

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Кащишин Святослав Орестович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

3D-картографування та визначення об'ємів земляних робіт за результатами
аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня

С.О. Кащишин

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Приходько Микола Миколайович д.г.н.професор
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри
геодезії та землеустрою

М.М. Приходько
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

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**

Кащишин Святослав Орестович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «3D-картографування та визначення об'ємів земляних робіт за результатами аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів»

керівник роботи: _____

(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. Теоретичні основи застосування безпілотних літальних апаратів у 3D-картографуванні та геодезичних дослідженнях
2. Планування польоту бпла та організація збору аерофотознімків для 3D-картографування
3. Оцінювання продуктивності системи БПЛА в реальних польових умовах

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Теоретичні основи застосування безпілотних літальних апаратів у 3D-картографуванні та геодезичних дослідженнях		
2	Планування польоту бпла та організація збору аерофотознімків для 3D-картографування		
3	Оцінювання продуктивності системи БПЛА в реальних польових умовах		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

Кащущин С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Анотація

В теперішніх реаліях еволюції геодезичних методів, безпілотні літальні апарати (БПЛА) знаходять усе більш обґрунтоване застосування як дієвий засіб збору просторової інформації для широкого спектра інженерних і будівельних потреб.

Застосування дронів дає змогу блискавично фіксувати деталізовані знімки ділянок, на базі яких потім формуються ортофотоплани, цифрові моделі висот та об'ємні зображення ландшафту.

Хибним не буде зазначити, що ці технології є надзвичайно корисними у процесі ведення та моніторингу земляних операцій, де нагальною є потреба у швидкій оцінці обстановки на місці та точному визначенні кількості переміщеного ґрунту.

Це дослідження присвячене використанню дронів для формування об'ємних (3D) макетів рельєфу та прорахунку кількості ґрунтових робіт, ґрунтуючись на зібраних з повітря фотографіях.

Метою роботи є з'ясувати, наскільки вигідно застосовувати безпілотники як мобільний засіб для створення об'ємних планів будівельних майданчиків.

Значну частину уваги зосереджено на вивченні ключових елементів системи знімання з повітря, які охоплюють власне літальний апарат, встановлену на ньому камеру, системи для управління польотом та програмне забезпечення, необхідне для фотограмметричної переробки зафіксованої інформації.

У цьому дослідженні представлено методологію, що охоплює планування місій безпілотних літальних апаратів (БПЛА), здійснення аерофотозйомки та наступну цифрову обробку отриманих зображень.

Використовуючи фотограмметричні прийоми, створюється хмара точок, цифрова модель рельєфу (ЦМР) та тривимірна модель (3D-модель) досліджуваної ділянки.

На підставі цих розроблених моделей було здійснено розрахунок обсягів ґрунтових мас і проведено верифікацію точності просторових даних.

Практичне апробування висунутої концепції мало місце на ділянках, де здійснювалися земляні роботи.

Здобуті дані засвідчують, що завдяки застосуванню безпілотних літальних апаратів (БПЛА) можна оперативно збирати геопросторові відомості, володіючи необхідною точністю для виконання інженерно-геодезичних робіт.

Використаний спосіб знаходить застосування як для нагляду за будівельними об'єктами, так і для верифікації обсягів ґрунтових робіт та генерації оновлених тривимірних репрезентацій місцевості.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, аерофотозйомка, фотограмметрія, 3D-картографування, цифрова модель рельєфу, земляні роботи, визначення об'ємів, геодезичні вимірювання.

Abstract

In the current realities of the evolution of geodetic methods, unmanned aerial vehicles (UAVs) are finding increasingly justified application as an effective means of collecting spatial information for a wide range of engineering and construction needs.

The use of drones allows you to quickly capture detailed images of areas, on the basis of which orthophotos, digital elevation models and volumetric images of the landscape are then formed.

It will not be amiss to note that these technologies are extremely useful in the process of conducting and monitoring earthmoving operations, where there is an urgent need for a quick assessment of the situation on site and an accurate determination of the amount of displaced soil.

This study is devoted to the use of drones for the formation of volumetric (3D) relief models and calculation of the amount of earthworks, based on photographs collected from the air.

The aim of the work is to find out how profitable it is to use drones as a mobile tool for creating volumetric plans of construction sites.

A significant part of the attention is focused on studying the key elements of the aerial survey system, which include the aircraft itself, the camera installed on it, flight control systems and software necessary for photogrammetric processing of the recorded information.

This study presents a methodology that covers planning unmanned aerial vehicle (UAV) missions, conducting aerial photography and subsequent digital processing of the obtained images.

Using photogrammetric techniques, a point cloud, a digital terrain model (DTM) and a three-dimensional model (3D model) of the studied area are created.

Based on these developed models, the volume of soil masses was calculated and the accuracy of spatial data was verified.

The practical testing of the proposed concept took place on sites where excavation work was carried out.

The obtained data show that thanks to the use of unmanned aerial vehicles (UAVs), it is possible to quickly collect geospatial information with the necessary accuracy for performing engineering and geodetic works.

The developed method is used both for supervision of construction sites and for verification of the volume of earthworks and generation of updated three-dimensional representations of the terrain.

Keywords: unmanned aerial vehicle, aerial photography, photogrammetry, 3D mapping, digital terrain model, earthworks, volume determination, geodetic measurements.

ЗМІСТ

Вступ

1. Теоретичні основи застосування безпілотних літальних апаратів у 3D-картографуванні та геодезичних дослідженнях

1.1 Конструктивні особливості та технічні характеристики безпілотної платформи

1.2 Методика виконання аерофотозйомки БПЛА для визначення об'ємів земляних робіт

2. Планування польоту бпла та організація збору аерофотознімків для 3D-картографування

2.1 Планування параметрів аерофотозйомки БПЛА

2.2 Фотограмметрична обробка даних аерофотозйомки та створення 3D-моделі місцевості

2.3 Обробка фотограмметричних даних та генерація 3D-хмари точок

3. Оцінювання продуктивності системи БПЛА в реальних польових умовах

3.1 Аналіз точності та ефективності використання БПЛА

3.2 Визначення об'ємів земляних робіт за цифровою моделлю рельєфу (DEM)

Висновок

Список використаної літератури

Вступ

В епоху бурхливого просування геоінформаційних розробок, особливий акцент робиться на способах швидкого збору та опрацювання територіальних відомостей щодо фактичного стану земної поверхні.

Геодезичні відомості формують фундамент для здійснення численних завдань у сферах проектування, будівництва та землеустрою.

Їх застосовують при розробці планів забудови, виконанні розріджувальних та земляних робіт, спорудженні інженерних об'єктів, а також для моніторингу трансформацій рельєфу.

Чіткість та своєчасність надходження цієї інформації прямо визначають успішність ухвалення інженерних рішень та загальний рівень якості виконання робіт.

Методи геодезії, що спираються на класичні інструменти, такі як теодоліти, нівеліри чи апаратура GNSS, дають змогу досягати високої точності у встановленні просторового положення об'єктів на місцевості.

Однак, здійснення замірів у полі цими шляхами може вимагати вагомих витрат часу та залучення значного штату працівників, особливо коли необхідно охопити великі площі або працювати у важкодоступних чи складних ландшафтах.

До того ж, під час виконання будівельних чи гірничих робіт критично важливим є оперативне одержання свіжих даних щодо трансформації поверхні та обсягів переміщеного ґрунту, що значно обмежує ефективність використання лише конвенційних геодезичних технік.

Напрямок, що активно розвивається у сучасній інженерній геодезії, полягає у застосуванні віддалених способів здобуття просторової інформації, серед яких особливе місце займає аерофотографування із залученням безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Через стрімкий прогрес в електроніці, появу якісних цифрових фотоапаратів, навігаційних комплексів та спеціалізованого програмного забезпечення для фотограмметричної інтерпретації, дрони перетворилися на дієвий засіб накопичення геопросторових відомостей.

Застосування таких апаратних комплексів дає змогу фіксувати зображення місцевості з дуже високим ступенем деталізації, які потім придатні для формування ортофотопланів, цифрових рельєфоутворюючих моделей, цифрових моделей земної поверхні та об'ємних (тривимірних) макетів ландшафту.

Обробка фотограмметричного типу, здійснена з картами, знятими з повітря, дає змогу створювати насичені хмари точок, котрі демонструють просторову структуру обстежуваної зони.

Базуючись на цій інформації, цілком реально зводити достовірні цифрові моделі висот, досліджувати особливості рельєфу та проводити обчислення габаритів усіляких утворень геологічного чи інженерного походження.

Таким чином, технології, що використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА), отримують масу застосувань у таких галузях, як будівництво, видобувна справа, кадастр і нагляд за станом земельних ділянок.

Надзвичайно доречним виявляється використання безпілотних літальних апаратів саме тоді, коли йдеться про здійснення та нагляд за земляними роботами.

Земляні роботи становлять собою ключовий етап у втіленні численних інженерних задумів, включно з прокладанням шляхів, зведенням виробничих потужностей, житлових кварталів, водних споруд та інших об'єктів інфраструктури.

У ході проведення цих робіт неминуче виникає потреба у встановленні обсягів ґрунту, який має бути переміщений або вже пересунуто.

Жорстка точність у визначенні мас ґрунту є критично важливою для моніторингу прогресу будівництва, прогнозування фінансових витрат та визначення реальної продуктивності задіяної техніки.

Засадничі підходи до з'ясування обсягів земляних робіт, що стосуються ґрунту, часто спираються на виконання геодезичних зніманих окремих координатних точок земної поверхні та наступне формування топографічних макетів місцевості.

Хоча, подібні способи можуть вимагати значних зусиль та забирати чимало часу, особливо коли йдеться про розлогі площі або рельєф складної конфігурації.

Впровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) істотно полегшує збір необхідної інформації та дає змогу оперативно будувати надзвичайно деталізовані цифрові моделі ландшафту.

Зйомка з повітря, здійснена за допомогою безпілотників, відкриває шлях до швидкого огляду обширних ділянок землі та збору масиву знімків із відмінною деталізацією простору (високою роздільною здатністю).

Наступна фотограмметрична робота з цими візуальними даними дає змогу створювати докладні тривимірні образи ландшафту.

Такі моделі стануть у пригоді для дослідження трансформацій у рельєфі, моніторингу стану певних зон та підрахунку обсягів робіт із переміщення ґрунту.

На теренах України спостерігається помітне посилення значущості застосування безпілотних систем у сфері геодезії.

З огляду на розбудову інфраструктурних об'єктів, зведення нових споруд, модернізацію шляхового покриття та ліквідацію наслідків

руйнувань, виникає нагальна потреба у впровадженні передових способів збору просторових даних.

Залучення дронів дає змогу суттєво наростити продуктивність інженерно-геодезичних завдань, скоротити час, витрачений на польові роботи, та гарантувати високу точність і деталізацію зібраної інформації.

Отже, вивчення потенціалу залучення безпілотних літальних апаратів для створення тривимірних карт місцевості та обчислення обсягів земляних робіт постає як значуще та своєчасне питання у сучасній геодезії.

Завдання цієї бакалаврської роботи полягає у вивченні перспектив використання БПЛА для побудови просторових моделей рельєфу й розрахунку кількості земляних мас на підставі отриманих знімків з повітря.

Для того, щоб досягнути поставленої цілі, варто виконати такі кроки:

- Здійснити розбір та аналіз актуальних способів застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сферах геодезії та фотограмметрії;
- Детально вивчити специфіку проведення аерофотознімання певних ділянок за допомогою безпілотних літальних апаратів;
- Провести наукове дослідження стосовно процедури фотограмметричної переробки зображень з метою формування тривимірних макетів рельєфу;
- Здійснити розрахунок обсягів земельного переміщення, спираючись на створені цифрові моделі поверхні;
- Провести експертну оцінку результативності застосування БПЛА при виконанні інженерно-геодезичних завдань.

Матеріалом для вивчення слугує процедура збирання й опрацювання просторових відомостей з метою формування тривимірних макетів місцевості.

Аспектами, що підлягають дослідженню, є способи тривимірного картографування та розрахунку обсягів ґрунтових переміщень, отриманих

завдяки аерознімальним роботам із залученням безпілотних авіаційних систем.

Цінність цієї роботи в практичному сенсі полягає у вивченні потенціалу використання дронів для швидкого збору геопросторових даних та обчислення мас переміщеного ґрунту під час виконання інженерно-геодезичних та будівельних завдань.

1. Теоретичні основи застосування безпілотних літальних апаратів у 3D-картографуванні та геодезичних дослідженнях

Протягом доволі значного періоду часу безпілотні літальні апарати (також відомі як дрони) створювалися насамперед із прицілом на застосування у військовій сфері.

Ці апарати, які являли собою дистанційно пілотовані машини крилатого чи роторного типу, знаходили своє призначення у веденні спостереження, розвідувальній діяльності та накопиченні розвідувальних даних.

Аби гарантувати стійкість у польоті та забезпечити високу точність управління, їх комплектували різноманітним сенсорним обладнанням.

До цього набору входили, зокрема, модулі інерціальної вимірювальної моделі (ІВМ), гіроскопічні пристрої та інші навігаційні датчики, що давали змогу виявляти просторове розташування, кут нахилу та траєкторію переміщення апарата.

Завдяки впровадженню мікрокомп'ютерних рішень у системи літальних апаратів, стало можливим утілення функцій самостійного орієнтування у просторі, чим суттєво скоротили потребу в безперервному втручанні людини-оператора.

Однак, на зорі становлення технологій безпілотних літальних апаратів, подібні комплекси відзначалися високою вартістю та помітними фізичними розмірами.

