

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Горблянський Василь
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
«Фотограмметрія БПЛА як інструмент високоточного картографування великих територій»
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

В. Горблянський, студент групи ГЗз-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

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

Горблянський Василь

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Фотограмметрія БПЛА як інструмент високоточного картографування великих територій»

керівник роботи: _____ *ст. викладач Віталій Ковтун*

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

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

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

1. Область дослідження
2. Матеріали та методи
3. Результати роботи

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	1. Область дослідження		
2	2. Матеріали та методи		
3	3. Результати роботи		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ ***Горблянський В.***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ ***Ковтун В.***

Анотація

Фотограмметрія, що використовує безпілотники (БПЛА), стрімко завоювала популярність завдяки своїй відмінній роботі та загальній доступності.

Цей метод постає як багатообіцяюча заміна традиційним методам дистанційного зондування, особливо там, де потрібні детальні геопросторові дані для відносно невеликих площ.

В рамках нашого дослідження, виконаного як частина бакалаврської роботи, був проведений комплексний аналіз застосування фотограмметрії з використанням БПЛА для створення високоточних карт значних територій.

Ключовим аспектом було оцінювання надійності зібраної інформації та ефективності використаних методів обробки.

Для отримання вихідних даних було використано багатороторний безпілотний літальний апарат, оснащений цифровим фотоапаратом, закріпленим на підвісі, що стабілізує зображення та усуває небажані вібрації під час польоту.

Обліт території загальною площею 50 га зайняв близько 2,5 годин, а обробка отриманих фотографій, включно з створенням хмари точок, тривала приблизно 18 годин.

Для забезпечення високої точності геометричних параметрів та правильного прив'язування до простору, на досліджуваній території було розміщено наземні контрольні пункти.

Для обробки зібраних даних було використано алгоритми комп'ютерного зору, зокрема, методику Structure from Motion (SfM), що дозволила відновити положення фотокамери під час зйомки, ідентифікувати особливості рельєфу та отримати щільні хмари точок з високою деталізацією.

На основі отриманих результатів було створено ортофотоплани, тривимірні моделі ландшафту та цифрові моделі поверхні.

Аналіз точності вимірювань показав, що середньоквадратична похибка координат у площині становить 1,7 см, а за висотою — 0,24 см.

Це чітко вказує на високу деталізацію та безперечну достовірність отриманих даних.

Отримані результати переконливо демонструють ефективність фотограмметрії з використанням БПЛА для оперативного та високоточного картографування великих площ.

Застосування цієї технології, у свою чергу, оптимізує процеси просторового аналізу, сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень та розширює можливості її використання в геодезії, землевпорядкуванні, екологічному моніторингу та містобудуванні.

Abstract

Photogrammetry using unmanned aerial vehicles (UAVs) has rapidly gained popularity due to its excellent performance and general accessibility.

This method appears as a promising alternative to traditional remote sensing methods, especially where detailed geospatial data for relatively small areas are required.

As part of our research, carried out as part of our bachelor's thesis, a comprehensive analysis of the use of photogrammetry using UAVs to create high-precision maps of large areas was conducted.

A key aspect was the assessment of the reliability of the collected information and the effectiveness of the processing methods used.

A multi-rotor unmanned aerial vehicle equipped with a digital camera mounted on a gimbal that stabilizes the image and eliminates unwanted vibrations during flight was used to obtain the initial data.

The flight over the territory with a total area of 50 hectares took about 2.5 hours, and the processing of the obtained photographs, including the creation of a point cloud, lasted approximately 18 hours.

To ensure high accuracy of geometric parameters and correct spatial binding, ground control points were placed on the studied territory.

Computer vision algorithms were used to process the collected data, in particular, the Structure from Motion (SfM) technique, which allowed restoring the camera position during shooting, identifying relief features and obtaining dense point clouds with high detail.

Based on the results obtained, orthophotomaps, three-dimensional landscape models and digital surface models were created.

An analysis of the measurement accuracy showed that the mean square error of the coordinates in the plane is 1.7 cm, and in height - 0.24 cm.

This clearly indicates the high detail and undeniable reliability of the obtained data.

The results obtained convincingly demonstrate the effectiveness of photogrammetry using UAVs for rapid and high-precision mapping of large areas.

The use of this technology, in turn, optimizes spatial analysis processes, contributes to making informed management decisions, and expands the possibilities of its use in geodesy, land management, environmental monitoring, and urban planning.

Зміст

Вступ

1. Область дослідження

2. Матеріали та методи

2.1 Складання плану польоту БПЛА

2.2 Підготовка на місці та збір даних

2.3 Генерація тривимірної хмари точок

2.4 Редагування, класифікація та інтерпретація даних

3. Результати роботи

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Розширення фотограмметрії за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) започаткувало нову еру у дистанційному зондуванні, надавши ефективну та економічно обґрунтовану заміну класичним методам отримання просторових даних.

Цей метод набуває все більшого поширення через свою високу точність, мобільність та швидкість збирання потрібних відомостей.

Сучасні способи фотограмметрії з застосуванням безпілотників розширюють можливості для багатьох сфер.

Йдеться про геологію, контроль за трансформаціями довкілля, розпорядження природними ресурсами та оцінку річкових екосистем.

Класичні підходи у таких випадках можуть демонструвати меншу ефективність або потребують великих грошових витрат.

Головна перевага аерозйомки з дронів полягає у здатності отримувати деталізовані знімки певних територій, не зважаючи на графіки надходження даних із супутників чи потребу в організації пілотованих рейсів.

Величезний прорив у галузі комп'ютерного бачення, що йшов пліч-о-пліч з розширенням обчислювальних потужностей, зумовив стрімкий розвиток фотограмметричних методів, в основі яких лежать алгоритми Structure from Motion (SfM) та багаторакурсного стереозору.

Це стало поштовхом до покращення процесів тривимірного моделювання й реконструкції земної поверхні з вражаючою деталізацією, дозволяючи досягати сантиметрової точності.

Дослідники все частіше застосовують автоматизовані алгоритми комп'ютерного зору для створення 3D-моделей земної поверхні, що відкриває можливості для ефективного відтворення найскладніших топографічних форм.

У протигагу лазерному скануванню, що потребує великих коштів та специфічного устаткування, фотограмметричні підходи, впроваджені з допомогою безпілотних літальних апаратів, вирізняються значно більшою доступністю і нижчими витратами.

