

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Простак Роман
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
**«Оцінка точності кадастрового знімання з використанням
фотограмметрії БПЛА та традиційними геодезичними методами»**
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

Р. Простак, студент групи ГЗ-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: **ст. викладач Віталій Ковтун**
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Простак Роман

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Оцінка точності кадастрового знімання з використанням фотограмметрії БПЛА та традиційними геодезичними методами»

керівник роботи: _____ *ст. викладач Віталій Ковтун*

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

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

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

1. Огляд використання БПЛА у кадастровому зніманні

2. Дослідницька зона для обстеження будівель за допомогою БПЛА

3. Обробка даних та результати

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Огляд використання БПЛА у кадастровому зніманні		
2	Дослідницька зона для обстеження будівель за допомогою БПЛА		
3	Обробка даних та результати		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ ***Простак Р.***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ ***Ковтун В.***

Анотація

У цій бакалаврській праці ми приділили основну увагу дослідженню продуктивності та правильності застосування фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у кадастровому зніманні.

Ми розглянули актуальні техніки збору просторових даних з використанням БПЛА, підходи до обробки фотографій та формування цифрових моделей рельєфу.

Було проведено практичне дослідження на конкретній території для порівняння точності результатів фотограмметричного знімання з нормами для кадастрових робіт, згідно з поточним законодавством України.

Отримані дані показали, що фотограмметрія з БПЛА забезпечує необхідну точність для кадастрових потреб, за умови належного планування польотів, калібрування та обробки даних.

За мету було поставлено дослідити та проаналізувати геометричну точність фотограмметричної кадастрової зйомки.

Точність аеротриангуляції оцінювали, використовуючи варіативні розташування наземних контрольних пунктів та контрольних точок, застосовуючи програмний продукт Agisoft Metashape.

Координати об'єктів визначалися з використанням трьох різноманітних методів вимірювання координат точок.

У якості додаткових продуктів були згенеровані моделі дахів будівель та 3D-моделі самих споруд.

Окрім того, було створено цифровий ортофотоплан з відповідною роздільною здатністю на місцевості.

Ключові слова: земельний кадастр, GNSS, БПЛА, сканування

Abstract

In this bachelor's thesis, we focused on the study of the productivity and accuracy of using photogrammetry using unmanned aerial vehicles (UAVs) in cadastral surveying.

We considered current techniques for collecting spatial data using UAVs, approaches to processing photographs and forming digital terrain models.

A practical study was conducted on a specific territory to compare the accuracy of photogrammetric survey results with the standards for cadastral work, in accordance with the current legislation of Ukraine.

The data obtained showed that photogrammetry with UAVs provides the necessary accuracy for cadastral needs, provided that proper flight planning, calibration and data processing are carried out.

The goal was to investigate and analyze the geometric accuracy of photogrammetric cadastral surveying.

The accuracy of aerial triangulation was assessed using variable locations of ground control points and control points using the Agisoft Metashape software product.

The coordinates of the objects were determined using three different methods of measuring point coordinates.

As additional products, models of building roofs and 3D models of the structures themselves were generated.

In addition, a digital orthophoto map with the appropriate resolution on the ground was created.

Keywords: land cadastre, GNSS, UAV, scanning

Зміст

Вступ

1 Огляд використання БПЛА у кадастровому зніманні

2. Дослідницька зона для обстеження будівель за допомогою БПЛА

2.1 Обстеження будівель

2.2 Польоти БПЛА

3. Обробка даних та результати

3.1 Оцінка вимірювань тахіметра

3.2 Оцінка польотів зображень БПЛА

3.3 Порівняння двох методів

Висновки

Список використаних джерел

Вступ

Сучасні кадастрові вимірювання вимагають вражаючої точності, швидкої обробки та вигідності в процесі збору геопросторових даних.

Через це, все більш широкого розповсюдження набирають новаторські способи отримання геопросторових даних, наприклад — застосування фотограмметрії з безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Цей метод дозволяє суттєво скоротити обсяг робіт, охопити значні території за короткий термін та створити деталізовані зображення місцевості з високою роздільною здатністю.

Фотограмметрія, що здійснюється з використанням безпілотних літальних апаратів, суттєво розширює горизонти в контексті кадастрових робіт.

Це дозволяє визначати межі землевласності, оперативно генерувати ортофотоплани, цифрові моделі рельєфу та тривимірні моделі території.

Проте, для забезпечення легальності використання цих даних, особливо в рамках Державного земельного кадастру, критично важливо мати ясне уявлення про точність отриманих результатів.

Також слід переконатися в їх повній відповідності діючим державним стандартам та нормативним актам.

Завданням нашої праці є визначення точності кадастрового знімання з використанням фотограмметрії безпілотних літальних апаратів, що здійснюється через практичний досвід, аналіз отриманих даних та їх зіставлення з положеннями нормативних актів.

Для реалізації визначеної мети було обрано тестову ділянку, організовано аерозйомку з використанням БПЛА, отримано дані наземної геодезичної зйомки для контролю, а також проведено фотограмметричну обробку даних з застосуванням відповідного програмного забезпечення.

Необхідно підкреслити актуальність даного дослідження.

В умовах децентралізації, цифровізації та оприлюднення кадастрової інформації, територіальні громади та приватні підприємства дедалі активніше використовують передові технології задля оперативного обліку земель, нагляду за їх використанням та врегулювання земельних конфліктів.

Відтак, наукове вивчення точності фотограмметричних методів, що застосовуються з безпілотних літальних апаратів, у кадастрових роботах є не просто сучасним, а й важливим з практичної точки зору.

У рамках цього дослідження також проаналізовано вплив різноманітних чинників, зокрема щільності знімків, висоти польоту апарата, кількості контрольних точок, типу місцевості та програмного забезпечення на кінцеву точність результату.

Здобуті дані дають можливість дійти висновків стосовно відповідності та ефективності застосування фотограмметрії з використанням БПЛА для кадастрових потреб.

1 Огляд використання БПЛА у кадастровому зніманні

Останніми роками безпілотники, або безпілотні літальні апарати (БПЛА), міцно увійшли в геодезичну практику як універсальний інструмент.

Важливість цієї технології в сучасному світі стає все більш очевидною з огляду на стрімке розширення ринку БПЛА та збільшення числа тих, хто їх використовує.

В Україні протягом останнього десятиріччя спостерігається активне впровадження безпілотників (БПЛА) у сферу кадастрової зйомки.

Такий підхід дає змогу значно підвищити точність, швидкість та економічну ефективність проведення геодезичних робіт.

У контексті розгортання цифрової економіки та модернізації земельних взаємин, використання БПЛА є значущим елементом державної стратегії просторового планування.

Згідно з даними Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру (Держгеокадастру), станом на 2024 рік маємо такі показники:

- понад 50% нових кадастрових зйомок виконуються з використанням БПЛА;
- щороку здійснюється понад 4 000 польотів для потреб земельного кадастру;
- На балансі державних та приватних організацій, котрі мають ліцензії на геодезичну діяльність, є більше 700 безпілотників, сертифікованих для картографування;
- Застосування БПЛА дозволяє зменшити час зйомок на 60–80% у порівнянні з традиційними наземними методами;

- У середньому площа кадастрової зйомки одним дроном протягом доби варіюється від 1 до 3 тис. га, що визначається складністю рельєфу місцевості та типом сенсора.

Найбільш популярні рішення в Україні для кадастрових вимірювань:

- DJI Phantom 4 RTK – відносно доступний та широко застосовується для невеликих територій (до 1 тис. га);
- Quantum Systems Trinity F90+ – використовується у великих проєктах, забезпечуючи час польоту до 90 хвилин;
- Delair UX11 та SenseFly eBee X – застосовуються для проєктів середнього розміру з підтримкою RTK/PPK технологій.

Зазначені дрони здатні забезпечувати планову точність в діапазоні 3–5 см після обробки фотограмметричних даних та коригування GNSS вимірювань.

Застосовуючи наземні опорні пункти, можливо добитися точності до 2 см у горизонтальній площині та до 3 см по висоті.

