

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**Київський національний університет імені Тараса Шевченка****Географічний факультет****Кафедра геодезії та картографії**

На правах рукопису УДК: 528.8

**ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ДЛЯ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ ПРИ
ВИКОНАННІ РОБІТ ЗЕМЛЕУСТРОЮ**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Галузь знань 19 – «Архітектура та будівництво»

Спеціальність 193 – «Геодезія та землеустрій»

Освітня програма «Геодезія та землеустрій»

Кваліфікаційна робота бакалавра
студента 4 курсу
освітнього рівня бакалавр
Каштальянова Ілля Сергійовича

Науковий керівник:
Наталья Олександрівна Полякова
К. геогр. н., доцент

Допущено до захисту:

Протокол засідання кафедри No ___ від «___» _____ 20___ року

Завідувач кафедри

проф. Даценко Л.М.

КИЇВ – 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ З	
ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА.....	6
1.1 Історія розвитку аерофотознімання.....	6
1.2 Способи та види проведення аерофотознімання.	10
1.3 Контроль точності матеріалів аерофотознімання.....	12
Висновки до розділу 1.....	16
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ	
АЕРОФОТОЗНІМАННЯ.....	18
2.1 Основні принципи орієнтування.....	18
2.2 Особливості прокладання маршрутів для аерознімання.....	21
2.3 Застосування сучасних технологій аерофотознімання в галузі землеустрою.....	25
Висновки до розділу 2.....	28
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПІДГОТОВКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	
АЕРОФОТОЗНІМАННЯ ДЛЯ ПОТРЕБ ЗЕМЛЕУСТРІЮ.....	30
3.1 Особливості проведення аерофотознімання різної складності з використанням БПЛА для створення ортофотопланів.....	30
3.2 Подальше використання ортофотопланів в землеустрої.....	39
3.3 Програмне забезпечення для обробки даних аерофотознімання.....	42

3.4 Збільшення результативності геодезичних робіт шляхом покращення аерофотознімання різних видів місцевості за допомогою безпілотних літальних апаратів.....	48
Висновки до розділу 3.....	51
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54

ВСТУП

Актуальність. Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для аерофотознімання при виконанні робіт землеустрою набуває все більшої популярності та актуальності у сфері геодезії та землеустрою. Розвиток технологій БПЛА значно покращив їхні технічні характеристики, що дозволяє отримувати детальні та точні аерофотознімки, необхідні для сучасних геодезичних і картографічних робіт. БПЛА значно знижують витрати на проведення аерофотознімання у порівнянні з традиційними методами, такими як використання пілотованих літаків чи вертольотів. Вони дозволяють проводити зйомку швидше, з меншими витратами ресурсів і часу, що особливо важливо при виконанні великих обсягів робіт з землеустрою. Зібрані дані з БПЛА можуть бути легко інтегровані з геоінформаційними системами (ГІС), що забезпечує комплексний підхід до управління земельними ресурсами. Це дозволяє проводити аналіз, моделювання та прийняття рішень на основі актуальної та точної інформації. Таким чином актуальність використання БПЛА для аерофотознімання при виконанні робіт землеустрою обумовлена їхньою ефективністю, точністю, доступністю, відповідністю сучасним вимогам та можливістю інтеграції з іншими технологіями, що забезпечує високоякісні геодезичні дані

Метою даного дослідження є підготовка та проведення аерофотознімання для виконання завдань землеустрою.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання

1. Проаналізувати загальну інформацію щодо планування та виконання аерофотознімання
2. Надати характеристику маршрутів аерофотознімання.
3. Проаналізувати використання спеціального програмного забезпечення для обробки даних аерофотознімання.
4. Провести аналіз виконання аерофотознімальних робіт для створення ортофотопланів.

5. Проаналізувати використання ортофотопланів для потреб землеустрою

Методи дослідження. Аналіз літератури відповідно до теми, настановами та вимогами щодо планування і проведення аерофотознімання.

Об'єкт дослідження. Аерофотознімання за допомогою БПЛА для виконання завдань землеустрою.