Більше того, задля гарантування високої точності таких моделей, достатньо обмеженої кількості опорних точок, що суттєво спрощує процес збору інформації.

Застосування передового програмного забезпечення для комп'ютерного зору дозволяє автоматично створювати щільні хмари точок, ортофотоплани та цифрові моделі рельєфу (ЦМР), які виступають як важливі інструменти в сфері просторового аналізу.

Використання космічних технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є ключовим для розуміння навколишнього середовища, дослідження змін на місцевості та прогнозування екологічних наслідків.

Значення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у наукових дослідженнях неухильно зростає, що підтверджується збільшенням обсягу даних про безпілотні літальні системи (БПС), що фіксується в щорічних оглядах та наукових публікаціях.

У багатьох наукових роботах було показано ефективність аерофотозйомки з БПЛА, яка застосовується у різних галузях, включно з моніторингом сільськогосподарських земель, екологічним контролем та оцінюванням стану природних ресурсів.

Можна виокремити п'ять ключових напрямків застосування фотограмметрії з використанням дронів:

1. Створення ортофотопланів та цифрових моделей місцевості (ЦММ)

БПЛА дозволяють швидко й точно отримувати аерофотознімки, які

потім обробляються для побудови високоточних ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу чи поверхні.

2. Топографічна зйомка важкодоступних територій

Використання дронів дає змогу здійснювати зйомку в районах зі складним рельєфом, густою рослинністю або обмеженим доступом для традиційної геодезичної техніки.

3. Моніторинг деформацій та змін рельєфу

За допомогою регулярних зйомок можна відстежувати динаміку зміщень ґрунту, зсувів, ерозій та інших геоморфологічних змін.

4. Кадастрові та землевпорядні роботи

Фотограмметрія БПЛА дозволяє оперативно збирати просторові дані для оновлення кадастрових планів, інвентаризації земель та визначення меж ділянок.

5. Документування об'єктів інфраструктури та будівництва

Дрони ефективні для зйомки мостів, доріг, будівель, гідроспоруд тощо. Це забезпечує точну фіксацію стану об'єктів, контроль будівництва та створення 3D-моделей.

Окрім того, дослідження великих просторів вимагає вдосконалених підходів до дистанційного зондування.

Взаємодія суші та води ускладнює процес аналізу й конструювання моделей таких екосистем.

Вирішення цих викликів передбачає комплексний підхід до опрацювання даних та створення новаторських методів картографування.

У нашій бакалаврській роботі ми вивчаємо можливості фотограмметрії з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) задля створення високоточних карт великих ділянок.

1. Область дослідження

Досліджувана площа, загальною величиною п'ятдесят гектарів, розташовується в селі Старий Лисець Івано-Франківської області та простягається на відстань, більшу ніж один кілометр.

Початкова точка території – трохи нижче земляної дамби, яка знаходиться у північно-західній частині села, зі східного боку від автошляху Н10.

Межі досліджуваної ділянки проходять на південь від перехрестя вулиць Івана Франка та Михайла Коцюбинського та далі прямують до іншої земляної греблі, що знаходиться у північно-східному напрямку (дивіться рисунок 1).



Рисунок 1. Область дослідження

Досліджувана місцевість – це типовий приклад території, де взаємодіють природні та штучні чинники, відіграючи важливу роль у системі цього регіону.

За останні кілька десятиліть значна частина досліджуваної території зазнала змін через людську діяльність.

Інтенсивне сільське господарство стало причиною трансформації природного ландшафту, зокрема, осушення заболочених ділянок для збільшення площ сільськогосподарського призначення.

Спорудження шляхів, земляних дамб та інших інфраструктурних об'єктів теж викликало перетворення природних екосистем і роздроблення ландшафту в окремих місцевостях. [5]

Не зважаючи на ці зміни, територія зберегла визначальні риси природного простору.

Для неї характерні своєрідні гідроморфні ґрунти, котрі відрізняються підвищеною вологомісткістю та низькою спроможністю протистояти навантаженням.

Рослинний світ представлений видами, притаманними подібним екосистемам, зокрема, заростями очерету, болотними травами, осоками та ін.

Природні характеристики цього регіону наділяють його важливими екологічними функціями.

Зокрема, він знижує вірогідність затоплень, забезпечує природне очищення водних ресурсів та слугує прихистком для різноманітної флори та фауни.[4]

2. Матеріали та методи

Методологія дослідження розбивається на чотири ключові стадії, як показано на рисунку 2. [4]