Через це їхнє застосування у народногосподарській чи комерційній галузях, зокрема на малих за розміром безпілотних апаратах, було доволі обмежене.

Істотні зрушення сталися з моменту, як на ринку з'явилися загальнодоступні системи для визначення місця розташування за допомогою супутників.

Застосування апаратури GPS відкрило шлях до визначення координат дронів у загальносвітовій системі координат, причому майже скрізь на планеті та нехайно.

Фактично, це стало ключовим кроком у прогресі безпілотних засобів, оскільки надало спроможність для високоточного встановлення положення та виконання польотних завдань у повноавтоматичному режимі.

Проте, коли система GPS лише впроваджувалася, спостерігалися деякі проблеми з повнотою отримання сигналу, що призводило до меншої точності у визначенні місця розташування для тих, хто не належав до військових.

Лише десь у дев'яностих роках минулого століття, від середини десятиліття, вдалося досягти, що навігація GPS для комерційних цілей давала похибку в межах кількох метрів, завдяки чому ця технологія стала застосовуватися набагато ширше на практиці.

Подальші поступ у сфері мікроелектроніки призвели до появи недорогих та мініатюрних гіроскопічних датчиків, які спершу знайшли своє масове застосування у портативній електроніці, таких як стільникові телефони.

Впровадження цих датчиків у механізми управління дронами помітно покращило керованість апаратів у повітрі та суттєво підвищило точність їхнього позиціонування у просторі.

Як наслідок, чимало меценатів та інженерів отримали можливість оновити свої радіокеровані літальні апарати та гелікоптери, трансформували їх у функціональні автономні авіаційні комплекси.

Інтеграція супутникових систем визначення місцезнаходження, інерційних датчиків та передових контрольних механізмів суттєво підвищила функціональні властивості безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Конкретно, ми спостерігаємо покращення щодо правильності визначення координат, тривалості перебування у повітрі, здатності переносити корисне навантаження та загальної стійкості функціонування апаратури.

Завдяки цьому відкрилися можливості для активного застосування безпілотників у різноманітних сферах діяльності.

Ключовим моментом у прогресі технологій безпілотників було інтегрування компактних, високоякісних цифрових камер.

Нині доступні апарати для фото- та відеозйомки, які монтуються безпосередньо на дрони, надають змогу фіксувати вичерпні знімки поверхні планети під час їхнього переміщення у повітрі.

Унаслідок цього, безпілотні літальні апарати еволюціонували у надзвичайно потужні пересувні системи для дистанційного картографування Землі.

Знімки, зроблені з повітря, є основою для формування ортофотопланів, числових моделей висот, цифрових моделей рельєфу та просторових моделей ландшафту.

Ця інформація знаходить широке використання у таких сферах, як геодезичні виміри, картографування, будівельна індустрія, земельне планування, а також у видобувній промисловості та інших галузях, де критично важливо мати достовірні відомості про топографію та просторове розташування об'єктів.

Незважаючи на великі можливості, які відкриває використання апаратів без пілота, їхнє впровадження у сферу спорудження цивільних об'єктів розпочалося лише набирати обертів відносно нещодавно.

Між тим, нинішні технології дронів надають свіжі перспективи для виконання геодезичних та інженерних вишукувань, бо дають змогу добувати просторові відомості значно оперативніше та з меншими фінансовими витратами, якщо порівнювати це з усталеними підходами.

У минулому для здійснення геодезичних знімів активно використовувалися приймачі GNSS, роботизовані тахеометри, техніки тахіометричного збору даних, а також лазерне сканування, чи аерофотозйомка, що виконувалася з пілотованих апаратів чи орбітальних систем.

Хоча ці методи забезпечують високу ступінь достовірності, вони часто тягнуть за собою суттєві грошові вкладення, ускладнену логістику виконання завдань чи певні застереження через особливості рельєфу.

Впровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) суттєво оптимізує процедуру збору геопросторової інформації.

Завдяки апаратам цього типу досягається оперативне покриття значних площ, здатність проводити аерофотозйомку у важкодоступних чи небезпечних для людини локаціях, а також збір масиву знімків із відмінною деталізацією простору.

Ключовим напрямком застосування дронів є формування тривимірних цифрових копій місцевості та точне обчислення обсягів вийнятого чи насипаного ґрунту.

Шляхом фотограмметричної обробки аерофотокадрів генерується насичений масив точок, що дає змогу точно реконструювати фізичну форму ландшафту.

Подальше вивчення зібраних відомостей уможлиблює розрахунок мас переміщеного ґрунту, моніторинг прогресу будівельних проєктів та фіксацію змін у конфігурації рельєфу.

Отже, апарати без пілотів являють собою потужний засіб для здійснення актуальних геодезичних вишукувань, особливо коли йдеться про створення тривимірних карт та підрахунок кількості проведених земельних робіт.

Подальші наукові розробки у цій площині зосереджені на зважуванні точності, продуктивності та реальних потенціалів застосування цих літальних засобів у завданнях геодезії та будівництва.

Можливі галузі використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у галузі геодезії та інженерних вишукувань охоплюють такі напрямки: створення карт місцевості, нагляд за будівельними об'єктами, вивчення трансформацій у ландшафті, перевірка обсягів виконаних земляних робіт, формування тривимірних зразків споруд та інші роботи, що потребують збору просторових даних.

Спектр геодезичних робіт, які може реалізувати технологія БПЛА, ілюструється на схемі, що позначена як рисунок 1.

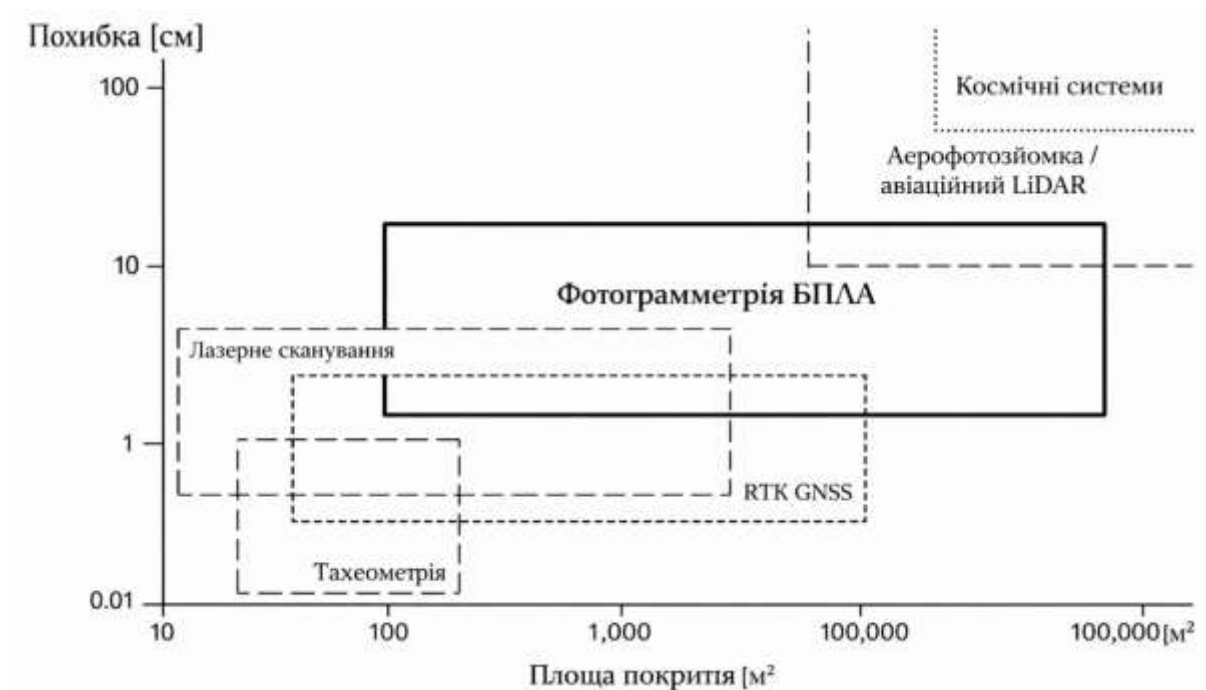


Рисунок 1 – Порівняння геодезичних методів за точністю та площею покриття

На рисунку, що ми бачимо, також проілюстровано, яке становище займають апарати безпілотні літальні серед інших геодезичних способів збирання просторової інформації.

Комплекс БПЛА, задіяний у цих дослідженнях, інтегрує потенціал аерознімання із передовими техніками фотограмметричної опрацювання здобутих даних.

Застосування подібних установок дає змогу формувати точні просторові моделі ділянок, що набуває особливої ваги при здійсненні інженерно-геодезичних завдань, зокрема коли постає потреба у вимірюванні кількості ґрунту, переміщеного під час робіт.

Варто підкреслити, що застосування дронів у межах різних держав підпорядковується регулюванню з боку відповідних національних структур, відповідальних за безпеку польотів.

Такі відомства формують норми використання безпілотних систем, метою котрих є гарантування безпечного функціонування у повітряному просторі та уникнення потенційних загроз для населення та важливих об'єктів.

Зазвичай, для комерційних потреб використання дронів встановлюється обмеження на виконання польотів у межах того простору, який оператор може бачити безпосередньо, що відоме як режим візуального контакту, або LOS (Line of Sight).

Щоб дотриматися вимог щодо прямої видимості, пілот чи оператор зобов'язаний невинно стежити за позицією апарата в повітрі, не вдаючись до жодних допоміжних приладів спостереження.

Цей метод гарантує здатність миттєво реагувати на будь-які пертурбації в повітряному просторі.

Як приклад, особа, що керує, має змогу оперативно коригувати курс або зупинити виконання завдання, якщо наявні інші апарати, трапляються технічні дефекти чи погіршуються погодні умови.

Як правило, людина, що оперує безпілотним літальним апаратом, виконує роль пілота і несе відповідальність за безпечне здійснення польоту.

Пілоту необхідно приділяти увагу контролю за льотними характеристиками, включаючи висоту, швидкість переміщення, курс польоту та стійкість самої апаратної платформи.

Окрім цього, слід брати до уваги дію зовнішніх чинників навколишнього середовища, як-от швидкість та напрямок вітру, метеорологічні умови, присутність будь-яких перепон чи інших потенційних ризиків.

Підтримання невинної уваги до траєкторії руху дрона є ключовою вимогою для безпечної експлуатації безпілотних літальних апаратів, особливо тоді, коли знімальні роботи із повітря виконуються над складною рельєфною місцевістю чи поблизу інженерних споруд.

З огляду на це, при архітектруванні маршруту польоту слід брати до уваги не лише технічні можливості апарата, а й специфіку оточуючого середовища, де має відбуватися виконання запланованих завдань.

Отже, суворе дотримання визначених норм користування БПЛА та належне впорядкування аерофотознімальних процесів становлять собою визначальні критерії для успішного застосування безпілотних засобів у геодезичних вимірах та створенні тривимірних моделей місцевості.

1.1 Конструктивні особливості та технічні характеристики безпілотної платформи

Створений безпілотний комплекс було розроблено цілеспрямовано для здійснення геодезичних вимірювань у галузі житлового та промислового будівництва.

Серцем цієї апаратної бази слугує багатороторний літальний апарат, зокрема конфігурації квадрокоптера.

Саме цей вид безпілотників володіє низкою суттєвих плюсів на тлі інших апаратних рішень, як от апарати з фіксованим крилом чи одноелементні гелікоптери.

Ключовою перевагою, яку мають квадрокоптери, є їхня помірна ціна як при купівлі, так і в процесі подальшої експлуатації та обслуговування.

На додаток, ці системи вирізняються відмінною здатністю до маневрування та можливістю злітати і приземлятися вертикально, що дає змогу застосовувати їх навіть там, де простір для маневру обмежений, наприклад, на будівельних об'єктах.

Подібні якості набувають першочергового значення при проведенні геодезичних завдань на невеликих або таких, що мають складний рельєф, територіях.

Ще однією помітною рисою, що притаманна квадрокоптерам, є здатність до надійної праці як при прямому керуванні оператором, так і під час виконання польотів за заданою програмою.

Завдяки впровадженню передових систем, що забезпечують стабільність польоту, ці пристрої здатні утримувати фіксовану позицію навіть у менш сприятливих метеорологічних умовах, зокрема при непередбачуваних вітрових поривах.

Серед ключових мінусів, які притаманні апаратам з чотирма пропелерами, слід відзначити обмежену дистанцію, на яку вони можуть віддалятися, та нетривалий час, протягом якого вони можуть залишатися у повітрі.

Проте, для потреб геодезичного вимірювання ці ліміти рідко стають визначальними, адже правове регулювання в багатьох державах накладає обмеження на використання безпілотних авіаційних систем, дозволяючи їх експлуатацію лише у зоні прямої видимості особи, яка керує апаратом (LOS).

Відтак, для виконання топографічних чи картографічних завдань на будівельних об'єктах такі параметри є цілком прийнятними.

Рама цього чотирироторного літального апарата збудована на основі елементів платформи "Mikrokopter L4-ME RTF" (рис.1).



Рисунок 1 БПЛА Mikrokopter L4-ME RTF

Його рушійна система складається з чотирьох колекторних двигунів, що функціонують у тандемі з 12-дюймовими лопатями з карбону.

Приблизний розмах апарата сягає одного метра. Завдяки такій архітектурі забезпечується необхідна тяга для перенесення цільового вантажу.

Сумарна тягова спроможність квадрокоптера сягає приблизно дев'яти кілограмів.

Вага самого апарата, якщо прибрати усе додаткове устаткування, складає десь один кілограм, тоді як загальна маса, враховуючи акумулятор та апаратуру для зйомки, доходить до двох цілих і шести десятих кілограма.

