавра

на тему:

**СТВОРЕННЯ ЦМР НА ОСНОВІ ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ**

Виконав: студент IV курсу, групи ГСТ-20  
за напрямком підготовки

193 «Геодезія та землеустрій»

Ріпак О.К.

*(прізвище та ініціали студента)*

Керівник: Горковчук Ю.В.

*(прізвище та ініціали, науковий статус, посада)*

Рецензент: Максимова Ю. С., канд. тех.

наук, асистент

*(прізвище та ініціали, науковий статус, посада)*

*Ідентичність підтверджую*

# КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: геоінформатики і фотограмметрії

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Напрямок підготовки: 19 «Архітектура та будівництво»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри проф. Карпінський  
Ю.О.

---

(підпис)

«22 лютого 2024 року

## **ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ**

Ріпак Олег Костянтинович

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема проекту (роботи): Створення ЦМР на основі лідарного знімання

Керівник проекту (роботи):

к.т.н. Горковчук Ю.В.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “25”04.2024 року №712/2

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 24.05.2024

3. Вихідні дані до проекту (роботи) дані лазерного сканування регіону Стокгольм

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

**ВСТУП**

**РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ**

1.1 ЦМР, ЦМВ та ЦММ

1.2 Побудова ЦМР в ГІС

1.3 Особливості LIDAR

Висновок до розділу

**РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ЦМР ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО  
ЗНІМАННЯ**

2.1 Технологія створення ЦМР

2.2 Порівняльний аналіз методів створення ЦМР

2.3 Використання лідарного знімання для моделювання ЦМР

Висновок до розділу

## РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ

3.1 Опис вихідних даних та завдання

3.2 Моделювання ЦМР

Висновок до розділу

ВИСНОВОК

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

ДОДАТКИ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

---

---

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Номер розділу	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Горковчук Ю.В.		
Розділ 2	Горковчук Ю.В.		
Розділ 3	Горковчук Ю.В.		

7.Дата видачі завдання 20.02.2024

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи )	Примітка
1.	ВСТУП	20.02.2024	
2.	РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ	22.02.2024	
3.	РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ЦМР ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ	19.03.2024	
4.	РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ	16.04.2024	
5.	Висновки	15.05.2024	

6.	Розробка графічного матеріалу	17.05.2024	
7.	Оформлення пояснювальної записки	17.05.2024	
8.	Подача проєкту на попередній захист та рецензування	20.05.2024	

**Студент: Ріпак О.К.**  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
( підпис )

**Керівник проєкту (роботи): Горковчук Ю.В.**  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
( підпис )

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1_ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ .....	7
1.1 Визначення цифрової моделі рельєфу.....	8
1.2 Побудова ЦМР в ГІС.....	9
1.3 Особливості застосування лідарного знімання для створення ЦМР .....	12
Висновок .....	19
РОЗДІЛ 2_ МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ЦМР ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ.....	20
2.1 Технологія створення ЦМР .....	21
2.2 Огляд методів створення ЦМР.....	22
2.3 Використання лідарного знімання для моделювання ЦМР .....	28
Висновки .....	36
РОЗДІЛ 3_ ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ .....	37
3.1 Опис вихідних даних та завдання .....	38
3.2 Моделювання ЦМР .....	45
Висновки .....	49
ВИСНОВОК.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	51
ДОДАТКИ .....	53

## ВСТУП

Моделювання цифрових моделей рельєфу є класичним завданням геоінформаційного аналізу та є фундаментальним для широкого кола прикладних завдань, зокрема землеустрій, містобудівне планування, екологічний моніторинг, геологічні дослідження тощо. Результат моделювання поверхні рельєфу в першу чергу залежить від якості вхідних даних, які є результатом збирання геопросторових даних. Класичними методами виконавчих зніманих є геодезичні або фотограмметричні. Одним із сучасних інструментів для отримання геопросторової інформації є лідарне знімання. Лідар (Light Detection and Ranging) — це технологія дистанційного зондування, яка використовує лазерний промінь для вимірювання відстаней до об'єктів та створення тривимірних моделей поверхонь. В останні роки лідар став все більш поширеним інструментом для збору геопросторових даних завдяки своїй високій точності та здатності працювати в різних погодних умовах та на різних типах поверхонь.

Метою даної дипломної роботи є дослідження процесу створення цифрових моделей рельєфу на основі лідарного знімання та порівняльний аналіз різних методів їх створення. Робота складається з трьох розділів, в межах яких розглядаються теоретичні питання створення цифрових моделей рельєфа, методика оброблення даних лідарних зніманих, порівняльний аналіз геоінформаційних інструментів моделювання ЦМР. Третій розділ присвячений практичній апробації розглянутих методів та інструментів. Основним результатом дослідження є встановлення переваг та недоліків різних методів створення ЦМР на основі лідарного знімання та розробка рекомендацій щодо їх використання у практичних застосуваннях.

**РОЗДІЛ 1.**  
**ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ**

## 1.1 Визначення цифрової моделі рельєфу

Дані терміни можуть мати різні визначення в залежності від стандартів. Наприклад, у деяких країнах терміни ЦМР та ЦМВ є синонімами. В Україні зазвичай ці терміни мають наступні визначення:

Цифрова модель рельєфу (ЦМР, англ. Digital Terrain Model, DTM) – геопросторова структура, яка відображає висоту та форму земної поверхні. Вона використовується для моделювання рельєфу без урахування об'єктів, що знаходяться над поверхнею землі, таких як будівлі та рослинність [1].

Цифрова модель висот (ЦМВ) або Digital Elevation Model (DEM) – це геопросторова структура, яка відображає перешкоди на поверхні землі, такі як рослинність та штучні об'єкти із вказівкою їх відносних висот. ЦМВ зазвичай включає в себе як рельєф земної поверхні, так і всі об'єкти, що знаходяться на ній [1].

Цифрова модель поверхні (ЦМП) або Digital Surface Model (DSM) – це геопросторова структура, яка включає в себе рельєф, рослинність та штучні об'єкти. Вона надає найбільш повну картину поверхні, враховуючи всі елементи, що знаходяться на землі [1].

У більшості країн терміни DTM (ЦМР) та DEM (ЦМВ) є синонімами, в той час як у США існує невелика різниця. Якщо ЦМВ відображає лише рівень земної поверхні у визначених точках, то ЦМР є «суперповерхнею», що також включає в себе твірні лінії рельєфу – вододіли і тальвеги. Такий підхід не дуже зручний у користуванні, тому в Україні прийнято використовувати терміни ЦМР для DEM чи DTM та ЦММ (Цифрова модель місцевості) для DSM.

В Україні стандартизація та визначення цифрових моделей здійснюються відповідно до міжнародних стандартів та рекомендацій, адаптованих до національних умов. Зокрема, терміни ЦМР, ЦМВ та ЦММ використовуються для уніфікації підходів у геодезії, картографії та геоінформаційних системах.

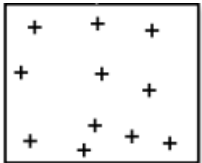
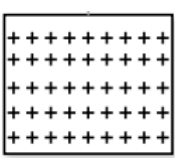
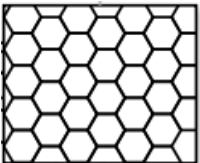
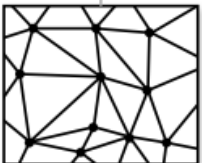

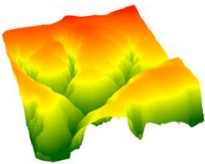
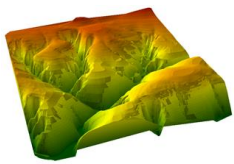
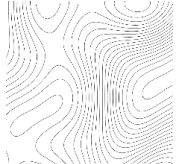
Офіційні стандарти та методики визначення цифрових моделей рельєфу, висот та поверхні розробляються та затверджуються відповідними державними органами та науковими установами, такими як Держгеокадастр України та профільні академічні інституції. Це забезпечує єдність підходів у створенні, обробці та використанні геопросторових даних, що є необхідним для ефективного управління територіями, планування та виконання інженерних робіт.

## 1.2 Побудова ЦМР в ГІС

Геометрична модель покриття може задаватися у вигляді набору нерегулярно розташованих точок, регулярних сіток або GRID-моделей вузлової та чарункової), нерегулярної мережі трикутників або TIN-моделі та ізоліній.

Таблиця 1.1

Способи подання рельєфу в ГІС

Нерегулярний набір точок	GRID вузли	GRID чарунки	TIN	Ізолінії
				
				

Таблиця 1.2

## Порівняння способів подання рельєфу в ГІС

Модель рельєфу	Опис	Призначення	Переваги	Недоліки
Нерегулярний набір точок	Модель складається з точок, розташованих без певної регулярності, кожна з яких має координати і висоту.	Використовується для побудови TIN та інших моделей.	Висока точність в місцях з великою варіацією рельєфу.	Складність обробки і аналізу.
Grid (вузли)	Регулярна сітка з точками (вузлами), кожен з яких має висотне значення.	Моделювання рельєфу, аналіз висот.	Простота створення і аналізу, зручність обробки даних.	Низька точність в місцях з різкими змінами рельєфу.
Grid (чарунки)	Регулярна сітка з клітинами (пікселями), кожна з яких має висотне значення.	Моделювання рельєфу, візуалізація.	Висока швидкість обробки, можлива деталізація.	Великий обсяг даних при високій роздільній здатності.
TIN	Мережа трикутників, обмежених точками з відомими висотами.	Деталізоване моделювання рельєфу, інженерні розрахунки.	Висока точність на ділянках з різкими змінами рельєфу.	Складність створення і обробки.
Ізолінії	Лінії на карті, що з'єднують точки однакової висоти.	Візуалізація рельєфу, аналіз топографічних особливостей.	Легкість інтерпретації, чітке уявлення про рельєф.	Можливість спотворення при великих інтервалах.

ГІС інструменти для побудови GRID, TIN, ізоліній:

1. ПЗ ArcGIS

GRID: Створення raster datasets з використанням інструментів Spatial Analyst.

TIN: Побудова TIN за допомогою 3D Analyst.

Ізолінії: Генерація контурних ліній з використанням інструменту Contour.

2. QGIS

GRID: Створення растрових шарів за допомогою інструментів GDAL.

TIN: Побудова TIN з використанням плагінів або інструментів Processing Toolbox.

Ізолінії: Генерація контурних ліній за допомогою плагіна Contour або інструментів GDAL.

3. Global Mapper

GRID: Генерація растрових моделей висот.

TIN: Створення та редагування TIN моделей.

Ізолінії: Створення контурних ліній на основі цифрових моделей рельєфу.

4. GRASS GIS

GRID: Створення растрових даних за допомогою r.surf.contour або r.surf.idw.

TIN: Побудова та обробка TIN з використанням v.delaunay.

Ізолінії: Генерація ізоліній з використанням r.contour.

5. SAGA GIS

GRID: Створення та аналіз растрових даних за допомогою інструментів для обробки поверхні.

TIN: Побудова TIN за допомогою інструментів для триангуляції.

Ізолінії: Створення контурних ліній за допомогою інструменту Contour Lines from Grid.

Найпоширенішим серед розглянутих інструментів є ArcGIS[2], найдоступнішим – QGIS[3] (вільно розповсюджується), найточнішим – ArcGIS[2]. Варто зазначити, що алгоритми створення ЦМР в ГІС дуже схожі, а

найбільшою відмінністю є можливість реалізації цих алгоритмів для різних вихідних даних. Наприклад, інструментарій QGIS лише останньої версії підтримує оброблення las файлів – класичного формату результатів лідарних знімків.

### 1.3 Особливості застосування лідарного знімання для створення ЦМР

Лідар (від англійської абревіатури "Light Detection and Ranging") - це технологія збору та аналізу даних дистанційного зондування, що використовує активні оптичні системи, такі як лазери. Вона базується на вимірюванні відбитого від поверхні Землі світла з високою точністю X, Y, Z координат. Початково використовувалась у повітряній лазерній зйомці, лідар став економічно вигідною альтернативою традиційній фотограмметричній зйомці. Дані, отримані за допомогою лідара, представляють собою набори точкових хмар, які можуть бути керовані, відображені, проаналізовані та використані за допомогою різноманітних програмних засобів.

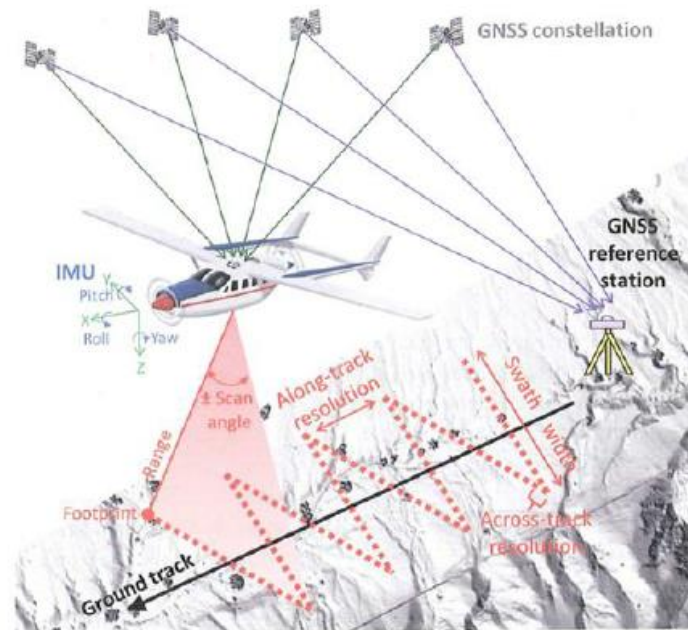


Рис. 1.1. Принцип роботи LIDAR

Основними компонентами апаратного забезпечення лідара є:

Транспортний засіб або пристрій: Лідар може бути встановлений на різних типах транспортних засобів, таких як літаки, вертольоти або стаціонарні штативи.