Предмет дослідження. Процес планування та проведення аерофотознімання.

Структура роботи. Складається з трьох розділів, висновків, переліків використаних джерел.

У висновках сформульовано основні результати досліджень.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА.

1.1 Історія розвитку аерофотознімання.

Історія розвитку аерофотознімання налічує понад 150 років розвитку, щоб прийти до того технологічного рівня, який ми маємо зараз.

Розвиток аерофотознімання став можливим завдяки розвитку фотографії. У 1827 році було зроблено перший відомий знімок Жозефом Нісефором Ньєпсом із використанням камери-обскури та емульсії з бітуму Юдеї, смолистої речовини та лавандової олії. Знімок був зроблений з вікна його студії з експозицією, що тривала 8 годин.

У 1858 році Гаспар Феліс здійснив перший аерофотознімок, використовуючи повітряну кулю над французьким селом Пті-Бессетр. На висоті 80 метрів він зробив знімок і таким чином визначив нову епоху в галузі фотографії. Хоча оригінальне зображення не зберіглося, втім важливість його досягнення полягає у відкритті нового напрямку для аерофотознімання та стимулюванні подальших досліджень та вдосконалення методів в цій галузі.

У 1873 році Герман Фогель провів серію експериментів з галогенідами срібла, що призвело до розвитку фотоплівок, чутливих до ближнього інфрачервоного спектру.

В 1889 році, використовуючи повітряного змія, Артур Батю зробив знімок конкретної місцевості над Лабругюєром у Франції

У 1898 р. був створений панорамограф, завдяки зусиллям Тіле Р. Ю. – першовідкривача аерофототопографії та інженерної фотограмметрії в Росії. Використання панорамографа здійснювалося за допомогою повітряної кулі. За свої досягнення Тіле Р. Ю. був нагороджений золотою Костянтинівською медаллю Російського географічного товариства

У 1899 році Джордж Істмен винайшов нітроцелюлозну плівку, що зберігала чіткість скляних пластин, і це призвело до винаходу фотоапарата Kodak, які були значно меншими за своїх попередників і могли легко кріпитися до птахів. Завдяки цьому історія має зовсім нетривіальний спосіб проведення аерофотознімання - у 1903 році Баварський голубиний корпус під керівництвом Юліуса Нойбронне використовував голубів для аерофотознімання. Юліус Нойброннер запатентував «Способи і засоби для фотографування пейзажів зверху» за допомогою поштових голубів. Цей спосіб мав успіх і завоював нагороди на міжнародних виставках в Дрездені, Франкфурті та Парижі в 1909-1911 роках. Голубина фотозйомка використовувалася під час Першої світової війни для ведення повітряної розвідки і послужила прообразом сучасних «живих камер», встановлюваних на диких і домашніх тварин.

У 1906 році Альберт Мауль застосував ракетний двигун, що працював на стислому повітрі, для викидання фотокамери з літака на висоті 2600 футів, після чого вона парашутувала назад на землю.

У 1903 році брати Райт створили перший літак, а Вілбур Райт здійснив першу аерофотозйомку з літака в 1909 році. Літак забезпечував стабільну платформу для камери, що дало змогу робити чіткіші знімки різних районів. Далі у 1907 році Огюст і Луї Л'юм'єр розробили просту систему кольорової фотографії, яка встановила 35-мм як стандарт кіноплівки. Це використовувалося під час Першої та Другої світових воєн як інструмент розвідки.

24 квітня 1909 р. над Римом, під час запису німого короткометражного кіно «Вілбур Райт і його літак», відбулося перше використання літального апарату важчого за повітря у комплексі з кінокамерою яка розташована на борту ЛА.

В 1911 році майором В. Ф. Потті був створений напівавтоматичний фотоапарат. Його широко застосовували для аерофотознімання місцевості за допомогою ЛА під час Першої світової війни. Аерофотознімання для

військових цілей у Першу світову війну практикувалася багатьма льотчиками.