У 2021 році в Україні почали діяти зміни до Закону "Про Державний земельний кадастр".

Ці зміни узаконили застосування даних аерофотозйомки з БПЛА для офіційного внесення в кадастрові відомості.

Також:

- затвердили Методику використання БПЛА в кадастрових роботах, розроблену Держгеокадастром;
- запровадили систему електронного обміну даними між операторами дронів та центрами обробки інформації;
- встановили обов'язкову реєстрацію польотів у контрольованому повітряному просторі під час зйомки населених пунктів.

Проєкт "Відкрита мапа сільгоспугідь" (2022–2023)

У межах цього проекту було застосовано БПЛА для аерофотозйомки понад 1,5 млн гектарів землі в Київській, Черкаській, Полтавській та Вінницькій областях.

Здобуті дані інтегровано до загальнодоступної кадастрової карти.

Для інвентаризації забудов у приміській зоні Львова було задіяно безпілотники, оснащені LIDAR-сканерами.

Отримані дані дали змогу зафіксувати більше 800 випадків незаконного будівництва, у тому числі на землях лісництв.

У контексті програми реабілітації територій після їх звільнення, БПЛА використовуються для прискореної оцінки збитків на ділянках.

Протягом півроку було проінспектовано понад 270 тис. га, де було виявлено невідповідності у межах ділянок на 18% обстеженої території.

Основні виклики:

- Обмеження повітряного простору поблизу військових об'єктів для польотів БПЛА;
- Брак фахівців з управління безпілотниками, потрібних для кадастрової діяльності;
- Відсутність єдиного програмного забезпечення для обробки фотограмметричних даних та їх інтеграції в ГІС.

Перспективи:

- Впровадження дронів з інтелектом, здатних самостійно аналізувати ситуацію на місці;
- Використання камер, що знімають у різних спектрах, для оцінки стану земельних ресурсів;
- Розширення масштабів використання БПЛА в системах моніторингу земель.

Однією з основних проблем, що виникають під час використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у кадастрових зніманнях, є забезпечення належної геометричної точності отриманих даних.

У межах виконання нашої бакалаврської роботи було проведено дослідження визначеної проблеми.

Реалізація здійснювалась через фотограмметричне знімання об'єктів, розташованих на території Палацу Потоцьких, що в Івано-Франківську.

Для забезпечення знімання було використано безпілотний літальний апарат DJI Phantom 4 Pro, що функціонував у трьох різноманітних режимах польотних завдань.

Для визначення зовнішніх параметрів орієнтації зображень було застосовано координати, отримані з GNSS-обладнання.

Ці дані оброблялись в режимі постобробки із використанням відповідного програмного забезпечення.

Якість аеротриангуляції була досліджена в Agisoft Metashape, використовуючи різноманітні підходи до розміщення наземних контрольних пунктів та пунктів прив'язки.

Координати кутових точок споруд визначались трьома способами: аналізом 3D-хмари точок, обробкою стереозображень та побудовою перерізів, як прямолінійних, так і утворених перетином площин вирівнювання.

Щільна хмара точок стала основою для генерації різних моделей: покрівель будівель, тривимірних моделей споруд з різним ступенем деталізації, цифрової моделі поверхні (ЦМП) та ортофотоплану з високою просторовою роздільною здатністю.

На завершення, було проведено оцінку точності, повноти та економічної ефективності робіт з БПЛА, що дало можливість порівняти отримані дані з результатами традиційного тахеометричного знімання будівельних об'єктів.

2. Дослідницька зона для обстеження будівель за допомогою БПЛА

Палац Потоцьких, розташований в Івано-Франківську, було визначено як тестову площадку для вивчення будівель (Див. Рисунок 1).

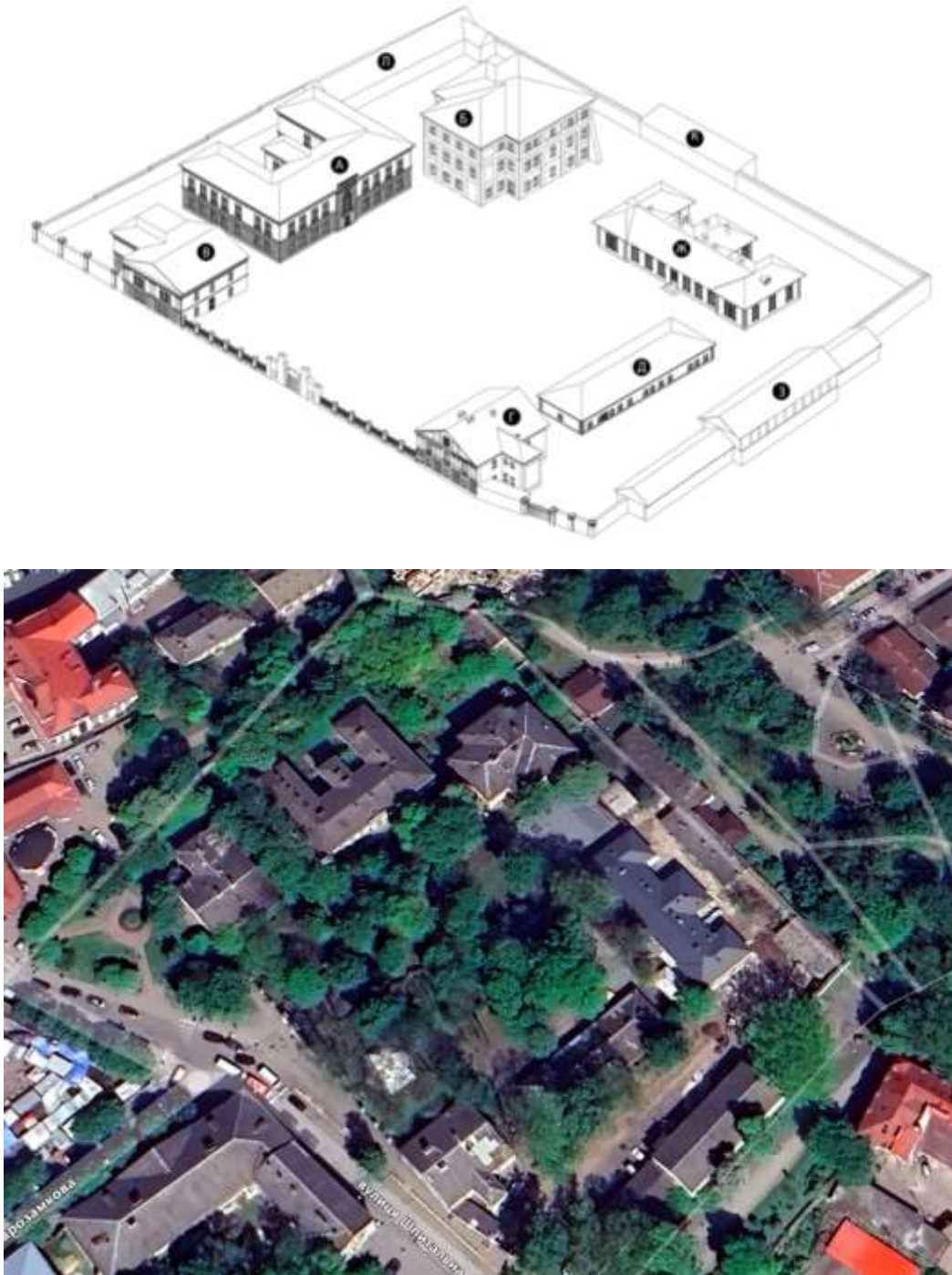


Рисунок 1. Схематичне та супутникове зображення території дослідження

Комплекс резиденції Потоцьких було закладено у 1672-1682 роках власником Станіславом /нині Івано-Франківськ/, гетьманом польного коронного Андрієм Потоцьким.

Палацовий ансамбль, як і місто загалом, до 1802 року лишався приватним володінням багатой магнатської династії Потоцьких, члени якої в різні періоди обіймали при дворі польського короля важливі урядові посади.