Енергію забезпечує літій-полімерний акумулятор, який важить близько 600 грамів, має напругу 14,8 вольт та ємність шість тисяч шістсот міліампер-годин.

Конструктивне виконання цієї платформи передбачає можливість закріплення додаткового вантажу вагою до півтора кілограма.

Для здійснення аерознімання на безпілотному літальному апараті мультироторного типу змонтували цифрову фотоапаратуру Sony NEX-5N, яка мала фіксований фокус 16 міліметрів та здатність реєструвати зображення у 16,1 мегапікселів.

Апарат дає змогу фіксувати картинки високої чіткості, які потім застосовуються для фотограмметричної інтерпретації та створення об'ємних макетів ландшафту.

Каркас апарату зроблено з поєднання полегшених, але водночас стійких матеріалів, зокрема алюмінієвих сплавів та вуглецевих волокон.

Архітектура цього каркаса передбачає інтеграцію рушійних установок, джерела живлення, електронних контрольних вузлів та механізму фіксації фотокамери.

Ядром системи навігації та контролю слугує спеціалізований модуль управління польотом (Flight Control Unit – FCU).

Даний блок відповідає за опрацювання розпоряджень, що надходять чи то від оператора, чи то від програми автопілота, і відповідно генерує команди керування для рушіїв та допоміжних механізмів.

Для встановлення координат та визначення кінематичних характеристик апарату застосовується інерційний вимірювальний прилад (ІВП).

Він надає дані щодо кутів орієнтації, показників прискорення та висоти, визначеної за атмосферним тиском.

Додатково, апаратура містить чотири регулятори двигунів безколекторного типу, які приймають імпульси від БУК (Блоку Управління Керуванням) і відповідно модулюють швидкість обертання кожного рушія.

Блок керування польотом з'єднаний із диференціальним GPS-приймачем та електронним магнітним компасом.

На основі цього забезпечується виконання таких функцій, як фіксація положення у тривимірному просторі, автоматичний зворотний політ до місця старту, а також рух уздовж заздалегідь визначеної траєкторії.

Інформація щодо траєкторії польоту готується як цифровий файл, який завантажується на безпілотний літальний апарат (БПЛА) із наземного пункту управління за допомогою радіозв'язку.

Траєкторію польоту визначають, подаючи її як низку контрольних точок, кожна з яких несе відомості про географічні координати, робочу висоту, орієнтацію руху, швидкість та налаштування апаратури для зйомки.

Структура файлу, що описує цей маршрут, сформована за стандартом XML, що дає змогу створювати завдання для польоту за допомогою спеціалізованих програмних комплексів.

Наразі система підтримує можливість роботи з маршрутами, що складаються максимум зі ста таких точок.

Для кожної контрольної точки є можливість встановити бажаний рівень точності визначення місця розташування та інтервал затримки апарата у цій позиції перед ініціюванням фотографування.

Під час здійснення польоту камера, як правило, робить знімки без припинення роботи апарату, тобто перебуваючи у стані руху.

Камерний апарат закріплений на спеціалізованому стабілізаційному механізмі, що змонтований у нижній секції платформи.

Даний механізм має на собі два сервоприводи, які відповідають за регулювання кутових параметрів нахилу камери.

Завдяки такій апаратурі забезпечується утримання позиції камери строго у напрямку нижньої півсфери (надіру) протягом усього польоту, що критично важливо для отримання високоякісних фотограмметричних матеріалів.

Ініціація спрацювання затвора камери відбувається через інфрачервоний передавач, котрий має пряме з'єднання з апаратурним комплексом керування польотом.

У теперішньому налаштуванні, апарат типу квадрокоптер здатний залишатися в повітрі орієнтовно шістнадцять хвилин, долаючи відстань до одного кілометра, при цьому максимальна висота підйому обмежена чотирма сотнями метрів.

У процесі геодезичних вишукувань, що були виконані у цьому дослідженні, ці потенційні переваги не були вичерпані.

Під час аерофотознімання досліджуваної ділянки, апарат типу "квадрокоптер" підіймався на висоту близько 100 метрів, при цьому тривалість кожного прольоту не перевищувала 400 метрів.

Керування цим безпілотним авіаційним засобом передбачає можливість роботи як під безпосереднім контролем оператора, так і у повністю автоматичному режимі.

Для ручного управління застосовується типовий радіопульт, що працює у діапазоні 2,4 ГГц, який є загальноприйнятим для управління авіамоделями.

Передача ж інформації про стан апарату (телеметрії) та завантаження попередньо визначених траєкторій польоту здійснюється через окремий канал зв'язку на частоті 868 МГц, що гарантує обмін даними між літальним апаратом та операторським пунктом на землі без затримок.

Оскільки апаратна частина цього безпілотного апарату має модульне виконання, існує можливість без зайвих зусиль замінювати чи додавати до функціоналу окремі складові системи.

Скажімо, оператор волен змінити встановлену апаратуру для фіксації зображення, інтегрувати нові датчики або блоки для обміну даними.

Ця здатність до адаптації стає суттєвою перевагою при застосуванні дронів у реальних завданнях, пов'язаних із цивільним будівництвом.

Сукупна ціна апаратної складової цієї системи сягає приблизно шести тисяч доларів, що позиціонує її як досить бюджетний варіант для проведення геодезичних вимірювань.

Якщо порівнювати з усталеними підходами до аерофотознімання, застосування саме таких безпілотних платформ здатне призвести до суттєвого скорочення фінансових витрат та покращення оперативності проведення інженерно-геодезичних обстежень.

1.2 Методика виконання аерофотозйомки БПЛА для визначення об'ємів земляних робіт

Застосування дронів у повітряній фотофіксації ділянок – це дієвий спосіб здобуття детальних геопросторових відомостей.

На основі таких відомостей можна формувати цифрові моделі висот, конструювати об'ємні зображення місцевості та розраховувати маси ґрунту.

Порядок дій при аерофотограметрії за допомогою БПЛА містить низку кроків: від підготовки до польоту, самого знімання, обробки отриманих матеріалів фотограмметричними методами, аж до кінцевого аналізу висновків.

Основні фази виконання повітряного знімання за допомогою безпілотника проілюстровано на рисунку 2.

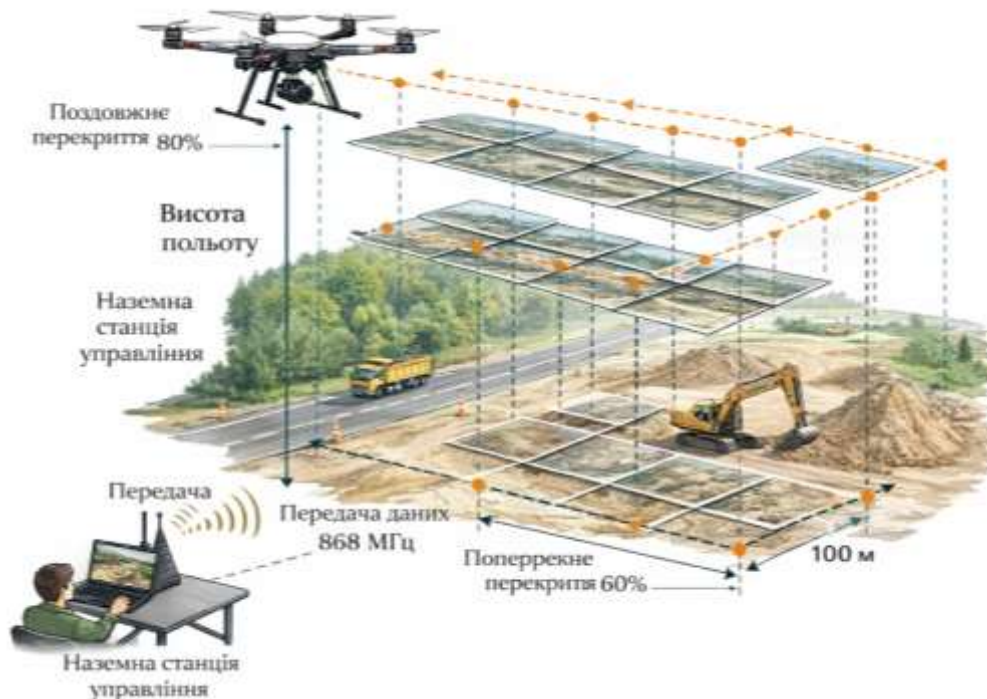


Рисунок 2 – Схема методики аерофотозйомки БПЛА

Згідно з рисунком 2, збирання геопросторової інформації складається з таких кроків: планування траєкторії польоту, здійснення аерофотографування, подальша фотограмметрична переробка отриманих зображень та оцінка кінцевих висновків.

Початковий крок полягає у завчасній підготовці до знімальних робіт з повітря.

На цій стадії відбувається дослідження зони інтересу, окреслення її меж, виявлення характерних рис місцевості та потенційних об'єктів, що можуть завадити польоту.

Крім того, встановлюються найбільш вдалі режими експлуатації безпілотного літального апарата, а саме: оптимальна висота польоту, швидкісний режим руху, періодичність фіксації кадрів та схема охоплення ділянки фотознімками.

Ключовим завданням фази підготовки є встановлення потрібної деталізації зображень (просторової роздільної здатності), що безпосередньо впливає на точність наступних обчислень.

Аби гарантувати високу якість фотограмметричної обробки, важливо досягти належного ступеня накладання (перекриття) знімків.

Як правило, у поздовжньому напрямку рекомендується забезпечувати покриття близько 70–80 %, тоді як для бокового (поперечного) напрямку — 60–70 %.

Такий відсоток суміщення кадрів дає змогу зібрати необхідну кількість спільних маркерів на зображеннях, що є критично важливим для успішного формування тривимірної моделі рельєфу за допомогою фотограмметричних методів.

Далі йде етап, присвячений розробці траєкторії для безпілотного літального апарату.

Ця траєкторія складається з ланцюга путівців (маршрутних точок), кожна з яких задає розташування, висоту польоту та інші характеристики переміщення БПЛА.

Для здійснення такого планування застосовуються спеціалізовані софтверні рішення, які дають змогу автоматизовано формувати найбільш ефективні шляхи польоту, беручи до уваги конфігурацію досліджуваної місцевості.

Після того, як етап планування буде закрито, переходимо безпосередньо до операції аерофотозйомки.

Під час виконання польоту бортова апаратура, а саме камера, що монтована на безпілотній системі, виконує серійне знімання земної поверхні через задані часові проміжки.

Для реалізації фотограмметричних цілей переважно налаштовують камеру так, аби її вісь була спрямована строго вертикально донизу (надирне

орієнтування), що забезпечує знімки з найменшими викривленнями геометрії.

Зображення, зафіксовані під час аеросесії, архівуються у цифровому вигляді й надсилаються на контрольний пункт на землі для подальших маніпуляцій.

Наступною стадією є безпосереднє фотограмметричне опрацювання отриманої візуальної інформації.

Ця процедура охоплює автоматичний пошук та ідентифікацію відповідних ділянок на суміжних кадрах, просторове встановлення положення кожної фотографії (орієнтування) та, як кінцевий результат, створення насиченого хмарового масиву точок, який репрезентує топографічну структуру досліджуваної області.

З отриманого хмарового набору точок формується або ЦМП (цифрова модель поверхні), або ЦМР (цифрова модель рельєфу).

Завдяки цим моделям стає можливим візуалізувати висоти певного простору, що є необхідним для подальшого дослідження геоморфологічних особливостей.

Окрім цього, застосовуючи фотограмметричні методи, генерується ортофотоплан – тобто, зображення ділянки з коректною геометричною проєкцією, яке знаходить своє застосування у картографуванні й проєктуванні.

Серед суттєвих напрямків використання створених цифрових макетів є прорахунок кількості необхідних земляних робіт.

З цією метою зводять до порівняння цифрові репрезентації рельєфу, зняті у різний час або зіставлені із запланованою конфігурацією.

Відмінність між цими моделями дає змогу встановити масу ґрунту, який вже було зрушено або який потребує переміщення у ході реалізації проєкту будівництва.

Алгоритм обчислення обсягів ґрунтових мас ґрунту спирається на дослідження відмінностей у позначках між двома поверхнями.

Для кожної ділянки землекористування встановлюється зміна абсолютної висоти, після чого розраховується об'єм простору, обмеженого цими поверхнями.

Актуальні програмні платформи для фотограмметричної обробки здатні автоматизувати подібні визначення, чим суттєво полегшують етап аналізу отриманої інформації.

Ключовою складовою усієї методики постає верифікація достовірності здобутих даних.

Ступінь вірності збудованих моделей обумовлюється низкою чинників, серед яких — установочні параметри польоту, експлуатаційні властивості апаратури зйомки, ступінь накладання кадрів та достовірність даних позиціювання.

Задля поліпшення показників точності звичайно залучають реперні точки на місцевості, чиї просторові координати визначаються із застосуванням високоточних геодезичних технологій, як-от GNSS-вимірювання чи тотальні станції.

Отже, застосування дронів у тандемі з фотограмметричним аналізом одержаних даних дає змогу формувати докладні тривимірні репрезентації рельєфу та проводити вивірені обчислення обсягів ґрунтових робіт.

Впровадження цієї саме технологічної бази істотно прискорює виконання інженерно-геодезичних завдань, зменшує часові витрати на збір даних "у полі" та гарантує надзвичайну деталізацію кінцевої інформації.

2. Планування польоту бпла та організація збору аерофотознімків для 3D-картографування

На етапі первинного опрацювання матеріалів з'ясувалося, що комерційно доступні штатні програми для складання маршрутів перельотів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) не задовольняють у повному обсязі потреби фотограмметричної аерофотозйомки.

