

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем управління територіями
Кафедра інженерної геодезії

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Дем'яненко Р.А.

« » _____ 2023 року

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

«Дослідження точності БПЛА методів
при топографічному зніманні автомобільних доріг»
(Accuracy of UAV methods for topographic surveying of highways)

Виконав студент групи зГД-61м

193 «Геодезія та землеустрій»
(спеціальність)

193,01 «Геодезія»
(спеціалізація)

Бернацький Дмитро Вікторович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

Керівник: Медведський Ю.В.
(прізвище та ініціали)

доц., к.т.н.
(вчене звання, науковий ступінь)

Ідентичність підтверджую

Київ 2023 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем управління територіями
Кафедра інженерної геодезії

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

на тему:

«Дослідження точності БПЛА методів
при топографічному зніманні автомобільних доріг»
(Accuracy of UAV methods for topographic surveying of highways)

Бернацький Дмитро Вікторович
(прізвище, ім'я та по батькові студента повністю)

Київ 2023 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Інженерної геодезії

Освітній рівень: «магістр за ОПІ/ОНП»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: 193.01 «Геодезія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету ГІСУТ

Нестеренко О.В.

“ ___ ” _____ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Бернацький Дмитро Вікторович
(прізвище, ім'я та по батькові студента)

1. Тема роботи «Дослідження точності БПЛА методів при топографічному зніманні автомобільних доріг» (Accuracy of UAV methods for topographic surveying of highways) затверджена наказом ректора КНУБА № 2529/2 від “24” жовтня 2023 року.

2. Керівник роботи: к.т.н., доцент Медведський Юрій Вікторович
(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту: _____

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р. 1. Аналіз методики створення топографічних планів.

Р. 2. Методологія топографічного знімання автомобільних доріг БПЛА методами.

Р. 3. Використання БПЛА при створенні цифрових топографічних планів.

5. Графічний матеріал за розділами:

- Р. 1. Аналіз методів виконання топографічного знімання, переваги використання БПЛА методу, перспективи в порівнянні із іншими методами.
- Р. 2. Характеристики об'єкту спостереження, розрахунок точності, щільність перекриття, конфігурація опорних точок та їх прив'язка.
- Р. 3. Методики проведення дослідження з визначення точності, методика оцінки точності виконаних робіт, аналіз отриманих результатів.

6. Календарний план виконання роботи: а) наукова частина;

б) практична частина.

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1.	до 18.11.2023
Розділ 2.	до 30.11.2023
Розділ 3.	до 01.12.2023
Остаточне оформлення роботи	до 05.12.2023
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	до 07.12.2023
Попередній захист роботи на кафедрі	до 15.12.2023

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

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

8. Дата видачі завдання: «07» жовтня 2023 р.

Зав. кафедри ІГ

(підпис)

Дем'яненко Р.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Медведський Ю.В.

(прізвище та ініціали)

Студент

(підпис)

Бернацький Д.В.

(прізвище та ініціали)

Резюме(summary) <i>До атестаційної випускної роботи</i>		Бернацький Дмитро Вікторович	
<i>ЗВО</i>	Київський національний університет будівництва та архітектури		
<i>Тема</i>	Дослідження точності БПЛА методів при топографічному зніманні автомобільних доріг		
<i>Освітній ступінь</i>	Магістр за освітньо-науковою програмою		
<i>Факультет</i>	ГіСУТ		
<i>Кафедра</i>	Інженерної геодезії		
<i>Спеціальність</i>	193 «Геодезія та землеустрій»		
<i>Спеціалізація</i>	Геодезія		
<i>Керівник</i>	к.т.н. Медведський Ю.В.		
<i>Обсяг роботи</i>	Пояснювальна записка	Розділів	Креслень формату А1
	50	3	9
<i>Розділ 1</i>	<i>Аналіз методики створення топографічних планів</i> Проведено аналіз методів виконання топографічного знімання при реконструкції автомобільних доріг. Розглянуто переваги використання БПЛА методу при проведенні інженерно-геодезичних вишукувань та визначення вимог до точності		
<i>Розділ 2</i>	<i>Методологія топографічного знімання автомобільних доріг БПЛА методами</i> Визначено основні характеристики об'єкту спостереження. Розглянуто етапи виконання робіт. Проведено розрахунок точності БПЛА знімання та параметрів перекриття знімків. Визначено конфігурацію опорних точок та їх прив'язку до системи координат.		
<i>Розділ 3</i>	<i>Використання БПЛА при створенні цифрових топографічних планів</i> Визначено загальні принципи до оцінки точності проведених експериментів. Проведено аналіз результатів аерофотознімання шляхом порівняння з даними класичного тахеометричного знімання. Виконано порівняння поперечних профілів з тахеометричного знімання та аерофотозйомкою з прив'язкою до опорних точок		
<i>Висновки по роботі:</i>	За результатами аналізу отриманих даних можна стверджувати про відповідність до Інструкції з топографічного знімання виготовлених цифрових топографічних планів масштабу 1:1000. Отримані матеріали є достатніми для подальших проектних робіт. Також дане дослідження доводить, що при використанні БПЛА без RTK-модуля на борту, достатньо три опорних пункти на один кілометр лінійного маршруту, для отримання необхідної точності при виготовленні топографічних планів.		
<i>Ключові слова:</i> <i>Keywords:</i>	БПЛА, RTK, топографічний план, знімання доріг, точність, хмара точок, тахеометричне знімання UAV, RTK, topographic plan, road survey, accuracy, point cloud, Total station surveying		

Укладач _____

Д.В. Бернацький

Керівник _____

Ю.В. Медведський

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДИКИ СТВОРЕННЯ ТОПОГРАФІЧНИХ ПЛАНІВ.....	10
1.1 Аналіз методів виконання топографічного знімання при реконструкції автомобільних доріг.....	11
1.2 Переваги використання БПЛА методу при проведенні інженерно-геодезичних вишукувань та визначення вимог до точності.....	15
1.3 Перспективи використання даного методу в порівнянні із іншими.....	17
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТОПОГРАФІЧНОГО ЗНІМАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ БПЛА МЕТОДАМИ.....	20
2.1 Основні характеристики об'єкту спостереження.....	21
2.2 Підготовчі роботи.....	23
2.2.1 Розрахунок точності.....	24
2.2.2 Щільність перекриття.....	29
2.2.3 Конфігурація опорних точок та їх прив'язка.....	30
2.3 Попередній розрахунок точності аерофотозйомки.....	31
РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ПРИ СТВОРЕННІ ЦИФРОВИХ ТОПОГРАФІЧНИХ ПЛАНІВ.....	34
3.1 Методики проведення дослідження з визначення точності.....	35
3.2 Методика оцінки точності виконаних робіт.....	37
3.3 Аналіз отриманих результатів.....	38
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ГРАФІЧНІ ДОДАТКИ.....	513

ВСТУП

Зростання обсягів транспортних мереж та швидкий розвиток автомобільної інфраструктури вимагають нових, ефективних підходів до збору та обробки геодезичних даних.

Так у сучасному світі стрімко зростає роль технологій в геодезії та картографії, а використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відкриває широкі перспективи для вдосконалення методів топографічного знімання, забезпечуючи точні, ефективні та швидкі засоби отримання геодезичних даних.

Використання БПЛА у геодезії та картографії стає важливим інструментом, сприяючи відображенню змін у географічному просторі та полегшенню завдань планування та управління дорожньою інфраструктурою.

Серед інших БПЛА вирізняється Phantom 4 RTK, який об'єднує в собі високоякісну камеру та технологію Real-Time Kinematic (RTK), і є потужним інструментом для топографічного знімання.

Використання БПЛА стає невід'ємною частиною сучасних досліджень та практичного використання. Дана дипломна робота спрямована на вивчення точності методів топографічного знімання автомобільних доріг за допомогою БПЛА. Завдання включають аналіз результатів знімання, розробку оптимального режиму польоту, та розробку ефективних методів обробки отриманих даних.

Актуальність проблеми:

Технологічний розвиток в геоінформаційних технологіях: З використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стає можливим отримання високоточних геодезичних даних для топографічного знімання. Це є результатом швидкого розвитку сучасних технологій, що впливають на галузі геодезії та картографії.

Ефективність та швидкість вимірювань: Використання БПЛА дозволяє значно прискорити процес топографічного знімання, зменшити витрати часу та забезпечити високу точність даних. Це особливо важливо в контексті дорожнього будівництва та обслуговування автомобільних доріг.

Підвищення якості дорожніх робіт: Точні геодезичні дані, отримані за допомогою БПЛА, можуть сприяти підвищенню якості проектування та будівництва автомобільних доріг. Це може вплинути на безпеку дорожнього руху, ресурсозбереження та загальну стабільність дорожньої інфраструктури.

Розвиток транспортної інфраструктури: Аналіз точності методів топографічного знімання автомобільних доріг за допомогою БПЛА може сприяти розвитку та оптимізації транспортної інфраструктури, враховуючи сучасні вимоги до дорожнього будівництва та управління транспортним потоком.

Важливість геодезичних даних для аналізу та управління дорожньою мережею: З точки зору планування, управління та підтримки дорожньої інфраструктури, важливо мати точні та актуальні геодезичні дані. БПЛА можуть стати ключовим інструментом для отримання таких даних.

Мета дослідження:

Основною метою даного дослідження є вивчення точності та ефективності методів топографічного знімання автомобільних доріг, які застосовуються за допомогою безпілотних літальних апаратів, з фокусом на популярному БПЛА Phantom 4 RTK. Завдання включають аналіз результатів знімання, розробку оптимальних стратегій польоту, та розробку ефективних методів обробки отриманих даних.

Завдання дослідження:

1. Аналіз точності методів знімання:

- Вивчення результатів попередніх досліджень та визначення ступеня точності, яку можна досягти за допомогою БПЛА.

2. Оцінка впливу параметрів польоту:

- Визначення впливу висоти польоту, кута нахилу камери та інших параметрів на точність знімання.

3. Розробка оптимальних стратегій польоту:

- Розробка методики оптимального планування місій польоту для максимізації точності та ефективності.

4. Обробка отриманих даних:

- Розробка методів геореференціації та фотограмметричної обробки отриманих зображень.

5. Визначення висновків та рекомендацій:

- Формулювання висновків з дослідження та надання рекомендацій для практичного використання отриманих результатів.

Об'єкт та предмет дослідження:

Об'єктом даного дослідження є процес топографічного знімання автомобільних доріг за допомогою БПЛА, зокрема, Phantom 4 RTK. *Предметом* дослідження є точність та ефективність цих методів, а також можливості їхнього вдосконалення.

Практичне значення

В результаті проведення дослідження планується отримати об'єктивні дані про точність та ефективність використання БПЛА Phantom 4 RTK для топографічного знімання автомобільних доріг, а також розробити рекомендації для покращення методів, збору та обробки даних.

Це дослідження має важливість для розвитку та впровадження сучасних методів геодезичного обліку, покликаних полегшити завдання планування та управління автомобільними дорогами в умовах швидкого розвитку транспортних систем, а також сприяти подальшому використанню технологій БПЛА у геодезії та картографії.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДИКИ СТВОРЕННЯ ТОПОГРАФІЧНИХ ПЛАНІВ

Під час реконструкції автомобільних доріг, виконання топографічного знімання є важливим етапом, який включає в себе використання різних методів для отримання даних про дорожнє покриття у визначеному поточному стані, земельну поверхню та всі елементи дорожньої інфраструктури.

Оцінка та детальне вивчення цих параметрів є критичними для ефективного проектування та виконання будівельних робіт.

Аналіз різних методів топографічного знімання для реконструкції автомобільних доріг включає наступні пункти:

1. Тахеометричне знімання:

- Метод тахеометричних вимірів: вимірювання кутів та відстаней між точками за допомогою тахеометра.

2. GPS-виміри та RTK:

- Супутникові виміри: використання GPS-приймачів для отримання географічних координат точок на дорозі.