У різний період володарі міста зустрічали у своїх покоях численних шанованих осіб, включно з Яном Собеським, котрий двічі прибував у місто, спочатку як польський коронний гетьман, а згодом – як польський король; трансільванським князем Ференцем Ракочі та дружиною Пилипа Орлика – Ганною, і навіть австрійським цісарем Йосипом II.

Збанкрутілий у 1801 році останній власник припинив своє існування, і резиденція перейшла під контроль державної скарбниці.

Протягом тривалого періоду, з 1804 по 2004 роки, комплекс використовувався як військовий шпиталь для різних держав, до юрисдикції яких належало місто: Австрії, Польщі, Німеччини, Радянського Союзу та України.

2.1 Обстеження будівель

Польові вимірювання будівель було виконано 14 жовтня 2021 року.

Для цього використовували електронний тахеометр Leica Viva TS16, який забезпечує високу точність: кутові вимірювання виконуються з найбільшою похибкою 0,3 мгон, а похибка вимірювання відстані становить 2 мм + 2 ppm, незалежно від типу поверхні.

Крім того, під час вимірювань був застосований ГНСС-приймач Leica GS16, який забезпечує багаточастотне позиціонування, використовуючи супутникові системи GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou.[4]

Для режиму RTK (реального часу) вказаний приймач показує точність обчислення координат до 8 мм + 1 ppm по горизонталі та до 15 мм + 1 ppm по вертикалі.

Зовнішній вигляд обладнання, що використовується, подана на рисунку 2.



Рисунок 2 Прилади для проведення дослідження

Чотири GNSS-пункти (пункт 1, пункт 2, пункт 3 та пункт 4, дивись Рисунок 3) були розміщені та обміряні неподалік від дослідницької території в рамках цього дослідження.

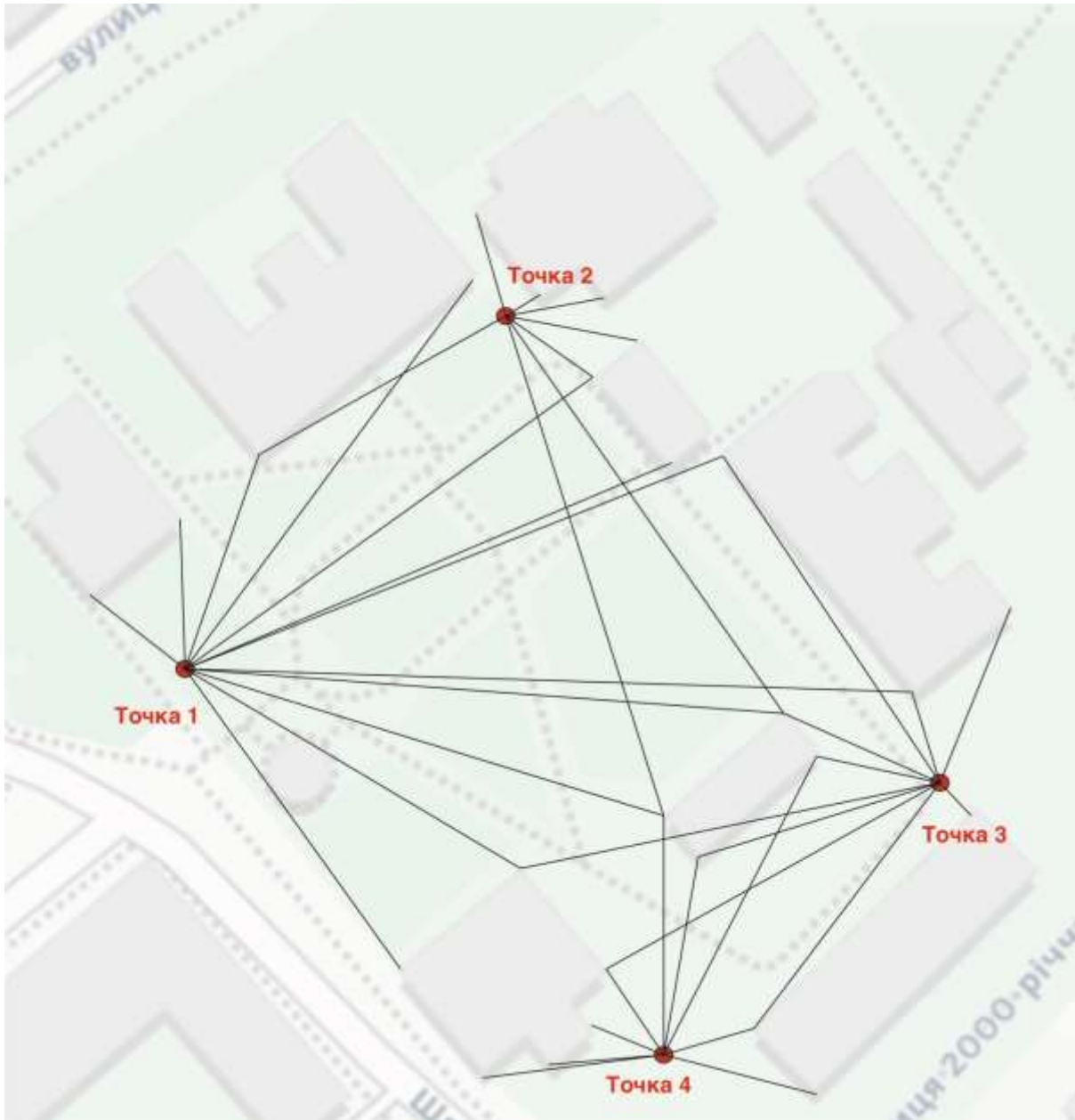


Рисунок 3 План розташування опорних точок

Виміри координат визначених пунктів проводилися із застосуванням базової GNSS-станції FRKV, котра дислокується в Івано-Франківську.

Кожну точку фіксували двічі, розділяючи сеанси спостережень незначним проміжком часу – приблизно 30 секунд.

Отримані значення координат стали базисом для проведення подальших тахеометричних робіт.

2.2 Польоти БПЛА

Аерозйомку здійснили 22 жовтня 2021 року.

Виконали три окремі льотні місії з використанням безпілотного літального апарату.

Зйомка проводилась камерою X4S, прикріпленою до платформи DJI Phantom 4 Pro V2.0 (див. рисунок 4). Фокусна відстань камери становила 8,8 мм, а роздільна здатність зображень – 20 мегапікселів.



Рисунок 4. Система БПЛА DJI Phantom 4 Pro

Керування дроном здійснювалось з мобільного пристрою Apple iPhone через додаток DJI GroundStation Pro.

Політний план був розроблений безпосередньо на місці проведення робіт, використовуючи вказане програмне забезпечення з попередньо налаштованими параметрами.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) був обладнаний модулем постобробки кінематичних даних (РРК).[4]

Зйомка проводилася на різних висотах, при цьому для кожної місії (зі сходу на захід та з півночі на південь) було передбачено повздовжнє перекриття кадрів на 80% та поперечне – на 60%.

Окрім того, було організовано третій політ з метою отримання похилих (облікових) знімків.