Зокрема, ці розробки не надавали належного рівня автоматизації для формування по льотних завдань, необхідних для вирішення геодезичних завдань, а саме – отримання аерофотознімків високої чіткості.

Для значного покращення результативності планування повітряних завдань задіяли утиліту для планування польотів під назвою Mikrokopter Flight Planning Tool (МК FPT).

Ключовим завданням використання цієї програми було мінімізувати ручну працю при конструюванні траєкторії польоту.

У даній редакції програмного забезпечення було інтегровано низку специфічних вимог, притаманних аерофотограмметрії, що є критичним для виконання геодезичних вимірювань у галузі житлового та промислового будівництва.

Зокрема, інструмент надає можливість задавати параметри накладання (перекриття) знімків, що слугує обов'язковою передумовою для коректного наступного фотограмметричного опрацювання матеріалів та формування об'ємних моделей рельєфу.

Під час підготовки до виконання польоту, оператору достатньо лише визначити ключові параметри запланованої аерофотозйомки.

До таких належать: межі району, що підлягає обстеженню (які позначаються на електронній карті), апаратурне оснащення (тип та технічні специфікації камери), габарити та деталізація отриманих зображень, висотний рівень польоту над рельєфом, швидкісний режим руху

безпілотною, а також ступінь накладання кадрів у поздовжньому та поперечному напрямках.

Спираючись на ці вхідні дані, програмний комплекс самостійно генерує детальний проєкт траєкторії польоту, що являє собою чітко визначений ланцюг навігаційних пунктів.

По цій прокладеній лінії апарат – квадрокоптер – здійснює автономне фотографування заданої ділянки.

Записаний політний план має вигляд електронного файлу, котрий завантажується у безпілотний літальний апарат напередодні виконання завдання.

Користувачський інтерфейс дає змогу миттєво створити траєкторію, котра здатна містити аж до сотні навігаційних точок.

Користувач сам вказує стартову та фінальну точки шляху, обираючи їх безпосередньо на карті супутникових знімків.

Далі апаратна частина самостійно прокладає найбільш вигідний шлях польоту, беручи до уваги встановлені вимоги до фотографування та потрібну деталізацію зображення.

Аби здійснити аерофотографування, було узгоджено такий ланцюжок дій під час польоту:

1. Доведення безпілотного літального апарата (БПЛА) до робочого стану перед здійсненням вильоту. Це охоплює ретельний огляд усіх складових апарата: корпусу, силових установок, гвинтових систем, джерела живлення, електронних датчиків, а також забезпечення впевненого прийому від навігаційного обладнання.
2. Активація фотоапарата та підтвердження його коректного функціонування.
3. Передача заздалегідь встановлених маршрутних точок у систему управління безпілотним літальним апаратом.

4. Аналіз оточуючих чинників, а саме: підтвердження статусу повітряного простору, визначення параметрів вітру (швидкість та напрямок), а також виявлення будь-яких можливих загроз для осіб чи обладнання.
5. Здійснення старту квадрокоптера, після чого оператор вручну керує зльотом, а потім передає апарат на безпілотне керування.

Одразу по наборі висоти, літальний апарат без екіпажу самостійно прямує по прописаному маршруту.

На кожній позначці шляху керуюча система дає команду на активацію камери, і таким чином здійснюється фіксація зображення ділянки, що обстежується.

Якщо трапляється щось незаплановане, оператор має змогу у будь-яку мить перевзяти контроль на себе, керуючи апаратом вручну.

Досягнувши фінальної точки запланованого шляху, апарат автоматично вмикає функцію "Повернення до точки старту" (Return-to-Home), за якої БПЛА прямує назад до місця, звідки він здіймався.

Приземлення допустиме як за ручного втручання, так і в автоматичному режимі.

На цьому етапі збір усіх необхідних аерофотоматеріалів вважається завершеним.

Коли територія, що підлягає дослідженню, є занадто об'ємною для покриття одним польотом, залучаються додаткові льотні завдання.

Це необхідно для гарантування стовідсоткового охоплення знімальною ділянкою аерознімками та накопичення необхідного масиву інформації, який уможливить подальшу фотограмметричну редукцію даних та створення тривимірного образу рельєфу.

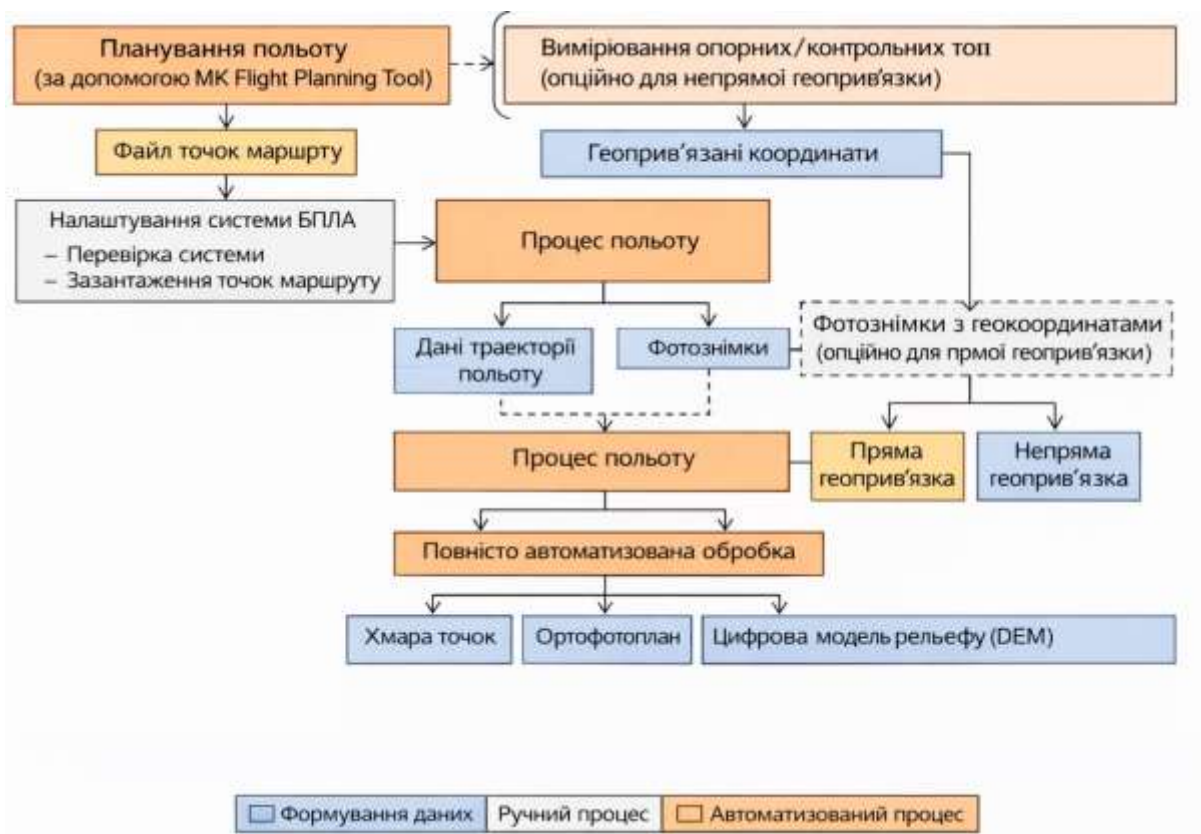


Рисунок 2 – Схема процесу планування польоту БПЛА та обробки даних аерофотозйомки

2.1 Планування параметрів аерофотозйомки БПЛА

Працездатність дронів для збирання геопросторової інформації тісно пов'язана з коректним визначенням установок аерознімання.

При складанні програми польоту слід брати до уваги спектр чинників, що визначають якість відзнятих зображень та достовірність створених на їх основі фотограмметричних макетів.

Таблиця 2 – Основні параметри аерофотозйомки БПЛА

Параметр	Значення	Опис
Тип БПЛА	Квадрокоптер	Безпілотна платформа для виконання аерофотозйомки
Камера	Sony NEX-5N	Цифрова фотокамера
Фокусна відстань	16 мм	Параметр об'єктива
Роздільна здатність знімка	4912 × 3264 px	Розмір цифрового зображення
Висота польоту	100 м	Висота аерофотозйомки
Швидкість польоту	4–6 м/с	Робоча швидкість БПЛА
Поздовжнє перекриття	70–80 %	Перекриття між знімками в напрямку польоту
Поперечне перекриття	60–70 %	Перекриття між польотними смугами
Просторова роздільна здатність (GSD)	~2–3 см/піксель	Деталізація зображення на місцевості
Кількість польотних смуг	2–4	Залежно від розміру території
Кількість точок маршруту	до 100	Точки, за якими рухається БПЛА
Тривалість польоту	~15–20 хв	Час роботи одного акумулятора

До таких чинників належать висота, на якій здійснюється політ, швидкість пересування безпілотного літального апарату, поздовжнє та бокове перекриття фотографій, технічні особливості апарату зйомки й чіткість отриманих зображень.

Одним із вирішальних показників аерофотографування є висота, на якій перебуває БПЛА під час зйомки.

Цей параметр напряду визначає масштаб фотознімків, що будуть отримані, а також просторову деталізацію картинок.

Коли висота польоту зростає, збільшується й територія, яку охоплює один знімок, проте якість деталізації зображення знижується.

З огляду на це, вибір оптимальної висоти польоту має ґрунтуватися на тому, які вимоги висуваються до точності моделювання рельєфу місцевості.

Щоб виявити найкращу висоту для здійснення польоту, зазвичай оперують терміном просторової роздільності (Ground Sample Distance – GSD), що описує габарити одного пікселя, спроектованого на земну поверхню.

Відповідно, чим менше числове значення GSD, то помітнішими та детальнішими будуть об'єкти на отриманому знімку.

На величину GSD впливають специфічні характеристики камери, а саме: фокусна відстань, що використовується в об'єктиві, фізичні розміри матриці датчика, і, природно, висота, на якій перебуває безпілотний літальний апарат (БПЛА).

Ключовим показником, що не можна ігнорувати, є ступінь накладання аерофотокадрів.

Аби фотограмметрична реставрація пройшла як слід, сусідні знімки повинні захоплювати спільні ділянки земної поверхні.

Це дає змогу софту знаходити ідентичні репери на різних світлинах та здійснювати просторове вирівнювання зображень.

У роботі з аерофотозйомкою загальноприйнято використовувати продольне накладання у межах 70–80 відсотків і поперечне — 60–70 відсотків.

Подібні параметри гарантують наявність достатньої кількості спільних маркерів для створення насиченої хмари точок та формування об'ємної моделі рельєфу.

Далі розглянемо такий ключовий показник, як швидкодія, з якою дрон здійснює переміщення у повітрі.

Важливо, щоб цей параметр був гармонійно узгоджений із періодичністю спрацьовування затвору апаратури для фотографування.

Якщо борт рухатиметься надшвидко, то просто не набереться достатнього накладання кадрів між послідовними знімками.

На противагу цьому, занадто повільний рух апарату затягує загальний час виконання поставленого завдання з обльоту та марно витрачає енергію бортових акумуляторів.

Плануючи переліт, слід також звернути увагу на орієнтацію повітряних шляхів.

Як правило, рух літальних апаратів відбувається вздовж суміжних ліній руху, які утворюють так звані коридори польоту.

Положення цих коридорів мусить узгоджуватися з особливостями ландшафту, що досліджується, задля гарантування однакового охоплення території аерофотокадрами.

Ключове значення у проведенні аерофотознімальних робіт мають параметри фотоапаратури, що монтується на безпілотному літальному апараті.

До суттєвих технічних властивостей відносять габарити сенсора, фокусну довжину об'єктива та здатність апарата до відображення деталей (роздільну здатність).

Застосування апаратури з відмінною роздільною здатністю дає змогу фіксувати знімки з винятковою деталізацією, що, своєю чергою, гарантує високу точність при створенні цифрових моделей місцевості та рельєфу.

З метою посилення достовірності фотограмметричних макетів у значній кількості ситуацій залучають опорні точки, розташовані на землі (GCP).

Ці точки закріплюються на зоні дослідження та визначаються їхні координати, використовуючи прецизійні геодезичні техніки, як-от вимірювання GNSS або теодолітна зйомка.

Далі, ці опорні пункти слугують для просторового прив'язування аерофотознімків та покращення якості створення об'ємної моделі ландшафту.

Коли усі параметри аерофотозйомки опрацьовано, розробляється маршрутний план для безпілотного літального апарата (БПЛА).

Цей план охоплює географічні координати пунктів навігації, робочу висоту, швидкість пересування апарата та налаштування апаратури для зйомки.

Заздалегідь, перед стартом місії, такий маршрут завантажується до бортового комплексу управління безпілотником.

У процесі виконання завдання БПЛА самостійно прямує визначеним курсом, здійснюючи фіксацію зображень місцевості через рівні проміжки часу.

З належним попереднім визначенням характеристик аерофотознімання, цілком реально досягти збору фотограмметричних відомостей високої якості, що слугують базисом для формування ортофотопланів, цифрових моделей висот та об'ємних (тривимірних) моделей ділянок.

Подібні вихідні дані фактично є фундаментальною запорукою для подальших розрахунків обсягів нульових робіт та вивчення морфології ландшафту.

Отже, уважне визначення необхідних параметрів для аерофотографування становить собою один із найважливіших етапів застосування дронів у сфері геодезичних вимірювань.

Це дає змогу покращити ступінь достовірності одержаних даних, налагодити оптимальний режим виконання льотних завдань та гарантувати продуктивне застосування фотограмметричних технік у межах інженерно-геодезичних робіт.