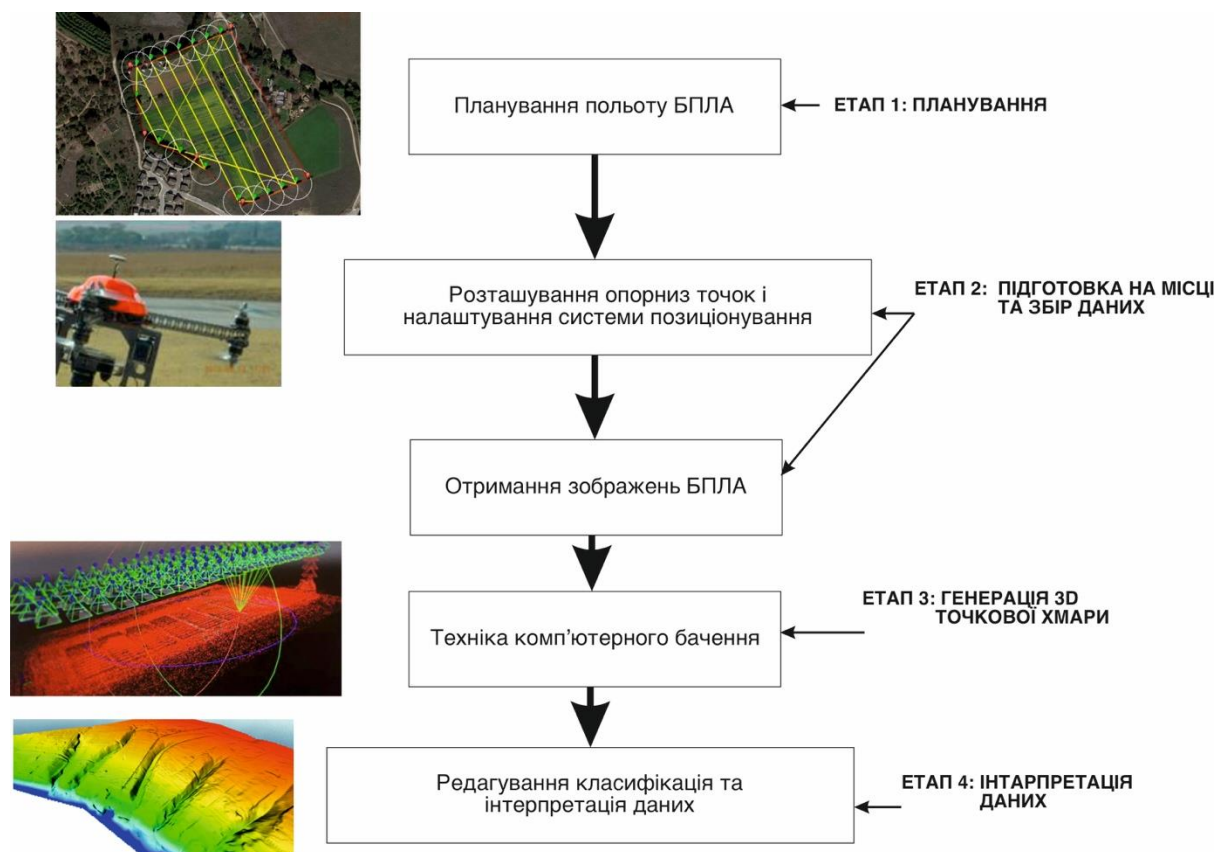


Рисунок 2. Блок-схема методології

2.1 Складання плану польоту БПЛА

На поточному етапі було виконано велику підготовчу роботу, яка охоплювала детальний аналіз особливостей досліджуваної території.

Проведено розрахунки оптимальної кількості аерознімальних маршрутів, визначено бажаний масштаб зображень, встановлено оптимальну висоту польоту, проаналізовано відсоток перекриття кадрів та розроблено остаточний план обльоту.[4,5]

Об'єктом досліджень стала ділянка площею 50 гектарів, котра повністю включала в себе функціональну екосистему разом з прилеглими схилами.

Залучення суміжних просторів мало значення, щоб зафіксувати нетільки характерні риси ландшафту, але й наслідки впливу довколишніх землекористувань на досліджувану область.

Маршрути польотів БПЛА були розроблені з метою гарантувати максимальне покриття території.

Відстань між сусідніми лініями траєкторій (смугами) дорівнював 60–70 метрам, що забезпечувало 80% повздовжнє (фронтальне) накладання та 60% бічне перекриття фотоматеріалів.[4,6]

Обраний рівень перекриття забезпечував необхідну точність при відновленні тривимірної моделі місцевості.

Задля забезпечення найвищої якості кінцевих результатів та мінімізації ймовірності виникнення помилок, було прийнято рішення використовувати метод з максимальними коефіцієнтами перекриття, хоча існувала теоретична можливість їхнього зменшення.

Кожен окремий фотознімок, зроблений в процесі, покривав територію приблизно 120 на 80 метрів.

Таке рішення забезпечувало високу деталізацію отриманих зображень, оптимально балансує між об'ємом інформації та оперативністю її збору.

Висота польоту безпілотного літального апарату була чітко встановлена на позначці 120 метрів над рівнем землі.

Це не лише відповідало вимогам регуляторних документів, але й гарантувало найкращу якість кінцевих зображень, зберігаючи необхідну деталізацію.

Визначення саме цієї висоти стало ключем до оптимального співвідношення деталізації зображень і раціонального використання часових та ресурсних обмежень під час реалізації аерофотозйомки.

Процес аерофотографування здійснювався за допомогою цифрової камери Nikon D3200, оснащеної об'єктивом з фокусною відстанню 28 мм, здатним забезпечити роздільну здатність в 20 мегапікселів.[4,5,6]

Усталено фокусування камери у режим "нескінченність", а витримка зафіксована на рівні 1/800 секунди для забезпечення необхідної чіткості зображень.

Це дало змогу одержати яскраві й нерухомі фотографії, навіть якщо безпілотник переміщався.

Просторова роздільна здатність знімків була близько 2 см/піксель, що надавало високу деталізацію ландшафту й дозволяло застосовувати отримані дані для створення точних цифрових моделей місцевості.

2.2 Підготовка на місці та збір даних

Для гарантування найвищої точності просторового прив'язування інформації, отриманої безпосередньо на об'єкті, проведено координування наземних контрольних пунктів з використанням високотехнологічного GNSS-обладнання.

Зокрема, у роботі була задіяна система Trimble SPS985, яка працювала у режимі RTK (кінематика реального часу) з корекціями від найближчої референтної станції FRKV, розташованої в місті Івано-Франківськ.

Такий підхід дозволив отримати координати з винятковою точністю, що є вкрай важливим для подальшої обробки зібраних даних та проведення калібрування результатів аерофотозйомки.

Наземні контрольні пункти було розміщено згідно з планом на території, що вивчалась, для перекриття кордонів і критичних зон.

Окрему увагу приділено розміщенню маркерів на ділянці дослідження (див. рисунок 3), плюс на різних рівнях висоти для побудови точної моделі рельєфу.



Рисунок 3. Наземні контрольні маркери

Загалом було зареєстровано координати 20 реперних точок, котрі рівномірно розподілені по території.

Положення кожної наземної контрольної точки було з високою точністю визначено в системі просторових координат XYZ, використовуючи GNSS-приймач Trimble SPS985.

Отримані результати стали фундаментом для подальшої роботи з зображеннями: їх обробки, виправлення ортофотопланів, а також побудови точних цифрових моделей місцевості (ЦММ).

Застосування GNSS-технологій у комбінації з даними фотограмметрії забезпечило значне зменшення похибок просторової прив'язки, що позитивно вплинуло на загальну якість кінцевих продуктів дослідження.

Процес отримання фотографій обстежуваної місцевості реалізувався через застосування мультикоптерного БПЛА, обладнаного цифровим фотоапаратом на підвісі з функцією стабілізації, що гарантувало чіткість зображень навіть за несприятливих погодних умов, таких як пориви вітру.

Сумарна тривалість повітряної зйомки зайняла близько двох з половиною годин, що створило можливість швидко зібрати потрібні відомості для наступного фотограмметричного опрацювання.[4]

Безпілотний літальний апарат функціонував у автоматичному режимі, використовуючи інтегровану систему GPS-навігації.

Фотокамера здійснювала автоматичне фотографування з інтервалом від однієї до двох секунд, керуючись бортовим контролером польоту.