Розташування камер (позначено чорним) та зони перекриття зображень можна побачити на рисунку 5.[4]

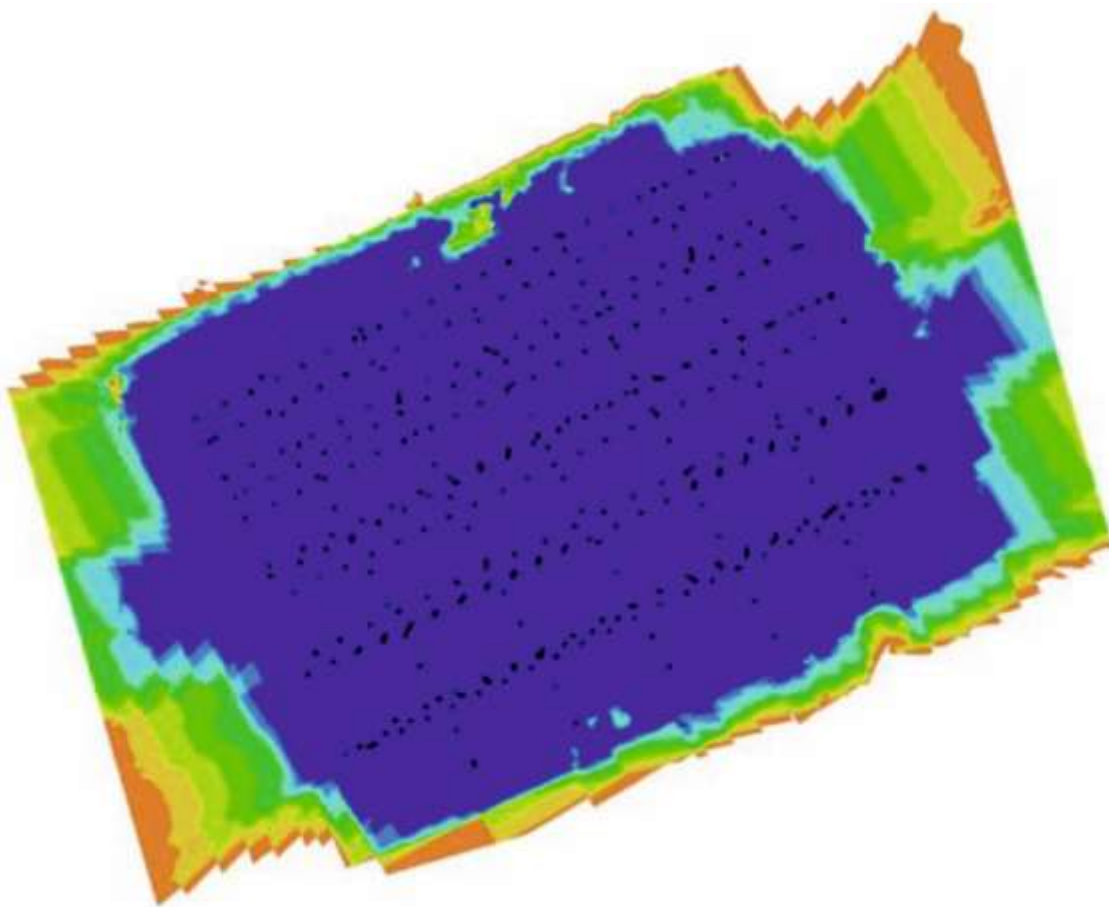


Рисунок 5. Розташування камер (чорні точки) та перекриття зображень.

Таблиця 1 містить основні технічні дані, що стосуються виконаних польотів.

Таблиця 1. Технічні характеристики трьох польотів БПЛА.

Параметри	Поздовжній політ	Перехресний політ	Поперечний політ
Висота	40м	50м	45м
Кут огляду	Найнижчий рівень	Найнижчий рівень	35 ⁰
GSD	10.8мм	12.7мм	12.5мм
Перекриття	60%-80%	60%-80%	60%-80%
Час польоту	13хв	3хв	4хв
Кількість фото	220	72	85

На етапі проєктування аерофотозйомки визначають висоту польоту, яка разом з фіксованою фокусною відстанню камери (8,5 мм) впливає на масштаб майбутніх фотографій.

Зважаючи на цей масштаб, обчислюється розмір пікселя на місцевості (GSD – Ground Sampling Distance).

Для цього масштаб множать на розмір одного пікселя на зображенні.

Фактично, отриманий результат вказує на приблизну величину, що відображає просторову точність визначення координат об'єктів.

Для створення якісної щільної хмари точок, необхідно забезпечити перекриття знімків, яке зазвичай має бути в діапазоні 60–80%. [4]

Для надійної калібровки фотоапарата рекомендуємо здійснювати аерозйомку на різних висотах, обираючи траєкторії, які перетинаються під прямим кутом (з поворотом на 90°, у вигляді перехресного польоту).

Додатково, політ з кадрами під кутом сприяє покращенню внутрішньої калібровки фотокамери та забезпечує краще відображення частин об'єктів, що нависають, наприклад, дахів, завдяки зміні перспективи під час зйомки.

Отже, відтворення кутових деталей споруд стає чіткішим та оптимальним для дослідження як на фотоматеріалах, так і в отриманій хмарі точок. [4],[5]

Щоб ознайомитися з докладним технічним описом повітряних траєкторій польоту та процесів забезпечення якості під час використання БПЛА, рекомендується звертатися до спеціалізованої технічної документації.

Під час проведення тахеометричних робіт було встановлено координати десяти контрольних точок на землі (GCP).

Дані були отримані з використанням GNSS-обладнання.

Перед початком зйомки, ці точки було візуально виявлено, шляхом розміщення контрастних чорно-білих міток (дивись рисунок 6).[4]

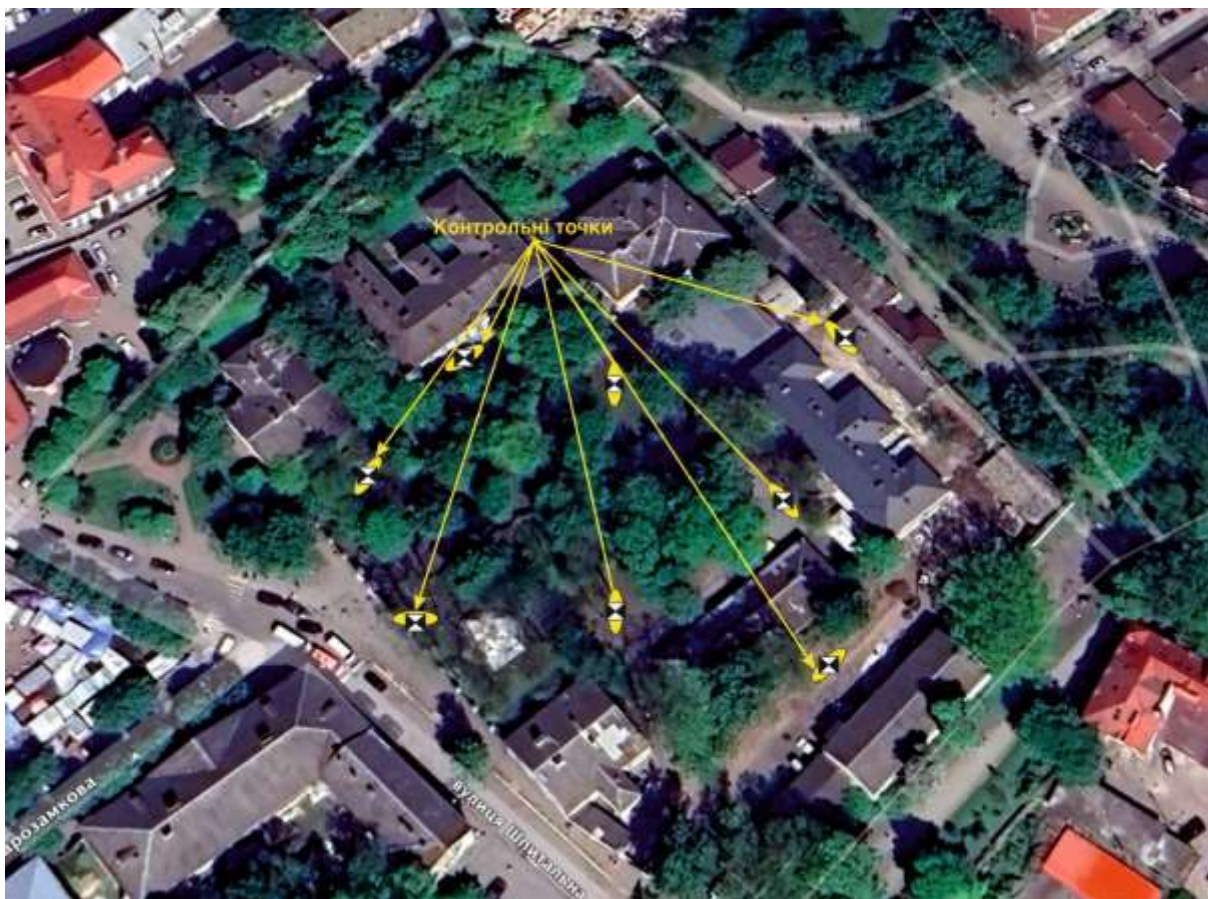


Рисунок 6. Розподіл наземних контрольних точок та чорно-білої цілі.