2.2 Фотограмметрична обробка даних аерофотозйомки та створення 3D-моделі місцевості

Опісля того, як безпілотний літальний апарат завершить аерофотознімання, здобуті зображення необхідно скерувати на фотограмметричну обробку.

Суть цього кроку полягає у трансформуванні сукупності поодиноких аерофотознімків у просторові дані, прив'язані до конкретних географічних координат.

Унаслідок цього стає можливим формування тривимірних макетів терену, створення ортофотопланів та розробка цифрових моделей рельєфу.

Ключові стадії опрацювання відомостей, зібраних БПЛА за допомогою фотограмметрії, ілюструє Схема 3.

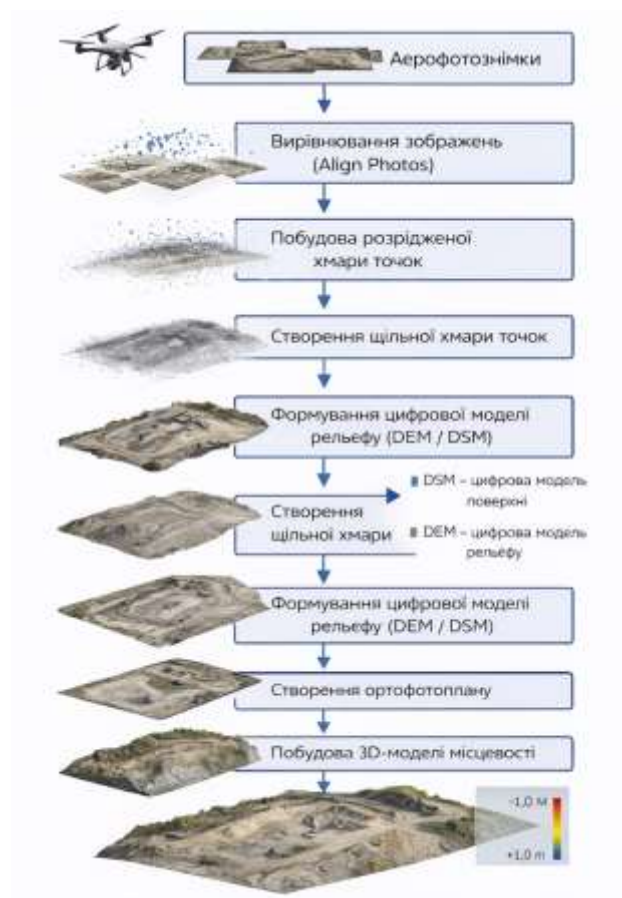


Рисунок 3 – Етапи фотограмметричної обробки даних БПЛА

Обробка фотограмметричних даних являє собою один із найважливіших етапів застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сфері геодезії, адже на цій стадії генерується первинна геопросторова інформація.

Нинішні програмні рішення для фотограмметричної обробки впроваджують алгоритми, що працюють на засадах автоматизації, які дають змогу опрацьовувати значні масиви знімків практично без участі людини.

Серед найчастіше вживаних методик виділяють підхід, знаний як Structure from Motion (SfM), котрий дає можливість реконструювати тривимірну модель місцевості, аналізуючи велику кількість зображень із значним взаємним перекриттям.

На початковому етапі фотограмметричної обробки відбувається первинне упорядкування зображень.

Тут здійснюється контроль якості зроблених фото, усунення кадрів із суттєвими деформаціями чи нечіткістю, а також класифікація отриманих даних.

Окрім того, спеціалізована програма обробки зчитує службову інформацію, що міститься у файлах фото, а саме: дані про місцезнаходження точки зйомки, висоту апарату та налаштування камери.

Наступний етап, що стоїть перед нами, — це локалізація спільних орієнтирів на серії зображень.

Існують спеціалізовані алгоритми, розроблені в царині комп'ютерного зору, які спроможні самостійно ідентифікувати виразні особливості на фотографіях.

До таких належать, наприклад, вигини фасадів будівель, географічні елементи ландшафту чи будь-які інші об'єкти з високим контрастом.

Ці визначені точки прийнято іменувати ключовими (key points). Саме на них спирається процес зіставлення (встановлення відповідностей) між різними візуальними даними.

Опісля того, як спільні елементи знайдено, настає черга просторового вирівнювання (орієнтації) знімків.

На цьому етапі комп'ютерна програма встановлює, у якому положенні та як саме орієнтована кожна фотокартка у тривимірному просторі стосовно інших зроблених кадрів.

Підсумком цієї процедури є формування так званої негустої хмари точок (sparse point cloud), яка репрезентує загальну конфігурацію обстежуваної ділянки.

Зібраний розріджений масив точок перетворюється на насичену (щільну) точкову хмару.

Цей процес реалізується завдяки застосуванню специфічних методик, що опрацьовують кожен елемент зображення (піксель) з метою встановлення його позиції у тривимірному просторі.

Як наслідок, генерується значний обсяг точок, які надають вичерпну інформацію про конфігурацію рельєфу.

Власне, ця щільна хмара точок і слугує фундаментальним вихідним матеріалом для створення об'ємної моделі відповідної ділянки.

По завершенню створення хмари точок, розпочинається процес вибудови об'ємної моделі рельєфу.

На цій стадії окремі точки з'єднуються, формуючи полігональну структуру, що відтворює геометрію та властивості поверхні.

Завдяки цій моделі стає можливим візуальне представлення топографії, зведених споруд і будь-яких складових ландшафту.

Далі за планом іде процес формування цифрових моделей ландшафту.

Як правило, створюють два ключові різновиди таких моделей:

- ЦМП (Цифрова Модель Поверхні) – це модель, у якій зафіксовані всі елементи, що розташовані на місцевості, включно з забудовою, рослинним покривом та іншими атрибутами;

- ЦМР (Цифрова Модель Рельєфу) – ця модель репрезентує виключно природний стан земної поверхні, ігноруючи штучно створені об'єкти.

З утворених моделей складається ортофотоплан.

Такий план, по суті, є зображенням місцевості з корекцією геометричних спотворень, зокрема усуненням ефектів перспективи.

Це надає ортофотоплану змогу слугувати картографічною базою для реалізації різноманітних інженерних та геодезичних проектів.

Значущим досягненням у процесі фотограмметричної обробки є здатність обчислювати обсяги ґрунтових робіт.

Для цього застосовуються цифрові моделі рельєфу (ЦМР), згенеровані для різних часових відрізків або сформовані відносно запланованої (проектної) поверхні.

Рисунок 4 демонструє алгоритм розрахунку об'ємів землерийних чи насипних робіт, який базується на використанні цифрових моделей рельєфу.

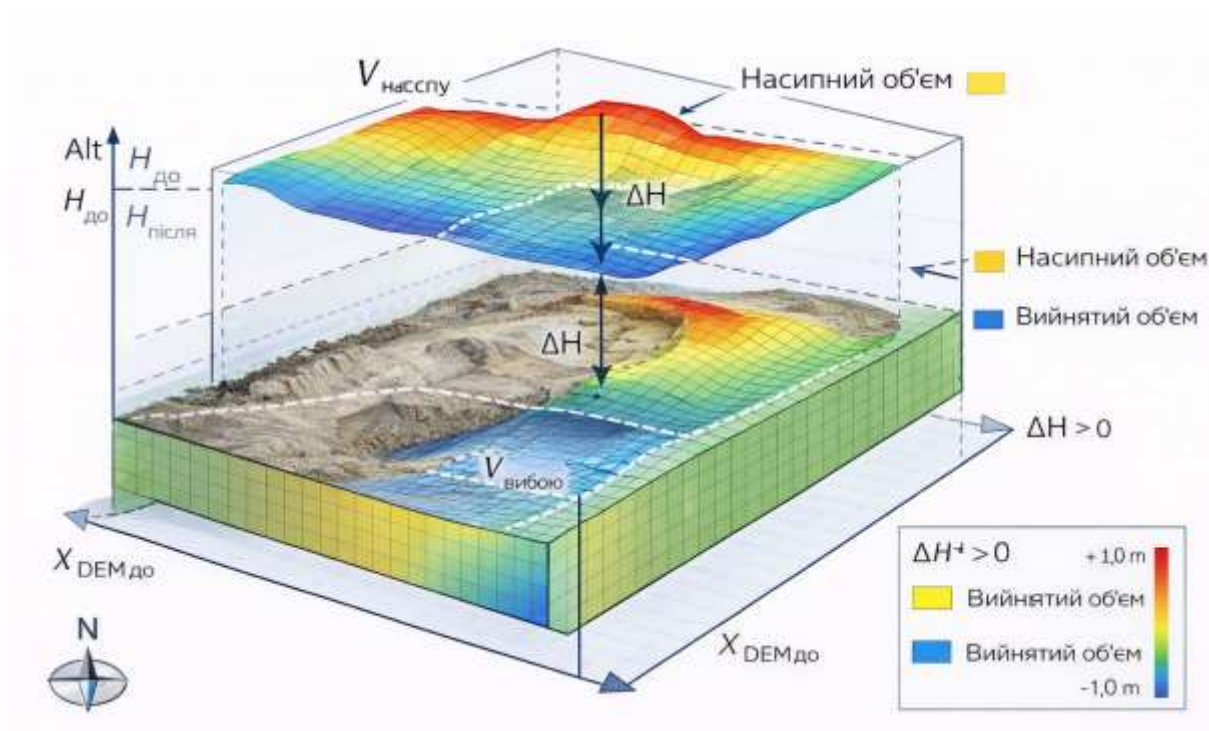


Рисунок 4 – Схема визначення об'ємів земляних робіт за моделлю DEM

Підхід для прорахунку кількості ґрунту ґрунту полягає у співставленні висотних позначок між двома моделями рельєфу.

У фахових софтах для фотограмметричної переробки подібна процедура, як правило, виконується завдяки техніці різницевого моделювання висот.

Для кожної локації на площі встановлюється розходження у висоті між цими двома моделями, після чого розраховується сумарна маса ґрунту, що була або додана, або вийнята у процесі землевпорядних операцій.

Ключовим етапом у процесі фотограмметричної обробки вважається верифікація точності досягнутих вихідних даних.

З цією метою залучаються репери, чиї просторові координати здобуваються з високою степенем достовірності, застосовуючи геодезичні прийоми.

Зіставлення вимірних значень планово-висотних відміток цих реперів із відповідними точками, що містяться у згенерованій цифровій моделі, дає можливість визначити ступінь достовірності сформованої просторової репрезентації.

Отже, коли ми обробляємо фотографії з повітря, зняті безпілотними літальними апаратами, за допомогою фотограмметрії, ми можемо будувати докладні тривимірні макети місцевості та цифрові моделі поверхні.

Речі, які ми отримаємо в результаті, стануть у пригоді для створення карт певних зон, стеження за тим, як просуваються будівельні роботи, а також для підрахунку обсягів робіт із переміщення ґрунту.

Застосування новітніх фотограмметричних технік суттєво покращує якість інженерно-геодезичних обстежень та гарантує, що отримані просторові відомості будуть дуже точними.

2.3 Обробка фотограмметричних даних та генерація 3D-хмари точок

Аби змайструвати об'ємну хмару точок, прив'язану до географічних координат, використовуючи низку знімків, зроблених з повітря, що накладаються один на одного, потрібна фотограмметрична обробка здобутих матеріалів.

Завдяки цій процедурі набір електронних світлин перетворюється на модель простору місцевості, яку згодом можна застосовувати для детального вивчення рельєфу, створення цифрових моделей рельєфу й обрахунку обсягів земляних робіт.

Поточні програмні пакети для фотограмметричної обробки використовують методики Structure from Motion (SfM), які дають змогу автоматично знаходити значущі деталі на знімках.

Серед таких деталей – обриси предметів, межі площин та інші особливі точки, здатні бути розпізнаними одразу на низці фотографій.

Отримані таким чином точки слугують основою для зіставлення знімків, які частково накладаються один на одного, що у свою чергу дає можливість встановити їхнє взаємне розташування у тривимірному просторі.

Під час ретельного опрацювання відбувається встановлення внутрішніх та зовнішніх орієнтацій знімків.

З цією метою залучаються техніки пакетного коригування (bundle adjustment), що гарантують приведення геометричних властивостей усіх кадрів до спільної системи координат.

Щодо характеристик камери, програмне забезпечення зчитує додаткові відомості з файлових супровідних даних Exif, котрі містять приблизні дані щодо фокусної відстані оптики, габаритів сенсора й інших налаштувань, використаних під час фотографування.

З метою автоматичного знаходження важливих орієнтирів у фотограмметрії, алгоритм SIFT (Scale Invariant Feature Transform) здобув значне поширення.

Завдяки цьому методу, вдається ідентифікувати незмінні характеристики на знімках, незалежно від того, як змінювався масштаб чи кут, під яким було зроблено кадр.

Еволюція технологій, спрямованих на багатозображувальну відбудову, була детально викладена у працях різних дослідників, де акцент робиться на застосуванні принципу мультистерео для опрацювання значних обсягів неструктурованих фотоматеріалів.

У межах цієї роботи, для опрацювання матеріалів аерозйомки, застосовувався програмний пакет Agisoft PhotoScan (відомий нині як Agisoft Metashape).

Даний інструментарій спеціально налаштований для ефективної роботи з даними, здобутими за допомогою БПЛА, і має спроможність до автоматизації значної частини послідовності фотограмметричних перетворень.

Софт надає можливість прив'язувати отримані дані до обраної системи координат, а також виводити результати у наступних форматах:

- тривимірний масив точок;
- цифрова модель висоти місцевості (DEM);
- цифрова модель рельєфу (DSM);
- ортотрансформована аерофотозйомка (ортофотоплан).