Для точного фіксування траєкторії польоту було використано вбудований GPS-приймач, який перед початком завдання було узгоджено з фотоапаратом.

Це забезпечувало коректне зіставлення фото з географічними координатами.

Політ супроводжувався безперервним радіообміном, що давало змогу оператору негайно отримувати інформацію про розташування безпілотника, рівень заряду батареї та інтенсивність сигналу.

Сумарно, впродовж аерофотозйомки місцевості було зроблено приблизно 1200 фотографій, що забезпечило необхідне перекриття для створення тривимірної карти місцевості.

По завершенню процесу фотографування, усі отримані світлини підлягали попередньому візуальному контролю згідно з наступними критеріями:

- Технічна якість зображень (відсутність ефекту змазування, чітке відображення деталей);
- Кут огляду та відповідність заздалегідь визначеному маршруту польоту;
- Ступінь перекриття суміжних кадрів.

Будь-які фотографії з серйозними недоліками, наприклад, розмиті або надмірно освітлені, відбраковувалися та не використовувалися у подальшій обробці.[4,6]

На основі попередньо синхронізованого треку GPS, кожному знімку були автоматично присвоєні орієнтовні географічні координати.

Наступним етапом була перевірка географічної прив'язки, яка включала в себе аналіз правильності виконаних ліній польоту, оцінку накладання зображень одне на одне та точності визначення координат.

Тільки після повного контролю якості зібраних даних, група завершувала роботу на дослідженій території.

2.4Генерація тривимірної хмари точок

Для обробки фотографій було застосовано програмне забезпечення Agisoft PhotoScan Professional певної версії.

Обробка даних у PhotoScan відбувалася за наступним алгоритмом:

1. Імпортування вихідних знімків, зроблених з дрона.

2. Автоматичне виявлення ключових точок на кожному знімку, яке допомагало знаходити спільні елементи на сусідніх зображеннях.

3. Узгодження та уточнення розташування камер, завдяки чому було можливо визначити геометричне положення кожного фото в просторі (Див. Рис. 4).[4]

4. Відтворення особливостей рельєфу було реалізовано шляхом послідовного формування щільної сукупності точок, побудови цифрової моделі поверхні Землі та наступного створення ортофотоплану.

5. Фінальне виправлення та просторове узгодження моделі виконувалися з використанням контрольних пунктів, попередньо ідентифікованих за допомогою GNSS-приладів.

Автоматизований алгоритм, реалізований у PhotoScan, забезпечив значне прискорення обробки даних, зводячи до мінімуму необхідність ручного редагування.

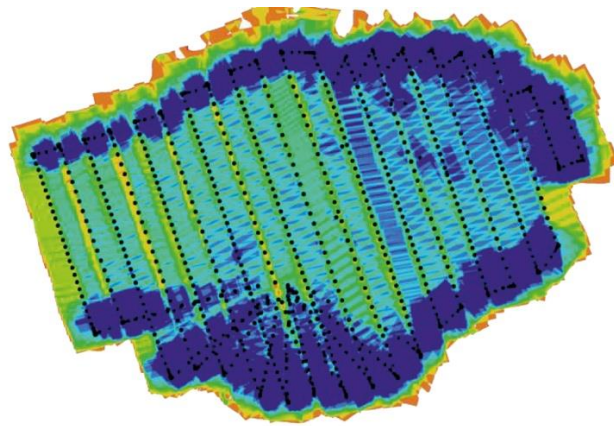


Рисунок 4. Розташування камери та накладання зображень.

Для створення розрідженого хмарного шару (див. рисунок 4) було задіяно 989 знімків, попередньо оброблених шляхом початкового корегування пучка.

Ця хмара пунктів зберігала відомості про розташування та орієнтацію кожної фотокамери, а також координати XYZ для кожної піксельної точки.[4,5]

На другому етапі було здійснено імпорт контрольних точок, отриманих із застосуванням GNSS системи Trimble, у програму PhotoScan, з попереднім перетворенням координат у формат широти та довготи.

Ці контрольні точки було застосовано для їх коректної ідентифікації в моделі та для повторної процедури корегування пучка.

Це дозволило забезпечити необхідну точність геометричних параметрів та точне географічне прив'язування знімків до навколишнього середовища.

Після цього етапу, було зібрано густий масив точок з великою чіткістю, що базувався на технології багат шарового стерео для всебічного покриття зазначеної ділянки.

Щоб досягти ще більшої точності щодо геометричних параметрів та збільшити деталізацію, було застосовано налаштування високої якості. Правда, на обробку таких даних потрібно було більше часу.

Для формування щільних хмар точок було використано різні рівні якості реконструкції: для зони з водно-болотною місцевістю, яка була меншою за площею, застосували високу якість, а для більших за розміром територій використовували низьку якість.

Завдяки цьому вдалося скоротити об'єм інформації, що позитивно вплинуло на спрощення подальшого представлення та вивчення згенерованих 3D-моделей.

На наступному кроці густі скупчення точок застосовувалися безпосередньо для формування сітки поверхні, що забезпечило можливість створення детальної моделі місцевості.

На завершальному етапі ці хмари точок були завантажені знову в PhotoScan для автоматизованого розподілу точок за двома категоріями: об'єкти, розташовані на землі, та ті, що знаходяться над нею (див. рис.

5).[4]