3. Обробка даних та результати

3.1 Оцінка вимірювань тахіметра

Отримані результати тахеометричних вимірювань було проаналізовано за допомогою спеціального редактора, інтегрованого у програмний комплекс, створений на базі платформи Digital.

Це програмне забезпечення розроблено для обробки, коригування та подальшого впровадження геодезичних даних у цифрові моделі рельєфу.

Під час обробки вимірювальні дані було скориговано з урахуванням розташування чотирьох наземних базових GNSS-пунктів, котрі виступали геодезичними реперами.

Застосування двовимірної корекції суттєво збільшило вірність визначення положення, забезпечуючи середньоквадратичні відхилення в межах 6 мм для координат у площині XY.[4]

Це відповідає високим стандартам точності, необхідним для кадастрових знімків.

Шляхом застосування відкоригованих координат кутів будівель та ключових елементів відбулася інтеграція цих даних в цифрову інвентаризацію об'єктів у системі Digital.

Це полегшує використання одержаних даних при плануванні та управлінні територіями.

У випадках, коли прямі виміри кутових точок будівель на місці не виконувалися (наприклад, через важкий доступ або технічні обмеження), координати таких точок визначалися математичним шляхом.

Для цього були задіяні вимірювання довжин сторін споруд на місцевості.

Це дало змогу обчислити розташування відсутніх кутів, використовуючи геометричні методи, беручи до уваги отримані відомості з інших опорних точок.[4],[6]

Завдяки такому методу було гарантовано безперервність та повноту необхідних даних для подальшого створення моделей об'єктів та виконання точних кадастрових операцій.

3.2 Оцінка польотів зображень БПЛА

Орієнтацію фото та побудову хмари точок реалізували за допомогою програмного забезпечення Agisoft Metashape.

GNSS-інформацію, зібрану під час аерофотозйомки, піддали попередній обробці у спеціалізованій програмі, щоб точно встановити просторове положення камери.

Для точного визначення координат можна використовувати постобробку (ППК), застосовуючи RINEX-файли, отримані з базової станції.

Це дає змогу уникнути залежності від режиму реального часу, як це відбувається у випадку з RTK (кінематичне позиціонування у реальному часі).

Як точка відліку для обробки інформації використовувався або окремий GNSS-приймач, закріплений в заданій позиції на території вивчення, або інформація з найближчої референтної станції FRKV.

Визначені координати розташування камери було трансформовано до системи координат УСК2000 за допомогою відповідного програмного забезпечення.

Отримані дані позиціонування демонструють точність, що варіюється: від приблизно 3 см для фіксованих рішень до 25 см для плаваючих рішень, що представлено на рисунку 7.[4]



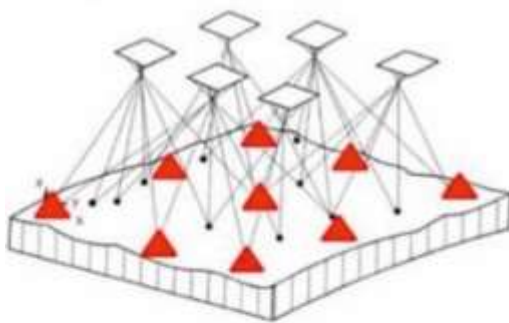
Рисунок 7. Розраховані положення камери

Координати центрів проєкцій застосовувались для виправлення точок, враховуючи стандартні відхилення та відповідні вагові коефіцієнти.

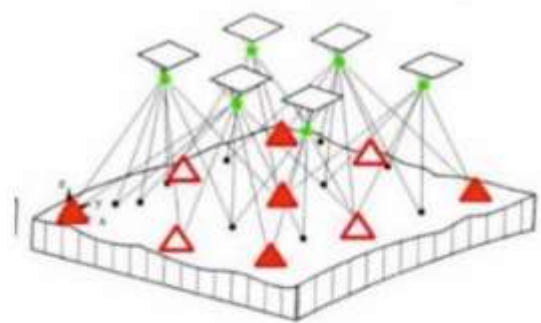
Орієнтування знімків реалізовується за наявності достатньої кількості наземних опорних точок, навіть без залучення методів RTK або PPK.

Проте, досягнення необхідної точності суттєво спрощується з використанням цих рішень, адже це дає змогу зменшити кількість потрібних опорних точок, що, своєю чергою, скорочує час, як у процесі польових робіт, так і на етапі обробки даних в офісі.

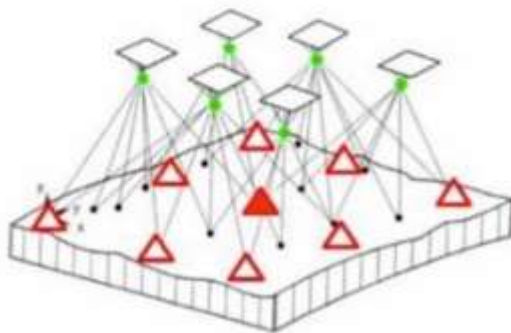
Коригування блоків зв'язності було виконано із використанням чотирьох різних варіантів, показаних на рисунку 8.[4]



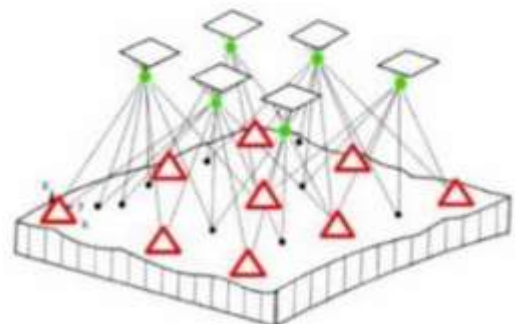
Використані всі контрольні точки



Використано RTK та 5 контрольних точок



Використано RTK та 1 контрольна точка



Використано тільки RTK

Рисунок 8. Використані варіанти для визначення орієнтації

Оновлені результати корекції блоків зв'язків зображено на рисунку 9.



Рисунок 9. Результати коригування для наземних контрольних точок та контрольних точок

Похибки у вимірах координат XYZ наземних контрольних пунктів не перевищують 1 см.

Це свідчить про високий рівень точності проведених вимірювань.

В той же час, орієнтування, яке виконувалося виключно з використанням зовнішнього орієнтування RTK, показує помітні неточності у висотних координатах (Z) на контрольних точках.

Зважаючи на вищесказане, використання хоча б однієї контрольної точки є критично важливим для коригування зв'язності блоків, особливо при застосуванні точного позиціонування камери з використанням RTK-GNSS.

Хоча координата Z є менш визначальною для подальшого опрацювання, її додавання покращує загальну точність орієнтації.[4],[7]

Для вимірювання розташування точок споруд було згенеровано насичену кольорову 3D-хмару точок, що включає близько 100 мільйонів одиниць.

Для опрацювання отриманих даних було використано три методи:

- Метод 1 передбачав безпосереднє визначення координат, що здійснювалося напряму в щільному масиві точок.
- Метод 2 базувався на просторовому перетині орієнтованих стереозоржень, що дозволяло досягти більшої точності визначення розташування об'єктів.
- Метод 3 полягав у застосуванні лінійного розрізу або перетину двох площин вирівнювання для уточнення положення точок.

Використання трикутної сітки для вимірювань виявилось недоцільним через заокругленість кутів будівель, яка виникала внаслідок наявності шумів у хмарі точок (див. Рисунок 10).[4]

Це ускладнювало реалістичне моделювання гострих кутів будівельних конструкцій.