Аерофотознімання для картографування вперше відбулося теж на фронтах Першої світової війни у січні 1918 р. за наказом генерала Алленбі п'ять австралійських льотчиків ескадрильї №1 Королівських військово-повітряних сил Австралії провели аерофотозйомку місцевості площею у 1620 км² в Палестині з метою поліпшення карт турецького фронту та коригування дій наземних військ. Лейтенанти Леонард Теплін, Аллан Браун, Х. Л. Фрезер, Едвард Патрік Кенні і Л. В. Роджерс зняли територію, яка простягалася від лінії турецького фронту на 51 км вглиб тилкових районів. Починаючи з 5 січня, вони літали на винищувачах супроводу «Мартінсайд» і «Ройал Ейркрафт Фекторі В.Е.2» з метою відбиття атак бойової авіації противника. Пілотам доводилося не тільки відбивати удари ворожої авіації, але ще й долати пориви вітру 29 м/с, вогонь протиповітряної артилерії противника, а також справлятися з погано працюючим обладнанням. Поставлена задача була виконана приблизно 19 січня 1918р.

Запропонував ідею комерційного використання аерофотознімання був Шерман Фейрчайлд, який створив компанію «Фейрчайлд Ейркрафт» з виробництва та проектування літаків, які мали можливість польотів в умовах високогірної місцевості. Був встановлений блок з двома камерами, які працюють синхронно на борту літака аеротопографічної служби компанії «Фейрчайлд Ейркрафт» у 1935 році. Кожна камера, використовує п'ять шестидюймових, а також десяти дюймові лінзами, з'явилась можливість проводити аерофотозйомку з висоти 23 000 футів (або 7 км.). Площа покриття одного знімку охоплювала територію в 580 км². Одне з перших державних замовлень компанії передбачало аеротопографічну зйомку штату Нью-Мексико для вивчення ґрунтової ерозії. Через рік Фейрчайлд застосував більш досконалу камеру для аерофотознімання високогірних місцевостей –

вона мала дев'ять лінз в одному блоці і могла знімати з висоти 31 555 футів (10 км.), кожен знімок відображав територію у 1 622 км².

У 1931 році американець на ім'я Стівен розробив інфрачервоні чутливі чорно-білі плівки. У 1949 році перша аерофотографія з космосу була зроблена за допомогою ракети V-2.

Аерофотознімання пройшла тривалий та складний шлях розвитку, перетворившись з простої ручної діяльності з використанням повітряних куль на високотехнологічний процес, що застосовує передові технології.

На перших етапах здійснювалось ручне керування повітряними кулями чи літаками, обладнаними фотокамерами, для отримання знімків з висоти. Згодом технології ставали дедалі автоматизованішими, з'явилися спеціалізовані літальні апарати, зокрема безпілотні літальні апарати (дрони), що забезпечують більшу стабільність та точність під час зйомки.

Сьогодні аерофотознімання досягла надзвичайної точності та ефективності завдяки використанню новітніх технологій. Системи обробки даних на основі штучного інтелекту, такі як фотограмметричні програми, уможливають автоматичну обробку великих обсягів фотознімків та виокремлення потрібної інформації, що раніше вимагало значних зусиль та часу.

Аерофотознімання трансформувалася з простої технології знімання на складну й високотехнологічну галузь, яка застосовується в різноманітних сферах, зокрема картографуванні, геодезії, міському плануванні, агрономії та багатьох інших. [1]

1.2 Способи та види проведення аерофотознімання.

З розвитком аерофотознімання з'явилася необхідність оперативно опрацювати достатньо великий обсяг інформації для того, щоб отримати різноманітних характеристик об'єктів та явищ, що досліджуються. Обширне використання аерофотознімання слугує рішенням таких завдань, з метою отримання різнопланової інформації про місцевість.

Процес аерофотознімання дає можливість отримати уявлення про ландшафт місцевості для того, щоб проаналізувати отриманий знімок та швидко оновити карти і фото-плани. Отримання таких зображень – це технічно складна справа, але завдяки сучасному технологічному розвитку у цій сфері, аерофотозйомку можна вважати ефективним та перспективним напрямком.