- RTK-технології: використання технології Real-Time Kinematic для отримання високоточних геодезичних координат.

3. Фотограмметрія (за допомогою БПЛА):

- Використання БПЛА: отримання аерознімків за допомогою безпілотних літальних апаратів з високою роздільною здатністю.

- 3D-моделювання: створення тривимірних моделей території та дорожньої інфраструктури на основі отриманих знімків.

4. Лазерне сканування (LIDAR):

- точне сканування поверхні: Використання LIDAR для отримання точних тривимірних моделей рельєфу дороги та її деталізації.

1.1 Аналіз методів виконання топографічного знімання при реконструкції автомобільних доріг

Тахеометричне знімання є важливою складовою частиною геодезичних робіт при реконструкції автомобільних доріг. Цей метод вимірювання використовує тахеометр – прилад, який об'єднує в собі функції теодоліту та далекоміра, дозволяючи вимірювати кути, відстані та висоти до об'єктів, які є важливими для проектування, будівництва та реконструкції дорожньої інфраструктури.

Процес тахеометричного знімання включає в себе наступні кроки:

1. *Планування вимірів:* розробка проекту топографічного знімання та попередній розрахунок точності теодолітних та нівелірних ходів.
2. *Встановлення та калібрування тахеометра:* перевірка та калібрування приладу для забезпечення точності вимірів.
3. *Визначення координат пунктів:* визначення координат пунктів опорної геодезичної мережі з прив'язкою до Державної геодезичної мережі.
4. *Вимірювання кутів та відстаней:* вимірювання кутів та відстаней до об'єктів знімання (тверді контури, дорожнє покриття, рельєф і т.д.).
5. *Фіксація та реєстрація даних:* експорт отриманих вимірів та даних у спеціалізовані програми для подальшої обробки.
6. *Обробка та аналіз результатів:*
 - обчислення геодезичних параметрів, таких як координати точок, довжини ліній, висоти тощо.
 - аналіз отриманих даних для побудови тривимірної моделі дорожньої інфраструктури та визначення параметрів реконструкції.

Точність цього методу вимірювання може залежати від декількох факторів:

1. *Інструментальна точність тахеометра:* точність вимірювань, яка обумовлена якістю (моделлю) самого тахеометра, його системою вимірювання, точністю далекоміру та сенсорів кутів.
2. *Умови вимірювання:*

-атмосферні умови (туман, вітер тощо) можуть впливати на точність вимірювань;

-погане освітлення або недоступність природного світла можуть впливати на видимість цілей для вимірювань.

3. *Підготовка та налаштування:* налаштування, перевірка та за необхідності калібрування тахеометра перед використанням для забезпечення його точності.

4. *Навички та досвід оператора:* вплив професійного досвіду та кваліфікації оператора на точність вимірювань.

Точність тахеометра може варіювати в межах кількох міліметрів до кількох сантиметрів, залежно від моделі тахеометра, умов вимірювання та технічних характеристик самої дороги. Наприклад, вимірювання відносних висот або відстаней між зйомочними станціями можуть бути виконані з високою точністю, у той час як точність вимірювання ширини дороги може бути меншою через складні умови на дорозі.

RTK (Real-Time Kinematic) є одним з методів топографічного знімання, який використовується для вимірювання географічних координат точок на автомобільних дорогах з високою точністю та в реальному часі. RTK зазвичай використовується в поєднанні з GPS-приймачами для досягнення високої точності вимірювань.

Основні характеристики та точність RTK-знімання:

1. *GPS-приймачі:* використання спеціальних GPS-приймачів, які отримують сигнали від супутників для визначення географічних координат точок.

2. *Коригування в реальному часі:* RTK забезпечує високу точність шляхом отримання коригувальних сигналів в реальному часі від базової станції.

3. *Точність:* RTK може надавати точність вимірювань на рівні декількох сантиметрів або навіть міліметрів, в залежності від умов знімання, якості сигналів та характеристик приладів.

4. *Вплив умов оточення:* умови довкілля, такі як погода, ландшафт та інші перешкоди можуть впливати на точність RTK-вимірювань.

5. *Дистанція до базової станції:* важливим фактором є відстань між GPS-приймачем і базовою станцією. Чим ближче, тим точніше можуть бути вимірювання.

6. *Професійність оператора:* кваліфікація та досвід оператора можуть також впливати на точність вимірювань.

Точність RTK-знімання може бути відмінною, забезпечуючи вимірювання з високою точністю, що дозволяє отримати точні географічні координати об'єктів на автомобільних дорогах. Однак, для досягнення найкращих результатів, важливо враховувати усі вищезазначені фактори та умови знімання.

Фотограмметрія за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є потужним інструментом для здійснення аерофотознімання, вимірювання та створення інженерно-геодезичних планів та тривимірних моделей автомобільних доріг та їхньої інфраструктури. Особливо важливо в контексті реконструкції доріг це створення детальних та точних планів та моделей для подальшого проектування та будівництва.

Процес фотограмметрії з використанням БПЛА включає такі кроки:

1. *Планування місць зйомки:* визначення оптимальних місць для зйомки, враховуючи покриття, зони інтересу та потрібну роздільну здатність.
2. *Вибір обладнання та камер:* встановлення на БПЛА спеціалізованої камери з високою роздільною здатністю для отримання якісних зображень.
3. *Виконання аерофотознімання:* проведення серії знімків з різних кутів та висот, щоб отримати повну інформацію про дорогу та оточуючу територію.
4. *Обробка знімків:* обробка отриманих зображень для створення мозаїк або панорам, які відображають дорогу та її деталі.
5. *Створення тривимірних моделей:* на основі знімків створення тривимірних моделей доріг та їхнього оточення.
6. *Визначення геодезичних параметрів:* вимірювання геодезичних координат точок на дорозі та оточуючих об'єктів.

7. *Аналіз та використання отриманих даних:* використання результатів фотограмметрії для планування, дизайну, реконструкції та управління дорожньою інфраструктурою.

Точність фотограмметрії залежить від декількох факторів:

1. *Тип камери та роздільна здатність:* висока роздільна здатність камери дозволяє отримати більш точні зображення.
2. *Умови польоту:* стабільність БПЛА та сприятливі погодні умови впливають на якість знімків.
3. *Обробка даних:* Точність обробки знімків та алгоритми реконструкції визначають кінцеву точність результатів.

Фотограмметрія з використанням БПЛА є важливим інструментом для отримання точних геодезичних даних та тривимірних моделей дорожньої інфраструктури, що сприяє управлінню та реконструкції доріг.

Процес лазерного сканування автомобільних доріг за допомогою LIDAR включає наступні кроки:

1. *Планування місць сканування:* визначення оптимальних місць для сканування доріг, враховуючи покриття, рельєф та потрібну деталізацію.
2. *Встановлення LIDAR на транспортний засіб:* зазвичай LIDAR встановлюється на автомобіль або спеціалізовану платформу для сканування.
3. *Сканування дороги:* LIDAR видає лазерні промені на поверхню дороги та реєструє відбиті сигнали. Даний процес дає можливість отримати високоточні тривимірні дані про поверхню.
4. *Обробка та аналіз даних:* обробка отриманих даних LIDAR для створення точних тривимірних моделей поверхні дороги та рельєфу.

Основні переваги використання LIDAR для сканування автомобільних доріг:

1. *Точність та деталізація:* LIDAR забезпечує високу точність та деталізацію отриманих тривимірних моделей, що дозволяє отримати дуже деталізовані дані про поверхню дороги.
2. *Швидкість сканування:* можливість швидкого сканування великих ділянок дороги, що зменшує час виконання робіт.

3. *Неінвазивність*: сканування відбувається без прямого контакту з поверхнею дороги, що дозволяє сканувати навіть складні об'єкти.

LIDAR є потужним інструментом для отримання даних про геометрію та рельєф автомобільних доріг, що є важливим для проектування, реконструкції та управління дорожньою інфраструктурою.

У кожного з цих методів є свої переваги та обмеження у використанні, але комбінування різних підходів може забезпечити максимально точну та повну інформацію про стан автомобільної дороги. Окремо, важливою є вартість, швидкість виконання та доступність методів для успішного використання в практичних умовах реконструкції автомобільних доріг.

1.2 Переваги використання БПЛА методу при проведенні інженерно-геодезичних вишукувань та визначення вимог до точності

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в інженерно-геодезичних вишукуваннях має низку переваг, які роблять цей метод дуже привабливим для використання в сучасних геодезичних роботах.

Переваги використання БПЛА в інженерно-геодезичних вишукуваннях:

1. *Швидкість та ефективність*: БПЛА може швидко охопити велику площу, виконуючи зйомку за короткий проміжок часу. Це дозволяє значно скоротити тривалість процесу вишукувань.

2. *Висока точність та деталізація*: БПЛА здатні отримати зйомку з високою роздільною здатністю, що дозволяє отримувати деталізовані зображення та вимірювання, забезпечуючи високу точність геодезичних даних.

3. *Легкість доступу до важкодоступних областей*: БПЛА може отримати доступ до територій з складним рельєфом, що ускладнюють доступність для звичайних засобів вимірювань та віддалених місць, куди складно або небезпечно потрапити для виконання геодезичних вимірювань.

4. *Безпека та зручність*: використання БПЛА усуває ризик для геодезистів під час проведення вишукувань у складних умовах, а також забезпечує безпечний доступ до вимірюваних областей.

5. *Широкий спектр застосування:* БПЛА можна використовувати для різноманітних геодезичних завдань, включаючи аерофотограмметрію, лазерне сканування, вимірювання висоти, створення тривимірних моделей тощо.

6. *Зниження витрат:* зменшення витрат та часу на проведення вимірів відносно традиційних методів топографічного знімання.

7. *Точність результатів:* використання БПЛА з високоякісним обладнанням, особливо застосовуючи RTK-технології, дозволяє отримати точні та достовірні дані, що є обов'язковим для подальшого використання при проектуванні, будівництві та реконструкції.

8. *Можливості для аналізу території:* знімки з висоти, отримані за допомогою БПЛА, надають можливість для створення тривимірних моделей та аналізу рельєфу території.

Вимоги до точності при використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в інженерно-геодезичних вишукуваннях можуть значно варіюватися в залежності від конкретних завдань, проектів та вимог замовників. Однак, загальні вимоги до точності включають такі аспекти:

1. *Горизонтальна та вертикальна точність:*

- зазвичай, вимоги до горизонтальної точності вимірювань можуть бути у межах кількох сантиметрів до міліметрів, в залежності від потреб проекту;

- вертикальна точність також може бути критичною і зазвичай вимагається з високою точністю, особливо для інженерних проектів.

2. *Точність позиціонування:* вимоги до точності позиціонування можуть залежати від вимірювальних задач. У деяких випадках вимагається точність GPS-даних на рівні сантиметрів (RTK або РРК), в інших – на рівні метрів.

3. *Деталізація та роздільна здатність:* вимоги до деталізації знімків іноді можуть вимагати високої роздільної здатності зображень для отримання детальних тривимірних моделей.

4. *Точність обробки даних:* обробка отриманих даних з БПЛА вимагає точних методів та програм для забезпечення високої достовірності результатів.

Важливо, щоб отримані дані були стабільними та однорідними, для усунення результуючих помилок.

5. *Точність моделювання та аналізу даних:* у разі створення тривимірних моделей та аналізу даних важливо враховувати точність процесів моделювання для отримання достовірних результатів.

6. *Контрольні вимірювання та валідація даних:* проведення контрольних вимірювань для перевірки точності та валідації отриманих даних є важливим етапом.

Забезпечення високої точності при використанні БПЛА в інженерно-геодезичних вишукуваннях є ключовим для отримання надійних геодезичних даних, які можуть бути використані у будівництві, реконструкції доріг та інших проектах.