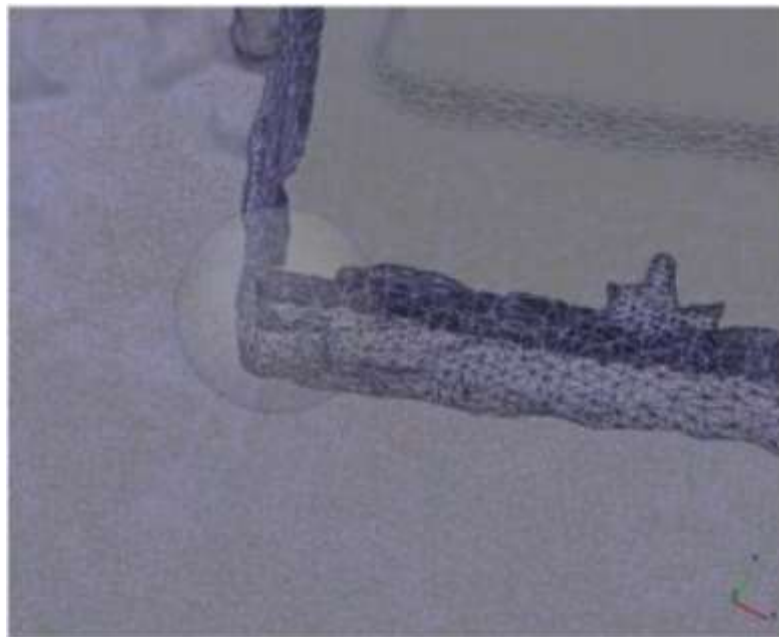


Рисунок 10. Вимірювання точок у трикутній сітці

Однак, найефективніші показники продемонструвало пряме вимірювання у хмарі точок (метод 1).

Загалом, 32 точки споруд, визначені за допомогою тахеометра, продемонстрували позитивну відповідність із даними фотограмметрії.

А саме, 87,5% кутових величин, виміряних фотограмметрично, вклались у визначений допуск похибки у 5 см.[4],[7]

Середнє лінійне відхилення зафіксувалося на рівні 1,4 см, що свідчить про високу точність використаної методики.

Для визначення розташування кожної точки споруд було використано усереднення трьох окремих вимірювань, отриманих з хмари точок.

У той же час, одна зі сторін будівлі вийшла не досить деталізованою через відсутність нахилених фотографій у конкретному секторі, що стало результатом помилки під час планування польоту (див. Рисунок 11).[4]

Це, в свою чергу, створило труднощі під час виконання точних вимірювань у відповідній зоні хмари точок.

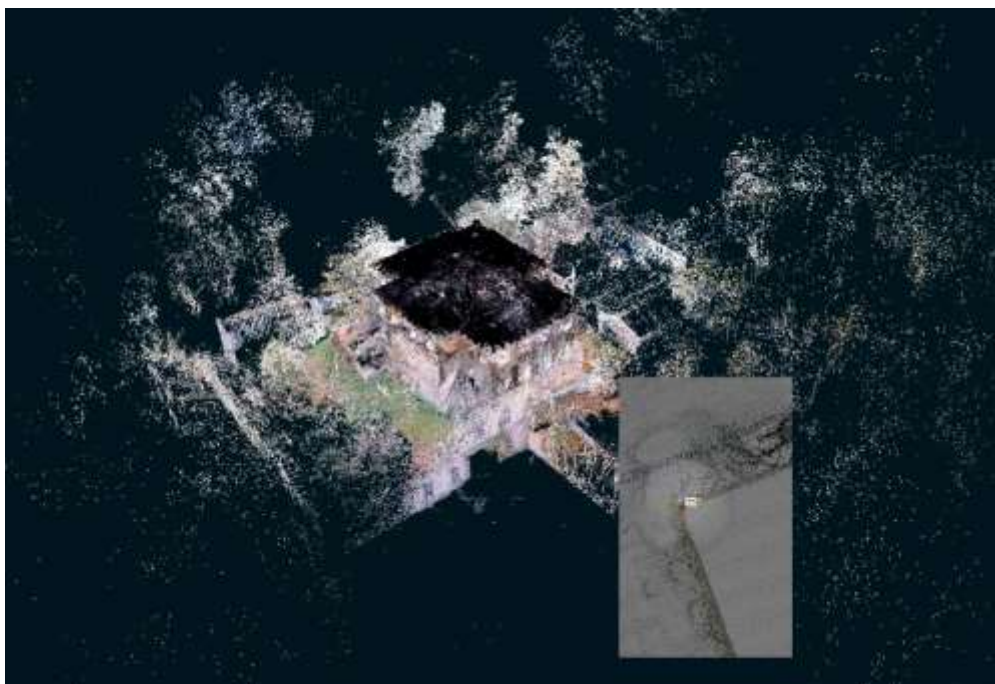




Рисунок 11. Відсутня хмара точок на фасаді

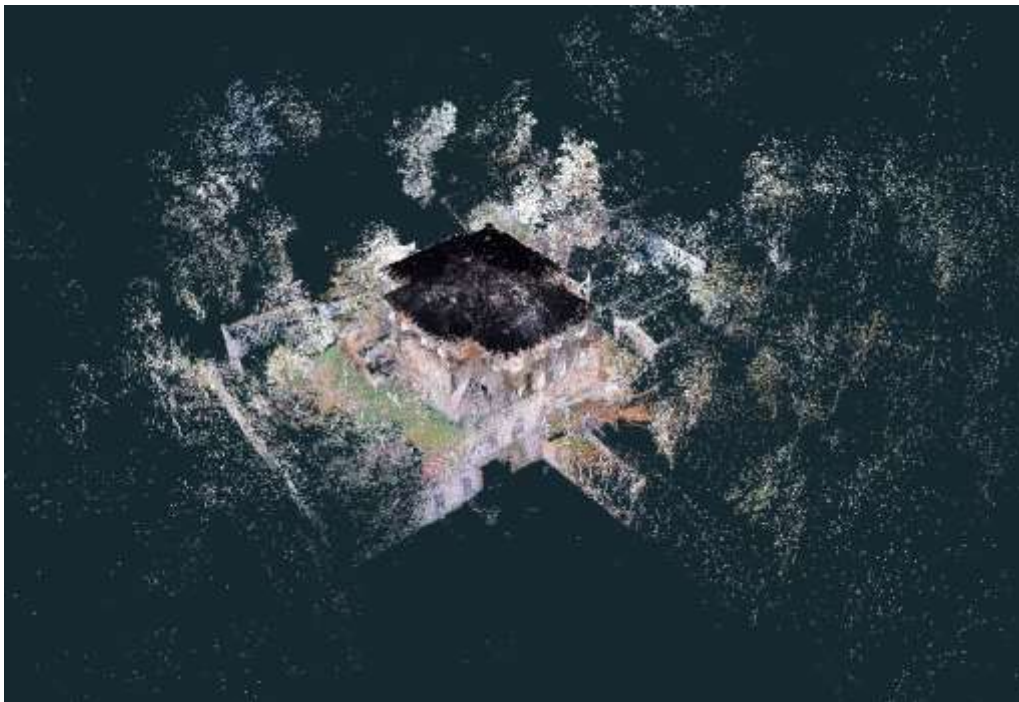


Рисунок 12. Перспективний вигляд хмари точок

Метод прямолінійних вимірів засвідчив відповідність критеріям у 78% випадків, що вказує на його прийнятну продуктивність.

Варто враховувати, що цей спосіб технічно складніший за безпосереднє вимірювання у хмарі точок, через що його доцільно розглядати як додатковий засіб, коли є потреба.

Метод просторового перетину, на противагу, не продемонстрував позитивних результатів.

Вимірювання, проведені на стереопарах зображень, показали низьку точність, із суттєвими відхиленнями від заданих норм.

Окрім обмірів споруд для цілей кадастру нерухомості, у ході роботи здійснено аналіз ефективності моделювання будівельних об'єктів з використанням густої хмари точок.