При роботі з об'ємними пакетами аерознімків критично важливо мати апаратне забезпечення зі значним запасом обчислювальної сили.

Бажано використовувати 64-бітну операційну платформу та мінімум 16 ГБ оперативної пам'яті, що забезпечить продуктивну роботу навіть з великими колекціями, що налічують більше сотні одиниць.

Фотограмметрична обробка складається з низки етапів, котрі йдуть один за одним.

Спершу відзняті от з повітря фотографії переносяться з апарату на обчислювальну машину.

Надзвичайно суттєвим є те, аби знімки мали належний ступінь накладання, це дає змогу віднайти ідентичні точки на різних кадрах.

Використовуючи інформацію, що міститься у метаданих Exif, застосунок здобуває орієнтовні дані щодо внутрішніх характеристик апарату, наприклад, довжини фокуса та габаритів матриці.

Опісля цього стартує власне етап фотограмметричної проробки, який охоплює три ключові складові:

1. Узгодження знімків (Align Photos) — віднаходження просторового розташування кадрів та формування первинного, розрідженого скупчення точок.
2. Формування геометрії (Build Geometry) — генерація насиченого набору точок та архітектура цифрового образу рельєфу.
3. Нанесення текстури (Build Texture) — проєкція текстури на створену модель, аби досягти правдоподібного вигляду ділянки земної поверхні.

На кожній стадії роботи людині надається можливість коригувати параметри опрацювання, котрі мають прямий вплив на ступінь достовірності кінцевих даних, архітектуру сформованої моделі, а також часові витрати на обчислення.

Завершення цих маніпуляцій призводить до генерації об'ємного хмароподібного масиву точок із кольоровим наповненням, що репрезентує просторове обличчя досліджуваної площі.

Зібрані відомості годяться для конструювання цифрового образу поверхні або виготовлення високоточного планового зображення (ортофотоплану).

Щойно опрацювання добігає кінця, програмне забезпечення самостійно генерує документ (звіт), де деталізовано дані стосовно коректності позиціювання знімків, обсягу ідентифікованих характерних точок, а також низку інших характеристик, пов'язаних із виконаним циклом обробки.

Ключовим етапом вважається прив'язка здобутих результатів до географічних даних, що уможливлює застосування розроблених макетів у сфері геодезії та картографії.

Зокрема, у комплексі PhotoScan доступні два фундаментальні способи геометричного прив'язування: прямий та опосередкований.

При застосуванні прямого методу геоприв'язки використовуються показники GPS, фіксовані безпосередньо під час обліту безпілотником.

За таких умов, дані про розташування точок зйомки автоматично вбудовуються у службову інформацію Exif і слугують програмі для обчислення орієнтації зображень у просторі.

Як наслідок, об'ємна модель формується безпосередньо в універсальній системі координат, приміром, WGS-84.

Геореференцування опосередкованим способом реалізується завдяки застосуванню наземних контрольних пунктів (GCP), які розташовуються на досліджуваній ділянці до початку льотних робіт.

Критично важливо, аби ці пункти були добре помітні на знімках, отриманих з повітря.

Визначення їхніх координат здійснюється за допомогою високоточних геодезичних технік, як-от диференціальні GNSS-виміри чи тахеометричне профілювання.

На етапі опрацювання даних, оператор особисто вказує розташування зазначених пунктів на аерофотознімках у спеціалізованому програмному забезпеченні.

Згодом, встановлені координати цих опорних елементів застосовуються задля просторової корекції усього сформованого моделювання.

Хоча для проведення такого роду трансформації мінімально вимагається наявність трьох контрольних точок, задля досягнення вищої точності бажано задіяти їхню більшу кількість.

Процес безпосереднього географічного прив'язування вирізняється більшою оперативністю, адже виключає необхідність виконання додаткових замірів на місцевості.

Однак, у випадку застосування референцних точок на землі, можна отримати просторові дані з підвищеною точністю.

З огляду на це, визначення найкращої техніки прив'язки диктується необхідним рівнем точності, якого прагнуть досягти у фінальному продукті.

Нинішні програмні пакети для фотограмметричної обробки здатні пропрацьовувати комплект, що налічує біля ста аерофотокадрів, знятих за одну льотну сесію безпілотної, протягом декількох годин.

Загалом, повний цикл опрацювання матеріалу займає приблизно три години, що варіюється залежно від потужностей обчислювальної машини та конфігурації досліджуваної ділянки.

Отже, застосування фотограмметричних підходів до обробки інформації надає змогу створювати докладні просторові моделі місцевості, базуючись на аерофотознімках, зроблених із безпілотних повітряних апаратів.

Подібні моделі слугують фундаментальною базою для подальшого вивчення рельєфу та розрахунку обсягів земляних робіт.

3. Оцінювання продуктивності системи БПЛА в реальних польових умовах

Переважаюча кількість студій, зосереджених на вимірюванні робочих спроможностей БПЛА, зазвичай здійснюється або в контрольованому середовищі, або в межах лабораторій, що не завжди відповідає справжнім умовам експлуатації.

У таких обставинах робочі показники апаратури можуть наближатися до ідеальних, що перешкоджає повноцінному розумінню дієвості застосування безпілотників при здійсненні геодезичних чи інженерних завдань у реальному ландшафті.

Отже, для з'ясування дійсних експлуатаційних властивостей системи видається нагальним проведення експериментів безпосередньо в польових умовах.

Перевірка спроможності та продуктивності новоствореного комплексу БПЛА була проведена на низці випробувальних полігонів, розміщених у справжніх умовах експлуатації.

Головним завданням цих вивчень стало з'ясування неточностей у згенерованих просторових відомостях, а також окреслення сильних сторін і потенційних рамок застосування безпілотних засобів при вирішенні топографічних завдань.

Окрім іншого, метою польових тестів було також формування надзвичайно детальних тривимірних макетів рельєфу, використовуючи аерофотограмметричні техніки.

Знімки, зроблені під час повітряної зйомки, уможливили створити густі скупчення точок, які перевищували 100 точок на кожен квадратний метр, гарантуючи тим самим високу пропрацьованість цифрових моделей терену.

Щоб пересвідчитися у достовірності досягнутих здобутків, було здійснено зіставлення з інформацією, здобутою завдяки класичним геодезичним підходам.

Зокрема, вимірювання, проведені на землі, здійснювалися за допомогою GNSS-приймачів диференціального типу та тахеометрії, що дає змогу створювати дуже точні моделі рельєфу.

Інформація, зібрана цими способами, слугувала еталоном для визначення точності фотограмметричних моделей.

Слід прийняти до уваги, що здійснення ґрунтовних вимірів на місцевості являє собою доволі обтяжливу процедуру, яка вимагає значних часових інвестицій, використання спеціалізованого інструментарію та залучення фахівців високої кваліфікації.

З огляду на це, застосування безпілотних (літальних) апаратів розглядається як продуктивна заміна для оперативного збору геопросторових відомостей щодо обширних ділянок.

Зокрема, методика з використанням БПЛА надає можливість швидко проаналізувати великі масиви ґрунту під час проведення земляних операцій чи переміщення сировини, що потенційно може бути задіяне для контролю будівельних етапів та покращення робочих показників.

З огляду на те, що обсяги ґрунтових мас, розраховані після фотограмметричної обробки відомостей, знятих безпілотним літальним апаратом (БПЛА), нерідко розходяться з даними, отриманими традиційними геодезичними методами, значна увага була зосереджена на дослідженні похибок, притаманних сформованим тривимірним моделям рельєфу.

Таке детальне вивчення дає змогу встановити ступінь довіри до здобутих числових даних і з'ясувати, чи можна застосовувати технологію з використанням БПЛА для вирішення реальних інженерно-геодезичних завдань.

Аби здійснити заміри в рамках дослідження, було вибрано певну територію для тестування, що знаходиться у межах кар'єру, де якраз ведуться роботи з виїмки ґрунту.

Подібні локації ідеально підходять для визначення, наскільки коректно працюють фотограмметричні техніки, адже їм притаманні заплутана топографія, великі різниці у висотах, а також неминучі трансформації ландшафту.

Схематичний вигляд зони дослідження демонструє малюнок під номером 4.

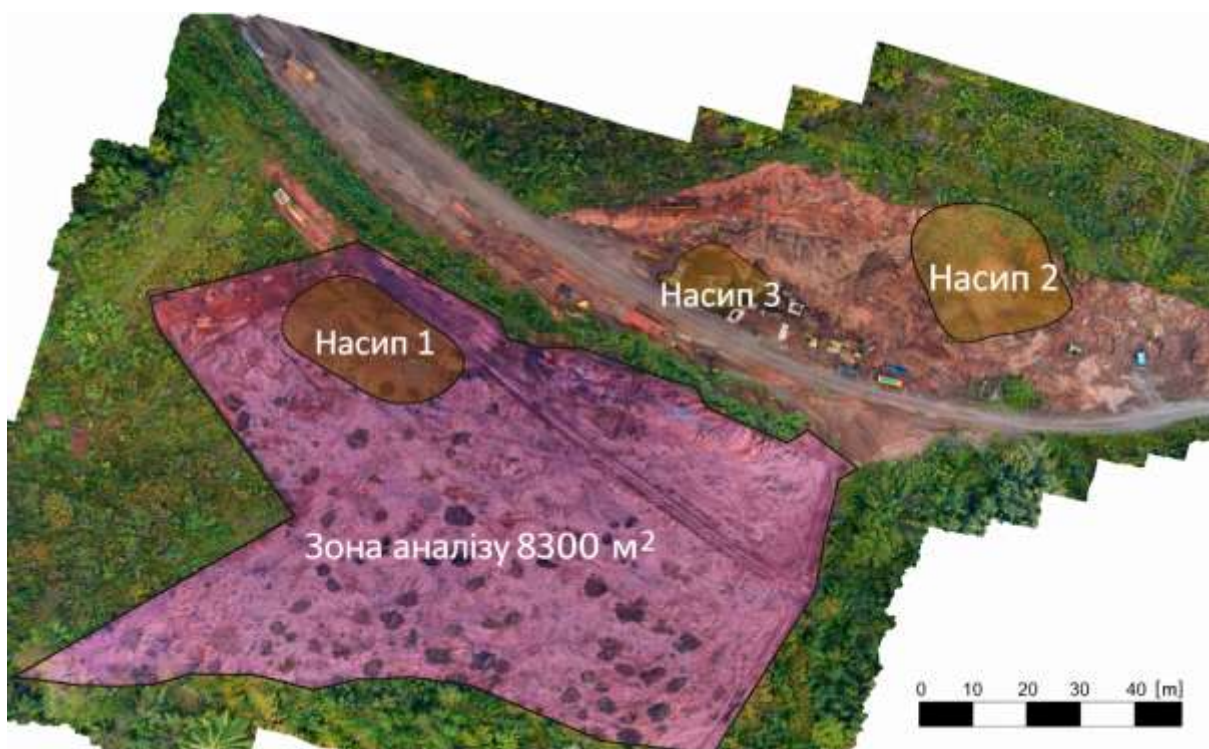


Рисунок 5 – Польова ділянка кар'єру

Приблизно сімнадцять тисяч квадратних метрів (орієнтовно двісті на вісімдесят п'ять метрів) — така була орієнтовна площа території, що підлягала дослідженню.

У межах цієї зони планувалося зняття верхнього шару ґрунту, товщиною в декілька сантиметрів, по всьому периметру.

Для реалізації цих завдань пропонувалося залучити екскаватори.

Водночас, роботи мали здійснюватися відповідно до ідей бережливого виробництва, що акцентує увагу на скороченні витрат матеріалів та уникненні як невиправдано великих, так і недостатніх обсягів земляних робіт.

Нашою метою стало визначення дієвості застосування безпілотних авіаційних систем (БАС) для проведення геодезичних промірів та спостереження за ходом земляних операцій.

Як уже наголошувалося, здобуті під час конвенційних геодезичних вимірювань дані, отримані способом тахеометричного знімання із залученням роботизованого тахеометра (RTS), зіставлялися з результатами автоматизованого картографування з прив'язкою до географічних координат, яке було реалізовано за допомогою дрона.

Обидва масиви інформації були орієнтовані у системі координат УСК2000, яка потім застосовувалася для керування землерийним обладнанням у процесі виконання запланованих робіт.

Організація аерофотознімання з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) проходила у кілька стадій.

Насамперед, на площі, що підлягала дослідженню, було розміщено та заміряно вісім реперних точок на землі.

Визначення їхніх координат здійснювалося залученням приймача GNSS із застосуванням мережі постійно діючих базових станцій.

Далі слідувала розробка плану траєкторії польоту, що було реалізовано через спеціалізований програмний засіб для планування завдань польотів.

Настанови для аерофотографічної зйомки були наступні:

- Обладнання – апарат Sony NEX-5N, що використовував об'єктив із постійною фокусною відстанню 16 міліметрів;
- Висота, з якої здійснювався політ, становила 70 метрів;

- Знімки мали накладатися один на одного по ходу руху на 80 відсотків;
- Накладання бокових частин знімків повинно було становити 60 відсотків.

За підсумками аеропольоту зафіксовано шістдесят чотири знімки, що охоплюють місцевість із просторовим розрізненням, яке дорівнювало приблизно 2 сантиметрам на кожен піксель.

Середнє відхилення за розрахунками сягнуло близько 2 см по горизонталі та 6 см по вертикалі.

Детальніше вивчення точності здійснили для конкретних зон територій, а саме: однієї значної площі у 8300 квадратних метрів, а також трьох менших валів ґрунту.