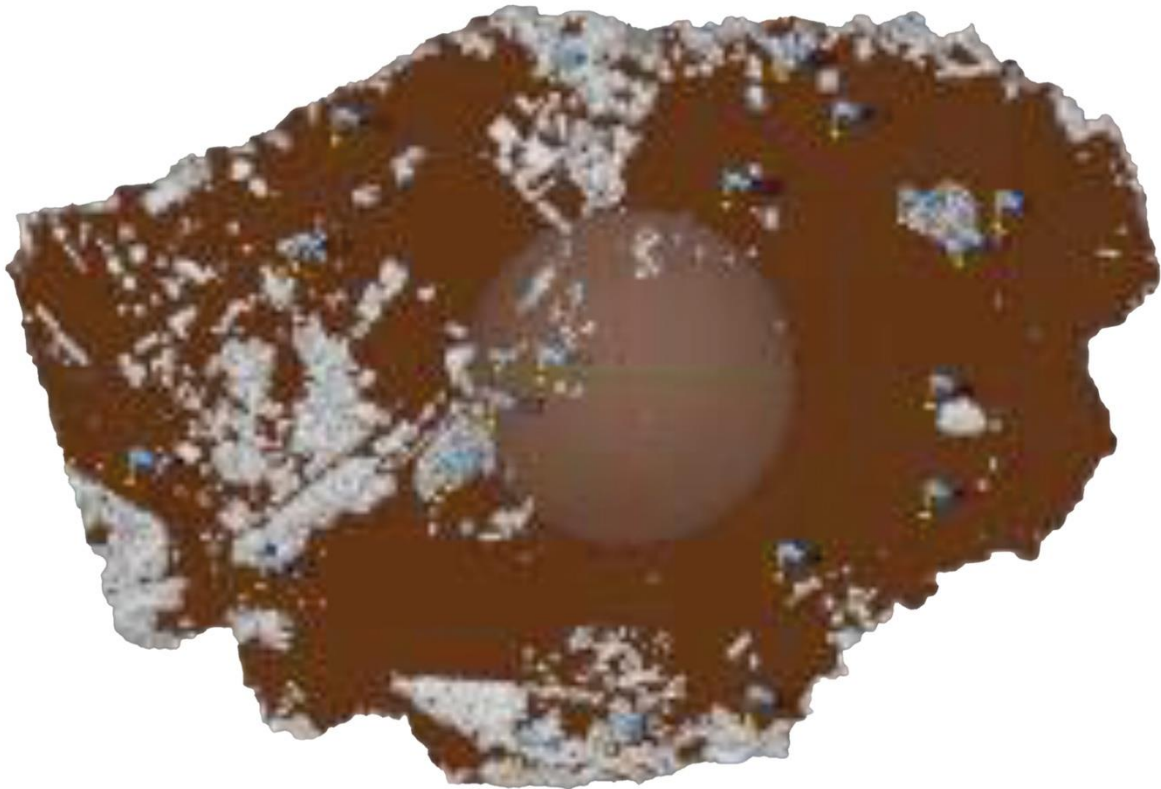


Рисунок 5. Здійснено автоматичне групування усіх точок на два різновиди: основні (коричневі) та решта (сірі).

На наступному етапі було проведено формування ортофотопланів та тривимірних моделей місцевості, використовуючи щільну хмару точок, яка була попередньо створена.

За допомогою програмного забезпечення Agisoft PhotoScan було здійснено деталізоване налаштування географічної прив'язки кожної фотографії, що суттєво покращило загальну точність кінцевих продуктів.

Для створення 3D-моделей була застосована комплексна технологія, яка включала алгоритми структурної реконструкції, що

використовували інформацію про геометричні властивості кожної фотокамери та її положення в просторі.[5]

Для більш докладного опису специфіки топографії об'єкту дослідження було здійснено порівняння результатів реконструкції з наявними цифровими моделями рельєфу.

Це дозволило ідентифікувати неточності в попередній обробці інформації.

Застосування цього методу забезпечило високу точність на кожному етапі створення карт, що має критичне значення при вивченні комплексних екологічних систем, зокрема, водно-болотних територій.

Додатково, було проведено порівняльний аналіз одержаних даних з інформацією, отриманою іншими методами картографування, зокрема, класичними наземними зйомками та лазерним скануванням, з метою оцінки переваг використання БПЛА для дослідження значних за площею територій.

В результаті цього порівняння з'ясувалося, що використання БПЛА дозволяє значно скоротити час збору даних та знизити витрати на проведення польових робіт.

Остаточна обробка даних привела до створення інтерактивної мапи місцевості. Вона візуально відображає усю досліджувану зону, враховуючи всі особливості її топографії та географії.

Такі карти можуть бути надзвичайно корисними для подальших досліджень та прийняття стратегічних рішень, спрямованих на охорону водно-болотних угідь та раціональне використання земель.

В процесі обробки сформувалась деталізована хмара точок, що охоплювала виключно наземні елементи та низьковисотні об'єкти території.

Це дозволило успішно побудувати точну цифрову модель рельєфу (ЦМР).

В ході формування сітчастої структури було здійснено видалення об'єктів, котрі розташовані над поверхнею ґрунту.

Йдеться про такі елементи, як забудови й рослинний покрив.

Завдяки цьому, було забезпечено акцент виключно на особливостях рельєфу місцевості.

Згенеровані дані було перетворено у низку форматів.

До їх числа належать хмари точок, ортофотоплани та цифрова модель рельєфу.

Це надало можливість виконати детальний аналіз ландшафту досліджуваної ділянки з максимальною точністю.

Обробка інформації здійснювалась із застосуванням персонального комп'ютера.[4]

Це забезпечило високу швидкість формування первинної хмари точок, а також експорт даних у формати, призначені для подальшого використання під час проведення аналітичних робіт і візуалізацій.

Загальна тривалість першого етапу обробки склала приблизно 16 годин.

Цей часовий проміжок включає в себе час, необхідний для генерації початкової хмари точок, а також для експорту ортофотопланів та хмари точок.

Для обробки інформації, що стосується формування хмар точок різного розміру в просторі, було залучено портативний комп'ютер.

Це дало змогу суттєво розвантажити головний комп'ютер та пришвидшити всю процедуру.

В кінцевому підсумку, було створено вичерпну та надзвичайно точну модель місцевості.

Вона придатна для широкого кола задач, включаючи екологічний контроль та розробку містобудівних планів.

2.4 Редагування, класифікація та інтерпретація даних

Для контролю коректності й відповідності даних, залучених для побудови зображень, ортофотопланів і 3D-моделей, був задіяний автоматизований інструмент оцінки якості зображень та формування звітів з показниками точності, вбудований у програмне забезпечення PhotoScan.

Цей інструмент проводить ретельний аналіз властивостей вихідних зображень, які використовуються в процесі подальшого відтворення моделей території.

Додатково, для детальнішого вивчення специфікацій та рівня точності даних, застосовувалася функція статистичного аналізу, інтегрована в програму Quick Terrain Modeller.[4,5]

Це програмне забезпечення полегшило детальний аналіз інформації про моделі поверхонь та хмари точок, за допомогою інтегрованих інструментів редагування.

Після первинної обробки даних було відібрано окремі частини в хмарах точок та поверхневих моделях, які потребували корекції, для наступного очищення від шумів та небажаних об'єктів.

Це включало виправлення перепадів, видалення аномальних точок, що знаходились поза територією дослідження.