Система лазерного сканування: Ця система випускає лазерні промені в напрямку досліджуваної території та реєструє відбиті сигнали.

GPS (Глобальна система позиціонування): GPS використовується для визначення географічного положення лідара у просторі.

INS (Внутрішня система позиціонування): INS вимірює крен, тангаж і ривок системи, щоб визначити її орієнтацію та рух.

Лідар випромінює лазерні промені в напрямку досліджуваної території, а потім аналізує відбиті сигнали. Приймачі фіксують точний час, що пройшов від випуску лазерного променя до його повернення, щоб обчислити відстань між лідаром і об'єктом. З використанням інформації про GPS та INS, ці відстані перетворюються на тривимірні точки, що відображають поверхню території, що сканується.

Зібрані точкові дані піддаються подальшій обробці з урахуванням діапазону часу роботи лазера, кута сканування, координат GPS та інформації про внутрішнє позиціонування, щоб отримати точні координати  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Лазерні імпульси, що випускаються лідаром, віддзеркалюються як від предметів, що знаходяться на землі, так і від об'єктів, що знаходяться над землею: від рослинного покриву, будівель, мостів і т.п. Один лазерний імпульс може віддзеркалювати і повертатися до сенсора як один раз, так і кілька. Будь-який лазерний імпульс зазнає кілька відображень при його русі до земної поверхні, поділяючись на стільки частин, від якої кількості поверхонь він відбився. Перший сигнал, що повернувся, є найбільш показовим і відповідатиме найвищому об'єкту ландшафту, такому як, наприклад, верхівка дерева або дах будівлі. Перший відбитий сигнал може також відповідати і земній поверхні. В цьому випадку лідаром буде захоплено тільки одне відображення. Велика кількість повернень

використовується для отримання висот декількох об'єктів, що знаходяться на шляху лазерного імпульсу. Відбиті сигнали з середини "спектра" зазвичай відповідають рослинності, а останні відбиті сигнали використовуються для моделей власне поверхні землі останнє відображення не завжди відбувається від земної поверхні

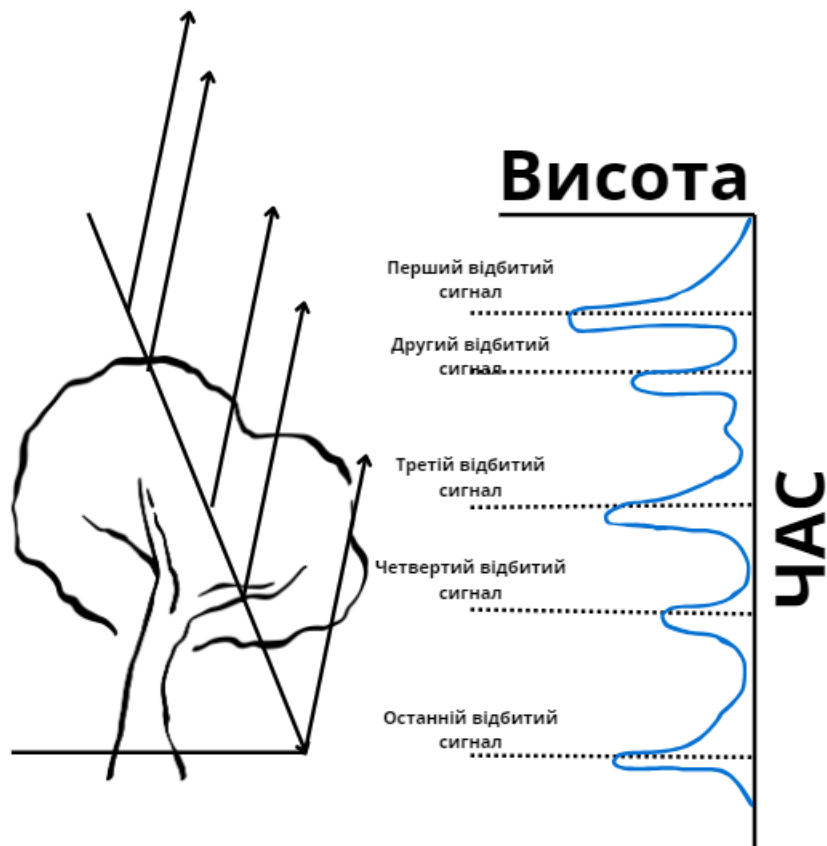


Рис. 1.2. Відбиття сигналів

Наприклад, якщо лазерний імпульс потрапляє в гілку дерева, то останнім відбиттям буде відбиття від цієї гілки, а не від землі.

Крім координат  $x$ ,  $y$  і  $z$ , лідар також зберігає додаткову інформацію про кожен лазерний імпульс. Ця інформація може включати: Інтенсивність; Сила

відображення лазерного імпульсу, що відповідає лідарній точці; Номер відбитого сигналу.

Лазерний імпульс, що випускається, може створити до п'яти відбитих сигналів в залежності від об'єктів, від яких він відбивається і можливостей лазерного сканера. Перший повернутий імпульс буде позначений як відбитий сигнал номер один, другий – як номер два тощо. Кількість сигналів, які повернулися – це загальне число відображень даного імпульсу. Наприклад, точка лазерних даних може бути другим відбитим сигналом з п'яти відображень. Кожна надалі оброблена точка лідара може містити значення класифікації, яке визначає тип об'єкта, який відбив лазерний імпульс. Точки відображаються в залежності від значення, яке дорівнює 0 або 1. Точки, що знаходяться на лінії польоту, мають значення, рівне 1, решта - рівна 0. Даним лідара може бути присвоєно атрибут RGB. Ця атрибутивна інформація часто береться із зображень, які виходять одночасно з лазерною зйомкою. Кут сканування - це значення в градусах з діапазону від -90 до +90. При 0 градусів лазерний імпульс випускається перпендикулярно і здійснюється зйомка в надир. При значенні, рівному -90 градусів, лазер випромінює імпульси вліво, а при +90 - вправо від літака в напрямку польоту. Більшість систем лазерного сканування працюють в діапазоні від -30 до +30 градусів. Напрямок сканування - це напрямок руху дзеркала скануючої системи в момент випускання системою лазерного сигналу. Значення, рівне 1, відповідає позитивному напрямку сканування, а рівне 0 - негативному. Позитивний напрямок означає, що сканер рухається зліва направо по напрямку польоту, а негативне – навпаки.

Переваги лідарного знімання:

1. Висока точність вимірювань:

Лідар забезпечує точне визначення координат X, Y, Z, що дозволяє отримувати детальну тривимірну модель поверхні Землі.

Можливість вимірювання висоти з точністю до 1 сантиметра.

## 2. Швидкість збору даних:

Лідар може швидко збирати великі обсяги даних, що робить його ефективним для масштабних проєктів.

Системи повітряного лазерного сканування можуть охоплювати великі території за короткий час.

## 3. Незалежність від освітлення:

Лідар використовує активні оптичні системи, що дозволяє проводити зйомку як вдень, так і вночі.

Можливість роботи в умовах недостатньої видимості, наприклад, в хмарну або туманну погоду.

## 4. Виявлення багат шарових об'єктів:

Лідар здатний отримувати відбиття від різних об'єктів на шляху лазерного імпульсу, що дозволяє аналізувати структури, такі як рослинний покрив та будівлі.

Можливість створення детальних моделей поверхні землі та об'єктів на ній.

## 5. Інтеграція з іншими даними:

Дані лідача можуть бути інтегровані з іншими геопросторовими даними, такими як аерофотознімки, для покращення аналізу та візуалізації.

Можливість присвоєння атрибутів RGB, що полегшує інтерпретацію даних.

Недоліки лідарного знімання:

### 1. Висока вартість:

Лідарні системи та їх експлуатація можуть бути дорогими, що робить їх менш доступними для малих проєктів або організацій з обмеженим бюджетом.

Високі витрати на технічне обслуговування та калібрування обладнання.

### 2. Залежність від погодних умов:

Хоча лідар може працювати в умовах низької видимості, сильний дощ або сніг можуть негативно вплинути на якість даних.

Погана погода може обмежити час, доступний для зйомки.

3. Складність обробки даних:

Дані лідара потребують значної обробки для отримання кінцевих результатів, що вимагає спеціалізованого програмного забезпечення та досвіду.

Великий обсяг даних потребує потужних обчислювальних ресурсів для їх обробки та зберігання.

4. Обмеження у певних середовищах:

Лідар може мати труднощі зі скануванням через густий лісовий покрив або у міських районах з високою щільністю забудови.

Відбиття від водних поверхонь можуть бути неточними або відсутніми.

5. Вплив відбитих сигналів:

Відбиті сигнали можуть бути неточними, якщо лазерний імпульс відбивається від рухомих об'єктів, таких як транспортні засоби або люди.

Неточності можуть виникати через складні рельєфні структури або неоднорідні поверхні.

Лідарне знімання розрізняють за осередками знімання:

Батиметричний лідарне знімання - тип аерознімання через товщу води. Більшість батиметричних лазерних систем здатні одночасно збирати дані про висоту і глибину, що дозволяє проводити аерозйомку і земної, і водної поверхні. При зйомці батиметричного лідаром інфрачервоне світло відбивається від земної або водної поверхні, повертається до літального апарату, тоді як випромінювання додаткового зеленого лазера проникає через потік води. Аналіз двох різних імпульсів використовується для визначення водних глибин та висот берегових об'єктів суші. Батиметрична інформація дуже важлива для вивчення територій, розташованих недалеко від берегової лінії, портів, мілин. Також батиметрична інформація використовується для розміщення об'єктів на океанічному дні.

Розрізняють два основних види наземних лідарів: мобільний та стаціонарний. При мобільній зйомці система встановлюється на рухомий транспортний засіб. При стаціонарній зйомці система лідара зазвичай

встановлюється на штатив або інший нерухомий об'єкт. Обидві пристрої обладнані безпечними для очей лазерними установками. Система наземної лазерної зйомки дозволяє отримувати дуже густо розташовані точки, що мають високі точні характеристики, що дозволяє з високою точністю ідентифікувати об'єкти. Такі дрібні межі точок можна використовувати для керування спорудами та обладнанням, обстеження автомобільних і залізних доріг і навіть для створення тривимірних моделей міста, включаючи моделі не тільки міської забудови, але й внутрішніх приміщень будівель і споруд.

Мобільний лідар – це прилад для лазерної зйомки, який закріплюється на будь якій рухомій платформі. Системи мобільного лідара можуть включати різну кількість сенсорів, встановлених на рухомий транспортний засіб. Такі системи можуть бути встановлені на автомобілях, поїздах, морських та річкових судах. Мобільні системи, як правило, складаються з лазерного сенсора, камер, GPS та INS (внутрішньої навігаційної системи), так само як і системи, що застосовуються для лазерної аерозйомки. Мобільний лідар може бути використаний для аналізу дорожньої інфраструктури, пошуку розташування порушень ліній електропередач, розміщення освітлювальних щогл, а також дорожніх знаків уздовж автомобільних та залізних доріг.

Стаціонарний лідар – це прилад для лазерної зйомки, який закріплюється стаціонарно. Зазвичай сенсор лідара встановлюється на штатив і має повністю автономну лазерну та фото-зйомку системи. Такі системи можуть отримувати точкові точки, здійснюючи лазерну зйомку як всередині будівель і споруд, так і зовні. Цей тип лідарної зйомки зазвичай застосовується при виконанні інженерних досліджень, геодезичної зйомки та археології

Класам присвоюються цілочисельні значення кодів, що зберігаються в файлах LAS. 42 Коди класифікації були затверджені Американським товариством фотограмметрії і дистанційного зондування (American Society for Photogrammetry

and Remote Sensing - ASPRS) для форматів LAS 1.1, 1.2, 1.3 і 1.4. ArcGIS підтримує всі версії LAS.

## **Висновок**

У першому розділі розглянуто основні визначення цифрової моделі рельєфу, а також відмінності між цифровими моделями рельєфу, висоти та місцевості. Подання рельєфу в геоінформаційних системах у вигляді TIN або GRID моделей мають певні переваги та недоліки, а інструменти їх створення дуже схожі за алгоритмами. Застосування лідарних зніманих для створення ЦМР дозволяє отримати високоточні (до 1 см) та детальні (завдяки багатошаровому фіксуванню поверхні) моделі поверхні для значних за розміром площ з великою швидкістю.