Так згідно п.5.1.3 Інструкції з топографічного знімання [1] граничні похибки ($\Delta_{гр.}$) положення планово-висотних розпізнавальних знаків відносно пунктів державної геодезичної мережі та геодезичних мереж згущення не повинні перевищувати на відкритій місцевості та на забудованій території 0,2 мм у масштабі плану і 0,3 мм — на місцевості, що закрита деревами та чагарниками. В залежності від масштабу топографічного знімання та відповідно до цих похибок розраховується висота польоту БПЛА, перекриття знімків та точність прив'язки опорних пунктів.

В цілому, використання БПЛА для інженерно-геодезичних вишукувань дозволяє збільшити швидкість, точність та ефективність отримання геодезичних даних у порівнянні з традиційними методами, що робить цей метод популярним та високоцінним для багатьох геодезистів та інженерів.

1.3 Перспективи використання даного методу в порівнянні із іншими

БПЛА-метод топографічного знімання має ряд переваг у порівнянні з іншими методами.

- Швидкість і простота виконання. Знімання за допомогою БПЛА можна виконати всього за кілька годин, тоді як традиційні методи можуть займати дні або

навіть тижні. Це робить БПЛА-метод особливо привабливим для вирішення завдань, які вимагають швидкого отримання даних, наприклад, для моніторингу стихійних лих або природних ресурсів.

- Доступність. БПЛА-обладнання стає все більш доступним, що робить цей метод більш доступним для широкого кола користувачів.

- Безпека. Знімання за допомогою БПЛА дозволяє уникати небезпечних умов, наприклад, на висоті або в зоні військових дій.

- Вартість та ефективність. Зниження витрат на збір та обробку даних порівняно з традиційними методами.

- Інтеграція з іншими технологіями. Здатність інтегрувати БПЛА з іншими технологіями, такими як GPS, LIDAR та фотограмметрія, для отримання комплексних та досить точних результатів.

Ось деякі приклади перспектив використання БПЛА-методу топографічного знімання:

- Моніторинг навколишнього середовища. БПЛА можна використовувати для спостереження за станом лісів, річок, морів і інших природних ресурсів. Це дозволяє своєчасно виявляти проблеми і приймати необхідні заходи.

- Архітектурне планування. БПЛА можна використовувати для створення точних топографічних карт, які необхідні для проектування будівель і споруд.

- Картографія. БПЛА можна використовувати для створення детальних карт населених пунктів, промислових зон та інших територій.

- Сільськогосподарське виробництво. БПЛА можна використовувати для моніторингу стану посівів, виявлення шкідників і хвороб рослин.

Хоча БПЛА мають свої переваги, важливо враховувати їх обмеження, такі як залежність від погодних умов, потреба в кваліфікованих операторах та правові обмеження, що можуть впливати на їхнє використання. Проте, розвиток технологій та методів обробки даних постійно поліпшує можливості БПЛА та робить їх універсальним та важливим інструментом у сучасній геодезії та інженерних вишукувань.

Незважаючи на ці недоліки, БПЛА-метод топографічного знімання має значний потенціал для розвитку. В останні роки він стає більш поширеним і затребуваним.

GISUT KNUCA 2023

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТОПОГРАФІЧНОГО ЗНІМАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ БПЛА МЕТОДАМИ

Методологія топографічного знімання автомобільних доріг за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) включає декілька ключових етапів:

1. Планування та підготовка:

- визначення області для зйомки та складання маршруту польоту, враховуючи рельєф, розміри ділянки, вимоги до роздільної здатності, висоти польоту тощо;

- підготовка БПЛА, перевірка обладнання, калібрування сенсорів та камер, перевірка та налаштування RTK-модуля.

2. Виконання аерофотозйомки:

- виконання плану польоту для зйомки автомобільних доріг з використанням БПЛА;

- збір зображень та даних, враховуючи вимоги до деталізації та точності.

3. Обробка та аналіз отриманих даних:

- обробка отриманих зображень та даних для створення мозаїк, панорам, або тривимірних моделей доріг, навколишньої інфраструктури та рельєфу;

- визначення геодезичних координат точок, створення цифрових моделей рельєфу, аналіз та інтерпретація даних.

4. Створення інженерно-топографічних планів та 3D-моделей:

- формування тривимірних моделей, які відображають топографію дороги, об'єктів поруч та рельєфу:

- створення інженерно-топографічних планів з відображенням дорожньої інфраструктури та різних деталей.

5. Аналіз та оцінка результатів отриманих даних:

- перевірка якості ЦММ та визначення того, чи відповідає вона вимогам проекту.

Ця методологія передбачає використання БПЛА для проведення ефективних та точних вимірювань, створення деталізованих моделей та отримання інженерно-

топографічних планів для подальшого використання у проектуванні та управлінні автомобільними дорогами.

Блок-схема виконання роботи представлена на рисунку 2.1.



Рис. 2.1 Блок-схема виконання роботи

2.1 Основні характеристики об'єкту спостереження

Ділянка автомобільної дороги М-12, що проектується на обході м. Березани, є міжнародною дорогою державного значення і відноситься до II технічної категорії і розташовується у Березанському районі Тернопільської області на землях Державних підприємств Березанське ЛМГ, «Березанирайагроліс» та Лапшинської селищної ради.

Транспортна мережа району представлена міжнародною автомобільною дорогою державного значення М-12 Стрий — Тернопіль — Кропивницький — Знам'янка, територіальними автомобільними дорогами Т-20-07 Березани — Нараїв — Брюховичі, Т-20-04 Березани — Підгайці — Монастирська та місцевими дорогами.

Залізничні шляхи сполучення в районі ділянки автодороги, що проектується, відсутні.

Район проектування об'їзної автомобільної дороги розташований у західному районі Тернопільської області в помірних широтах з досить м'яким помірно-континентальним кліматом з нежарким літом, м'якою зимою і достатньою кількістю опадів. Кліматичний район — I — Північно-західний. Абсолютна максимальна температура — плюс 36,6 °С (Бережани, 1952 р.), середня місячна температура найбільше теплого місяця липня — плюс 17,8 °С, середня місячна температура найбільше холодного місяця січня — мінус 5,0 °С. Абсолютна мінімальна температура — мінус 33,5 °С (Бережани, 1962-1963 р.). Опадів 520 - 700 мм на рік, близько 75 % їх припадає на теплий період року. Інколи випадає град. Взимку бувають заметілі. Сніговий покрив на території області випадає зазвичай — у другій половині листопада і тримається до початку березня. Товщина — від 0,08 до 0,10 м, максимуму досягає у другій декаді лютого. Дати танення снігового покриву припадають на кінець березня, з коливанням від другої декади лютого до першої декади березня. Найбільша висота снігового покриву (0,09–0,16 м) буває в другій декаді лютого.

Вегетаційний період 203-208 днів. Вітри (найчастіше північно-західні та південно-західні, найменше — північні та південні) характерні для всіх пір року, особливо для літа.

За дорожнім районування України (ДБН В.2.3-4:2015 [3], Додаток Г) територія вишукувань відноситься до II (Центральної) дорожньо-кліматичної зони (за умовами роботи асфальтобетонного покриття ділянка проектування відноситься до району А-2).

Існуюча мережа автомобільних доріг загального користування забезпечує регулярний зв'язок господарств району з обласним центром, з сусідніми районами області, а також забезпечує і вихід в інші регіони України.

Транспортна мережа району представлена на рисунку 2.2.

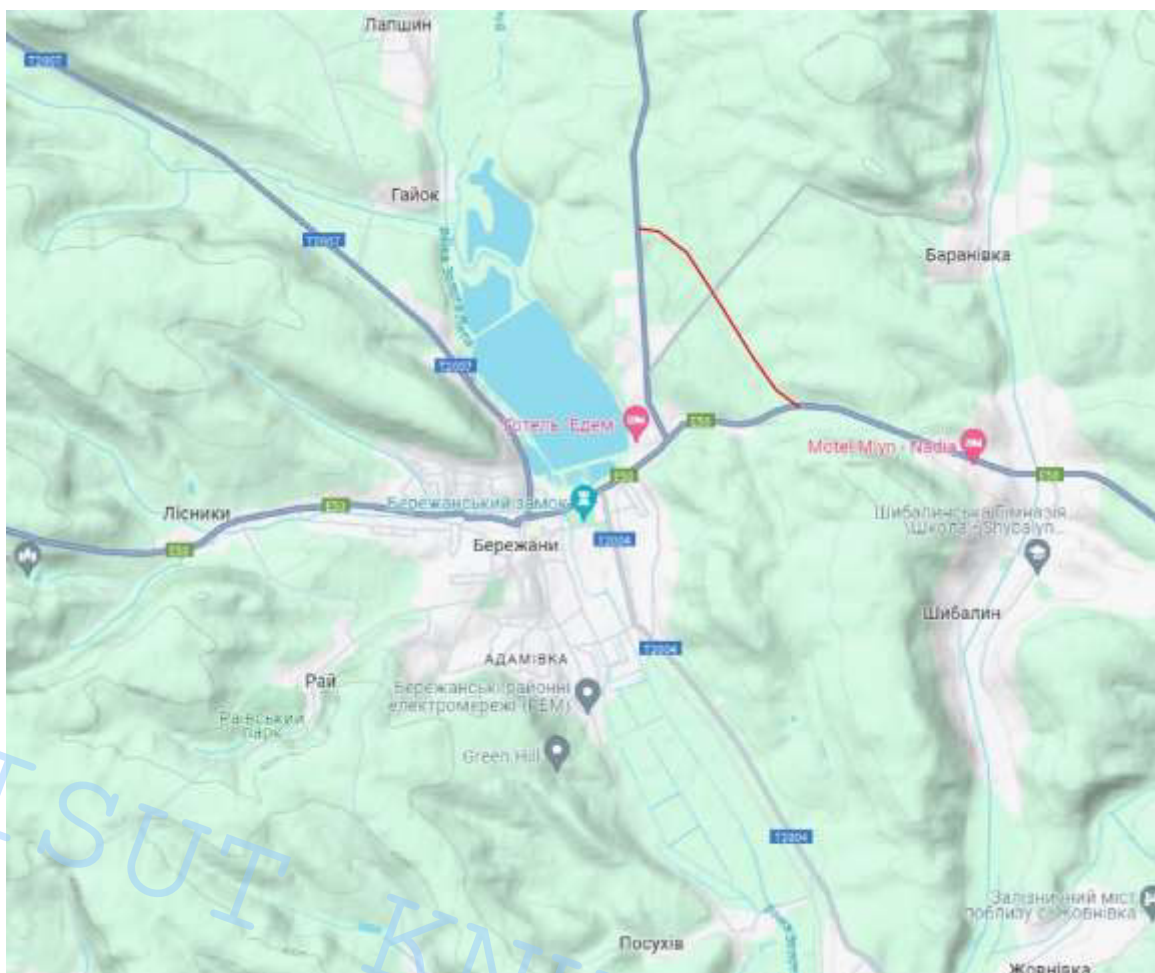


Рис. 2.2 Схема розташування ділянки виконання робіт

2.2 Підготовчі роботи

Підготовка до аерофотозйомки за допомогою безпілотного літального апарату (БПЛА) є ключовим етапом для забезпечення успішної та ефективної зйомки. Ось кілька підготовчих кроків:

1. Визначення цілей та потреб:

- ретельне визначення цілей зйомки, потреби в даних, що будуть отримані, а також конкретних параметрів зйомки.

2. Вибір відповідного БПЛА та обладнання:

- вибір підходящого БПЛА з урахуванням вимог до роздільної здатності камери, тривалості польоту, стійкості до погодних умов та інших факторів.

3. Планування місця та часу зйомки:

- вибір оптимального часу та дня для зйомки з урахуванням освітлення, погодних умов, а також потреб замовника.

- Визначення границь зйомки та підготовка карт для охоплення необхідної території.

4. Підготовка БПЛА:

- перевірка та підготовка БПЛА до польоту, включаючи перевірку пропелерів, акумуляторів, сенсорів, камер, GPS та іншого обладнання.