Збір усіх даних на цих об'єктах вевся одночасно – залучали як роботизований тахеометр, так і аерофотографування, здійснене за допомогою безпілотного літального апарату.

Варто підкреслити, що ландшафт обстежуваної ділянки не зазнав жодних змін протягом інтервалу між двома актами вимірювань.

Усі можливі завади, що могли спричинятися зеленими насадженнями, були ліквідовані ще до початку будь-якого з циклів дослідження.

Зважаючи на те, що територія вже була звільнена від дерев та значних чагарників наперед, ця підготовча робота зайняла лишень лічені хвилини.

Спираючись на відомості, зібрані обома підходами, створили тривимірні макети рельєфу.

Далі ці отримані результати зіставили один з одним.

Сумарна кількість точок, зафіксованих у ході вимірювань, сягнула 202 для способу тахеометричної зйомки та 122 275 точок для аерофотограмметричного методу із залученням БПЛА.

Площа, яку займало спільне для обох отриманих моделей перекриття, дорівнювала 7761 квадратним метрам.

Для кожної з вибраних хмар точок було створено поверхневу модель на основі триангуляції (TIN).

Подальша операція віднімання однієї моделі від іншої дала змогу виявити різницю в об'ємах, яка склала 149 кубічних метрів.

Якщо розділити цей об'єм на площу перекриття (тобто $149 \text{ м}^3 / 7761 \text{ м}^2$), ми отримаємо, що середнє відхилення за висотою складає близько 1,9 сантиметра.

Висновок, який можна зробити на основі цих даних, полягає в тому, що застосування методу аерофотозйомки за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) демонструє цілком задовільну точність для розрахунку обсягів земляних робіт.

Порівняння детальніших показників, отриманих методами наземного лазерного сканування (RTS) та БПЛА, представлено у Таблиці 3.

Таблиця 3 – Порівняння ефективності геодезичної зйомки методом RTS та картографування за допомогою БПЛА

Метод зйомки	Зйомка RTS	Картографування БПЛА
Площа покриття	14 330 м ²	24 900 м ²
Необхідний час		
Підготовка	120 хв	60 хв
Зйомка	420 хв	15 хв
Обробка	120 хв	60 хв
Загальний час	660 хв	135 хв
Кількість точок	350	Більше ніж 2 000 000
Щільність точок	0.02 точок/м ²	До 561 точок/м ²
Середня точність трансформації	Горизонтальна 0.3 см Вертикальна 0.2 см	Горизонтальна 0.9 см Вертикальна 0.2 см Похибка пікселя 0.5
Точність опорних точок	Горизонтальна 0.7 см Вертикальна 0.3 см	Горизонтальна 3 см Вертикальна 0.5 см

У наведеній таблиці також міститься зіставний розгляд часових витрат на геодезичні роботи, що вимагаються кожним із розглянутих способів.

Здобуті дані дають змогу визначити, наскільки продуктивним є застосування класичної тахеометричної зйомки порівняно з аерофотограметрією, виконаною за допомогою безпілотного літального апарату.

Додатково, на рисунку 6 відображено підсумки аналізу розбіжностей по висотах, зафіксованих при використанні методу наземного лазерного сканування (RTS) та зйомки БПЛА.

Ця інформація була зібрана у 142 реперних точках, розподілених по обстежуваній ділянці.

Зіставлення цих показників дає можливість зрозуміти, наскільки узгоджуються результати, отримані двома методами, та встановити ступінь точності створених цифрових моделей рельєфу.

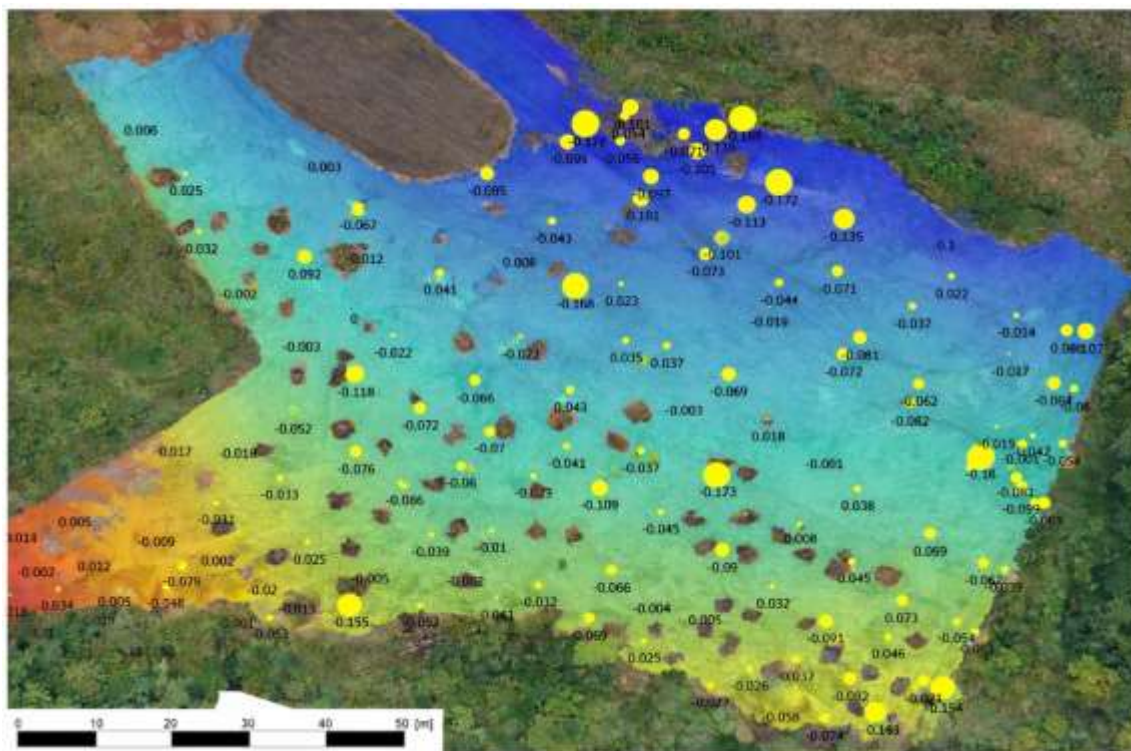


Рисунок 6 – Карта різниць висот RTS та БПЛА

Згідно з виконаним порівняльним дослідженням, середня розбіжність у висотах між даними, здобутими за допомогою роботизованої тахеометрії, та тими, що отримані аерофотограмметриєю з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зафіксована на рівні 4,2 см, тоді як стандартне відхилення склало 5,9 см.

Цифрова модель рельєфу, створена на базі аерофотознімків, оброблених із застосуванням БПЛА, у середньому демонструє завищення приблизно на 1,9 см порівняно з ідентичною моделлю, збудованою за даними, отриманими методом роботизованої тахеометрії.

Ця розбіжність у здобутках може бути обумовлена низкою чинників.

Насамперед, коректність вимірювань могла зазнати впливу через особливості форми наземних реперів; адже референтні мішені, що застосовувалися, мали приблизно сантиметрову товщину, що здатне викликати невелику похибку у визначених відмітках висот.

По-друге, під час виконання тахеометричних вимірювань ймовірно несуттєве зменшення висотних показників.

Це виникає через специфіку монтажу геодезичної віхи чи штатива, коли її нижня частина трохи втискається у ґрунт.

Ще однією обставиною, що могла позначитися на отриманих даних, є стан земної поверхні та густота рослинного покриву.

Приміром, ділянки, вкриті стоячою водою чи заростями високої трави, або важко, або взагалі не піддаються коректному вимірюванню з використанням тахеометричних технік, тоді як фотограмметрична робота зі знімками, зробленими дроном, дає змогу охопити поверхню значно повніше.

До того ж, істотно вища насиченість замірів, здобутих завдяки аерофотографуванню, також сприятливо відбивається на точності збудованої моделі.

Завдяки значному обсягу вимірювальних точок, підхід з використанням безпілотних літальних апаратів гарантує детальніше відображення топографії території.

Протягом виконання дослідження в реальних умовах, останні дві обставини виявилися вельми вагомими, що доводить ефективність застосування безпілотних літальних апаратів для швидкого створення деталізованих мап рельєфу.

Таблиця 4 містить зведені дані, що відображають порівняння застосованих методик.

Таблиця 4 – Порівняння визначення об’ємів земляних насипів за результатами RTS-зйомки та аерофотозйомки БПЛА

Ділянка	Площа [м²]	RTS Об'єм [м³]	RTS Кількість точок	БПЛА Об'єм [м³]	БПЛА Кількість точок	Похибка [м³]	Похибка [%]
Насип 1	443	730	29	789	3 877	59	8%
Насип 2	440	997	40	1 090	2 617	93	9%
Насип 3	95	81	24	95	454	14	16%

Аналіз даних щодо обсягів насипів, визначених різними способами, виявив, що розбіжність між показниками, отриманими з використанням RTS та дронівих технологій, коливалася у межах 8–16 відсотків.

Головною причиною цієї невідповідності вважається різна густота збору даних: тахеометричні роботи забезпечили значно меншу щільність точок порівняно з фотограмметричною обробкою матеріалів, зібраних із БПЛА.

З огляду на це, можна зробити висновок, що аерофотознімальний підхід дає змогу детальніше відобразити конфігурацію поверхні, а отже, потенційно дає змогу точніше розрахувати об’єми ґрунтових мас.

Водночас, аби досягти найбільш неупередженого зіставлення отриманих даних, оптимальним рішенням видається залучення наземного лазерного сканування.

Ця технологія дає змогу створити надзвичайно насичену точкову хмару, гарантуючи при цьому високу ступінь вірності моделюванню рельєфу.

Застосування саме такої методики сприяло б зменшенню ймовірності хибно завищених чи занижених показників об'ємів при подальшому опрацюванні згенерованих моделей місцевості.

Однак, використання таких надточних технік не завжди є доцільним, коли доходить до реального використання.

У типових будівельних завданнях, що стосуються нагляду за проведенням земельних робіт, необхідним є дуже швидке одержання підсумків.

З огляду на це, розрахунок обсягів зазвичай ґрунтується на даних, зібраних під час виїздів на місцевість, та експрес-аналізі геодезичних даних.

Насправді, роботизоване тахеометричне знімання (RTS) зберігає позиції як один із найбільш уживаних способів підрахунку обсягів робіт із переміщення ґрунту.

Причина цьому — досягнення потрібної міри точності, відносна легкість налагодження знімальних заходів у полі та здешевлення процесу, якщо порівнювати його з використанням лазерних сканерів.

Більше того, тахеометричне знімання вимагає збору меншого масиву вимірів і не тягне за собою потреби у складному налаштуванні апаратури, що суттєво спрощує його застосування безпосередньо на будівельних об'єктах.

3.1 Аналіз точності та ефективності використання БПЛА

Використання дронів у геодезичних заходах за останні роки стало досить популярним через здатність доволі швидко збирати значний масив просторових відомостей із високим ступенем деталізації.

Застосування аерофотографування за допомогою безпілотників у тандемі з фотограмметричною інтерпретацією отриманих знімків дає змогу формувати точні цифрові моделі терену та високодеталізовані ортофотоплани, які знаходять застосування для підрахунку обсягів земельних вивізних чи засипних робіт, вивчення морфології ландшафту та нагляду за перебігом будівельних проєктів.

У межах здійсненого студіювання ми провели зіставлення даних, здобутих у процесі геодезичних замірів, використовуючи як класичний тахеометричний підхід, так і технологію повітряної зйомки на базі безпілотного літального апарату (БПЛА).

Ключовим завданням такого зіставлення було встановлення рівня хибності у створених цифрових моделях рельєфу, а також з'ясування, наскільки виправданим є застосування дронів у геодезичних операціях, зокрема тих, що стосуються розрахунку об'ємів переміщеного ґрунту.

Аналіз виявив, що розбіжність у висотах між даними з RTS та безпілотника в середньому сягала приблизно 4,2 см, зі стандартним розкидом у 5,9 см.

Ці показники говорять про цілком прийнятну збіжність між двома цими підходами.

При цьому з'ясувалося, що цифрова модель рельєфу, сформована з використанням інформації з БПЛА, загалом виявилася вищою (приблизно на 1,9 см) за модель, яку було виведено на основі тахеометричних зйомок.

Розгляд імовірних джерел цих розбіжностей свідчить про те, що вони можуть зумовлюватися низкою чинників.

Зокрема, до них належить товщина реперних точок, які застосовувалися для просторового прив'язування фотограмметричної моделі.

Окрім того, під час проведення тахеометричного знімання існує ймовірність незначного заниження позначок висоти, що може бути спричинене частковим утрусанням вістря геодезичного штатива у ґрунт.

Нарешті, певний внесок у похибки може зробити й характеристика місцевості, що підлягала дослідженню, а саме: наявність рослинного покриву або зон із неоднорідним складом ґрунту.

Ключовою складовою, котра визначає правильність створених макетів, є насиченість вимірювань.

При залученні безпілотних літальних апаратів (БПЛА) обсяг зібраних даних може доходити до сотень тисяч або навіть мільйонів, що відчутно більше за обсяги, які фіксуються під час звичайної тахеометричної знімальної процедури.

Цей надлишок інформації дає змогу точніше охарактеризувати найдрібніші особливості рельєфу місцевості та посилити коректність розрахунку мас ґрунту.

Окрім того, що дані мають бути точними, не менш важливим є те, наскільки швидко вдається ці роботи виконати.

Зіставлення даних продемонструвало, що застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) суттєво пришвидшує виконання робіт у полі.