**РОЗДІЛ 2.**  
**МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ЦМР ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО**  
**ЗНІМАННЯ**

## 2.1 Технологія створення ЦМР

Створення цифрової моделі рельєфу — це процес візуалізації та репрезентації земельної поверхні або будь-якого іншого територію у вигляді тривимірної моделі, що базується на геопросторових даних. Технології для створення цифрових моделей рельєфу широко використовуються в геодезії, картографії, геоінформатиці, геології, а також у виробництві інтерактивних карт і симуляторів.

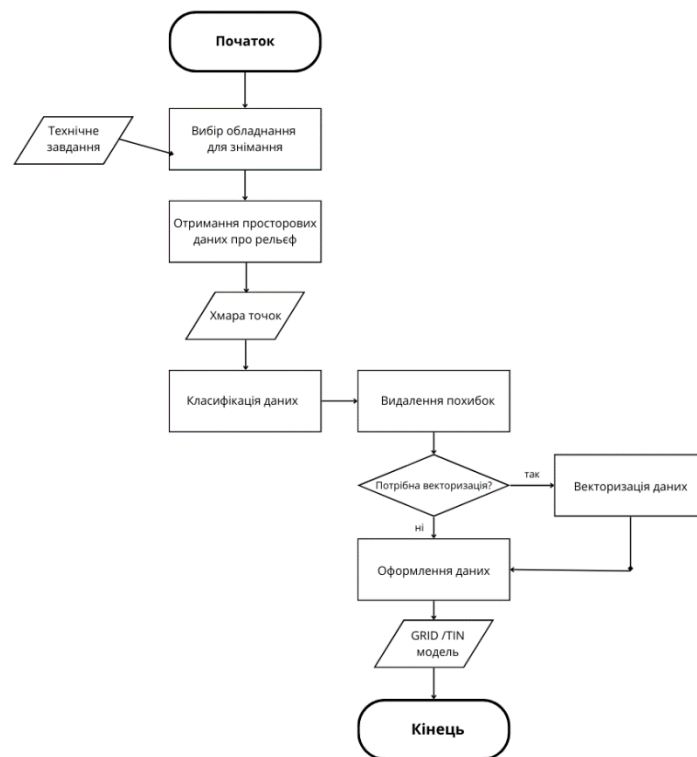


Рис.2.1. Блок схема створення ЦМР

Технологічною схемою побудови ЦМР з фотограмметричних вимірювань передбачено виконання таких етапів: підготовчі роботи; збір даних; обробка; візуалізація. Підготовчі роботи включають визначення мети робіт, необхідної точності і відповідно методу збирання даних – в залежності від площі поверхні, необхідного масштабу, наявних ресурсів. На цьому ж етапі виконується контроль

всіх вихідних даних. Збір даних виконується на ЦМР і полягає в отриманні: сітки точок, розміщених регулярно (досить часто до такої сітки додаються пункти з нерегулярною позицією, з метою підвищення точності ЦМР); скелетні лінії та інші лінії, що визначають особливості рельєфу поверхні (обриви, насипи, канави, рови та ін.); висотні точки (пiketи), що відображають характерні місця поверхні (вершини, сідловини, западини тощо); елементи гідрології – водотоки, ріки (що підрисовуються двома береговими лініями), водойми (в т.ч. озера, ставки); елементи інфраструктури (мости, віадуки труби для перепускання води та ін.); границі тих частин поверхні, для яких не можна отримати потрібну точність побудови ЦМР з об'єктивних причин (наприклад, територія покрита високою рослинністю).

Збір даних може проводитись в режимі автоматичному, півавтоматичному або ручному. Вибір методу залежить від кількох факторів, серед яких домінуючими є необхідна точність побудови ЦМР, тип території, степінь забудови та покриття рослинами чи деревами. Великий вплив мають фактори часу та коштів. Відомо, що методика ручного збору є суттєво дорожчою від автоматичного отримання даних, але їх точність в більшості випадків є вищою. Побудована ЦМР візуалізується на екрані у вигляді регулярної сітки з певним кроком з вказанням висот пікетних точок. Цей процес є керованим і «наглядним». Ключове значення тут відіграє підбір параметрів побудови ЦМР, які залежать від типу місцевості та масштабу картографування. Кожного разу необхідно проводити тестування заданих параметрів, щоби досягнути оптимальних результатів.

## **2.2 Огляд методів створення ЦМР**

На сьогодні існує багато методів, що дозволяють розв'язувати задачу створення ЦМР. Серед них – інтерполяція на основі триангуляції Делоне, метод зворотно зважених відстаней, метод природної околиці, методи сплайн-

апроксимації, трендів, радіальних базисних функцій, кригінг, метод «Топо в растр» та багато інших.

Інтерполяція на основі триангуляції Делоне за умови достатньо рівномірного розташування точок у точності моделює дії людини у процесі побудови рельєфу в горизонталях і обчисленні висот точок, у результаті чого досягається найбільш звична картина рельєфу. При цьому спочатку будується система трикутників, що не перекриваються, вершинами яких є вихідні точки. Поверхня подається як багатогранник з трикутними гранями, де проекція кожної грані на площину, що картографується, і є відповідний трикутник триангуляції, а висоти дорівнюють значенням  $z = 0$  в  $i$ -х точках. З безлічі точок на площині можуть бути утворені різні мережі триангуляції, і відповідно до цього будуть утворюватись різні поверхні. Виявляється, що оптимальною для моделювання є триангуляція Делоне, в якій для запобігання виникнення зломів ізоліній на ребрах полігонів для кожної вихідної точки будується локальний поліном першого або другого ступеня, і за допомогою триангуляції ці локальні поліноми «склеюються» в одну гладку поверхню. Найважливішою особливістю сучасного зображення рельєфу є необхідність відображення рельєфу за допомогою поверхні. ЦМР задається масивом просторових координат точок, які описують складну поверхню рельєфу місцевості. За способом розташування точок розрізняють регулярну, нерегулярну, структуровану. ЦМР, що будуються за поперечниками до магістрального ходу, передбачає створення системи поперечних профілів, на яких у місцях перегинів профільних ліній і розташовуються опорні точки моделі. Подання ЦМР на регулярній сітці GRID передбачає інтерполяцію значень висот і відоме як модель DEM (Digital Elevation Model). Регулярна ЦМР може бути розрахована на будь-яку область і мати будь-який розмір. У таких цифрових моделях точки з відомими просторовими координатами розташовуються у вершинах сітки квадратів, прямокутників, рівносторонніх або рівнобедрених

трикутників. Існують також цифрові моделі у вигляді системи поперечних профілів, проведених через встановлені відстані до заданої лінії (наприклад, повітряної лінії траси) та із заданим стандартним кроком розміщення точок у кожному. GRID-подання поверхні вважається функціональною поверхнею, оскільки для будь якого місця  $x, y$  зберігається тільки одне значення аплікати  $Z$ . Функціональні поверхні є 2,5-вимірними (2,5 D) поверхнями.

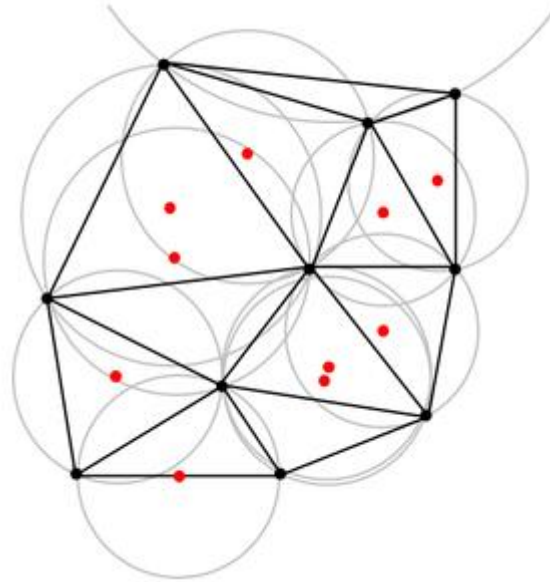


Рис.2.2. Інтерполяція на основі триангуляції Делоне

Метод ЗЗВ визначає значення комірки з використанням лінійно-зваженого поєднання безлічі точок вибірки. Вага, яка призначається, є функцією відстані вхідної точки від місця вихідної комірки: чим більша відстань, тим менша вага значень. Задані значення до невідомих точок розраховуються із середньозважених значень, доступних у відомих точках. Метод ЗЗВ є частковим, але найбільш поширеним випадком методу середнього вагового, або ковзного середнього вагового, який об'єднує ідеї близькості, що використовується, у свою чергу, методом полігонів Тиссена–Вороного з повільними змінами трендової поверхні.

Метод «Природної околиці», як і метод ЗЗВ, ґрунтується на ваговому усередненні значень. Автором цього методу є Робін Сібсон. Метод також відомий як інтерполяція Сібсона, або «захоплюючої області». Його основні властивості – будучи локальним, він використовує тільки підмножину зразків, які оточують точку запиту, і те, що інтерпольовані висоти гарантовано будуть у межах діапазону використовуваних зразків. Метод інтерполяції «Природної околиці» використовує середньозважене значення локальних даних, що ґрунтується на концепції координат природного околиці, обумовленої полігонами Тиссена. Цей метод має багато позитивних властивостей: може ефективно працювати з великими наборами вхідних точок; використовуватись як для інтерполяції, так і для екстраполяції, і загалом добре працювати з кластерами розподілених точок.

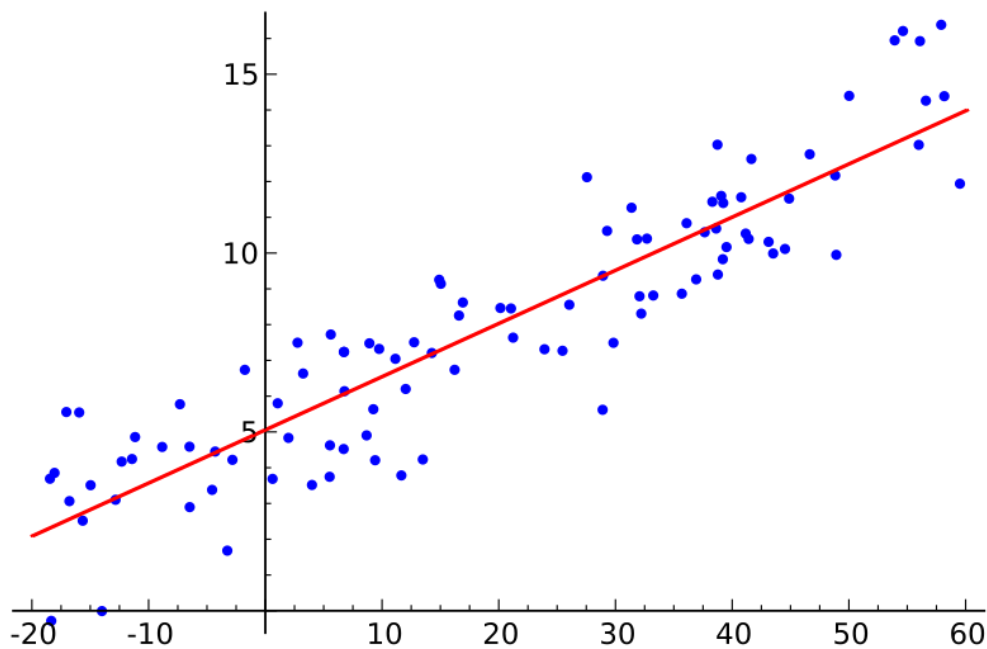


Рис.2.3. Метод «кригінгу»

Метод «кригінгу» – це вид узагальненої лінійної регресії, який використовує статистичні параметри для знаходження оптимальної оцінки у значенні мінімального середнього відхилення при побудові поверхонь, кубів і карт. В основі кригінгу (крайгінгу) лежить припущення, що відстані між точками вимірів

відображують просторову кореляцію, яку можна використати для формування поверхні. Цей метод отримав свою назву від прізвища Південно-Африканського геолога Д. Дж. Кріге, роботи якого лягли в основу розробки цієї технології інтерполяції. Іноді в російсько- і українськомовній літературі цей метод називають «кригінг» або «крайгінг». При побудові моделі використовується так званий «ординарний кригінг» з лінійною варіограмою, що є точним інтерполятором. Цей метод інтерполяції заснований на використанні методів математичної статистики. У його реалізації застосовується ідея змінної, яка змінюється від місця до місця з деякою видимою безперервністю, тому не може моделюватися тільки одним математичним рівнянням. Поверхня розглядається у вигляді трьох незалежних величин. Перша – тренд, що характеризує зміну поверхні в певному напрямку. Далі передбачається, що є невеликі відхилення від загальної тенденції, на зразок маленьких піків і западин, які є випадковими, але все ж пов'язаними один з одним просторово.