Поверхневі моделі пройшли додаткову обробку, в тому числі вирізання та згладжування областей, що виходили за задані просторові рамки, що забезпечувало точніше та ефективніше використання 3D-моделей.

Це виправлення значно підсилило вірогідність подальшого аналізу, зокрема під час експертизи таких характеристик, як нахил поверхні й форма місцевості.

Завдяки високоякісному ортофотоплану, що його створили та опрацювали за допомогою QGIS та Global Mapper для формату GeoTIFF,

було можливо отримати максимально коректні дані для досліджуваної території.[4]

Файли KMZ, які застосовуються для зберігання координат об'єктів на мапі, передали для ознайомлення у різних геоінформаційних програмах, зокрема у ArcGIS Earth.[4]

Для подальшого опрацювання хмар точок та моделей рельєфу, отриманих в результаті досліджень, було використано Qualisys Track Manager як ключовий інструмент, котрий гарантує детальний аналіз та візуалізацію зібраної інформації.

3. Результати роботи

Аерозйомку дроном провели за дві з половиною години, охопивши територію розміром у 50 гектарів.

Для побудови первинної хмари точок використали 989 зображень, що у підсумку сформувало 861 296 939 точок.

Обробка зібраних даних, включно зі створенням детальної хмари точок, експортом хмар і фінальних ортофотопланів, зайняла 16 годин.

Роздільна здатність ортофотографічних планів склала 5 см та 10 см на піксель.

Після того, як хмара точок була вперше сформована, відбулася кропітка робота з її покращення: дані очищали від зайвого сміття, відфільтровували помилки, згладжували стрибки.

Це було потрібно для суттєвого підвищення загальної якості та надійності на наступних стадіях обробки.

Для цієї мети застосовували спеціалізовані редактори.

Найбільш корисним виявився пакет Quick Terrain Modeler.[4,6]

Завдяки йому стало можливо ефективно оперувати з величезними масивами інформації та забезпечувати правильне просторове прив'язування.

Геометричну точність, яку вдалося досягнути на основі двадцяти опорних точок, показано в Таблиці 1.

Сукупна середня квадратична похибка (СКП) для цих вимірювань складає 0,018 м, а вертикальна точність становить 0,0025 м.[6]

Отримані дані беззаперечно засвідчують виняткову коректність зібраної інформації, яка цілком відповідає всім вимогам, що пред'являються для подальшого аналізу, включаючи аналітичні дослідження та створення картографічних матеріалів.[5]

Для полегшення майбутнього застосування інформації, здійснено експорт даних у різноманітні формати.

Серед них формат GeoTIFF, який найкраще підходить для створення ортофотопланів, а також формат KMZ, що є ідеальним рішенням для роботи в географічних інформаційних системах (ГІС).

Застосування різних форматів гарантує можливість подальшої обробки та детального аналізу здобутих результатів на кожному етапі досліджень.

Таблиця 1. Усереднена точність (м) даних, отриманих з БПЛА з використанням 20 контрольних точок.

Мітка	Помилка X (м)	Помилка Y (м)	Помилка Z (м)	Загальна помилка (м)	Проекції	Помилка (пікс.)
T1	-0.003012	-0.002879	0.002102	0.004312	9	0.145892
T2	-0.014312	-0.005678	-0.002479	0.015689	12	0.118654
T3	-0.000923	0.005102	0.001207	0.005412	14	0.128976
T4	0.000102	0.001298	0.001145	0.001748	11	0.169874
T5	-0.018112	0.010276	-0.000689	0.021034	17	0.179312
T6	-0.014102	-0.005214	0.001123	0.015124	9	0.275689
T7	0.003412	0.024879	-0.000579	0.025017	10	0.209756
T8	-0.017024	0.009103	-0.003102	0.019678	8	0.212432
T9	0.031024	-0.000712	0.005876	0.031498	7	0.245781
T10	-0.010576	-0.035102	-0.000502	0.036245	6	0.267145
T11	-0.009024	0.011002	-0.003212	0.014589	6	0.110215
T12	0.005412	0.032678	0.004276	0.033176	7	0.075321
T13	-0.002912	-0.007012	-0.000276	0.007512	15	0.252487
T14	0.001756	-0.005978	0.000278	0.006324	6	0.072451
T15	0.001276	-0.004897	0.001254	0.005156	6	0.098721
T16	0.008978	-0.013102	0.001879	0.015876	7	0.154987
T17	0.014678	-0.001578	-0.000478	0.014876	16	0.210489
T18	0.020124	-0.009876	-0.001879	0.022376	8	0.198742
T19	0.013578	-0.007024	-0.005976	0.016478	7	0.113245
T20	-0.009678	0.002897	0.003212	0.010678	15	0.165487

Мітка	Помилка X (м)	Помилка Y (м)	Помилка Z (м)	Загальна помилка (м)	Проекції	Помилка (пікс.)
Всього	0.013024	0.014012	0.002789	0.019234	200	0.183276

Ці дані чітко показують виняткову точність, що перевищує ту, яку демонструють інші дослідження.

Наприклад, в інших роботах середня квадратична похибка часто коливається навколо 0,18 метра, з середньою роздільною здатністю близько 0,4 метра, у той час як загальна середня СКП становить 0,042 метра.

Проте, у нашому дослідженні ми досягли суттєво кращих результатів.

Це стало можливим завдяки використанню надзвичайно точного наземного знімання, стабільній роботі багатогвинтового дрона, і, що важливо, ретельно відпрацьованого програмного забезпечення PhotoScan, яке активно застосовується як в науково-дослідній діяльності, так і в практичних проєктах.[4,5]

Надзвичайно ключовим є вертикальна точність, яку вдалося отримати через використання великої кількості опорних точок і високоякісного обладнання.

Висоти з хмари точок повністю відповідали вимірам висот наземних контрольних пунктів, що ще раз підтверджує коректність та надійність зібраних відомостей.

Для хмари точок, яка покривала меншу площу, було зафіксовано 261 427 437 точок, з середньою щільністю 692,7 точки на квадратний метр.

Це демонструє високу точність у створенні моделі місцевості та забезпечує надзвичайний рівень деталізації.

Зведений статистичний аналіз для цієї хмари точок, що покриває зону дослідження, можна побачити у Таблиці 2.

Ці дані надають можливість глибше зрозуміти особливості точності та щільності точок для подальшого вивчення та використання у різних галузях картографічних та геодезичних досліджень.