Існує декілька типів аерофотознімання, що залежить від кута нахилу аерофотоапарату під час зйомки:

- горизонтальна, кут нахилу якої дорівнює нулю ($\angle = 0$);
- планова, при куті нахилу не більше 3° ($|\angle| < 3^\circ$);
- перспективна, якщо кут нахилу є більший від 3° ($|\angle| > 3$).

В залежності від масштабу аерофотознімка 1:m, існують:

- Дрібномасштабна АФЗ, масштаб зображення 1:50000 і менше.
- Середньомасштабна АФЗ, масштаб зображень від 1:50000 до 1:10000.
- Для великомасштабної аерофотознімання використовується масштаб, більший за 1:10000. [2]

Окрім цього розрізняють:

- багатозональну зйомку;
- інфрачервону;
- радіолокаційну;
- аерофототопографічну зйомку.

Аерофотознімання є одним з найбільш ефективних способів збору просторових даних. Вона становить базу для створення топографічних планів і карт, а також для побудови тривимірних моделей рельєфу та місцевості. [3]

Аерофотознімання є незамінним інструментом для отримання статичних зображень великих територій у вигляді аерофотознімків. Завдяки цьому вона повсюдно застосовується під час географічних, гірnodобувничих та гідрографічних розвідок, у будівництві, промисловості та сільському господарстві. На відміну від традиційної топографічної зйомки, коли знімки місцевості створюються поступово, аерофотознімання використовує аерофотоапарати, які працюють повністю в автоматичному режимі.

Аерофототопографічна зйомка поєднує аерофотозйомку, польові геодезичні роботи та камеральну фотограмметричну обробку для створення високоякісних топографічних карт та числових моделей місцевості.

На етапі польових топогеодезичних робіт визначають координати опорних точок на аерофотознімках, таких як розпізнавальні знаки, а також здійснюють дешифрування аерофотознімків. Отриману розріджену мережу геодезичних пунктів згущують за допомогою фотограмметричних методів, наприклад аналітичного способу з використанням стереокомпараторів або побудови мережі на стереофотограмметричних приладах. Кожну стереопару аерофотознімків забезпечують чотири або більше опорними точками для згущення.

Контурну частину топографічної карти укладають шляхом створення фотоплану або дешифрування чи зйомки контурів за моделлю місцевості. Зйомку рельєфу зазвичай виконують за тривимірною моделлю, відтвореною на стереофотограмметричному приладі, а в лісистих районах - за допомогою методів наземної зйомки.[5]

1.3 Визначення точності матеріалів аерофотознімання.

Первинний етап визначення фотограмметричної точності матеріалів аерофотознімання – це її планування, дотримання інструкцій проведення аерофотознімання є ключовим фактором вдалого та швидкого проведення робіт.

“З метою стандартизації та оптимізації процесу виконання аерофотознімальних робіт була розроблена і затверджена «Інструкція про порядок контролю і приймання топографо-геодезичних та картографічних робіт (Затверджена наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру України №19 від 17.02.2000) Обов’язкова для всіх підприємств, організацій та суб’єктів підприємницької діяльності, які виконують топографо-геодезичні і картографічні роботи загальнодержавного та спеціального призначення»”

Контролюючи якість аерофототопографічної зйомки комбінованим методом та мензульної зйомки, перевіряють:

- правильність побудови зйомочної основи і щільність точок для виконання топографічної зйомки рельєфу і контурів;
- зв’язок з суміжними трапеціями, допустимість розходжень координат і висот спільних (зв’язуючих) точок;
- правильність і своєчасність оформлення матеріалів зйомки (оригіналу зйомки, кальки висот, польових журналів, вкопіювання по рамках трапецій, формуляру тощо);
- дотримання допусків у польових вимірюваннях під час прокладання зйомочних ходів і зйомки рельєфу та контурів місцевості;
- своєчасність і якість викреслювання топоплану, правильність застосування умовних знаків, виразність зображення рельєфу і

- узгодженість горизонталей з позначками висот, зображенням гідрографії і контурів;
- правильність виділення командних висот, розташування назв об'єктів і пояснювальних підписів на оригіналі.