5. Розробка маршруту польоту:

- створення оптимального маршруту польоту для покриття всієї території, що підпадає під знімання, з врахуванням параметрів польоту.

6. Узгодження з місцевими органами самоуправління та інших зацікавлених структурах:

- отримання необхідних дозволів та узгоджень з відповідними органами, які регулюють використання БПЛА та аерофотозйомку в конкретній області.

7. Технічна підготовка операторів:

- підготовка операторів БПЛА, включаючи навчання та практичні тренування для ефективного та безпечного використання апаратури під час зйомки.

Ці підготовчі роботи важливі для забезпечення успішної та безпечної аерофотозйомки, що дозволяє отримати високоякісні та корисні геодезичні дані для подальшого використання у проектуванні, дослідженнях або інших цілях.

2.2.1 Розрахунок точності

Розрахунок точності аерофотозйомки за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) включає кілька ключових параметрів, що впливають на точність отриманих даних:

1. Роздільна здатність камери:

- роздільна здатність камери визначає точність зображень, які отримуються під час аерофотозйомки. Чим вища роздільна здатність, тим деталізованіші дані.

2. Висота польоту:

- висота, на якій проводиться політ, впливає на покриття території та роздільну здатність знімків. Зазвичай, збільшення висоти зменшує роздільну здатність, але може забезпечити більше покриття.

3. Накриття (Overlap) та Перекриття (Sidelap):

- накриття визначає область, яка покривається кожним кадром у порівнянні з попереднім кадром, тоді як перекриття вказує на частину, яка перекривається між сусідніми знімками. Високе накриття та перекриття забезпечують кращу точність та якість моделі.

4. Джерело геопозиціонування:

- використання високоточних систем глобального позиціонування (наприклад, RTK GPS) або методи постпроцесингу (ППК) може покращити точність геолокації знімків.

5. Характеристики об'єкта:

- особливості об'єкта, такі як рельєф, текстури, колір та освітлення, можуть впливати на якість та точність знімків.

Для розрахунку точності аерофотозйомки за допомогою БПЛА використовують математичні моделі та програмне забезпечення для аналізу параметрів, врахування впливу помилок та оцінювання точності отриманих даних. Точність вимірювань може оцінюватися порівнянням отриманих геодезичних координат точок з референтними даними або внутрішньою перевіркою точності.

У процесі роботи з аерофотозйомкою за допомогою БПЛА важливо ретельно виконати планування та контроль за усіма параметрами, щоб забезпечити максимальну точність та якість отриманих результатів.

Правильний розрахунок аерознімальних робіт напряму впливає на якість отриманих подальших матеріалів, які б відповідали вимогам Інструкції [1]. Це дає підставу для аналізу ситуації та програмування БПЛА.

Технічні характеристики фотокамери напряму впливають на висоту польоту. При використанні цифрових камер як параметр, що відповідає за точність кінцевої продукції, використовується співвідношення одиниці растрового зображення з його лінійним розміром на земній поверхні (GSD). Значення цього параметра визначається залежно від масштабу топографічної зйомки. Відповідно до положень Інструкцій [1] середні помилки в положенні на плані предметів та контурів місцевості з чіткими обрисами відносно найближчих точок знімальної основи не

повинні перевищувати 0,5 мм, а в гірських та лісових районах — 0,7 мм. Середні помилки знімання рельєфу відносно найближчих точок геодезичної основи не повинні перевищувати за висотою: — 1/4 прийнятої висоти перерізу рельєфу при кутах нахилу до 2°. Для переходу від середніх помилок (δ) до середніх квадратичних помилок (m) застосовується коефіцієнт 1,25, тобто $m=1,25 \delta$.

Так, дотримуючись цих вимог, похибка визначення планових координат для масштабу 1:1000 становить 0,5м.

Точність визначення планово-висотних координат, отриманих за допомогою БПЛА, залежить від точності визначення координат і висот точок місцевості на основі стереопари знімків (m_ϕ) і точності визначення координат розпізнавальних (опорних) знаків ($m_{оп}$) і виражається наступним чином:

$$m_{БПЛА} = m_\phi + m_{оп} \quad (2.1)$$

Розпочнемо з розрахунку точності визначення планових координат та відміток точок місцевості на стереопарі знімків (m_ϕ), надалі визначимо допустиму СКП визначення координат опорних знаків $m_{оп}$.

Вихідні дані для розрахунку СКП визначення планових координат та відміток точок місцевості на стереопарі знімків беремо з параметрів камери БПЛА DJI Phantom 4 RTK та обраних параметрів знімання (табл. 2.1).

Параметри БПЛА та знімальної апаратури

Таблиця 2.1

Параметр	Величина
Розмір пікселя цифрової камери, мкм	2,4
Розмір матриці цифрової камери, пкс/мм	5472x3648 / 13,1x8,8
Фокусна відстань / відп. до плівки 35мм, мм	8,8 / 24
Точність визначення планових координат центра проекції, м	0,010
Точність визначення висотної координати центра проекції, м	0,015
Точність визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування, градус	0,01
Поздовжнє та поперечне перекриття p , %	80x60
Висота знімання, м	120
Швидкість БПЛА, м/с	9,7

Параметр GSD (ground solution distance), який відповідає розміру одного пікселю на земній поверхні, знаходимо за формулою 2.2:

$$GSD = \frac{H}{f} = \frac{120}{3648} = 0.033 \text{ м} \quad (2.2)$$

За умовою рівного впливу помилок приймаємо, що точність вимірювання координат і паралаксів однакова, тобто $m_x = m_y = m$, звідси точність визначення координат точок на місцевості $m_{X\phi}$, $m_{Y\phi}$ розраховуємо за формулою 2.3:

$$m_{X\phi} = m_{Y\phi} = GSD \cdot m_{\pi} \quad (2.3)$$

Точність визначення паралаксів приймаємо рівною 0,5 пікселя, тоді отримаємо:

$$m_{X\phi} = m_{Y\phi} = GSD \cdot m_{\pi} = 0,033 \cdot 0,5 = 16,5 \text{ мм}$$

Величина базису фотографування впливає на точність визначення відмітки залежність якої, обчислюється за наступною формулою:

$$m_{H\phi} = \frac{H}{b} m_{\pi} \quad (2.4)$$

Базис фотографування в масштабі знімку визначається за формулою:

$$b = \frac{100-p}{100} \cdot l_x \cdot GSD \quad (2.5)$$

$$b = \frac{100-80}{100} \cdot 3648 \cdot 3,3 = 2408 \text{ пкс.}$$

Точність визначення координат точок на місцевості $m_{H\phi}$ обчислюється за формулою:

$$m_{H\phi} = \frac{H}{b} m_{\pi} = \frac{120}{2408} \cdot 0,5 = 25 \text{ мм} \quad (2.6)$$

Точність планових координат розраховуються вздовж радіус-вектору згідно формули:

$$m_{XY\phi}^2 = m_{X\phi}^2 + m_{Y\phi}^2; \quad (2.7)$$

$$\text{При } m_{X\phi} = m_{Y\phi}; \quad m_{XY\phi} = m_{X\phi} \sqrt{2};$$

$$\text{Або } m_{XY\phi} = 16,5 \sqrt{2} = 23,3 \text{ мм} \quad (2.8)$$

Для заданих параметрів отримуємо наступні значення СКП координат по стереопар:

- в плані $m_{XY\phi} = 0,023 \text{ м};$
- по висоті $m_{H\phi} = 0,025 \text{ м.}$

Розрахунок СКП вимірювання координат опорних знаків виконується наступним чином.

Визначаємо допустимі помилки в планових координатах $\delta_{XY(\text{доп})}$ та відмітках $\delta_{H(\text{доп})}$:

$$0,5_{\text{мм/масшт.}} \leq \delta_{XY(\text{доп})} = 0,5\text{м};$$

$$\delta_{H(\text{доп})} \leq \frac{1}{4} h_{\text{пер}} = 0,125\text{м}.$$

Переходимо від допустимих помилок визначення координат до допустимих середніх квадратичних значень.

$$m_{\text{доп}} = 1,25 \cdot \delta_{\text{доп}};$$

$$m_{XY(\text{доп})} = 1,25 \cdot 0,5 = 0,625\text{м};$$

$$m_{H(\text{доп})} = 1,25 \cdot 0,125 = 0,156\text{м}.$$

Так як допустимі СКП включають в себе помилки визначення опорних точок та фотограмметричних робіт, то отримаємо вираз:

$$\frac{m_{\text{доп}}}{3} = m_{\text{БПЛА}} = m_{\Phi} + m_{\text{оп}} \quad (2.9)$$

Далі переходимо від допустимих СКП визначення контурів та відміток на топографічному плані до СКП визначення координат опорних точок. Визначення точності вимірювання координат опорних точок обумовлюється взаємозв'язком між максимально допустимим значенням СКП та вимірним і виражається наступною формулою:

$$m_{\text{оп}} = \frac{m_{\text{доп}}}{3} - m_{\Phi} \quad (2.10)$$

$$m_{XY(\text{оп})} = \frac{0,625}{3} - 0,023 = 0,185\text{м};$$

$$m_{H(\text{оп})} = \frac{0,156}{3} - 0,025 = 0,027\text{м}.$$

Відповідно до Інструкції з топографічного знімання [1] СКП визначення планово-висотних розпізнавальних знаків відносно пунктів державної геодезичної мережі та геодезичних мереж згущення не перевищує 0,2 мм у масштабі плану, тобто 0,2 м, тому оптимальним методом визначення координат та висот буде

використання GNSS-методу в режимі RTK від пунктів постійно діючої GNSS-мережі.

2.2.2 Щільність перекриття

Щільність перекриття знімків БПЛА - це міра того, наскільки сильно знімки перекриваються один з одним. Вона вимірюється як відсоток площі кожного знімка, який перекривається з іншими знімками.

Щільність перекриття знімків БПЛА впливає на точність та деталізацію моделі, створеної на основі цих знімків. Більша щільність перекриття забезпечує більш точну модель, але також вимагає більшого обсягу даних.

Існує два основних методи розрахунку щільності перекриття знімків БПЛА.

Метод обчислення площі перекриття.

Цей метод полягає в обчисленні площі кожного перекриття між двома знімками. Загальна щільність перекриття визначається як сума площ всіх перекриттів, поділена на площу всієї території, покритої знімками.

Формула для розрахунку щільності перекриття за цим методом:

$$\rho = \Sigma(A_i)/A_{tot} \quad (2.11)$$

де:

ρ - щільність перекриття;

$\Sigma(A_i)$ - сума площ всіх перекриттів;

A_{tot} - площа всієї території, покритої знімками.

Метод розрахунку кількості перекриттів.

Цей метод полягає в обчисленні кількості перекриттів між двома знімками. Загальна щільність перекриття визначається як кількість всіх перекриттів, поділена на загальну кількість знімків.

Формула для розрахунку щільності перекриття за цим методом:

$$\rho = \Sigma(n_i)/N \quad (2.12)$$

де:

ρ - щільність перекриття;

$\Sigma(n_i)$ - сума кількості всіх перекриттів;

N - загальна кількість знімків.

Один із найпоширеніших методів розрахунку щільності перекриття знімків БПЛА - це метод обчислення площі перекриття. Цей метод є точним, але може бути трудомістким, якщо потрібно обчислити щільність перекриття для великої кількості знімків.

Метод розрахунку кількості перекриттів є менш точним, але він більш простий у використанні. Цей метод можна використовувати для швидкого розрахунку щільності перекриття для великої кількості знімків.

Оптимальна щільність перекриття знімків БПЛА залежить від конкретного застосування. Для створення точних моделей з високим ступенем деталізації рекомендується використовувати щільність перекриття не менше 60%. Для створення моделей з меншою деталізацією можна використовувати щільність перекриття меншу, ніж 60%.