Приміром, для тієї ділянки, яку ми досліджували, геодезична зйомка з використанням традиційних методів тривала кілька годин, тоді як аерофотозйомка за допомогою дрона зайняла лише кілька хвилин, доки апарат був у повітрі.

Навіть якщо додати до цього час, необхідний для подальшої обробки отриманих знімків (камеральні роботи), загальна тривалість була відчутно меншою, ніж за умови застосування звичних підходів.

Серед суттєвих плюсів застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) виступає також здатність охоплювати значні площі у стислі терміни.

Ця можливість є вкрай затребуваною на будівельних об'єктах, у кар'єрах, на полігонах та подібних локаціях, де конче потрібен систематичний нагляд за обсягами проведення земляних операцій.

Ба більше, залучення БПЛА сприяє скороченню чисельності персоналу, який працює "у полі", і одночасно підносить ступінь безпеки усіх робочих процесів.

Проте, аерофотознімальний спосіб має власні недоліки.

Серед них слід виокремити обумовленість якістю погоди, вимогу гарантувати адекватне накладання окремих кадрів, а також потребу у вагомих комп'ютерних можливостях для опрацювання масивів фотограмметричних відомостей.

З іншого боку, удосконалення поточних програмних засобів для маніпуляцій із зображеннями та зростання продуктивності обчислювальних машин поступово нівелюють дію цих стримуючих факторів.

На основі виконаного аналізу можна констатувати, що застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) демонструє високу дієвість як засіб для здійснення геодезичних завдань, зокрема картографування певних ділянок та розрахунку обсягів ґрунтових переміщень.

Цей підхід із застосуванням дронів гарантує необхідний ступінь коректності результатів, суттєво мінімізує терміни виконання завдань і дає змогу збирати детальну інформацію у тривимірному форматі про досліджувану зону.

Таким чином, включення технологій БПЛА у поточну геодезичну практику відкриває значні перспективи для зростання продуктивності у сфері нагляду за будівництвом, верифікації обсягів земельних робіт, а також формування надточних цифрових репрезентацій рельєфу.

3.2 Визначення об'ємів земляних робіт за цифровою моделлю рельєфу (DEM)

Серед ключових практичних випадків використання аерофотограмметрії з дронами вирізняють обчислення мас ґрунту, що переміщується.

Просторові відомості, здобуті внаслідок фотограмметричної переробки знімків, зроблених безпілотниками, дають змогу формувати надзвичайно докладні цифрові моделі висот (Digital Elevation Model, DEM).

Ці моделі є корисними для дослідження трансформацій ландшафту, моніторингу виконання гірничодобувних чи будівельних земляних операцій, а також для підрахунку обсягів як насипних матеріалів, так і виробок.

Цифрова модель рельєфу постає завдяки скупченню точок, зібраних після фотограмметричної опрацювання знімків, зроблених з повітря.

Кожна точка у такій моделі володіє просторовими координатами у визначеній системі координат та відповідною висотою, що дає змогу педантично відновити конфігурацію земної поверхні обстежуваної ділянки.

На базі цих відомостей формується або рівномірна сітка, або мережа триангуляції нерегулярної форми (TIN), яка потім стає підґрунтям для подальших досліджень топографії.

Для підрахунку кількості ґрунту, що підлягає переміщенню, стандартним підходом є зіставлення двох рельєфних моделей.

При цьому одна модель відображає вихідне положення земної поверхні, а друга — те, як вона виглядатиме після завершення будівельних чи гірничих робіт, пов'язаних із переміщенням ґрунту.

Шляхом обчислення різниці у висотах між точками, що відповідають одна одній на цих двох моделях, стає можливим встановити величину

деформації рельєфу та вирахувати загальний обсяг переміщених земляних мас.

У рамках цього дослідження, підрахунок обсягів земляних робіт було проведено через ретельний аналіз цифрової моделі рельєфу, яку було сформовано на основі знімків, отриманих за допомогою безпілотного літального апарату (БПЛА) методом фотограмметрії.

На початковому етапі зформовано насичену мережу дискретних елементів, що охоплювала відомості про розташування у тривимірному просторі мільйонів точок, які формують досліджувану поверхню.

Згодом ця мережа була конвертована у модель поверхні, побудовану на основі триангуляції, що уможливило генерацію цифрову модель рельєфу (ЦМР) для відповідної області.

Далі було здійснено обчислення мас ґрунту, переміщеного у насипи, на конкретних фрагментах досліджуваної площі.

З цією метою спершу ідентифікували контури кожного окремого насипу, а потім збудували відповідні рельєфні моделі.

Об'єми визначалися шляхом інтегрування різниці висот між моделлю поверхні самого насипу та початковою (базовою) моделлю рельєфу території.

Зібрані дані були зіставлені з даними, здобутими завдяки застосуванню класичної розбивочної (тахеометричної) техніки (RTS).

Зроблений аналіз засвідчив, що застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дає змогу накопичити суттєво більший обсяг вимірювальних даних, що забезпечує вищу точність у відображенні конфігурації земної поверхні.

У той час як обсяг точок, фіксованих при тахеометричному знімальному процесі, має певні обмеження, фотограмметрична інтерпретація аерознімків дає змогу сформувати насичене хмароподібне утворення, що складається із сотень тисяч, а то й мільйонів точок.

У зв'язку з тим, що цифрова модель рельєфу, сформована із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), характеризується високим насиченням даними, вона забезпечує значно точніше зображення як конфігурації насипів, так і природних нерівностей ландшафту.

Цей аспект набуває критичного значення у процесі підрахунку обсягів ґрунтових мас: навіть мінімальні неточності у визначенні абсолютної висоти можуть спричинити вагомі розбіжності у фінальних обчисленнях об'ємів.

Ще однією суттєвою перевагою, яку надає цифрова модель висот (ЦМВ), є функціональність візуалізації отриманих результатів аналізу.

Спираючись на цю ЦМВ, цілком реально генерувати різноманітні картографічні матеріали, зокрема карти висотних відміток, карти, що відображають перевищення чи заниження окремих ділянок, а також інші спеціалізовані карти, які наочно і репрезентативно демонструють трансформації рельєфної поверхні.

Дані матеріали стануть у пригоді фахівцям з інженерії, геодезії та керівникам, що відповідають за об'єкти будівництва, оскільки надають змогу швидко зреагувати та проаналізувати прогрес виконання земляних операцій.

Окрім безпосереднього прорахунку кількості переміщеної ґрунтової маси, тривимірні моделі місцевості знаходять застосування у розв'язанні чималої кількості завдань.

Серед них — дослідження системи водовідведення, симуляція руху поверхневих водних потоків, формування графіків будівельної діяльності, а також відстеження трансформацій ландшафту протягом певного періоду.

Отже, застосування цифровізованих геомodelей, сформованих на базі аерозйомки з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), демонструє високу ефективність як засіб для обчислення обсягів земляних робіт.

Комплекс переваг, зокрема гранично висока деталізація отриманих відомостей, швидкість збору інформації та здатність до автоматизованої інтерпретації, позиціонує цю технологію як таку, що має значний потенціал для інтенсивного впровадження у сучасній практиці геодезичних та інженерних досліджень.

Висновок

У цій бакалаврській роботі розглядалася потенційна корисність безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для створення тривимірних карт місцевості та підрахунку обсягів земляних робіт на підставі даних, отриманих під час аерофотозйомки.

Акцент було зроблено на порівняльному аналізі точності й оперативності застосування БПЛА відносно до усталених геодезичних технік збору даних.

У межах дослідження було проаналізовано ключові технічні параметри та апаратне забезпечення комплексу БПЛА, що застосовується для аерофотографування.

Крім того, детально викладено механізми роботи сенсорів, розташованих на апараті, системи його орієнтування у просторі, а також оптичних пристроїв, що дають змогу збирати просторову інформацію з високим рівнем деталізації.

Особливу увагу зосереджено на розробці маршруту польоту, що дає змогу автоматизувати геодезичні вимірювання та гарантувати належний ступінь накладання аерофотокадрів, потрібний для подальшої фотограметричної редукції.

У межах цього дослідження було проаналізовано техніку проведення аерофотографування, окрім того, розглянуто стадії фотограметричної переробки зібраного матеріалу.

Завдяки обробці аерофотознімків удалося створити насичену тривимірну точкову модель, цифрову модель висот місцевості (ЦМВ) та ортофотоплан досліджуваної ділянки.

Здобуті відомості дали можливість здійснити ґрунтовний розбір рельєфу та обчислити маси ґрунту, що переміщуються.

Щоби визначити, наскільки достовірними є здобуті дані, ми здійснили зіставлення відомостей, які ми мали з безпілотного літального апарату (БПЛА), із даними, здобутими класичним способом — тахеометричним зніманням (RTS).

Наше дослідження показало, що розбіжність по висоті між цими двома типами вимірювань у середньому сягала приблизно 4,2 сантиметра.

Це, своєю чергою, демонструє цілком прийнятний рівень точності фотограмметричного підходу з використанням БПЛА.

При цьому варто зазначити, що цифрова модель рельєфу, яку ми сформували на основі даних, знятих з дрона, у середньому виявилася вищою на близько 1,9 см, ніж модель, побудована за підсумками тахеометричного промірювання.

Згідно з виконаним аналізом даних щодо обсягів насипів ґрунту, розбіжність між показниками, здобутими з використанням тахеометрії та БПЛА, коливається у межах 8–16 %.

Ключовим фактором, що зумовлює цю варіативність, є суттєво вища концентрація вимірювальних точок, яка генерується в процесі фотограмметричної обробки аерознімків.

Відтак, застосування технології БПЛА забезпечує більш детальне моделювання контурів місцевості, що, своєю чергою, веде до підвищення достовірності визначення обсягів ґрунтових мас.

Здійснене дослідження засвідчило, що експлуатація безпілотних літальних апаратів (БПЛА) несе вагомі переваги у контексті продуктивності виконання завдань.

Аерознімання дає змогу кардинально зменшити тривалість етапів польових замірів, гарантує стрімке охоплення розлогих площ і дає змогу здобувати просторові відомості високої деталізації.

Ба більше, використання дронів покращує ступінь захищеності під час робіт, адже зменшується потреба у присутності геодезичних фахівців

безпосередньо на об'єктах, що є ускладненими чи потенційно ризикованими.

Тим не менше, застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) накладає певні технічні рамки.

До таких обмежень належать скорочений часовий проміжок, протягом якого апарат може перебувати у повітрі, його чутливість до змін у погодних умовах, а також необхідність у потужних обчислювальних потужностях для аналізу значної кількості фотограмметричних знімків.

На продуктивність усієї системи суттєво впливає показник ємності акумуляторів, адже саме він диктує максимально можливий час перебування БПЛА у небі та обсяг території, яку реально охопити під час однієї місії.

Отож, висновки, отримані у ході цього вивчення, засвідчують, що застосування дронів демонструє високу дієвість та має значний потенціал як інструмент для виконання завдань у галузі геодезії, зокрема у площині тривимірного моделювання місцевості та обчислення обсягів переміщення ґрунту.

Комбінація аерофотографування за допомогою безпілотників із застосуванням актуальних фотограмметричних технік опрацювання зібраної інформації дає змогу формувати цифрові рельєфові моделі, що вирізняються високою точністю, і суттєво примножує продуктивність при проведенні інженерно-геодезичних обстежень.

Список використаної літератури

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. Лазарєва 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. Лазарєва, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).
3. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. – Berlin : De Gruyter, 2014. – 702 p.
4. Westoby M., Brasington J., Glasser N., Hambrey M., Reynolds J. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. // *Geomorphology*. – 2012. – Vol. 179. – P. 300–314.
5. Furukawa Y., Ponce J. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2010. – Vol. 32. – P. 1362–1376.
6. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. – London : Springer, 2011. – 812 p.
7. Agisoft LLC. Agisoft Metashape User Manual. – St. Petersburg, 2022. – 176 p.
8. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: A review. // *Applied Geomatics*. – 2014. – Vol. 6. – P. 1–15.
9. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 92. – P. 79–97.

10. Eisenbeiss H. UAV Photogrammetry. – Zürich : ETH Zurich Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2009. – 203 p.
11. Kraus K. Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. – Berlin : Walter de Gruyter, 2007. – 459 p.
12. Wolf P., Dewitt B., Wilkinson B. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. – New York : McGraw-Hill, 2014. – 608 p.
13. Шульц Р. В., Ніколаєв Ю. М. Фотограмметрія. – Київ : КНУБА, 2015. – 320 с.
14. Третяк К. Р., Задорожний В. І. Основи геодезії. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 440 с.
15. Кучеренко О. В. Інженерна геодезія. – Київ : Ліра-К, 2017. – 388 с.
16. Шевченко Т. Г. Геоінформаційні системи та дистанційне зондування Землі. – Київ : Наукова думка, 2018. – 304 с.
17. Remondino F., Fraser C. Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. // ISPRS Commission V Symposium. – 2006. – P. 266–272.
18. James M., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera. // Earth Surface Processes and Landforms. – 2012. – Vol. 37. – P. 1002–1013.
19. Turner D., Lucieer A., Watson C. An automated technique for generating georectified mosaics from UAV imagery. // Remote Sensing. – 2012. – Vol. 4. – P. 1392–1410.
20. Hardin P., Jensen R. Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing. // GIScience & Remote Sensing. – 2011. – Vol. 48. – P. 99–111.
21. Pix4D SA. Pix4Dmapper User Manual. – Lausanne, 2021. – 160 p.
22. DJI. DJI Phantom 4 RTK Technical Documentation. – Shenzhen : DJI Technology Co., 2020. – 85 p.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

«3D-картографування та визначення об'ємів земляних робіт за результатами аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів»

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)