Відомі також простий кригінг, індикаторний кригінг, кокригінг, ординарний кригінг з анізотропією, нелінійний кригінг і деякі інші різновиди локально-стохастичної інтерполяції, хоча і менш поширені порівняно з описаними вище, проте такі, що мають свої сфери використання. Ординарний кригінг – найбільш загальний і широко використовуваний метод, що використовується за замовчуванням. Передбачається, що середнє значення константи невідомо. При універсальному кригінгу передбачається, що є домінуючий тренд у даних – наприклад, переважний вітер – і його можна моделювати детермінованою функцією, поліномом. Цей поліном отримується з вихідних вимірених точок, і автокореляція моделюється з довільних похибок.

Метод «Топо в растр» накладає обмеження, які забезпечують гідрологічно коректну ЦМР, яка містить пов'язані структури дренажу і правильно подає хребти й потоки за вхідними даними горизонталей. Він використовує ітеративний метод

інтерполяції кінцевих різниць, який оптимізує обчислювальні ефективності локальної інтерполяції без втрати безперервності поверхні глобальної інтерполяції. Він був спеціально розроблений для інтелектуальної роботи з вхідними горизонталями. За цим методом кращі результати будуть отримані тоді, коли всі вхідні дані зберігаються в тій самій плоскій (або планарній) системі координат і мають ті ж самі одиниці вимірювання висоти. Можуть бути використані широта-довгота; але в цьому випадку результати можуть бути неточними, особливо на високих широтах.

Метод інтерполяції на основі локальних поліномів передбачає використання як детермінованих методів інтерполяції поверхонь, що засновані на точках виміру або математичних формулах, так і геостатистичних методів інтерполяції, що засновані як на статистичних моделях, які враховують автокореляції, так і на математичних функціях. Характеристики інтерпольованої поверхні можна контролювати за допомогою обмеження вхідних точок, використовуваних для розрахунку значень вихідної комірки. Це може бути зроблено за рахунок обмеження кількості точок замірів або області, з якої беруться точки вимірів. Зазначення максимальної кількості точок вибірки використовуватиме точки, найближчі до місця вихідної комірки, поки не буде досягнута максимальна кількість комірок. При генеруванні поверхні також можна враховувати бар'єри, що відображають лінії розлому, скелі, річки та інші просторові об'єкти, які створюють лінійний розрив у поверхні. Багато інструментів інтерполяції включають бар'єри, які визначають і керують поведінкою поверхні у плані плавності й безперервності.

## 2.3 Використання лідарного знімання для моделювання ЦМР

Використання лідарного знімання для моделювання цифрової моделі рельєфу (ЦМР) надає можливість отримати високоточну інформацію про поверхню землі, що дозволяє виконувати різноманітні аналізи, включаючи класифікацію об'єктів, побудову полігональних моделей та вирішення інших завдань в геопросторовому середовищі.

Особливості лідарного знімання полягають у його високій точності та здатності проникати через різні природні та антропогенні перешкоди, такі як лісовий покрив, будівлі чи густий ґрунт. Це дає змогу отримати детальну тривимірну модель рельєфу та об'єктів на земній поверхні.

Щодо інструментальних засобів, для обробки даних лідарного знімання в ГІС використовуються різноманітні програмні пакети та інструменти. Наприклад, ESRI ArcGIS пропонує модулі для обробки лідарних даних, такі як ArcGIS Pro та ArcGIS Spatial Analyst. Крім того, існують відкриті інструменти, такі як GRASS GIS та QGIS, які також забезпечують функціональність для аналізу та обробки лідарних даних у контексті геопросторових досліджень.

Загалом, лідарне знімання є потужним інструментом для моделювання ЦМР та виконання різноманітних геопросторових аналізів, а інструментальні засоби ГІС надають можливість ефективно використовувати цей метод у практичних застосунках.

Джерелами даних для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) можуть бути різні види інформації, включаючи дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), аерофотознімки, фотограмметричні виміри, дані систем супутникового позиціонування, наземні геодезичні зйомки, результати промірних робіт та ехолотування, лазерне сканування місцевості, а також картографічні дані тощо. Широко використовується метод отримання даних шляхом сканування карт із

подальшою напівавтоматичною векторизацією за допомогою спеціальних програм-векторизаторів.

Створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) на основі даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) включає кілька етапів, таких як збір даних за допомогою супутникових або авіаційних датчиків (оптичних, радіолокаційних, лазерних), попередня обробка для видалення шумів та корекції помилок, генерація висотних моделей за допомогою методів стереопари або лідарних вимірювань, інтерполяція даних для створення неперервної поверхні, фільтрація та очищення для усунення артефактів, перевірка якості та валідація через порівняння з реальними даними, а також інтеграція готової ЦМР в геоінформаційні системи для подальшого використання.

Плюси методу:

Велика територія охоплення: ДЗЗ дозволяє отримувати дані про великі площі земної поверхні, що робить цей метод особливо корисним для регіонального та глобального моніторингу.

Висока точність: Використання лідарних систем та високоточних супутникових датчиків дозволяє отримувати дані з дуже високою просторовою роздільною здатністю та точністю.

Оперативність: ДЗЗ забезпечує регулярне та швидке оновлення даних, що важливо для моніторингу динамічних процесів, таких як ерозія, повені, зсуви.

Недоступні або важкодоступні місця: Можливість отримання даних з регіонів, куди важко або неможливо дістатися наземними методами.

Різноманітність даних: Можливість використання різних видів датчиків для отримання багатоспектральних, радіолокаційних та лазерних даних, що дозволяє отримувати комплексну інформацію про рельєф.

Мінуси методу:

Висока вартість: Отримання та обробка даних ДЗЗ можуть бути дорогими, особливо коли йдеться про використання високотехнологічних супутникових або авіаційних систем.

Чутливість до погодних умов: Оптичні та деякі радіолокаційні системи можуть бути обмежені погодними умовами, такими як хмарність або дощ.

Необхідність складної обробки даних: Процес обробки даних ДЗЗ включає численні кроки для корекції, інтерполяції та фільтрації, що потребує значних обчислювальних ресурсів та кваліфікованих фахівців.

Артефакти та аномалії: Дані можуть містити артефакти або аномалії, які потребують додаткової обробки для усунення, що може вплинути на точність кінцевої моделі.

Валідація даних: Необхідність у порівнянні та перевірці отриманих моделей з іншими достовірними джерелами даних, що може бути складним і трудомістким процесом.

Використання даних дистанційного зондування Землі для створення цифрової моделі рельєфу має свої переваги у вигляді широкого охоплення та високої точності, але також стикається з викликами, пов'язаними з вартістю, складністю обробки та впливом погодних умов.

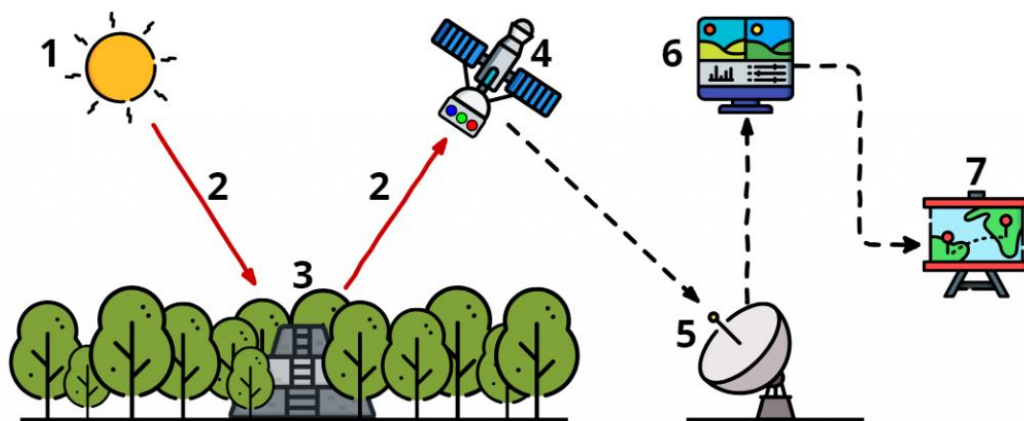


Рис. 2.4. Виконання лідарного знімання

Створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) на основі фотограмметричних вимірів включає процес використання фотографічних зображень для отримання тривимірної інформації про земну поверхню. Спершу проводиться аерофотозйомка або наземна фотозйомка з різних кутів, забезпечуючи перекриття зображень (60-80%), щоб можна було виконати стереоскопічний аналіз. Перед обробкою фотознімків камери калібруються для визначення внутрішніх параметрів, таких як фокусна відстань і спотворення лінз.

Використовуючи стереопари – пари зображень, зроблених з різних точок, спеціалізоване програмне забезпечення визначає відповідні точки на обох зображеннях і обчислює їх висоту, що дозволяє створити тривимірну модель. Після цього тривимірні точки вирівнюються та прив'язуються до глобальної системи координат за допомогою відомих геодезичних точок або GPS-даних. На основі тривимірних точок будується триангуляційна сітка (TIN), яка представляє поверхню рельєфу, дозволяючи отримати неперервну модель. Інтерполяція допомагає заповнити прогалини, а фільтрація – згладити модель і видалити шуми чи артефакти.

Готова модель перевіряється на точність шляхом порівняння з іншими джерелами даних, такими як наземні геодезичні зйомки або картографічні матеріали. Плюси цього методу включають високу точність і деталізацію, особливо при використанні високоякісних камер, а також відносну швидкість процесу, що робить його ефективним для картографування невеликих і середніх територій. До того ж, отримані зображення можна використовувати для оцінки стану об'єктів або моніторингу змін. Проте, метод залежить від погодних умов, таких як освітлення і хмарність, що може вплинути на якість зображень. Для великих територій потрібно багато зображень і часу на їх обробку, а обробка даних вимагає висококваліфікованого персоналу. У густо забудованих або лісистих районах перекриття об'єктів, таких як будівлі або дерева, може ускладнити отримання точних даних про рельєф.

Таким чином, фотограмметрія є потужним методом для створення цифрової моделі рельєфу, що забезпечує високу точність і деталізацію, але потребує сприятливих умов і спеціальних знань для успішного виконання.

Створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) на основі наземного геодезичного знімання включає кілька важливих етапів, що забезпечують точність та деталізацію отриманих даних. Цей метод використовує різні геодезичні прилади та техніки для вимірювання координат точок земної поверхні.

Першим кроком є планування геодезичних робіт. Визначаються точки, які будуть вимірюватись, та обираються методи вимірювання (наприклад, тахеометрія, GNSS-зйомка, нівелювання). Потім проводиться польове обстеження місцевості для визначення умов роботи і можливих перешкод.

Після цього здійснюється збір даних. За допомогою тахеометрів або GNSS-приймачів (глобальних навігаційних супутникових систем) вимірюються координати точок на поверхні землі. Тахеометри дозволяють вимірювати відстані та кути, що дає змогу точно визначити положення кожної точки в просторі. GNSS-приймачі використовуються для визначення координат за допомогою сигналів від супутників, що забезпечує високу точність навіть на великих територіях.

Дані вимірювань обробляються та коригуються для досягнення необхідної точності. Проводиться вирівнювання та узгодження даних з використанням відомих точок на місцевості (опорних точок). Це включає використання методів найменших квадратів для мінімізації помилок вимірювань.

Наступним етапом є створення тривимірної моделі. На основі вимірних точок будується триангуляційна сітка (TIN), що представляє рельєф місцевості. Виконується інтерполяція для заповнення прогалів між точками, що дозволяє отримати неперервну поверхню. Для підвищення точності моделі можуть використовуватися додаткові дані, такі як знімки з дронів або аерофотознімки.

Готова цифрова модель рельєфу перевіряється на точність шляхом порівняння з іншими даними або польовими вимірами. Це допомагає виявити і

виправити можливі помилки або неточності. Модель інтегрується в геоінформаційні системи (ГІС) для подальшого використання у різних додатках, таких як планування будівництва, моніторинг земельних ресурсів, аналіз ризиків природних катастроф.

Плюси методу:

**Висока точність:** Наземні геодезичні вимірювання забезпечують високу точність даних, що особливо важливо для детальних проектів та інженерних робіт.

**Деталізація:** Цей метод дозволяє отримувати детальну інформацію про рельєф навіть на складних та малих ділянках.

**Незалежність від погодних умов:** Наземні вимірювання можуть проводитись у будь-яких погодних умовах, на відміну від методів, що залежать від якості зображень або сигналів.

Мінуси методу:

**Трудомісткість:** Процес збирання даних є досить трудомістким і вимагає значних зусиль та часу, особливо на великих територіях.

**Вартість:** Вартість проведення наземних геодезичних робіт може бути високою через необхідність використання спеціалізованого обладнання та залучення кваліфікованих фахівців.

**Обмеження в доступі до місцевості:** У деяких випадках доступ до певних ділянок може бути обмеженим або небезпечним, що ускладнює збирання даних.

Таким чином, створення цифрової моделі рельєфу на основі наземного геодезичного знімання забезпечує високу точність і деталізацію, але потребує значних ресурсів і часу. Цей метод є ефективним для проектів, де необхідна максимальна точність і де доступ до місцевості не є проблемою.