2.2.3 Конфігурація опорних точок та їх прив'язка

Перед початком аерофотознімальних робіт важливим є побудова опорних точок (ОТ) на територію знімання.

Конфігурація опорних точок для БПЛА знімання залежить від конкретних потреб та умов знімання. Загалом, ОТ слід розміщувати рівномірно по всій території, яка підлягає аерофотозніманню. При цьому слід враховувати наступні фактори:

- Щільність перекриття знімків - чим вища щільність перекриття знімків, тим менше ОТ потрібно для їх прив'язки.
- Точність знімків - чим точніше знімки, тим точніше потрібно прив'язувати їх до відповідної системи координат.
- Умови знімання - якщо знімання проводиться в умовах поганої видимості, може знадобитися збільшити кількість ОТ.

Вимоги до планово-висотного обґрунтування (ПВО) для аерофотозйомки за допомогою БПЛА наведено у таблиці 2.2.

Вимоги до планово-висотного обґрунтування для аерофотозйомки за допомогою БПЛА

Таблиця 2.1

Вимоги	Площадна зйомка				Лінійна зйомка		
Масштаб	1:500 0	1:2000	1:500	1:200	1:5000	1:2000	1:500
Кількість точок на 1 км ²	0,5	2	6	10	0,5	2	6
Точність визначення координат точок ПВО	20 см	10 см	5 см	3 см	20 см	10 см	5 см

Для лінійного об'єкту знімання розпізнавальні знаки розташовувались на початку, в середині та в кінці блоків, довжинами в середньому 1 км, із взаємним перекриттям з сусідніми блоками.

В якості опорних точок використовувались пластикові тарілки діаметром 20 см, розташованих та зафіксованих на узбіччі дороги, та чітко виражені на місцевості елементи дорожньої розмітки.

Роботи по визначенню планово-висотного положення ОТ виконувались шляхом GNSS-спостережень в RTK-режимі середні квадратичні похибки яких, не перевищували 0,015-0,02 м.

2.3 Попередній розрахунок точності аерофотозйомки

Попередній розрахунок точності аерофотозйомки дозволяє оцінити точність, яку можна досягти при виконанні аерофотозйомки за заданими параметрами. Цей розрахунок може бути використаний для вибору оптимальних параметрів знімання та для оцінки можливих похибок, які можуть виникнути при обробці знімків.

На точність аерофотозйомки впливають наступні фактори:

Точність геодезичного позиціонування БПЛА - це похибка визначення координат БПЛА в момент знімання.

Точність стабілізації камери БПЛА - це похибка орієнтації камери БПЛА в момент знімання.

Точність налаштування камери БПЛА - це похибка фокусної відстані, кута поля зору та інших параметрів камери.

Точність орієнтування знімка - це похибка визначення орієнтації знімка відносно площини проекції.

Формула для розрахунку точності аерофотозйомки

Точність аерофотозйомки можна розрахувати за такою формулою:

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_s + \sigma_c + \sigma_o \quad (2.13)$$

де:

σ - загальна похибка аерофотозйомки;

σ_p - похибка геодезичного позиціонування БПЛА;

σ_s - похибка стабілізації камери БПЛА;

σ_c - похибка налаштування камери БПЛА;

σ_o - похибка орієнтування похибка.

Маємо наступні параметри:

Похибка геодезичного позиціонування БПЛА - 0,02 метра;

Похибка стабілізації камери БПЛА - 0,1 градуса;

Похибка налаштування камери БПЛА - 0,1 відсотка;

Похибка орієнтування знімка - 0,2 градуса.

У цьому випадку загальна похибка аерофотозйомки становитиме:

$$\sigma = 0,02 + 0,002 + 0,001 + 0,02 = 0,043 \text{ метра}$$

Крім загальної похибки аерофотозйомки, необхідно також оцінити можливі похибки, які можуть виникнути при обробці знімків. До таких похибок можна віднести:

Похибка корекції атмосферного збурення - це похибка, яка виникає при корекції атмосферного збурення.

Похибка ортофототрансформації - це похибка, яка виникає при ортофототрансформації знімків.

Похибка створення 3D-моделі - це похибка, яка виникає при створенні 3D-моделі на основі ортофотопланів.

Оцінка цих похибок може бути проведена за допомогою спеціального програмного забезпечення.

GISUT KNUCA 2023

РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ПРИ СТВОРЕННІ ЦИФРОВИХ ТОПОГРАФІЧНИХ ПЛАНІВ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стають все більш популярними для створення цифрових топографічних планів. Вони пропонують ряд переваг перед традиційними методами аерофотозйомки, такими як літаками та гелікоптерами, включаючи:

Більш низька вартість: БПЛА можуть коштувати значно менше, ніж традиційні аерофотознімальні платформи. Це робить їх більш доступними для невеликих компаній та організацій.

Гнучкість: БПЛА можуть літати в більш обмежених просторах, ніж традиційні аерофотознімальні платформи. Це дозволяє їм отримувати точні зображення недоступних або важкодоступних місць.

Швидкість: БПЛА можуть виконувати аерофотознімальні роботи швидше, ніж традиційні аерофотознімальні платформи. Це може бути важливо для термінових проектів або для отримання актуальних зображень.

Процес створення цифрового топографічного плану з використанням БПЛА включає наступні етапи:

Планування: На цьому етапі визначається територія, що буде зніматися, і розробляється маршрут польоту БПЛА.

Аерознімання: БПЛА літає за запланованим маршрутом, отримуючи зображення території.

Обробка зображень: Зображення обробляються за допомогою фотограмметричного програмного забезпечення, щоб створити цифрову модель рельєфу (ЦМР) або ортофотоплан.

Цифрові топографічні плани, створені з використанням БПЛА, мають широкий спектр застосувань, включаючи:

- **Картографію:** Цифрові топографічні плани використовуються для створення топографічних карт і планів.
- **Земельний кадастр:** Цифрові топографічні плани використовуються для визначення меж земельних ділянок та інших географічних об'єктів.

- Інженерію: Цифрові топографічні плани використовуються для планування інженерних проектів, таких як будівництво доріг і мостів.
- Охорона навколишнього середовища: Цифрові топографічні плани використовуються для моніторингу довкілля та виявлення змін у ландшафті.

Використання БПЛА для створення цифрових топографічних планів є швидко зростаючою галуззю. Ця технологія пропонує ряд переваг перед традиційними методами аерофотозйомки, що робить її все більш привабливою для широкого спектру користувачів.

3.1 Методики проведення дослідження з визначення точності

Методики проведення дослідження з визначення точності можна поділити на два основні типи:

Методики, засновані на порівнянні з референтними даними. У цьому випадку точність вимірювань оцінюється шляхом порівняння їхніх результатів з результатами, отриманими за допомогою іншого, більш точного методу або за допомогою референтних даних, які отримані іншими способами.

Методики, засновані на оцінці статистичних характеристик вимірювань. У цьому випадку точність вимірювань оцінюється шляхом оцінки таких статистичних характеристик, як середнє значення, дисперсія, стандартне відхилення та межі похибок.

До методик першого типу належать такі:

Метод порівняння з вимірюваннями, проведеними іншим методом. У цьому випадку точність вимірювань оцінюється шляхом порівняння їхніх результатів з результатами, отриманими за допомогою іншого, більш точного методу. Наприклад, точність визначення висоти за допомогою БПЛА можна оцінити шляхом порівняння її результатів з результатами, отриманими за допомогою лазерного сканера або топографічного знімання.

Метод порівняння з референтними даними. У цьому випадку точність вимірювань оцінюється шляхом порівняння їхніх результатів з результатами, отриманими за допомогою референтних даних, які отримані іншими способами.

Наприклад, точність визначення координат за допомогою БПЛА можна оцінити шляхом порівняння їхніх результатів з координатами, отриманими за допомогою супутникової навігації.

До методик другого типу належать такі:

Метод середнього значення. У цьому випадку точність вимірювань оцінюється шляхом визначення середнього значення вимірювань, проведених кілька разів. Чим менше похибка середнього значення від референтного значення, тим точніше вимірювання.

Метод дисперсії. У цьому випадку точність вимірювань оцінюється шляхом визначення дисперсії вимірювань. Чим менше дисперсія, тим точніше вимірювання.

Метод стандартного відхилення. У цьому випадку точність вимірювань оцінюється шляхом визначення стандартного відхилення вимірювань. Чим менше стандартне відхилення, тим точніше вимірювання.

Метод меж похибок. У цьому випадку точність вимірювань оцінюється шляхом визначення меж похибок, в яких знаходиться справжнє значення вимірюваної величини з заданою ймовірністю.

Вибір методики проведення дослідження з визначення точності залежить від конкретних умов проведення дослідження. При виборі методики необхідно враховувати такі фактори, як:

Точність референтних даних. Чим точніше референтні дані, тим точніше можна оцінити точність вимірювань.

Кількість повторних вимірювань. Чим більше повторних вимірювань, тим точніше можна оцінити точність вимірювань.

Статистичні характеристики вимірювань. Чим менші дисперсія та стандартне відхилення, тим точніше вимірювання.

При проведенні дослідження з визначення точності необхідно дотримуватись таких вимог:

Вимірювання повинні проводитися в однакових умовах.

Вимірювання повинні проводитися кваліфікованими операторами.

Вимірювання повинні проводитися за допомогою високоточних приладів.

Результати вимірювань повинні оброблятися за допомогою відповідного програмного забезпечення.

Виконання цих вимог дозволить отримати точні результати дослідження.

В даному дослідженні точність аерофотознімальних робіт будуть порівнюватися з результатами топографічного знімання, виконаних електронним тахеометром Spectra Precision FOCUS 6 (2") рис.3.1.



Рис. 3.1. Електронний тахеометр Spectra Precision FOCUS 6 (2")

3.2 Методика оцінки точності виконаних робіт

Оцінка точності виконаних робіт при використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА) включає наступні методики:

1. Геоприв'язка:

- Вимірювання точних геодезичних контрольних точок на місцевості за допомогою високоточного обладнання (наприклад, GPS RTK).
- Геоприв'язка отриманих знімків БПЛА до цих контрольних точок для оцінки точності геолокації.

2. Перевірка точності робіт:

- Визначення різниці між координатами контрольних точок, виміряних безпосередньо на місці, та їхніми вірними геодезичними координатами.

- Аналіз відхилень та похибок геолокації на отриманих знімках у порівнянні з контрольними даними.

3. Точність рельєфного моделювання:

- Оцінка точності та якості побудованої цифрової моделі рельєфу (ЦМР) на основі отриманих знімків.

- Порівняння відтворення рельєфу на знімках з реальними географічними особливостями місцевості.

4. Оцінка точності створених векторних даних:

- Перевірка точності створених векторних шарів (наприклад, доріг, будівель) на отриманих знімках в порівнянні з реальною топографією місцевості.

5. Статистичний аналіз похибок:

- Визначення статистичних параметрів похибок геолокації та точності вимірювань (середні значення, стандартні відхилення, максимальні похибки).

6. Кореляція з іншими методами:

- Порівняння результатів, отриманих за допомогою БПЛА, з результатами, отриманими за допомогою традиційних методів знімання та визначення точності (наприклад, тахеометричне знімання, GPS-вимірювання).

Ці методи допомагають оцінити точність та надійність отриманих даних, а також встановити відповідність отриманих результатів встановленим вимогам точності.

3.3 Аналіз отриманих результатів

Обробка аерофотознімання та подальший аналіз точності виконаних робіт проводилось у програмному забезпеченні «Agisoft Metashape Pro».



Рис. 3.2. Розташування опорних точок на ділянці виконання робіт



Рис. 3.3. Розташування опорних точок на знімках

Порівнянню піддавались фотознімки обробка та вирівнювання яких, виконано у двох варіантів:

1. Вирівнювання центрів знімків відбувалось за допомогою координат отриманих з GNSS-модуля встановленого на борту БПЛА в режимі RTK. Контролем слугували розпізнавальні знаки координати яких, були визначені за допомогою GNSS-приймача в режимі RTK (Рис. 3.3).