Отримання необхідних параметрів точності при аерофотозйомці за допомогою БПЛА повністю залежить від професіоналізму оператора, камери, технічних можливостей БПЛА, а також контролю якості кожного етапу робіт та дотримання технічних вимог. Оператор, окрім досвіду аерофотознімання, повинен орієнтуватися в фотограмметрії, картографії, геодезії та 3D моделюванні. Почати виконувати проект слід з розробки маршрутів зйомки та їх подальше перекриття, пов'язане це з критичною важливістю цих параметрів на кінцевий результат. Наступним кроком обирається найкращий варіант відповідно до конфігурації об'єкту зйомки, поставлених цілей проекту та вимог підсумкового результату. Для того, щоб досягнути достатнього рівня точності аерофотознімання, створюється проект планово-висотної прив'язки, що забезпечує надійність даних та виконання пунктів діючої інструкції та нормативних актів щодо точності готової картографічної продукції.[6]

В процесі підготовки до аерозйомки потрібно встановити опознаки, щоб отримати надійну прив'язку аерознімка. Найкращими варіантами будуть: пункти геодезичної мережі, геодезичних мереж згущення, об'єкти з чіткими контурами, контрастні до фону та добре помітні на аерофотознімках об'єкти.

При необхідності опознака наноситься краскою на дорожнє покриття, таким чином, щоб форма опознака безпомилково дозволяла визначити його центр.

В залежності від технічних характеристик аерофотоапарата, задають величину лінійного зсуву знімку на аерофотознімках. Максимально

допустима величина зсуву зображення на аерофотознімках топографічного АФА – 0,05 мм.

Поздовжнє і поперечне перекриття топографічних аерофотознімків встановлюються в залежності від найбільшого перевищення (h) над середньою площиною знімальної ділянки і висоти польоту (H) над цією площиною. Для рівнинних і горбистих районів (при $h: H < 0,2$) поздовжнє перекриття повинно відповідати вимогам, наведеним в табл. 2, а поперечне перекриття повинно бути в межах $30\% \pm 10\%$.

Допустима мінімальна і максимальна величина поздовжнього перекриття вибираються з (табл. 1.). Допустимі відхилення поперечного перекриття від розрахункового значення не повинні перевищувати $\pm 15\%$.

У всіх випадках в зоні поперечного і потрійного поздовжнього перекриття повинні бути контурні точки, які можуть бути використані при побудові фотограмметричних мереж.

Таблиця 1. Допустима мінімальна і максимальна величина поздовжнього перекриття.

Повздовжнє перекриття, %			
задане	мінімальне	максимальне	
		$h : H \leq 0,2$	$h: H > 0,2$
60	55	65	70
73	70	77	80
80	78	83	85

Величина повздовжнього перекриття розраховується за допомогою формули:

$$P_x = \frac{dx}{l} 100\%,$$

де dx – величина перекритої частини; l - формат зображення.