Лідарне знімання (LiDAR) має кілька суттєвих переваг перед методами створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) на основі дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), фотограмметрії та наземного геодезичного знімання. Лідар забезпечує надзвичайно високу точність вимірювань, здатну визначати рельєф із

точністю до кількох сантиметрів, що перевершує можливості багатьох методів фотограмметрії та деяких видів дистанційного зондування. Лідарні імпульси можуть проникати крізь листя та інші перешкоди, забезпечуючи точні вимірювання земної поверхні навіть у густо зарослих районах. Це робить LiDAR особливо корисним для лісистих територій, де фотограмметрія може бути менш ефективною. LiDAR може швидко збирати великі обсяги даних за короткий час, що значно підвищує ефективність збору даних порівняно з наземними геодезичними зніманнями, які є більш трудомісткими та часозатратними. Хоча лідарні системи не працюють у сильно дощову чи туманну погоду, вони менш залежать від умов освітлення, ніж оптичні системи фотограмметрії. LiDAR може працювати вдень і вночі, що підвищує гнучкість збору даних. Лідарні системи, встановлені на літаках або дронах, можуть охоплювати великі території з високою швидкістю та деталізацією, що робить їх ефективними для регіональних і навіть національних масштабів зйомки. LiDAR генерує дуже густі хмари точок, що дозволяє створювати детальні цифрові моделі рельєфу і виявляти дрібні деталі місцевості, такі як малі структури або зміни рельєфу.

Порівняно з фотограмметрією, лідар перевершує її у точності та здатності проникати крізь рослинність. Фотограмметрія залежить від високоякісних зображень і потребує хороших умов освітлення та видимості, тоді як лідар менш залежить від цих факторів і забезпечує більш точні результати в складних умовах. Наземне геодезичне знімання може бути дуже точним, але потребує більше часу та ресурсів для охоплення великих площ, тоді як лідар значно швидше збирає дані на великих територіях і менш трудомісткий. ДЗЗ-методи, такі як супутникові знімки, зазвичай мають нижчу роздільну здатність і точність порівняно з лідаром. Лідар також здатен забезпечувати точні дані в умовах густої рослинності, чого не завжди можна досягти за допомогою супутникових методів.

Візуалізація даних лідарного знімання може здійснюватися за допомогою різних програмних засобів, які пропонують інструменти для обробки, аналізу та

візуалізації тривимірних даних. Основні етапи процесу візуалізації включають імпорт даних, їх обробку, створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) та візуалізацію. Нижче наведено деякі з найпоширеніших програмних засобів, що використовуються для цих цілей.

LAStools – це набір інструментів для обробки даних LiDAR, який включає різноманітні утиліти для фільтрації, класифікації, перетворення та візуалізації лідарних даних. Використовується для обробки великих обсягів даних і може інтегруватися з іншими програмами, такими як ArcGIS.

ArcGIS від компанії Esri є потужною платформою для роботи з геопросторовими даними. Для візуалізації даних LiDAR у ArcGIS можна використовувати модуль ArcGIS Pro, який підтримує імпорт лідарних даних у форматі LAS. ArcGIS дозволяє створювати цифрові моделі рельєфу, тривимірні візуалізації та аналіз поверхонь. Крім того, ArcGIS має інструменти для класифікації та обробки лідарних даних.

Global Mapper є гнучким програмним забезпеченням для обробки і візуалізації геопросторових даних, включаючи лідарні. Підтримує широкий спектр форматів даних, дозволяє створювати цифрові моделі рельєфу, аналізувати поверхню та створювати 3D-візуалізації. Інструмент також включає модулі для обробки лідарних даних, такі як класифікація точок та фільтрація.

CloudCompare – це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим кодом, спеціально розроблене для обробки тривимірних хмар точок, включаючи лідарні дані. CloudCompare надає інструменти для візуалізації, обробки, порівняння та аналізу хмар точок. Підтримує роботу з великими обсягами даних і дозволяє створювати високоякісні 3D-візуалізації.

QGIS є безкоштовним і відкритим географічним інформаційним системним (ГІС) програмним забезпеченням, яке також підтримує роботу з лідарними даними через різні плагіни, такі як LAStools або PDAL (Point Data Abstraction

Library). QGIS дозволяє імпортувати, обробляти та візуалізувати лідарні дані, створювати цифрові моделі рельєфу та виконувати аналіз поверхонь.

TerraSolid – це потужний інструмент для обробки лідарних даних, який працює на платформі Bentley MicroStation. TerraSolid включає кілька модулів, таких як TerraScan, TerraModeler і TerraMatch, які дозволяють виконувати різні задачі з обробки та візуалізації лідарних даних. TerraScan використовується для обробки та класифікації хмар точок, TerraModeler – для створення цифрових моделей рельєфу та поверхонь, а TerraMatch – для калібрування та вирівнювання лідарних даних. Це програмне забезпечення підтримує широкий спектр функцій для роботи з великими обсягами даних та створення високоточних моделей.

## **Висновки**

В загальному вигляді технологічна схема створення ЦМР включає такі етапи: підготовчі роботи, збір даних, обробка, візуалізація. При використанні у якості методу збору даних лідарні знімання, етап оброблення буде мати такі особливості: первинна обробка хмари точок, класифікація хмари точок, векторизація ЦМР. В розділі також розглянуто класичні алгоритми інтерполяції дискретних даних для створення ЦМР. Застосування хмари точок для моделювання рельєфу потребує спеціалізованих програмних засобів, огляд найпоширеніших з них наведено в підрозділі 2.3.

**РОЗДІЛ 3.**  
**ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО**  
**ЗНІМАННЯ**

### 3.1 Опис вихідних даних та завдання

Практична частина дипломної роботи виконана в ТОВ «Нпара», під час роботи над проектом оброблення лідарних знімачь для векторизації об'єктів дорожньої мережі. Територія об'єкта робіт належить до регіону Стокгольм та розташована на північному узбережжі, вона охоплює різноманітні ландшафтні форми, від гірських пасм до плоских долин і озер. Гірські угіддя створюють складний топографічний рельєф, що впливає на мікроклімат та розподіл рослинності. Процес сканування території був проведений з використанням системи сканування Airborne LIDAR, забезпечили вимірювання висот, рельєфу та покриття поверхні з точністю до 3 см. Процес сканування включав розстановку аеронавігаційних пунктів для забезпечення повного охоплення території, а також використання спеціалізованого програмного забезпечення для первинної обробки отриманих даних. Таким чином, вихідними даними є хмара точок щільністю 18 точок/м<sup>2</sup>.

Етапи оброблення лідарних знімачь:

#### 1. Класифікація вихідних даних

Вихідна хмара точок потребує класифікації. Застосовується система класифікації, що включає наступні категорії:

- Некласифіковані точки
- Грунт
- Шуми
- Водна гладь
- Мости

#### 2. Видалення шумів

Для початку видаляються шуми та інші точки, що не формують об'єкти:

Classify Low Points – визначає точки та групи точок, що знаходяться далеко від основного скупчення.

Classify Isolated Points – виявляє точки, що потенційно не можуть формувати об'єкти.

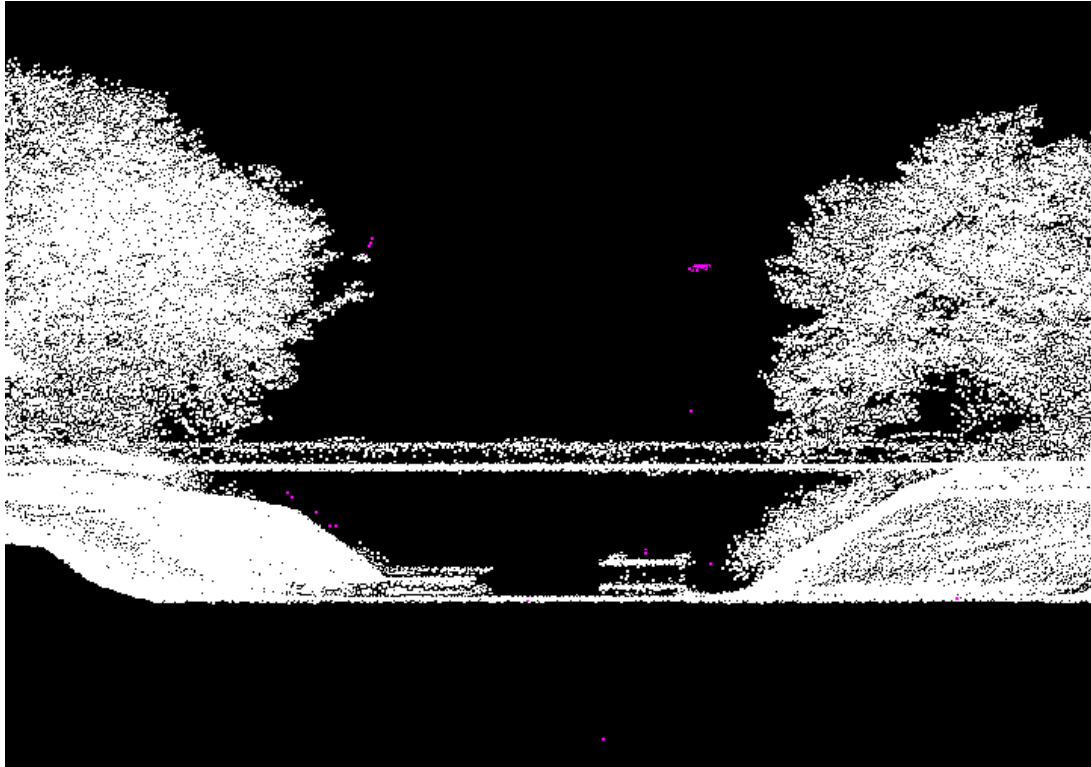


Рис. 3.1. Вигляд з виділеними шумами

### 3. Класифікація ґрунту

Оскільки виділення рослинності не є критичним, застосовується інструмент Classify Ground, який налаштовується з урахуванням:

Max building size – максимальний розмір плоских поверхонь, що не вважаються ґрунтовим покривом (наприклад, 60 для незабудованих місцевостей).

Terrain angle – максимальний кут нахилу для коректного розпізнавання перепадів висот.

Iteration angle та Iteration distance – параметри ітерацій для класифікації.

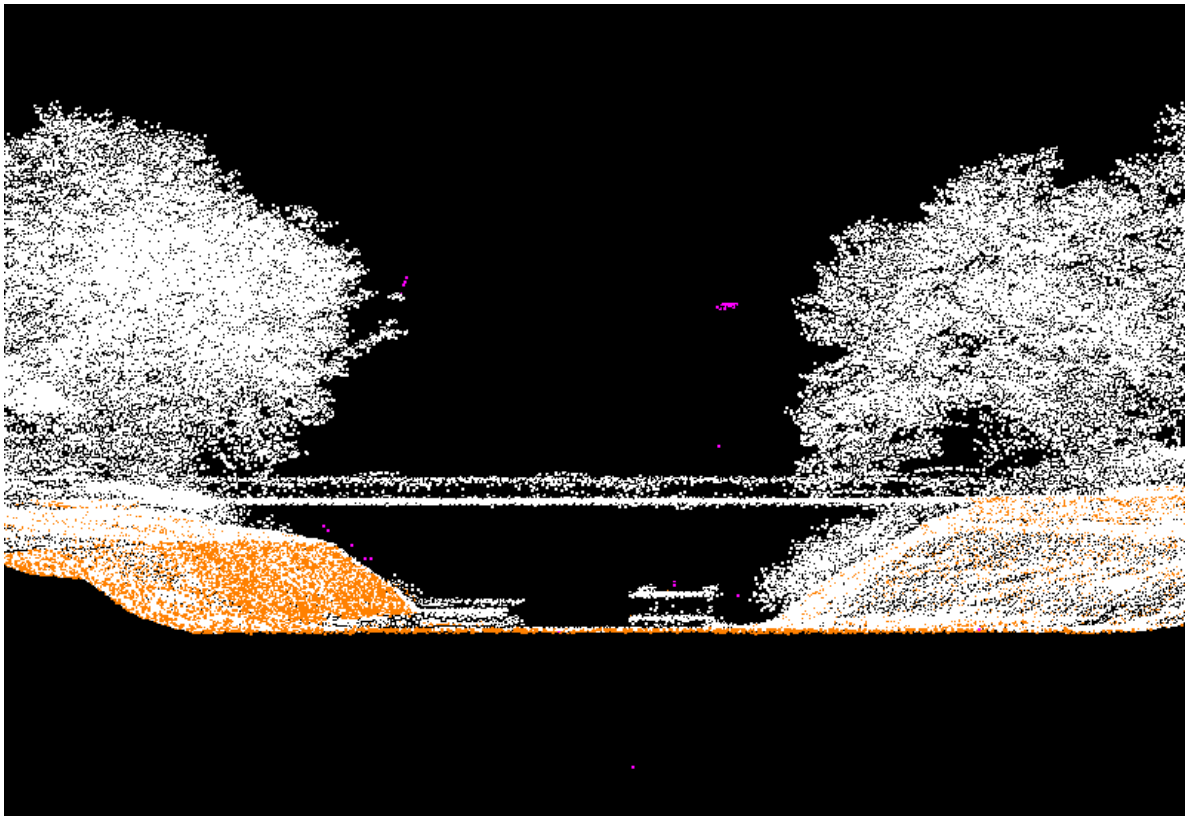


Рис. 3.2. Вигляд після класифікації ґрунту

#### 4. Ручна класифікація

Після автоматичної класифікації проводиться ручна перевірка та виправлення помилок. Для цього створюється проміжна модель рельєфу за допомогою Create editable model, де використовується функція Display Shared Surface.