Маркеры	Восточное указа	Северное указан	Высота (м)	Точность	Ошибка (м)	Проекц	Ошибка (пикс)
<input type="checkbox"/> m15	261950.177000	5480614.077000	295.353000	0.005000	0.014056	15	0.306
<input type="checkbox"/> m16	262257.928000	5480592.794000	303.758000	0.005000	0.004525	19	0.418
<input type="checkbox"/> m17	261417.804000	5480434.972000	289.221000	0.005000	0.008815	21	0.416
Общая ошибка							
Опорные точки							
Контрольные точки					0.009929		0.390

Рис. 3.4. Похибка визначення координат контрольних точок в режимі RTK

Похибки положення опорних точок можна побачити на рис. 3.5, де похибка по Z відображена кольором еліпсу, а планові похибки формою еліпсу.



Рис. 3.5. Положення контрольних точок в режимі RTK та оцінка похибок

2. Обробка проводилась на основі опорних точок які використовувались в якості контрольних для першого варіанту обробки (Рис. 3.6).

Маркеры	Восточное указа	Северное указан	Высота (м)	Точность	Ошибка (м)	Проекц	Ошибка (пикс)
<input checked="" type="checkbox"/> m15	261950.177000	5480614.077000	295.353000	0.005000	0.019146	15	0.323
<input checked="" type="checkbox"/> m16	262257.928000	5480592.794000	303.758000	0.005000	0.004719	19	0.419
<input checked="" type="checkbox"/> m17	261417.804000	5480434.972000	289.221000	0.005000	0.008662	21	0.413
Общая ошибка							
Опорные точки					0.012434		0.393
Контрольные точки							

Рис. 3.6. Похибка визначення координат опорних точок

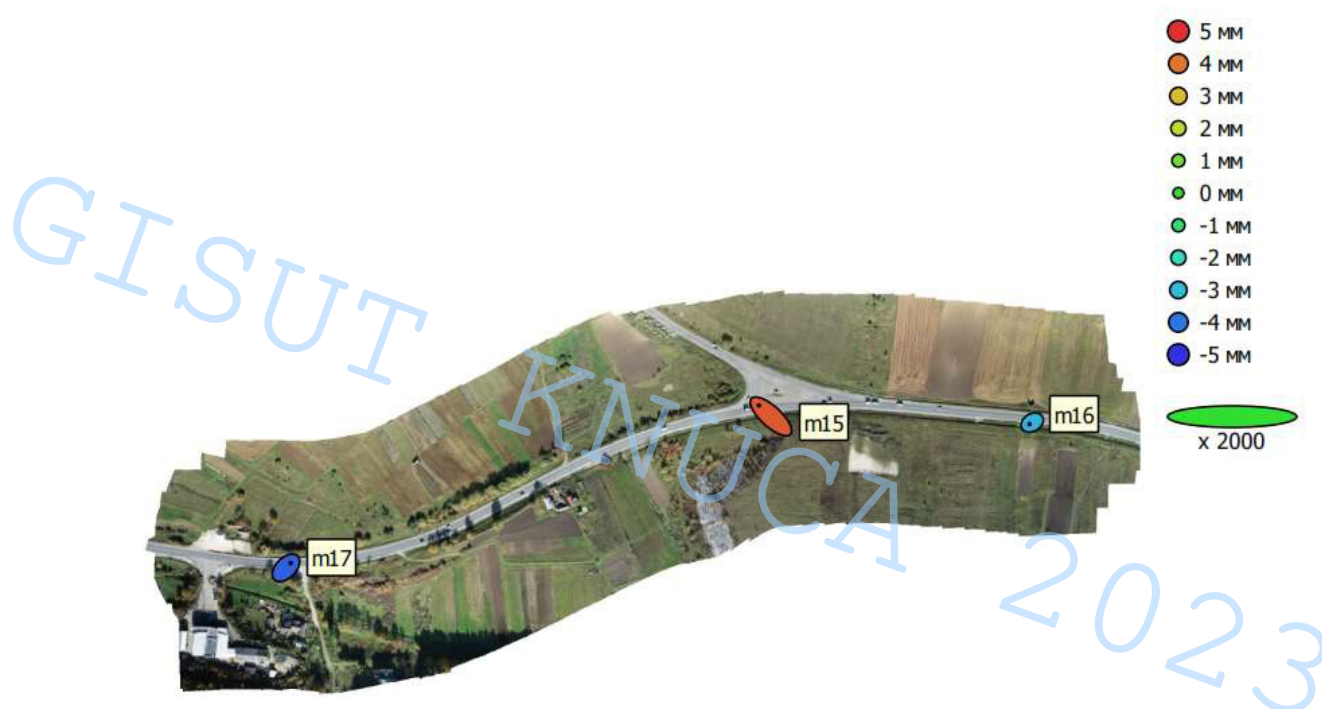


Рис. 3.7. Положення опорних точок та оцінка похибок

Далі оцінимо точність рельєфного моделювання. Порівняємо різницю побудови горизонталей між тахеометричним зніманням і аерофотозніманням (рис. 3.8, 3.9). Жовтим кольором виділені горизонталі побудовані в ПЗ «Agisoft Metashape Pro», зеленим – з тахеометричного знімання.

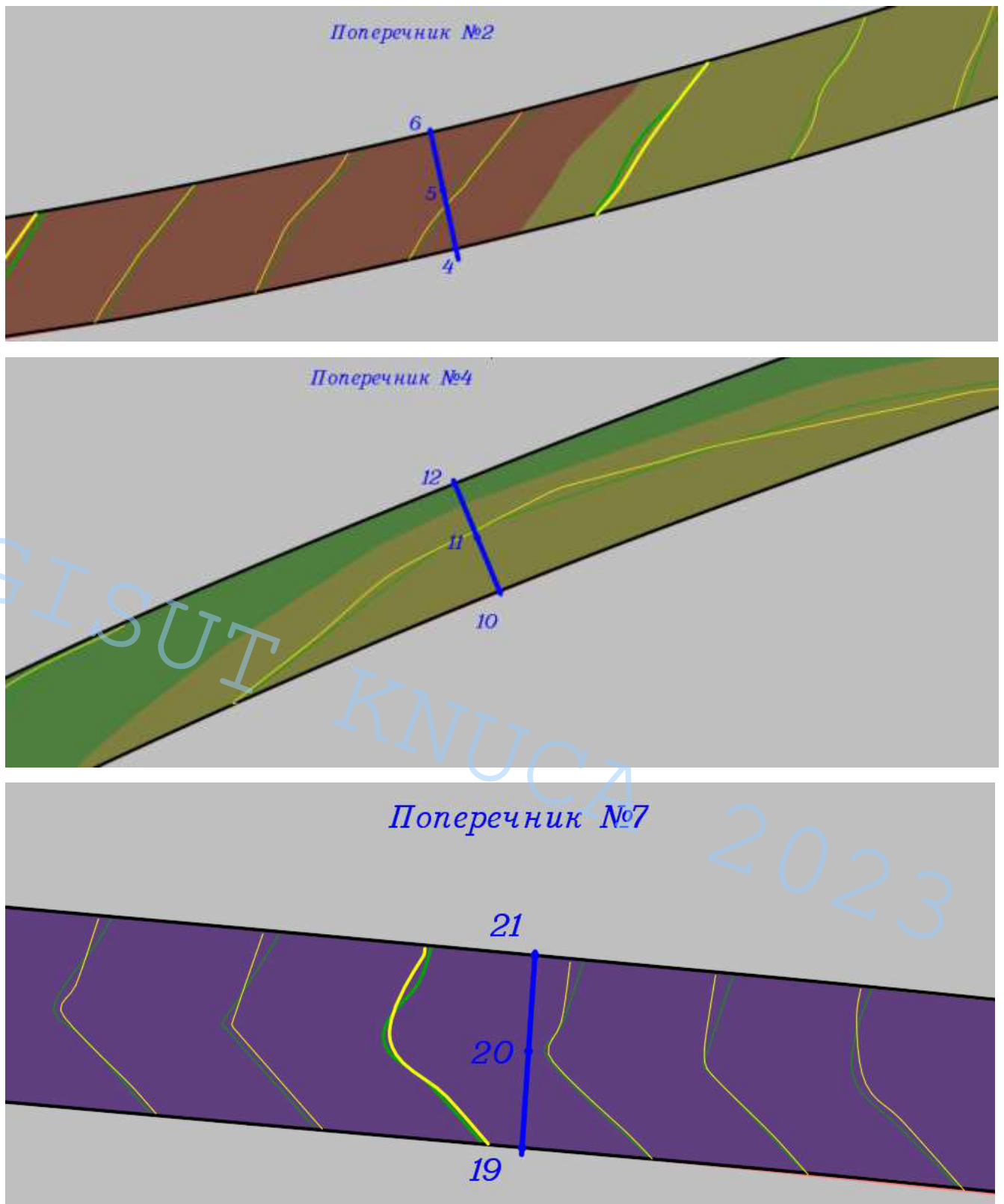


Рис. 3.8. Порівняння рельєфу з тахеометричного знімання та аерофотозйомкою в режимі RTK

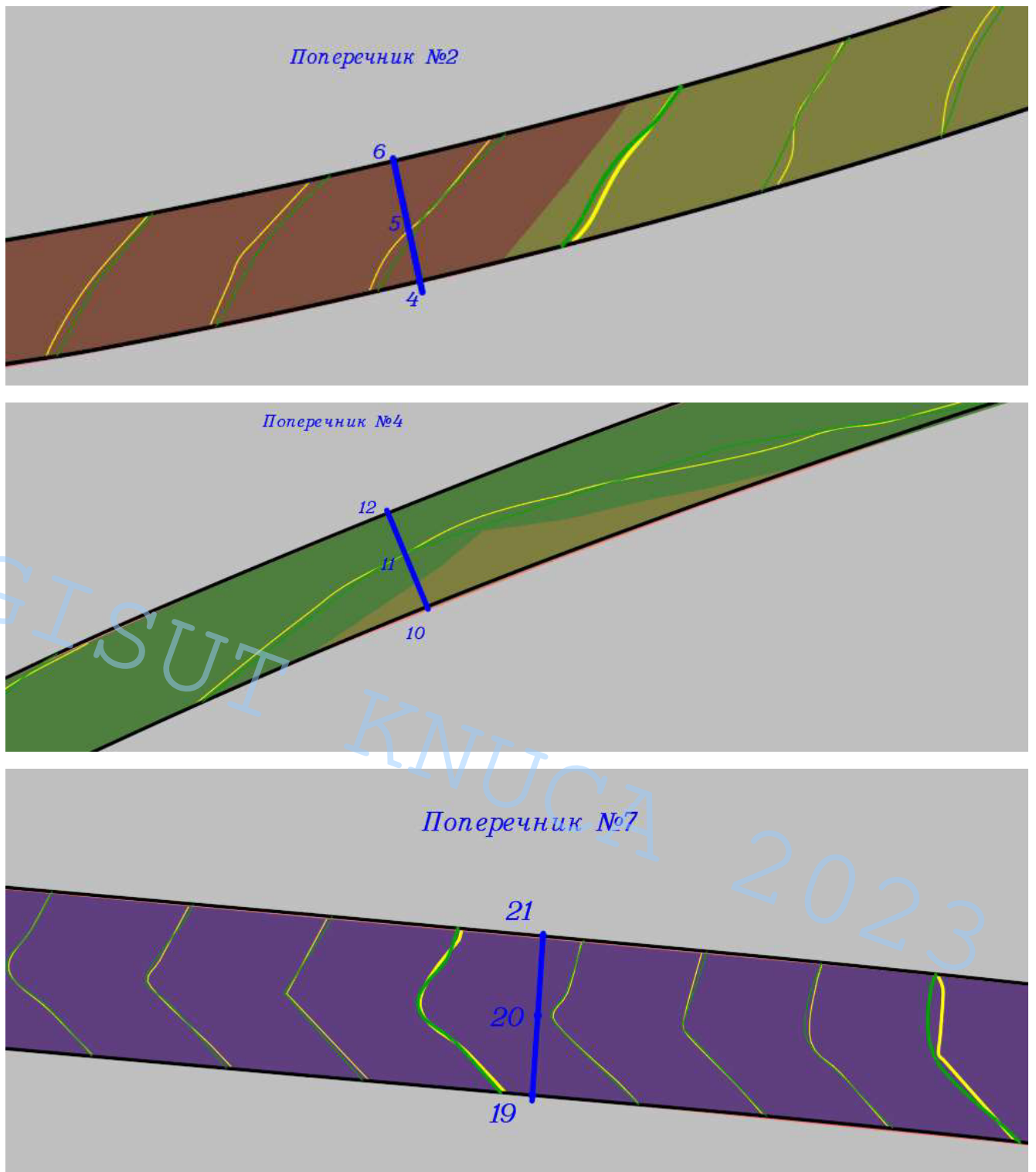


Рис. 3.9. Порівняння рельєфу з тахеометричного знімання та аерофотозйомкою з прив'язкою до опорних точок

В абсолютному значенні розходження між горизонталями в плані не перевищують 0,25 м. Для похилу в 0,0310 ‰, на даній ділянці дороги, перевищення на відстані в 0,25 м дорівнює 0,008 м. Ця величина не перевищує допустиму $\frac{1}{4}$ перерізу рельєфу – 0,125 м.