Таблиця 2. Підсумок модельної статистики хмари точок

X (м)	Z (м)
28.486500	1539.888293
28.486616	1539.795291
28.486732	1540.599915
28.486848	1542.003658
28.486965	1541.114234
28.487081	1540.552662
28.487197	1539.570877
28.487313	1540.827785
28.487429	1540.655453
28.487545	1541.818621



Рисунок 6 Графік залежності висоти Z від координати X

Ці дані свідчать про незначні відхилення висот, що є природним для цього типу інформації, з огляду на випадкові коливання та перешкоди.

Було оброблено 12 489 256 точок для більшої області, утворюючи просторову хмару, що має в середньому 11,8 точок на кожний квадратний метр.[4]

Отримані дані характеризуються великою щільністю, що дає змогу з високою точністю визначати та візуалізувати об'єкти рельєфу.

Порівнюючи ці результати з даними LiDAR, можна помітити, що щільність точок, зібраних за допомогою безпілотних літальних апаратів, значно перевищує дані, одержані шляхом аеролазерного сканування.

Використовуючи дані з меншої хмари точок та аерофотознімки, було створено ортофотоплан із розмірами пікселя на землі 0,018 м та 0,025 м, а також хмару точок і цифрову модель поверхні з роздільною здатністю 0,038 м.

Модель рельєфу з дискретизацією 0,29 метра було отримано завдяки обробці надзвичайного масиву інформації, яка стосувалася масштабних ділянок земної поверхні.

Аналіз аерознімків з метою вивчення великих географічних районів передбачає не лише володіння відповідною технікою, але й наявність знань, практичного досвіду та глибоке розуміння особливостей досліджуваної території.

Звірка отриманих результатів інтерпретації з реальними об'єктами та умовами на місці, в натурі, є надзвичайно важливою для забезпечення максимальної достовірності наукових висновків.

Слід також пам'ятати, що часові обмеження та бюджетні рамки часто стають серйозною перешкодою для організації всебічних та вичерпних досліджень.

Приміром, на здійснення буріння землі та оцінку гідрологічного режиму, часто не вистачає необхідного часу.

Дослідження таких питань, як траєкторія та швидкість течії води у межах місцевості, набуває ключового значення, особливо стосовно змінених ландшафтів, де не всі ознаки легко розпізнаються.

Це зумовлює потребу у поглибленому аналізі певних складових, таких як нахил та форма місцевості, що сприяє глибшому розумінню впливу водних потоків на відповідну ділянку.

Отже, продукти, отримані за допомогою безпілотних літальних апаратів, значно полегшують процес картографування великих площ.

Для визначеної зони дослідження було виконано обчислення ухилу та профілю, застосовуючи цифрову модель рельєфу (ЦМР) з деталізацією 0,29 м (Див. Рисунок 7).[4]

Отримані дані продемонстрували значення ухилу у розмірі 1,0130 або 1,77%, що співставляється з мінімальним показником 2,4%, який було встановлено за допомогою інструменту побудови профілю висоти у Google Earth.

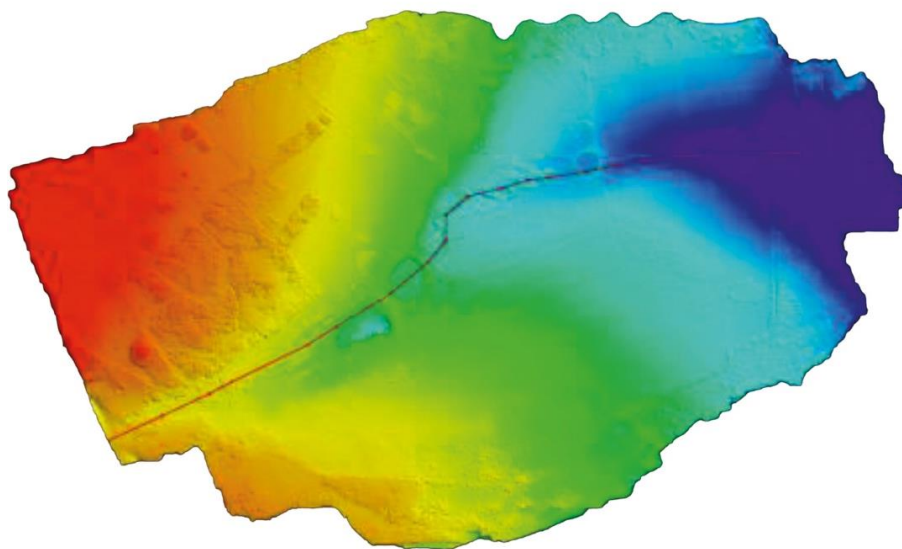




Рисунок 7. Середній кут нахилу (профільний аналіз) по ділянці становить 1,77 %

Завдяки надзвичайній детальності зображень та надзвичайно точному відображенню висот, які було досягнуто в ході цього дослідження, стало реальним здійснити виміри з максимальною точністю.

Для цього було задіяно хмари точок, отриманих з використанням безпілотних літальних апаратів, а також моделі земної поверхні.

Польові перевірки, що здійснювалися вже після збору даних, додатково підтвердили високу точність і надійність зібраної інформації, що остаточно засвідчило достовірність отриманих результатів вимірювань.

Навіть найдрібніші риси місцевості, які звично складно передати з необхідною точністю традиційними способами, як-от LiDAR – зокрема, вузькі яри, мережі водовідведення та ймовірні перешкоди, – були чітко та детально відображені у хмарах точок і моделях поверхні, сформованих за допомогою БПЛА (див. рисунок 8).[4]

Це демонструє значну результативність застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) при складанні карт та створенні моделей комплексних, важкодоступних територій, що дає можливість збирати

більш точну та детальну інформацію навіть щодо місцевостей зі складним ландшафтом.



Рисунок 8. Густа тривимірна хмара точок розміром 0,38 м забезпечує точне визначення глибини дренажних систем.

Ключова перешкода фотограмметрії, що використовується безпілотними літальними апаратами (БПЛА), полягає у неспроможності відновлювати поверхні під кронами дерев.

Технологія LiDAR, на відміну від неї, здатна успішно справлятися з цим завданням.

Крім того, труднощі виникали при реконструкції значних за площею територій.

Алгоритми не завжди знаходили відповідні точки перекриття, що могло призводити до появи артефактів, або шуму, на окремих ділянках реконструйованої поверхні.

Не зважаючи на видалення цих шумів у процесі редагування даних, загальна точність створеної поверхні могла трохи поступатися іншим частинам моделі.