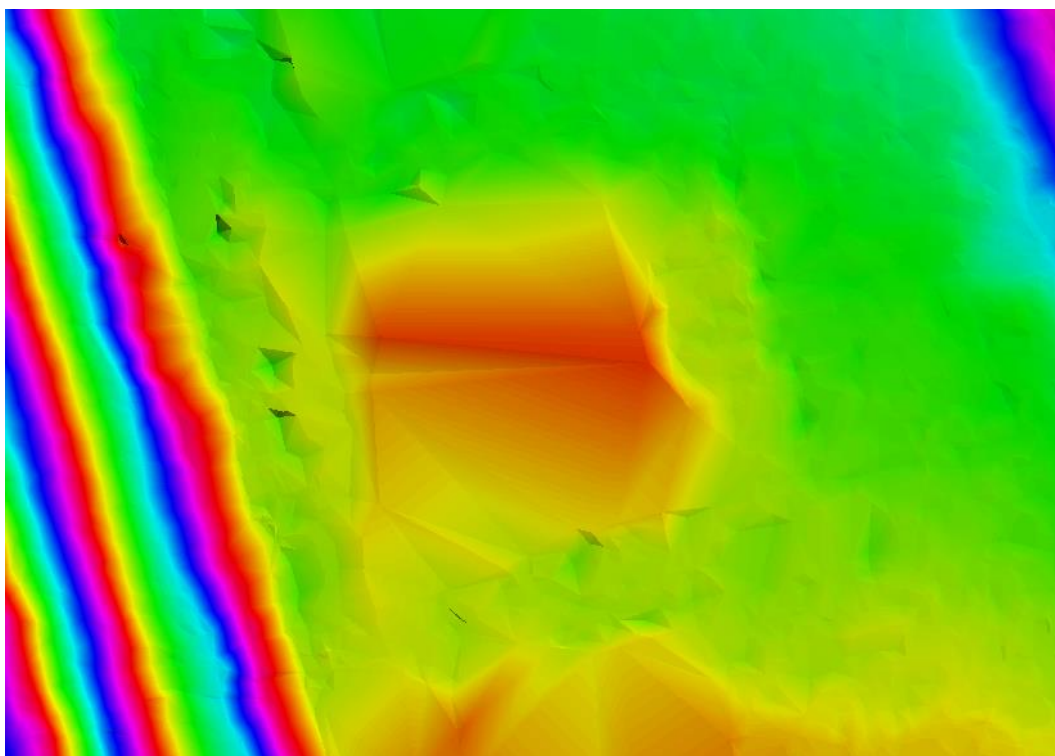


Рис. 3.3. Помилка автоматичної класифікації

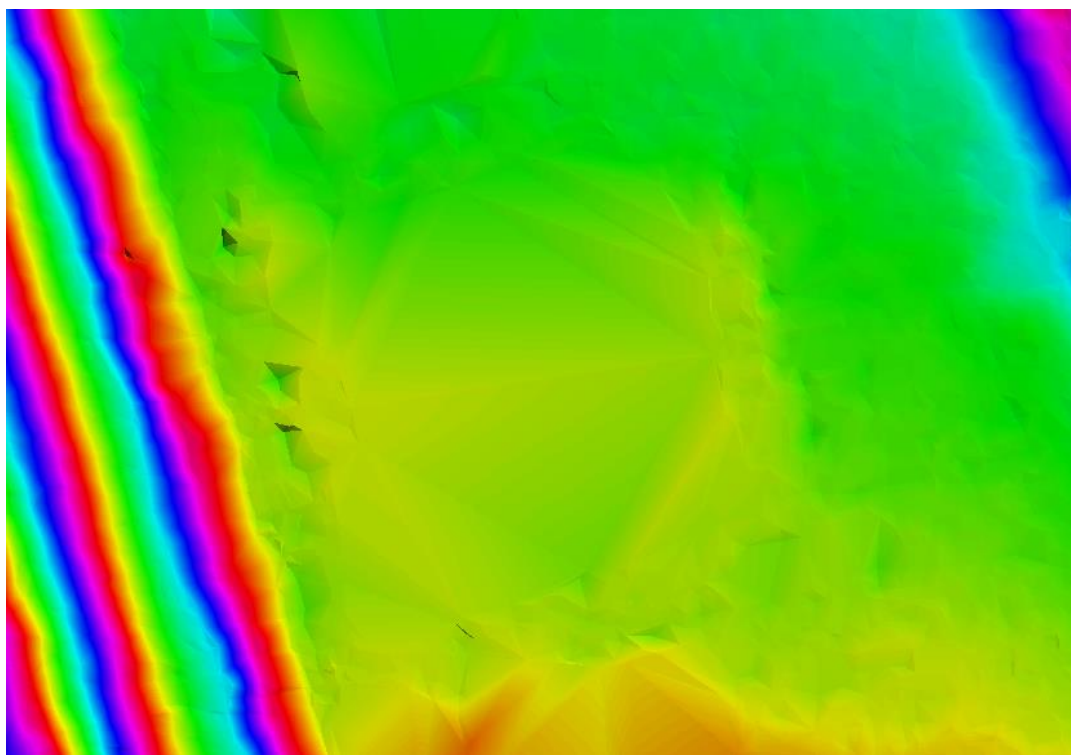


Рис. 3.4. Виправлення помилки автоматичної класифікації

## 5. Класифікація мостів

Використовуючи інформацію про інтенсивність точок, проводиться візуальний пошук та ідентифікація мостів.

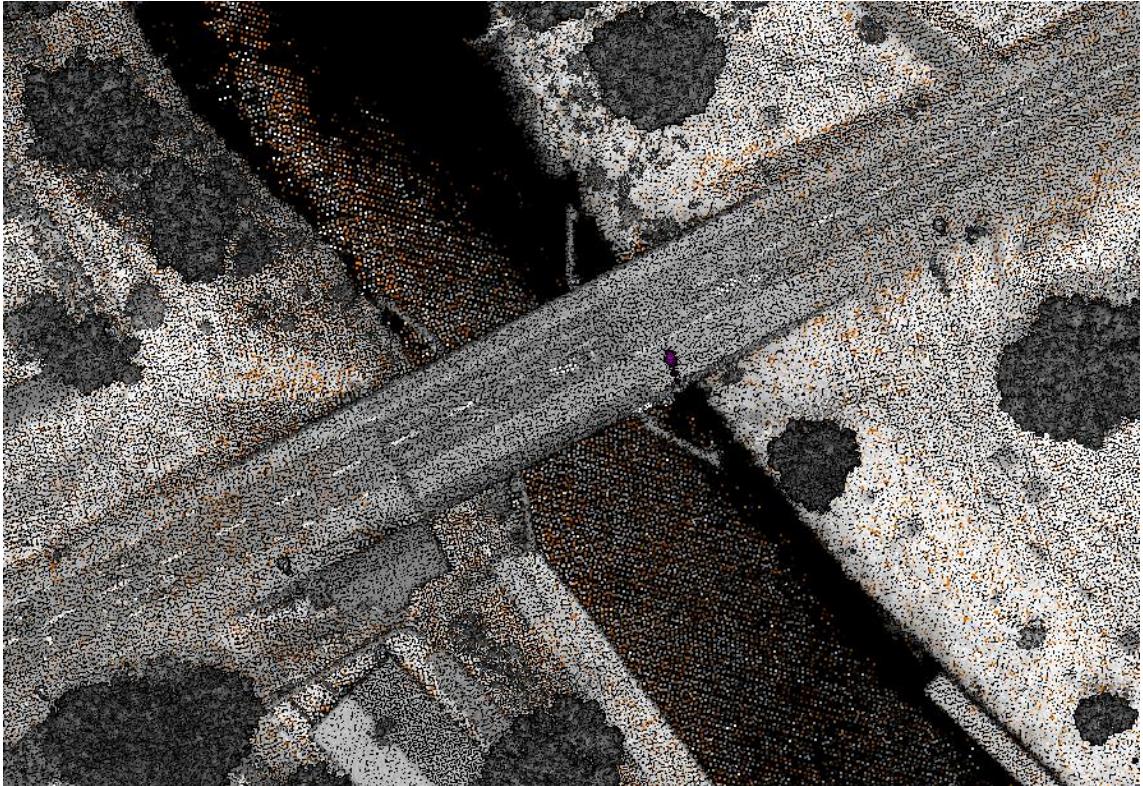


Рис. 3.5. Вигляд з увімкненим параметром інтенсивності

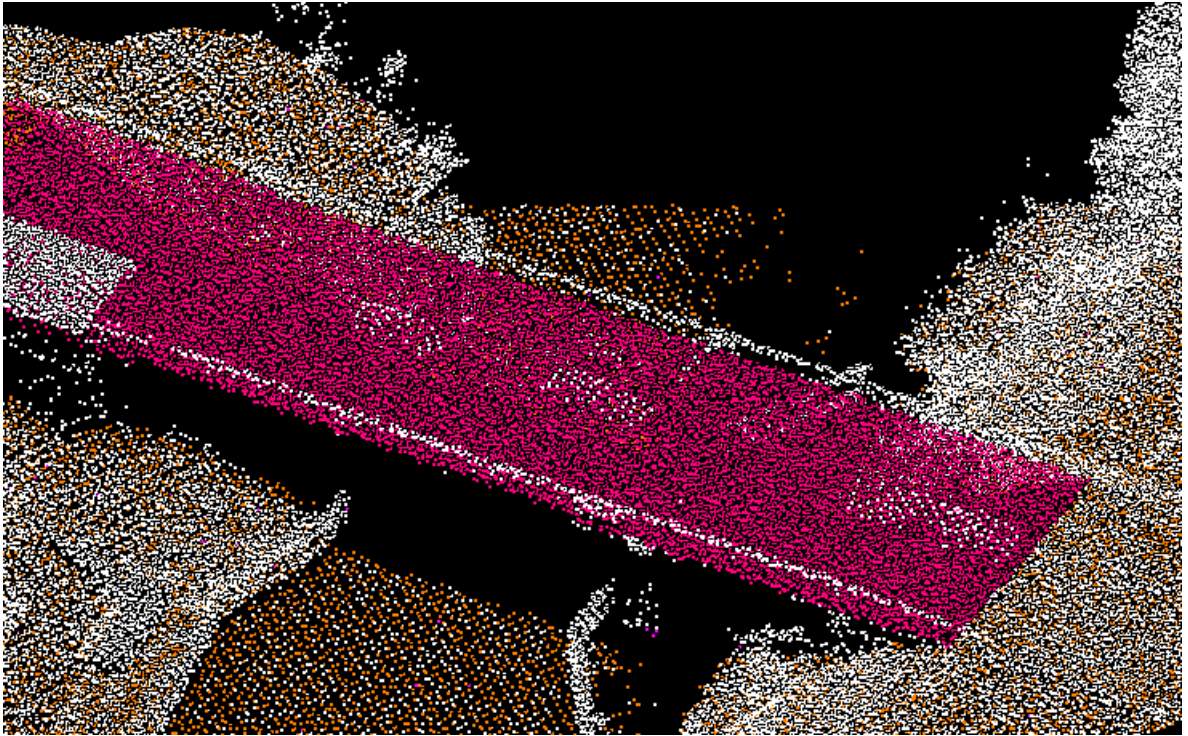


Рис. 3.6. Класифікований міст

#### 6. Класифікація водної поверхні

Для класифікації водної поверхні створюється векторний шар водного дзеркала за допомогою інструментів векторизації. Інтенсивність відображення точок допомагає визначити водну поверхню.