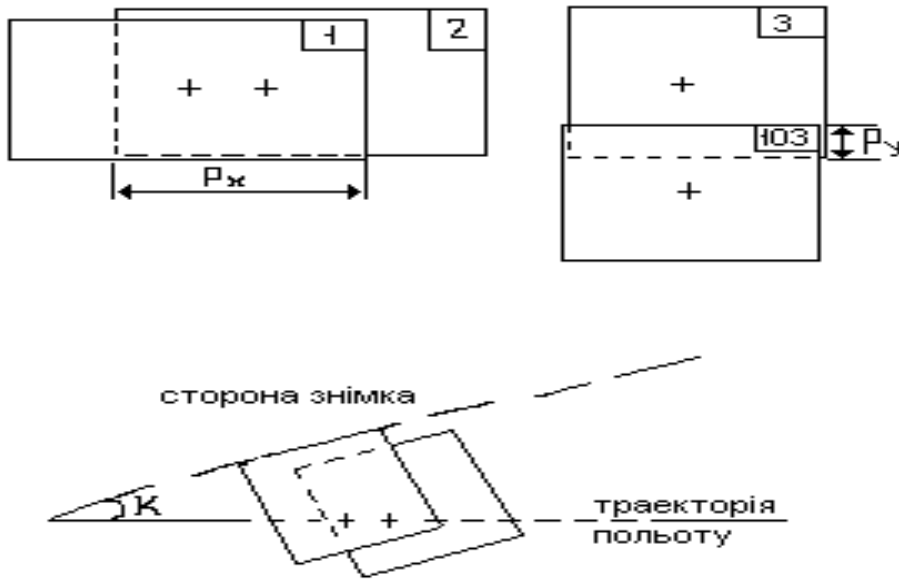


Рис. 1. Поздовжнє і поперечне перекриття

Площадну аерозйомку складає ряд паралельних маршрутів, між котрими є поперечне перекриття.

$$P_x = \frac{dx}{l} 100\%.$$

Непаралельність основи фотозйомки стороні знімка має бути меншою ніж 5° .

Важливо, щоб Аерофотографії були чіткими та мали рівномірне освітлення. На них не повинно бути хмар, сонячних променів і механічних пошкоджень. Тому найкращі умови для аерофотознімання - це безхмарна погода та висота сонця не менше 20° над горизонтом. Якість зйомки оцінюється за допомогою композитного монтажу, що складається з усіх зображень.

Поздовжні і поперечні перекриття залежно від перевищення ділянки та висоти знімання, для масштабу 1:10000 і більше, визначаються за

формулами:

$$P_x\% = p + \frac{h}{H-h} (100 - p);$$

$$P_x\% = q + \frac{h}{H-h} (100 - q);$$

де $h = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{2}$ - максимальне перевищення над середньою площиною;

p - задане поздовжнє перекривання аерофотознімків (60%)

q - задане поперечне перекривання аерофотознімків (30%)

Висновки до розділу 1

Аерофотознімання - це галузь, яка пройшла тривалий шлях розвитку від простих ручних методів з використанням повітряних куль до сучасних високотехнологічних процесів із застосуванням передових технологій, зокрема безпілотних літальних апаратів (дронів). Існує кілька способів та видів аерофотознімання, серед яких: горизонтальна, планова та перспективна зйомка, багатозональна, інфрачервона, радіолокаційна та аерофототопографічна. Вибір виду зйомки залежить від конкретних цілей та завдань проекту.

Для забезпечення необхідної точності матеріалів аерофотознімання необхідно дотримуватися відповідних інструкцій та нормативних актів, зокрема "Інструкції про порядок контролю і приймання топографо-геодезичних та картографічних робіт". Ключовими факторами забезпечення якості знімання є професіоналізм оператора, технічні характеристики обладнання, ретельне планування зйомки та контроль якості на кожному етапі процесу. Серед ключових параметрів, що впливають на точність аерофотознімання, є поздовжнє та поперечне перекриття знімків, які залежать від перевищення ділянки та висоти знімання. Необхідно дотримуватися рекомендованих діапазонів значень цих параметрів відповідно до масштабу зйомки.

Важливу роль для подальшої обробки відіграє якість фотографій, зокрема їх чіткість, рівномірне освітлення, відсутність хмар та механічних пошкоджень, а також сприятливі умови зйомки, такі як безхмарна погода та висота сонця над горизонтом не менше 20° .

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ.

2.1 Основні принципи орієнтування.

Елементи внутрішньої орієнтації - це параметри, що описують відповідне положення між центром фотографування та фотографією, включно з трьома параметрами. А саме, фокусна відстань (f) від центру фотографування до фотографії та координати головної точки (x_0, y_0) в системі координат зображення.

Ці параметри визначають для калібрування камери перед використанням, щоб забезпечити отримання точних вимірювань з аерофотознімка. Перетин площини знімка з перпендикуляром, опущеним з центра проєкції S на цю площину, називають головною точкою знімка "о". Головна точка "о" в координатній системі $o'x'y'$ матиме координати x_0, y_0 , а довжина перпендикуляра So є фокусною віддаллю камери f . У багатьох випадках вважають, що точки "о" та "о'" збігаються.