Водночас тривимірний візуальний огляд хмар точок з високою деталізацією та моделей рельєфу відкриває можливість розпізнавання масштабних ландшафтних візерунків, що виникли через взаємне розташування орієнтирів та інших об'єктів на місцевості.

Ці розробки, хоча й не здатні цілковито замінити польові дослідження, демонструють високу ефективність у співпраці з ними, забезпечуючи додаткові інструменти для проведення аналізу та розробки планів.[5,6]

Отримані дані підкреслюють значущість застосування безпілотних літальних апаратів для детального картографування та побудови тривимірних моделей, особливо у випадках великих за площею об'єктів.

Зокрема, неймовірно ясне зображення хмар точок відкриває можливість відтворювати з найдрібнішими подробицями навіть незначні елементи рельєфу: неглибокі яри, шляхи для стікання води, а також як природні, так і рукотворні бар'єри.

У поєднанні з інформацією, отриманою під час натурних вимірювань, ці відомості можуть стати фундаментом для комплексного аналізу місцевості, наприклад, у контексті гідрологічних досліджень або ж планування перетворень ландшафту.

На рисунку 9 подано вихідну ортофотографію з роздільною здатністю 10 см, що була сформована на основі хмари точок для досліджуваної території розміром 50 га.[4]



Рисунок 9. Ортофотокарта з наземною роздільною здатністю пікселя 10 см.

Високоточні ортофотознімки, зроблені за допомогою БПЛА, пропонують вагомі переваги для спеціалістів, які оперують великими площами.

Вони дозволяють з високою деталізацією розпізнавати характерні елементи ландшафту, зокрема: ділянки з акумуляцією води, незначні зміни у рельєфі, межі землекористування та рослинний покрив.

Вони відкривають доступ до ключової інформації, що сприятиме подальшим науковим пошукам, зокрема, вивченню рослинності, що потребує вологи, та навіть ідентифікації конкретних рослин, зокрема інвазивних видів, здатних змінювати екологічну систему місцевості.

Окрім того, ортофотографічні знімки дозволяють оцінити інтенсивність людського впливу на місцевість, наприклад, виявляти сліди

будівництва, ведення сільського господарства або інших проявів людської діяльності.

В співпраці з іншими інформаційними потоками, а саме висновками польових робіт або спеціалізованими моделями, ці зображення сприяють неймовірно точній оцінці екологічного стану навколишнього середовища.

На малюнку 10 представлено детальне ортофото з високою роздільною здатністю у 2,5 сантиметри.[4,6]

Воно відкриває двері до глибшого вивчення найменших деталей території та допомагає у прийнятті обґрунтованих рішень під час аналізу великих просторів.



Рисунок 10. Визначення та аналіз пошкоджень на територіях за допомогою ортофотографії з БПЛА з роздільною здатністю 2,5 см

Окрім того, ортофото знімок надав важливу інформацію щодо рослинності, зокрема трави, якою покрита земляна гребля, а також точного місцезнаходження дренажних мереж.

Це дозволяє глибше дослідити структуру ландшафту та виявити важливі складові, що можуть впливати на водний баланс або міцність конструкції греблі.

Ортофотознімки, які отримуються з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), також надзвичайно ефективно можуть використовуватися як текстурний шар.

Їх застосовують у поєднанні з цифровими моделями рельєфу (ЦМР) в спеціалізованих програмних середовищах.

Це потрібно для значного поліпшення кінцевого візуального сприйняття.

Нанесення цих даних одне на одного дає змогу отримати значно точніше відображення навколишнього ландшафту в тривимірному вимірі.

Завдяки цьому фахівці можуть досягти більш глибокого розуміння особливостей будови території, а також прослідкувати динаміку її змін.

Це критично важливо як для проведення серйозного аналізу, так і для обґрунтованого прийняття подальших управлінських рішень.

Висновок

Результати аналізу демонструють значний потенціал фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів для вдосконалення картографічного відображення масштабних площ, що, відповідно, оптимізує процеси аналізу та вивчення таких територій.

Сучасні технологічні зміни, зокрема, доступність та порівняно невисока вартість БПЛА, сприяють ефективності та актуальності цієї технології у проведенні оперативних та надзвичайно точних вимірювань.

У порівнянні зі стандартними методами дистанційного зондування, як супутникові зображення, дрони дають відчутно кращі показники деталізації та якості, особливо при огляді значних територій.

Через можливість фіксувати навіть мінімальні зміни ландшафту, ця інформація значно доповнює ті прогалини, які не завжди вдається заповнити за допомогою знімків із супутників.

Фотограмметрія, що реалізується за допомогою безпілотників, дозволяє не лише виявляти зміни, але й організовувати ефективний моніторинг через повторні обстеження однієї й тієї самої області.

Вона стає ключовим елементом у стратегіях реабілітації значних земельних площ, надаючи можливість чіткого аналізу існуючого стану та розробки планів щодо підтримки або відновлення природних комплексів.

Разом з тим, визначальним недоліком цього дослідження є невикористання сторонніх контрольних пунктів для верифікації позиційної коректності та точної висоти, що передбачається усунути в подальших розвідках.

Одним з найбільш багатообіцяючих шляхів для майбутніх розвідок є застосування безпілотних апаратів задля здійснення гідрографічних вимірювань, що дозволить гарантувати точне відображення батиметричних характеристик дна водойм.

Список використаних джерел

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

4. Marinus Axel Boon, Richard Greenfield, Solomon Tesfamichael Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry Produces Accurate High-resolution Orthophotos, Point Clouds and Surface Models for Mapping Wetlands
September 2016, South African Journal of Geomatics 5(2):186
DOI:10.4314/sajg.v5i2.7

5. Lucieer, A, Turner, D, King, D та Robinson, S, 2013, «Використання безпілотного літального апарату (БПЛА) для зйомки мікротопографії антарктичних мохових покривів». Міжнародний журнал прикладного спостереження за Землею та геоінформації, том 27, с. 53-62.

6. Marcaccio, J, Markle, C та Chow-Fraser, P, 2015, «Безпілотні літальні апарати створюють високороздільні, сезонно релевантні зображення для класифікації водно-болотних угідь». Міжнародний архів фотограмметрії,

дистанційного зондування та просторової інформації, Торонто, Канада, том XL-1/W4, с. 249-256.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Фотограмметрія БПЛА як інструмент високоточного картографування великих територій ».

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)