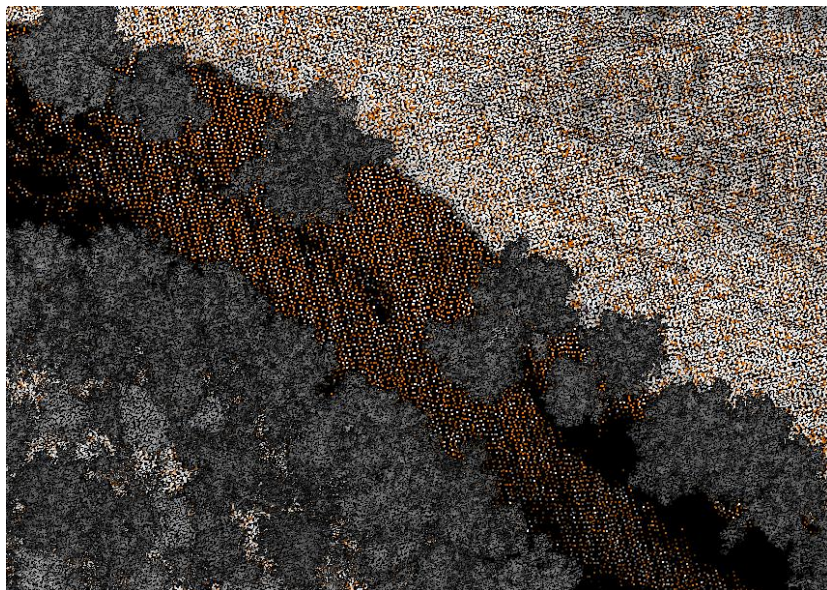


Рис. 3.7. Вигляд водної поверхні з параметром інтенсивність

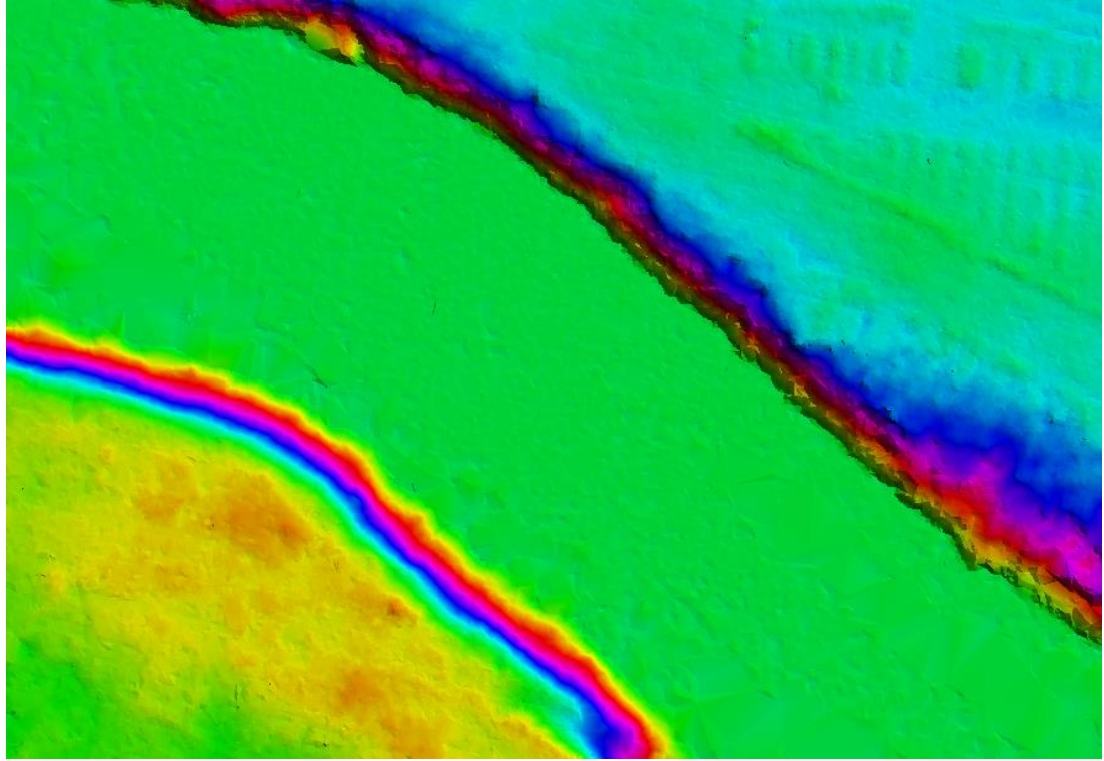


Рис. 3.8. Вигляд водної поверхні на ЦМР

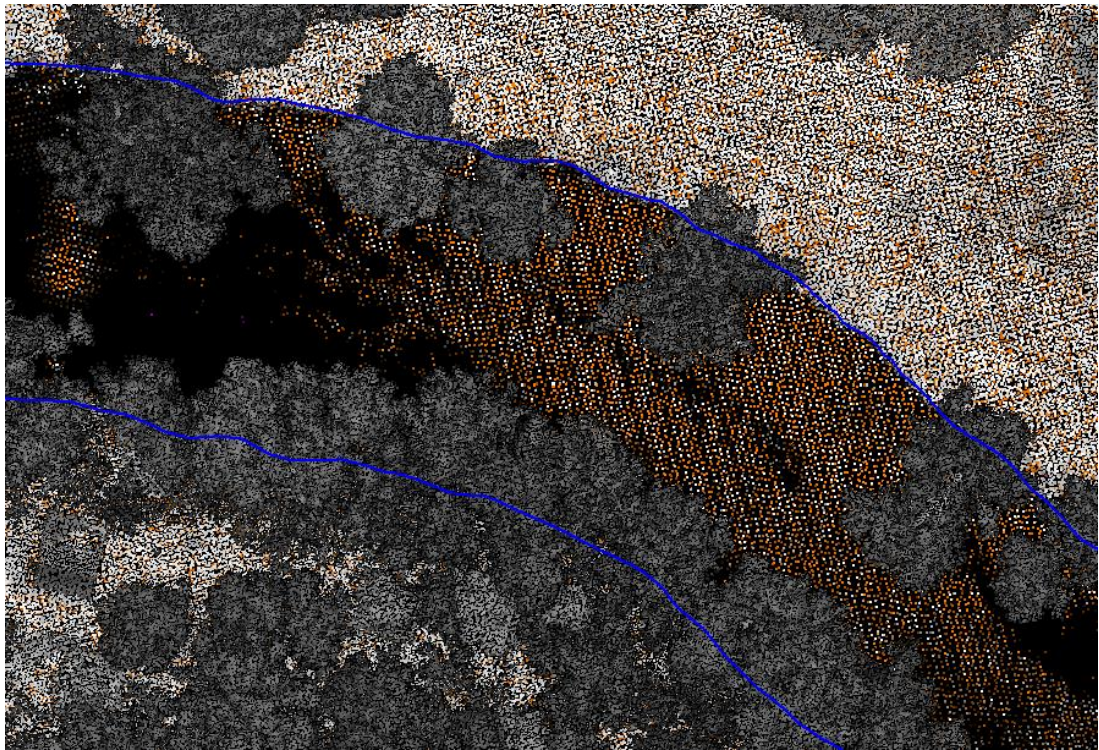


Рис. 3.9. Вигляд водної поверхні з векторним шаром

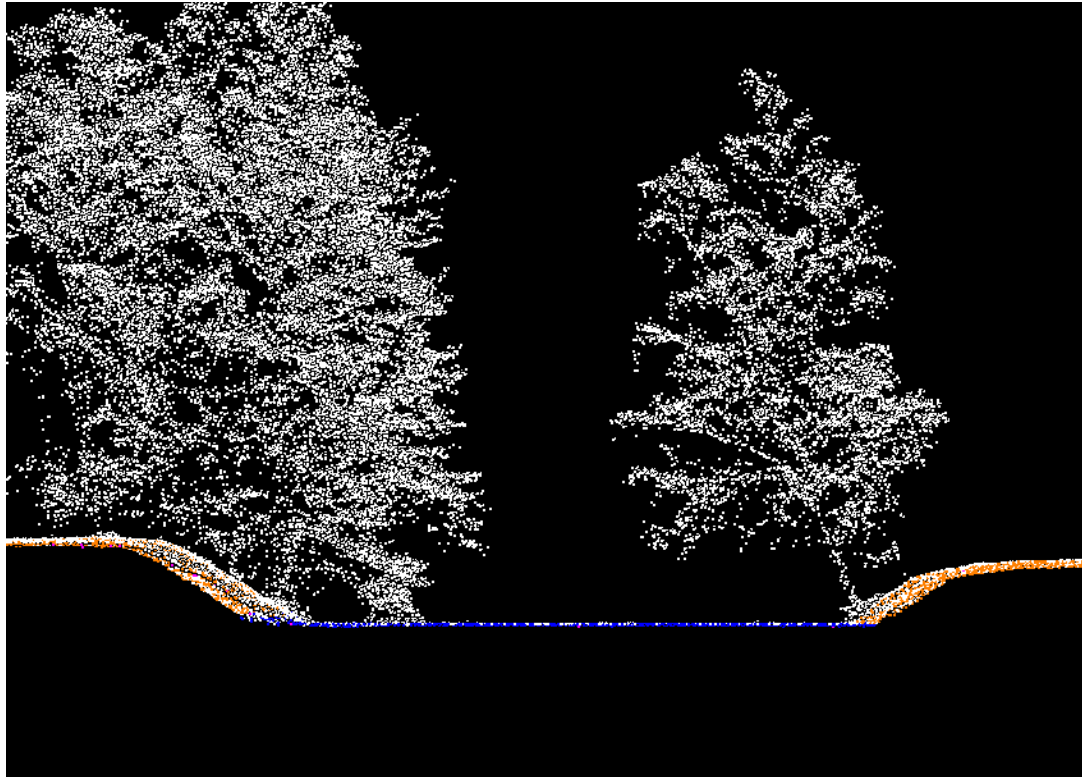


Рис. 3.10. Видгляд класифікованої поверхні у розрізі

Результатом етапу класифікації є категоризована хмара точок, що дозволяє створити точні цифрові моделі рельєфу, висот та місцевості, необхідні для подальших геопросторових аналізів та планування.

### **3.2 Моделювання ЦМР**

Проект включає створення трьох основних моделей:

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) – відображає топографію без врахування рослинності та інших об'єктів.

Цифрова модель висот (ЦМВ) – включає всі об'єкти на поверхні, такі як будівлі та рослинність.

Цифрова модель місцевості (ЦММ) – включає детальну інформацію про всі особливості ландшафту.

Побудова моделей рельєфу.

1) Цифрова модель рельєфу (ЦМР) за визначенням є відображенням геоморфологічних особливостей території без врахування висоти об'єктів, зокрема рослинності, дерев чи будівель (рис. 3.11.).

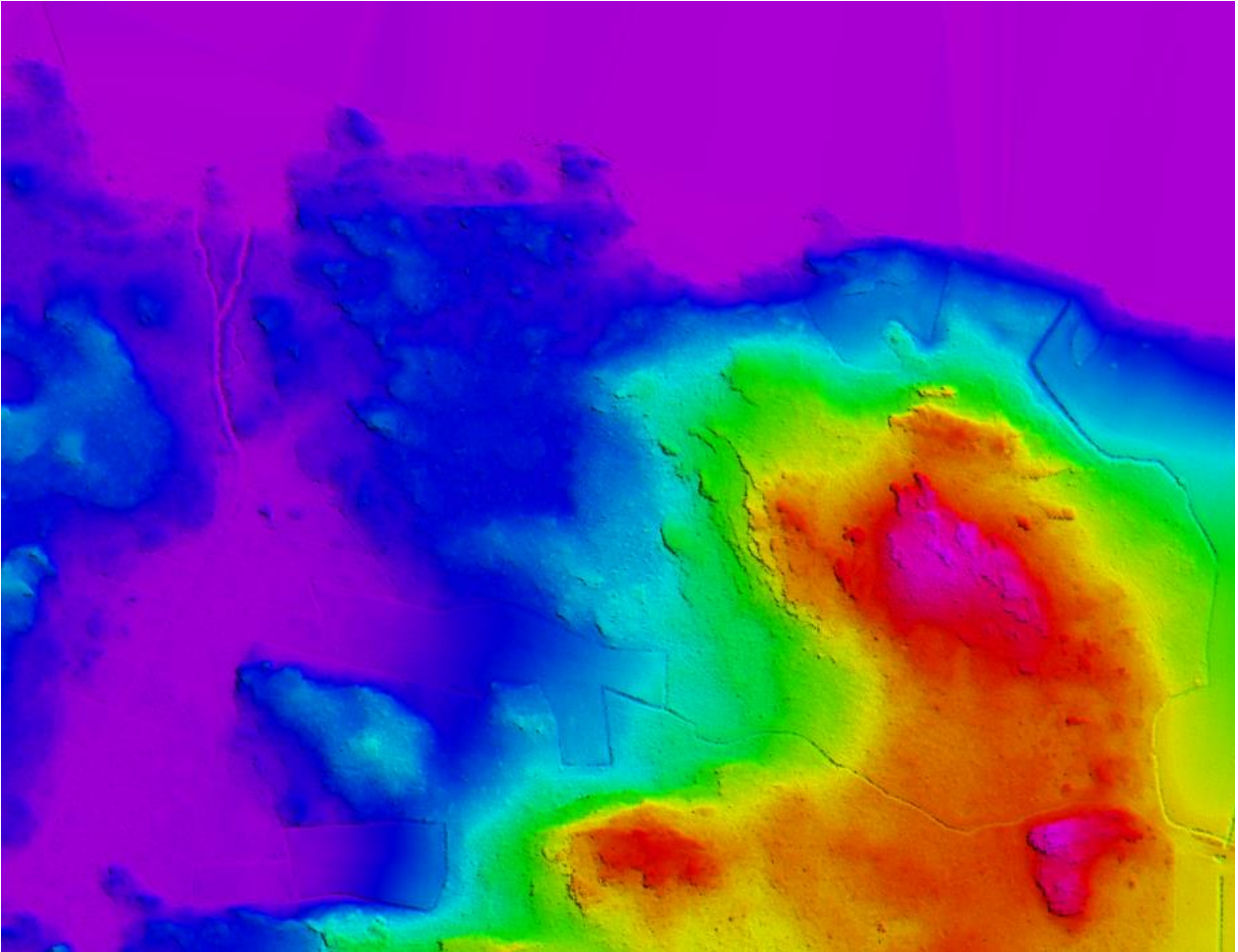


Рис. 3.11. Цифрова модель рельєфу

2) Цифрова модель висот (ЦМВ) включає значення висот всіх об'єктів на поверхні, в тому числі будівлі та рослинність, та використовується для планування міських територій, проектування інфраструктури та просторового аналізу впливу об'єктів на оточуючу територію (рис. 3.12.).