Проведемо оцінку точності створених векторних даних. За основу візьмемо поперечні перерізи на проїзній частині дороги, в кількості семи штук на відстані 150 м один від одного (рис. 3.10). Також порівняємо поздовжній профіль по кромці автомобільної дороги.

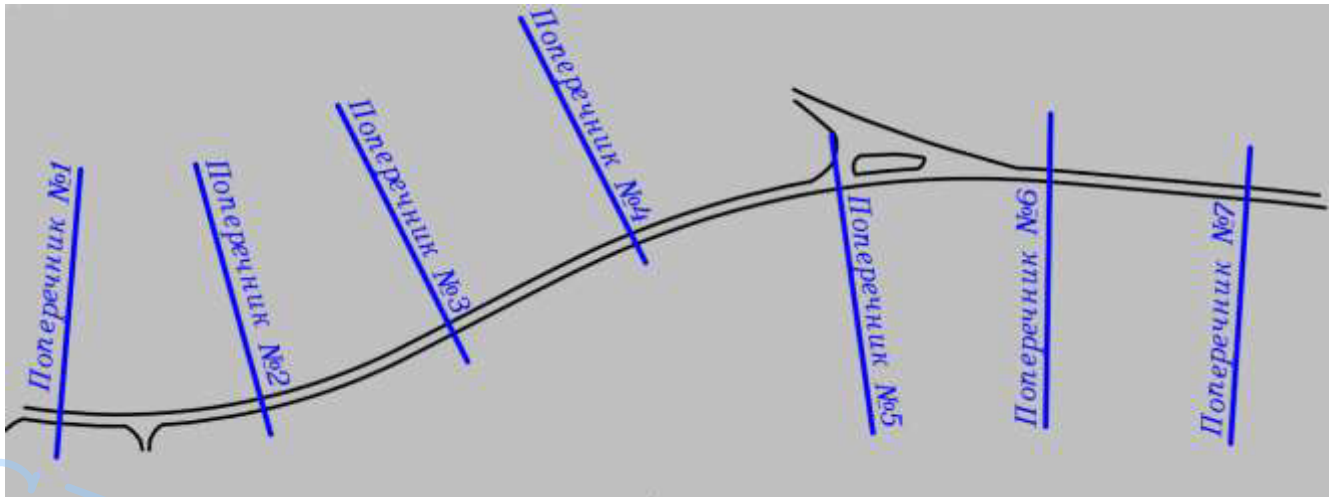


Рис. 3.10. Схема розташування поперечних перерізів

На рис. 3.11 та 3.12 графічно показана різниця між поперечними профілями.

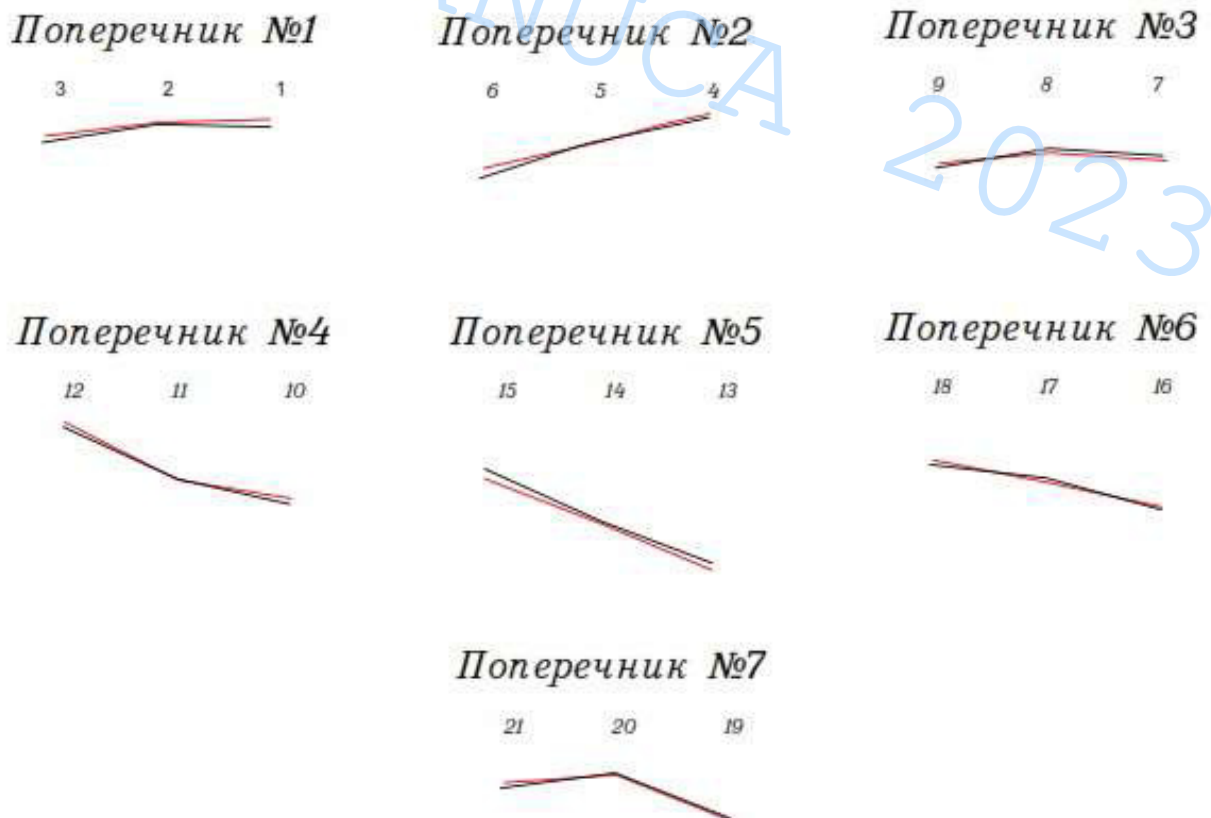
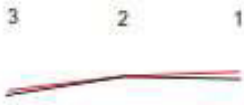
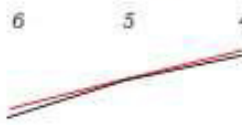


Рис. 3.11. Порівняння поперечних профілів з тахеометричного знімання та аерофотозйомкою в режимі RTK

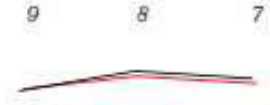
Поперечник №1



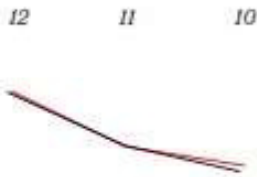
Поперечник №2



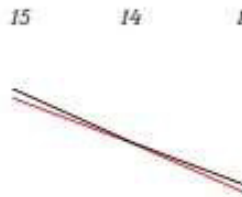
Поперечник №3



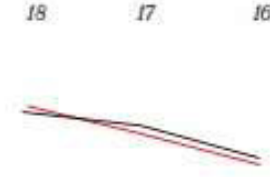
Поперечник №4



Поперечник №5



Поперечник №6



Поперечник №7

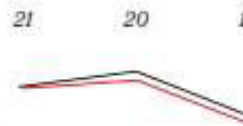


Рис. 3.12. Порівняння поперечних профілів з тахеометричного знімання та аерофотозйомкою з прив'язкою до опорних точок

Червоним кольором виділені профілі побудовані в ПЗ «Agisoft Metashape Pro». Різниця значень розходжень в плановому та висотному положенні наведені таблицях 3.1 та 3.2.

Для переходу від середніх значень відхилень до середніх квадратичних похибок застосуємо формулу Бесселя:

$$m = \sqrt{\frac{V^2}{n-1}}$$

**Різниця координат визначених з тахеометричного знімання та
аерофотозйомкою в режимі RTK**

Таблиця 3.1

Точка	Різниця координат			Відхилення від середнього значення			СКП		
	$\Delta X, \text{ м}$	$\Delta Y, \text{ м}$	$\Delta Z, \text{ м}$	X	Y	Z	V_X^2	V_Y^2	V_Z^2
1	0,0039	0,0000	0,0221	0,0409	0,0163	-0,0044	0,0017	0,0003	0,0000
2	0,0023	0,0002	0,0063	0,0425	0,0161	0,0114	0,0018	0,0003	0,0001
3	0,1070	0,0108	0,0282	-0,0622	0,0055	-0,0105	0,0039	0,0000	0,0001
4	0,0199	0,0042	0,0181	0,0249	0,0121	-0,0004	0,0006	0,0001	0,0000
5	0,0615	0,0271	0,0041	-0,0167	-0,0108	0,0136	0,0003	0,0001	0,0002
6	0,0551	0,0251	0,0128	-0,0103	-0,0088	0,0049	0,0001	0,0001	0,0000
7	0,0637	0,0665	0,0141	-0,0189	-0,0502	0,0036	0,0004	0,0025	0,0000
8	0,0436	0,0231	0,0163	0,0012	-0,0068	0,0014	0,0000	0,0000	0,0000
9	0,0794	0,0722	0,0178	-0,0346	-0,0559	-0,0001	0,0012	0,0031	0,0000
10	0,0490	0,0204	0,0202	-0,0042	-0,0041	-0,0025	0,0000	0,0000	0,0000
11	0,0195	0,0081	0,0032	0,0253	0,0082	0,0145	0,0006	0,0001	0,0002
12	0,0459	0,0191	0,0221	-0,0011	-0,0028	-0,0044	0,0000	0,0000	0,0000
13	0,0332	0,0042	0,0363	0,0116	0,0121	-0,0186	0,0001	0,0001	0,0003
14	0,0052	0,0010	0,0084	0,0396	0,0153	0,0093	0,0016	0,0002	0,0001
15	0,0721	0,0409	0,0269	-0,0273	-0,0246	-0,0092	0,0007	0,0006	0,0001
16	0,0453	0,0008	0,0184	-0,0005	0,0155	-0,0007	0,0000	0,0002	0,0000
17	0,0142	0,0004	0,0148	0,0306	0,0159	0,0029	0,0009	0,0003	0,0000
18	0,0654	0,0036	0,0118	-0,0206	0,0127	0,0059	0,0004	0,0002	0,0000
19	0,0341	0,0023	0,0116	0,0107	0,0140	0,0061	0,0001	0,0002	0,0000
20	0,0399	0,0027	0,0288	0,0049	0,0136	-0,0111	0,0000	0,0002	0,0001
21	0,0805	0,0101	0,0301	-0,0357	0,0062	-0,0124	0,0013	0,0000	0,0002