Першим етапом цього процесу було створення ландшафтів покрівель (див. Рисунок 13).[4]

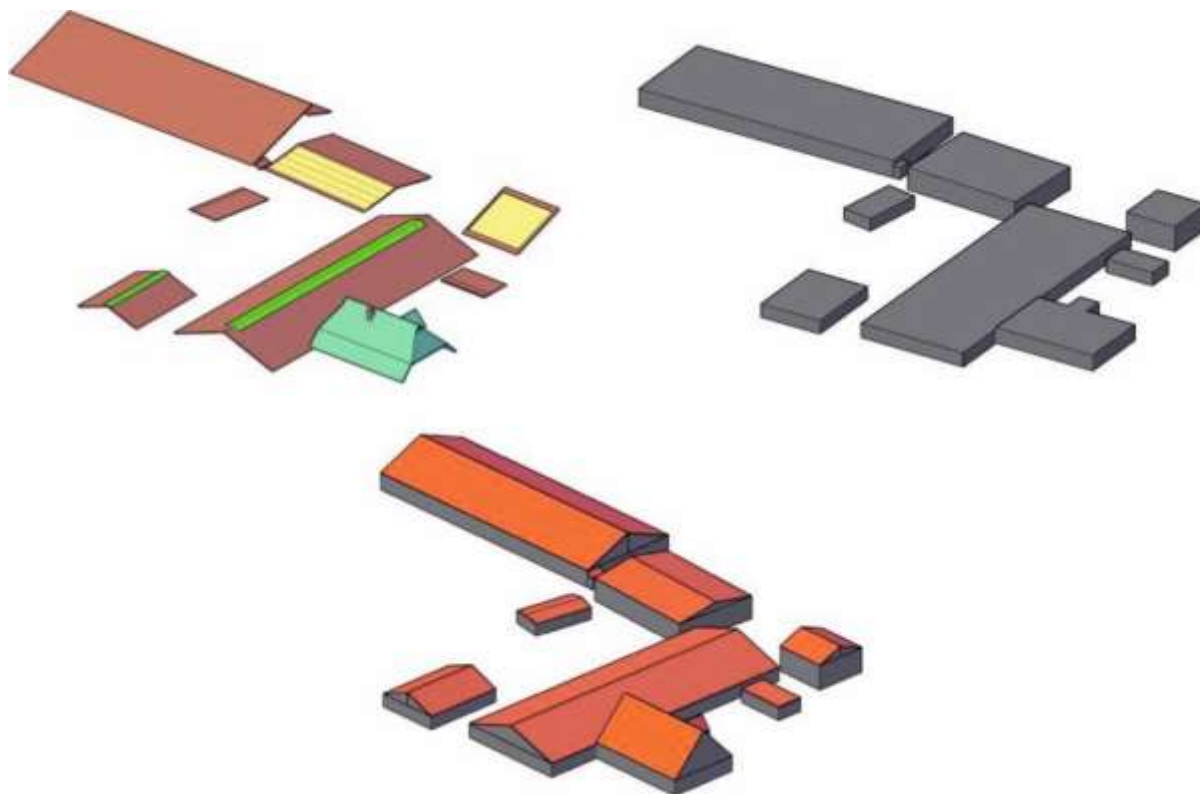


Рисунок 13. Сконструйовані зображення дахів

Координати кутових вершин покрівель перенесли в AutoCAD, де на їх основі створили полілінії та об'ємні моделі (тіла).

На наступному кроці згенерували тривимірні моделі будівель, згідно з рівнями деталізації LoD1 та LoD2 (див. Рисунок 14).

В завершальній частині роботи розробили деталізовані 3D-моделі, до яких включили вікна, двері та інші архітектурні складові.

Це дало змогу з'ясувати, чи забезпечує густота хмари точок адекватну якість для складних моделей.

Для цього хмару точок було імпортовано безпосередньо в AutoCAD у форматі RCP та використано як основу для тривимірного моделювання.

На рисунку 14 показано 3D-моделі будівель, що приблизно відповідають рівню деталізації LoD3, демонструючи високий рівень опрацювання деталей, досягнутий шляхом застосування фотограмметричних даних.[4]

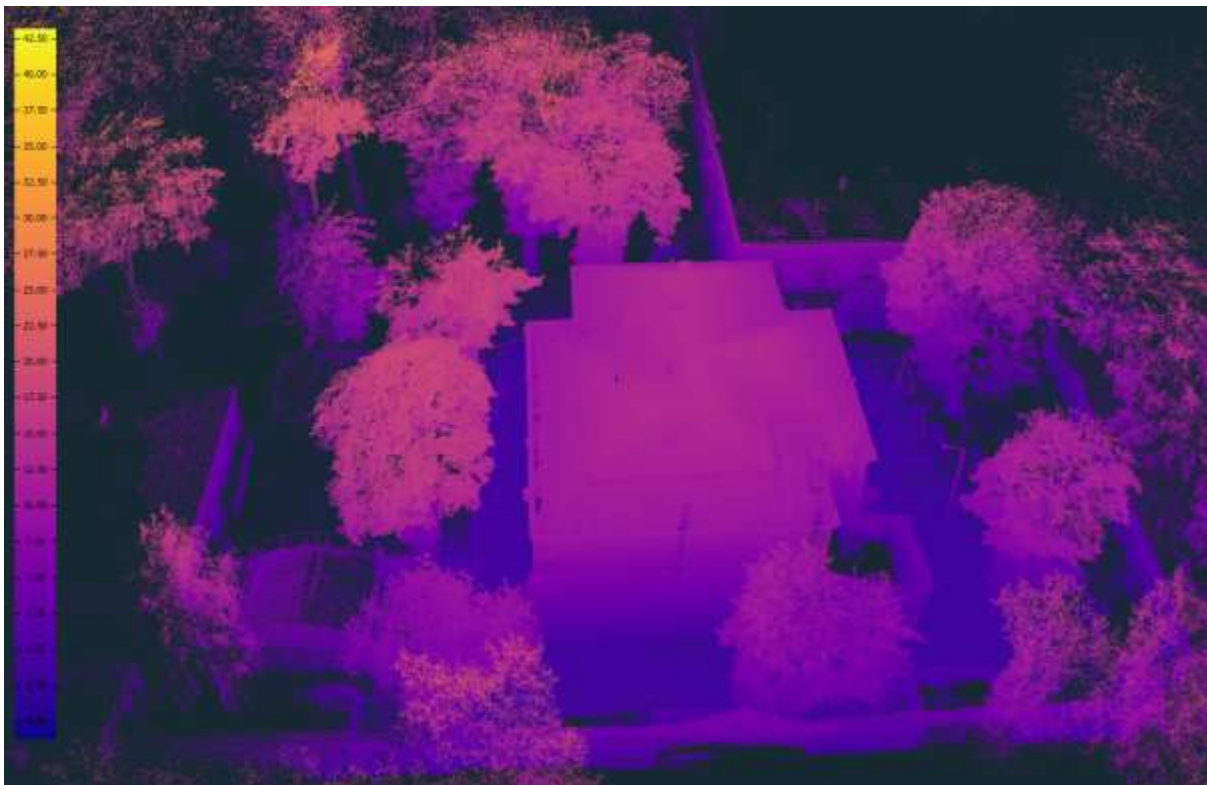


Рисунок 13. Детальні 3D-моделі будівель

3.3 Порівняння двох методів

Точність, повнота інформації та фінансова доцільність результатів фотограмметрії, здійсненої з застосуванням безпілотників (БПЛА), були докладно досліджені через зіставлення з традиційним тахеометричним вимірюванням будівель.

Для реалізації поставленої задачі були використані два різновиди зйомок: тахеометрична та фотограмметрична, які пройшли ретельний порівняльний аналіз.

Під час тахеометричного дослідження 32 опорні точки будівель продемонстрували стандартне відхилення у 6 мм, в той час як для точок, отриманих з щільної хмари точок, що була згенерована за допомогою фотограмметрії БПЛА, це відхилення склало 8,4 мм.