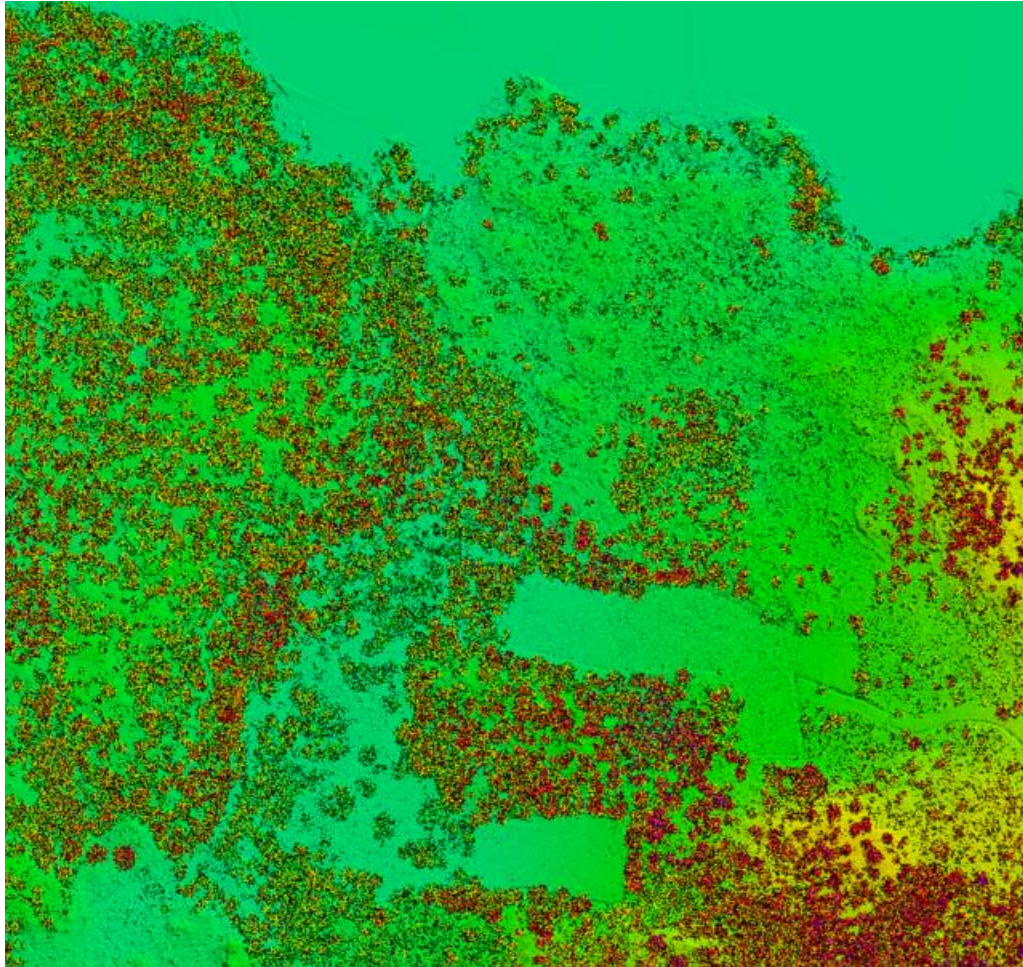


Рис. 3.12. Цифрова модель висот

3. Цифрова модель місцевості (ЦММ) є найбільш детальною моделлю рельєфу, що включає всі особливості ландшафту – мости, дороги, водні об'єкти тощо. Ця модель дозволяє здійснювати детальний аналіз території та використовується для різних інженерних та планувальних завдань великих масштабів (рис. 3.13.).

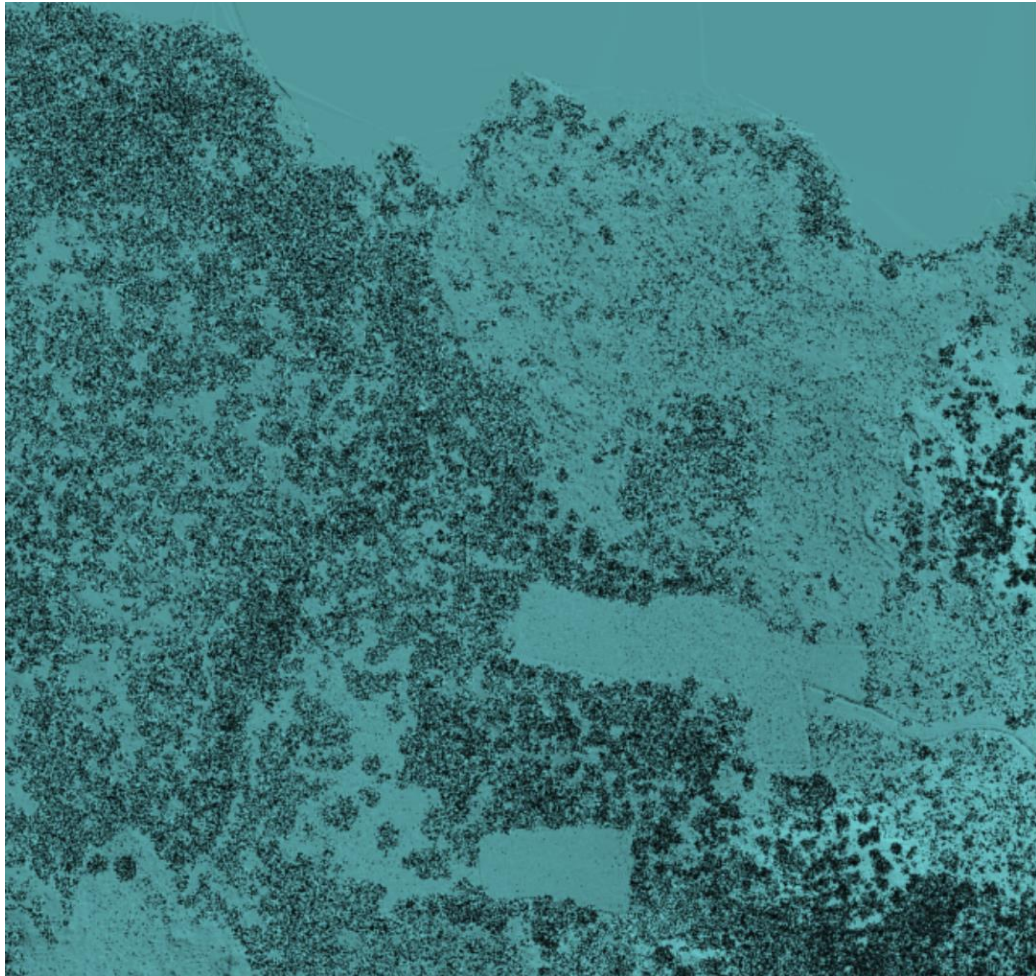


Рис. 3.13 Цифрова модель місцевості

Завдяки використанню сучасних методів обробки даних та класифікації, вдалося досягти точності моделей рельєфу до 3 см.

Отримані моделі рельєфу було використано для створення детальних та точних візуалізації території. Використання хмари точок дозволило побудувати наочні тривимірні моделі рельєфу, які є важливим інструментом для планування та аналізу. Створені моделі рельєфу використовувалися для різних практичних завдань, таких як:

Планування міської забудови

Проектування інфраструктури

Аналіз впливу природних та антропогенних факторів на територію

Визначення зон ризику, наприклад, зон підтоплення або зсувів

Виявлення геоморфологічних особливостей

Моделі рельєфу дозволили виявити та детально вивчити геоморфологічні особливості території, такі як схили, долини, гірські хребти тощо. Це сприяло кращому розумінню ландшафтних процесів та плануванню заходів для збереження природного середовища.

## **Висновки**

Практична частина роботи включала створення цифрової моделі рельєфу, цифрової моделі висот та цифрової моделі місцевості в програмному середовищі MicroStation на основі результатів лідарного знімання. Застосування хмари точок щільністю 18 точок/м<sup>2</sup> в якості вихідних даних дозволило досягнути високого ступеня автоматизації та точності до 3 см цифрових моделей.

## ВИСНОВОК

Мета роботи полягала в дослідженні процесу створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) на основі лідарного знімання, а також у порівняльному аналізі різних методів їх створення. Зокрема, робота мала на меті визначити переваги та недоліки використання лідарних даних для моделювання рельєфу, а також розробити рекомендації щодо їх застосування у практичних задачах.

У роботі було детально розглянуто основи моделювання рельєфу, включаючи визначення та відмінності між цифровою моделлю рельєфу (ЦМР), цифровою моделлю висот (ЦМВ) та цифровою моделлю місцевості (ЦММ). Проаналізовано способи подання рельєфу в геоінформаційних системах (ГІС), такі як нерегулярний набір точок, регулярні сітки (GRID), мережа трикутників (TIN) та ізолінії. Описано технологічний процес створення ЦМР за даними лідарного знімання, який включає збір вихідних даних, їх обробку та візуалізацію. Проведено порівняльний аналіз різних методів створення ЦМР, включаючи їх переваги та недоліки. Зокрема, було підкреслено високу точність та ефективність лідарного знімання у порівнянні з іншими методами.

На основі зібраних лідарних даних було виконано практичне моделювання рельєфу, що включало опис вихідних даних, процес моделювання та аналіз отриманих результатів. Таким чином, в роботі побудовано ЦМР, ЦМВ та ЦММ для території регіону Стокгольм із застосуванням інструментів Terra solid з точністю 3 см.

Практична частина роботи підтвердила, що лідарне знімання забезпечує високу точність моделей рельєфу, що є важливим для подальшого використання в містобудуванні, геологічних дослідженнях, екологічному моніторингу та інших галузях.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wood J. The geomorphologic characterization of Digital Elevation Models, 2001.
2. Продукти та дані Esri та партнерів. URL: <https://www.esri-cis.com/ru-ru/arcgis/products/index>
3. QGIS. URL: <https://qgis.org/ru/site/index.html>
4. Terrasolid. URL: <https://terrasolid.com/>
5. Water and ground classification. URL: <https://hmaragis.com/cases/water-and-ground-classification/>
6. Обробка LIDAR. URL: <https://tvis.com.ua/ua/products/obrobka-lidar/>
7. Гурьянова Л. В. Введение в ГИС / Л. В. Гурьянова. – Мн. : БГУ, 2008.
8. Іщук О. О. Просторовий аналіз в ГІС : навчальний посібник /О. О. Іщук, М. М. Коржнев, О. Є. Кошляков ; за ред. акад. Д. М. Гродзинського. – К. : ВПЦ "Київський університет".
9. Баранов Ю. Б. Геоинформатика : толковый словарь основных терминов / Ю. Б. Баранов, А. М. Берлянт, Е. Г.
10. Kemp K. K. Developing a curriculum in Geographic Information Systems: The National Center for Geographic Information and Analysis Core Curriculum project / K. K. Kemp // Journal of Geography in Higher Education. – 1991.
11. Серьогін Денис. Принципи обробки та тривимірного моделювання через лідарні дані для прикладних досліджень міського середовища / Денис Серьогін // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2022.
12. Костріков, С. В. Програмне забезпечення ГІС для LiDAR-технології дистанційного зондування в цілях аналізу урбогеосистем [Текст] / С. В. Костріков, Д. Л. Кулаков, К. Ю. Сегіда // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – 2014. – Вип. 19. – С. 45-52
13. Laser Doppler Velocimetry Applied to the Measurement of Local and Global Wind, J. M Vaughan and P. A. Forrester, Wind Engineering, Vol. 13 No. 1 1989

14. Лидар//Метеорологический словарь —Л.: Гидрометеиздат, 1974.
15. Lidar measurements taken with a large-aperture liquid mirror. 2. Sodium resonance-fluorescence system / P.S. Argall, O. N. Vassiliev, R. J. Sica, and et al// Applied Optics. — 2000. — Vol. 39, No. 15. — P. 2393—2400.
16. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere series, Springer series in optical sciences, vol. 102 / C. Weitkamp (Ed.). — New York: Springer, 2005. — 460 p.
17. Точки в пространстве. URL: <https://nplus1.com/material/2015/06/01/lidar-as-art>
18. LIDAR. URL: <https://omapwiki.orienteering.sport/glossary/lidar/>
19. LiDAR для археологічних розкопок і аналізу. URL: <https://api.visicom.ua/uk/posts/Lightdetection123123>

## ДОДАТКИ

Додаток А