сер.	0,0448	0,0163	0,0177	$\Sigma=$	0,0158	0,0087	0,0016
				$m_i=$	0,0281	0,0209	0,0089
				$m_{xy}=$	0,0350		

**Різниця координат визначених з тахеометричного знімання та
аерофотозйомкою з прив'язкою до опорних точок**

Таблиця 3.2

Точка	Різниця координат			Відхилення від середнього значення			СКП		
	$\Delta X, \text{ м}$	$\Delta Y, \text{ м}$	$\Delta Z, \text{ м}$	X	Y	Z	V_X^2	V_Y^2	V_Z^2
1	0,0498	0,0050	0,0264	0,0110	0,0169	-0,0088	0,0001	0,0003	0,0001
2	0,0023	0,0002	0,0007	0,0585	0,0217	0,0169	0,0034	0,0005	0,0003
3	0,1070	0,0108	0,0149	-0,0462	0,0111	0,0027	0,0021	0,0001	0,0000
4	0,0190	0,0042	0,0180	0,0418	0,0177	-0,0004	0,0017	0,0003	0,0000
5	0,0549	0,0120	0,0047	0,0059	0,0099	0,0129	0,0000	0,0001	0,0002
6	0,1151	0,0251	0,0332	-0,0543	-0,0032	-0,0156	0,0029	0,0000	0,0002
7	0,1018	0,0739	0,0179	-0,0410	-0,0520	-0,0003	0,0017	0,0027	0,0000
8	0,0231	0,0436	0,0184	0,0377	-0,0217	-0,0008	0,0014	0,0005	0,0000
9	0,1365	0,0737	0,0070	-0,0757	-0,0518	0,0106	0,0057	0,0027	0,0001
10	0,1513	0,0639	0,0209	-0,0905	-0,0420	-0,0033	0,0082	0,0018	0,0000
11	0,0178	0,0126	0,0034	0,0430	0,0093	0,0142	0,0018	0,0001	0,0002
12	0,0977	0,0605	0,0031	-0,0369	-0,0386	0,0145	0,0014	0,0015	0,0002
13	0,0332	0,0064	0,0270	0,0276	0,0155	-0,0094	0,0008	0,0002	0,0001
14	0,0052	0,0010	0,0021	0,0556	0,0209	0,0155	0,0031	0,0004	0,0002
15	0,0886	0,0461	0,0338	-0,0278	-0,0242	-0,0162	0,0008	0,0006	0,0003
16	0,0273	0,0008	0,0247	0,0335	0,0211	-0,0071	0,0011	0,0004	0,0001
17	0,0142	0,0004	0,0290	0,0466	0,0215	-0,0114	0,0022	0,0005	0,0001
18	0,0703	0,0036	0,0206	-0,0095	0,0183	-0,0030	0,0001	0,0003	0,0000
19	0,0341	0,0023	0,0274	0,0267	0,0196	-0,0098	0,0007	0,0004	0,0001
20	0,0399	0,0027	0,0325	0,0209	0,0192	-0,0149	0,0004	0,0004	0,0002
21	0,0881	0,0111	0,0049	-0,0273	0,0108	0,0127	0,0007	0,0001	0,0002

сер. 0,0608 0,0219 0,0176

$\Sigma =$ 0,0405 0,0139 0,0026

$m_i =$ 0,0450 0,0263 0,0113

$m_{xy} =$ 0,0522

На рис. 3.13 показані фрагменти поздовжнього профілю де показані висотні відхилення. Повний вид профілю наведено в графічних додатках.

Відмітка землі за аерофотозйомкою з прив'язкою до опорних точок, м	287,82	288,37	288,88	289,39
Відмітка землі за аерофотозйомкою в режимі RTK, м	287,83	288,38	288,88	289,40
Відмітка землі з тахеометричного знімання, м	287,80	288,36	288,85	289,38
Відстань, м	20	20	20	
Пікети	0			

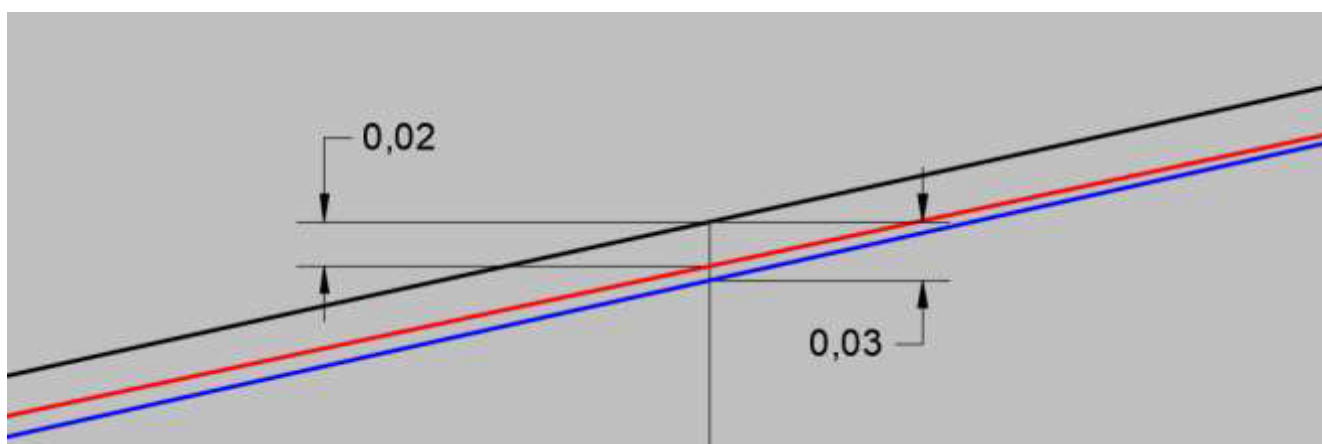
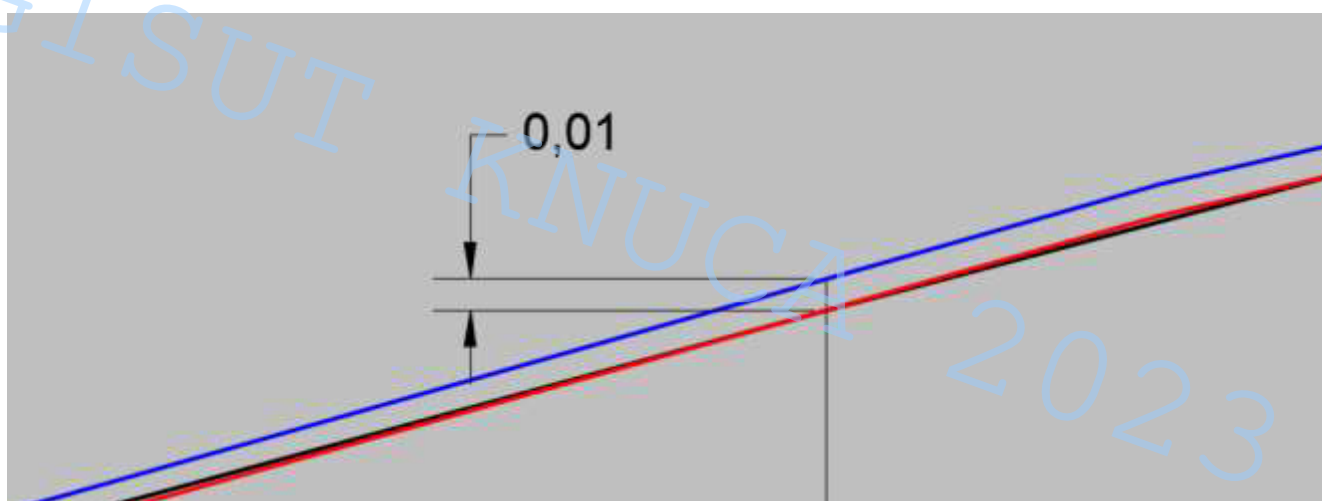


Рис. 3.13. Фрагменти поздовжнього профілю автомобільної дороги

Як можна побачити по результатах аналізу середні планові відхилення за результатами аерофотознімання, в порівнянні з тахеометричним зніманням, не перевищують - 6,5 см, а висотні – 4 см.

З огляду на допустимі помилки $m_{xy(\text{доп})} = 0,5$ м та $m_H(\text{доп}) = 0.125$ м, можна зробити висновок про відповідність отриманих фотограметричних моделей до вимог при створенні топографічного плану масштабу 1:1000.

GISUT KNUCA 2023

ВИСНОВКИ

Метою даної дипломної роботи було дослідження точності та ефективності методів топографічного знімання автомобільних доріг, які застосовуються за допомогою безпілотних літальних апаратів при створенні планів масштабу 1:1000.

За результатами аналізу отриманих даних можна стверджувати про відповідність до Інструкції з топографічного знімання виготовлених цифрових топографічних планів. Отримані матеріали є достатніми для подальших проектних робіт. Проте треба зауважити, що при виконанні топографічних робіт на автомобільних дорогах часто зустрічаються лісосмуги, нечищені узбіччя та кювети. Тому, для поліпшення точності та контролю аерофотознімальних робіт, в таких випадках треба вдаватися до традиційних методів знімання.

Також дане дослідження доводить, що при використанні БПЛА без RTK-модуля на борту, достатньо три опорних пункти на один кілометр лінійного маршруту, для отримання необхідної точності при виготовленні топографічних планів. Це дає змогу зменшити час та витрати на виконання польових робіт при прив'язці даних пунктів.

На основі проведеної роботи можна зробити наступні висновки щодо переваг та недоліків використання БПЛА при виконанні топографо-геодезичних робіт на автомобільних дорогах.

Переваги:

- Швидкість та ефективність;
- Висока точність та деталізація;
- Легкість доступу до важкодоступних областей;
- Безпека та зручність;
- Низькі витрати.

Недоліки:

- Неможливість точного нівелювання при аерофотозйомці.
- Залежність від погодних умов.
- Відсутність можливості аналізу точності виконаних робіт негайно після їх виконання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98). Головне управління геодезії, картографії та кадастру, наказ № 56 від 09.04.98, м. Київ.
2. Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. (Проект. Перша редакція).
3. Державні будівельні норми: ДБН А.2.1-1-2008. Вишукування, проектування і територіальна діяльність. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва. – Введ. 2008-07-01. - К.: Мінрегіонбуд, 2008. – 72 с.
4. Державні будівельні норми: ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. – Введ. 2016-04-01. - К.: Мінрегіонбуд, 2016. – 91 с.
5. Національний стандарт України: ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. – Введ. 2011-11-01. - К.: Мінрегіонбуд, 2011. – 76 с.
6. Шульц Р.В., Войтенко С.П., Крельштейн П.Д., Маліна І.А. (2015). До питання розрахунку точності визначення координат. Інженерна геодезія (вип. 62).
7. Руководство пользователя Agisoft Metashape Standard Edition, версия 2.0.
8. Кондратенко Т., Горковчук Д. (2020). Геодезичні дослідження та моделювання об'єктів єврейської спадщини — Посібник ESJF.
9. Атаманенко Ю.Ю. Фотограмметрія та дистанційне зондування землі. Криворізький національний університет. Інженерна геодезія, 2017, вип. 64.
10. Meier G., Frank S. Dokumentation und Überwachung einer Rutschung mittels UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Geodäsie/Vermessung, Geomatik Schweiz, 2014. – P.449–452.
11. Rinaudo F., Chiabrando F., Lingua A. M., Spanò A. T. Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer. The International archives of the photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences, 39(B5), 2012. –. 583–588
12. Introduction To UAV Photogrammetry And Lidar Mapping Basics

13. Cartographic Bases. Accurate information about space for making reliable decisions with all the necessary infrastructure and efficient planning

GISUT KNUCA 2023

GISUT KNUCA 2023