Витримано встановлений ліміт похибки для 29 з 33 точок (83,4%).

Середнє відхилення просторового вектора становило приблизно 12 мм, найбільше відхилення не перевищило позначку 35 мм.[4]

Інші точки не вдалося коректно ідентифікувати через нестачу нахилених зображень у необхідній зоні.

Причиною цього став недосконалий план польоту БПЛА.

Маємо підстави вважати, що отримані результати могли б бути значно кращими за умови оптимізації траєкторії польоту.

Щодо трудових затрат, то виконання тахеометричних вимірювань і подальша обробка отриманих даних тривала близько восьми годин.

Час було розподілено практично рівномірно між польовими роботами та камеральною обробкою.

Вимірювання, проведені за допомогою БПЛА, потребували приблизно одну годину для підготовчих етапів.

Це включало в себе визначення наземних контрольних точок, використовуючи GNSS, а також безпосередні польоти, які виконувались двома особами.

Окрім того, для обробки зібраних даних (орієнтування знімків, калібрування камери, формування щільної хмари точок та вимірювання контурів будівель) було необхідно близько 9 годин.[4]

Отже, загальний час, витрачений на обстеження з використанням БПЛА (польоти та обробка даних), становив орієнтовно 10 годин.

Це більше, ніж час, що зазвичай витрачається на традиційне тахеометричне знімання.

Водночас, варто зазначити, що використання БПЛА виявляється вигіднішим при обстеженні низки будівель або значних територій.

Це пояснюється автоматизованою обробкою даних та вимірюваннями, які зменшують необхідність ручної праці, хоча і збільшують час на обчислення.

Це особливо актуально у масштабних проектах, де спостерігається скорочення загального часу та кількості трудових ресурсів, задіяних безпосередньо на місці проведення робіт.

Необхідно також враховувати фінансові аспекти.

Головною статтею витрат при проведенні тахеометричних досліджень є вартість обладнання: в цьому прикладі вартість Leica TS16 становить приблизно 18 000 євро.

Для зрівняння, комплект DJI Phantom 4 Pro з РРК-модулем можливо придбати приблизно за 4000 євро, в той час як GNSS-приймач Leica GS16, котрий потрібний для визначення опорних контрольних точок, оцінюється приблизно в 16 000 євро.[4]

Цей приймач є обов'язковим компонентом обох підходів.

Отже, фотограмметрія, застосована з використанням БПЛА, не тільки гарантує високу точність, а й дозволяє генерувати продукти з поліпшеною роздільною здатністю та деталізацією.

Зокрема, мова йде про цифрові моделі місцевості (див. Рисунок 14) та цифрові ортофотоплани з високою роздільною здатністю, що досягають точності приблизно 1 см (див. Рисунок 15).[4]

Ці результати мають потенціал стати корисним інструментом у різноманітних сферах застосування.



Рисунок 14. Цифровий ортофотоплан інтегрований у дані Google Map.



Рисунок 15. Цифрова модель поверхні

Результати виконаного дослідження виокремили кілька ключових рекомендацій щодо застосування фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) під час кадастрового обстеження будівель.

По-перше, у контексті обстеження одного об'єкту нерухомості, використання фотограмметрії з БПЛА економічно поступається традиційним методам, що передбачають застосування тахеометра.

Це обумовлено як вартістю технічного оснащення, так і часовими витратами та складністю обробки отриманої інформації.

Однак під час зйомки масштабних об'єктів, на зразок архітектурних комплексів чи нещодавно зведених районів із великою кількістю об'єктів, фотограмметрія БПЛА показує значну продуктивність.[7]

Застосування безпілотних апаратів у таких ситуаціях дає змогу відчутно зменшити період збору даних і оптимізувати витрати на робочу силу.

Щоб досягти високої точності результатів при плануванні польотів БПЛА, важливо зберігати допустиме відхилення від середньої відстані між зображеннями в діапазоні 1–1,5 см.

Ця умова забезпечує необхідну деталізацію та високу точність одержаних моделей.

Радимо виконувати польоти з траєкторіями, що перетинаються, на різних висотах, додаючи до них додаткові похилі фото.

Це дозволяє максимально ефективно охопити фасади та кути споруд, що критично важливо для коректного відтворення геометрії об'єктів.

Крім того, разом із застосуванням GNSS RTK для встановлення позиції камер БПЛА, конче важливо передбачити в зоні дослідження принаймні одну наземну контрольну точку.[4]

Розміщення такої точки, зазвичай, у центральній зоні досліджуваної площі, забезпечує контроль та мінімізує ймовірні вертикальні зсуви, покращуючи точність орієнтування й калібрування.

Щоб оцінити якість налагодження вузлів зв'язку й калібрування камер, радиться використовувати сигналізовані контрольні пункти.

Аналіз відхилень у розташуваннях цих контрольних пунктів здатен бути переконливим доказом точності та якості здійсненої зйомки.

Висновки

У цій бакалаврській праці здійснено порівняльний аналіз двох підходів до обстеження будівель: традиційного, з використанням тахеометра, та сучасного, що базується на фотограмметричних даних, отриманих з зображень, зроблених безпілотним літальним апаратом (БПЛА).

Отримані результати дослідження засвідчили, що фотограмметрія, застосована з БПЛА, демонструє себе як ефективний та багатообіцяючий спосіб проведення кадастрових обстежень будівель.

Цей метод дозволяє досягти потрібного рівня точності, що цілком співставний з результатами, отриманими при використанні класичних методик.

Застосування фотограмметрії дозволяє скоротити, чи навіть виключити необхідність у додаткових або альтернативних методах, які використовуються разом із тахеометром, зокрема при обстеженні численних об'єктів чи масштабних територій.

Окрім того, висока інформативність фотограмметричних даних дає змогу створювати додаткові цифрові продукти, такі як 3D-моделі будівель, ортофотоплани з високою роздільною здатністю, цифрові моделі місцевості та поверхні, що розширює спектр застосування отриманих відомостей.

Наразі, аби метод укорінився серед професійних геодезистів та активно використовувався в офіційних геодезичних вишукуваннях, необхідно активніше популяризувати та заохочувати застосування фотограмметрії на основі БПЛА.

Відтак, варто відзначити, що в майбутньому значення фотограмметрії БПЛА у кадастровій зйомці лише посилюватиметься, що відкриває нові можливості для результативного та точного картографування об'єктів нерухомості.

Список використаних джерел

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).
4. Kersten, Thomas & Preuß, Frederik & Teten, Dagmar & Lindstaedt, Maren. (2025). UAV/UAS Photogrammetry for Use in Cadastral Surveying. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLVIII-M-6-2025. 169-175. 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-6-2025-169-2025.
5. Курчинський, З., Бакула, К., Карабін, М., Ковальчик, М., Маркевич, Й.С., Островський, В., Подласяк, П., Завєска, Д., 2016. Можливість використання зображень, отриманих з БПЛА, у кадастрових роботах. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 41, 909-915. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1909-2016.
6. Leica Geosystems, 2024a. Leica TS16: Роботизований тахеометр. Самонавчальний тахеометр геодезичного класу для будь-яких умов. <https://leica-geosystems.com/de-de/products/totalstations/robotic-total-stations/leica-ts16> (04 грудня 2025 р.).

7. Leica Geosystems, 2024b. Leica Viva GS16 GNSS-Ровер – легка інтелектуальна GNSS-антена для точного позиціонування. <https://leica-geosystems.com/en-gb/products/gnssystemsmart-antennas/leica-viva-gs16> (04 грудня 2025 р.).

8. Маньокі, М., Тайлер, П., Штойдлер, Д., Айзенбайс, Х., 2011. Безпілотний літальний апарат у кадастрових застосуваннях. Міжнародна архітектурна фотограма. Дистанційне зондування. Просторова інформація. Наука, 38-1/C22, 57-62. doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-57-2011.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Фотограмметрія БПЛА як інструмент високоточного картографування великих територій ».

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)