Маючи інформацію про елементи внутрішнього орієнтування, можливо провести відтворення пучків проєктуючих променів (рис. 2.), які були на момент знімання. Для цього знаходять положення центра проєкції S , використовуючи координати міток і елементи x_0, y_0, f . Наступним кроком встановлюється джерело світла в отриманий центр проєкції і проєктують зображення знімка на будь-який екран.

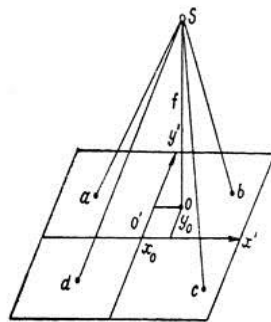


Рисунок 2. Пректуючі промені на площину знімання

Для фіксації системи координат на знімку служать координатні позначки 1, 2, 3, 4. При монтажі фотокамери стараються так розмістити ці позначки, щоб лінії 1-3 та 2-4 були взаємно перпендикулярні. З іншого боку елементи внутрішнього орієнтування є ніщо інше, як компоненти вектора, проведеного з початку координат у центр проєкції.

Завдання визначення елементів внутрішнього орієнтування в фотограмметрії називають калібруванням знімка. Якщо окрім елементів внутрішнього орієнтування визначити параметри дисторсії, то такий процес називають повним калібруванням знімка.

Елементами зовнішнього орієнтування (ЕЗО) – називають величини, які однозначно визначають положення площини аерофотознімка в момент фотографування відносно зовнішньої просторової прямокутної системи координат місцевості. Оскільки тіло в просторі має шість ступенів свободи, то знімок буде мати шість елементів зовнішнього орієнтування. З них: три лінійні і три кутові. Лінійні елементи визначають положення центра проєкції в зовнішній системі координат місцевості. Якщо з початку системи координат місцевості провести вектор у центр проєкції, то компоненти цього вектора і будуть лінійними елементами зовнішнього орієнтування.

У фотограмметрії використовують дві системи ЕЗО, які розрізняються системами відліку.

Перша система елементів зовнішнього складається з плоскої координатної системи знімка та допоміжних координатних систем. Їх координатні вісі паралельні до осей координатної системи місцевості та плоскої координатної системи знімка відповідно. ЕЗО в цій системі є шість величин – три лінійних і три кутових, при чому два кутових елементи пов'язані з площиною, що проходить через головну оптичну вісь і вісі допоміжної системи (рис. 2.):

- координати центра проєкції в системі координат місцевості;

- повздовжній кут нахилу в площині між віссю (або надирним променем) і проекцією головного оптичного променя на площину;
- поперечний кут нахилу в площині між головним оптичним променем і його проекцією на площину;
- кут розвороту знімка між віссю і слідом перетину площини площини знімка (головною вертикаллю).

Дана система широко використовується в наукових дослідженнях при аналітичній і цифровій обробці знімків, в конструкціях фотограмметричних приладів. Якщо значення кутів і порівняно невеликі то в такому випадку допускають використання диференціальних формул зв'язку координат між точками знімка і місцевості.

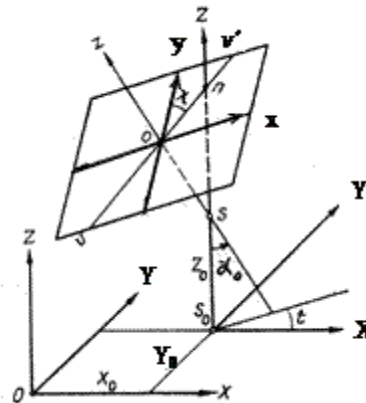


Рисунок 2.1 Оптична вісь і вісі допоміжної системи.

Друга систему кутів елементів зовнішнього орієнтування. Це кути:

- сумарний повздовжній кут нахилу в площині головного вертикала між віссю (надирний промінь) і головним оптичним променем ;
- дирекційний кут оптичної вісі знімальної камери в площині між віссю і проекцією головної вертикалі (кут напряму знімання);
- кут розвороту знімка в його площині між віссю і головною вертикаллю.

Таким чином, аерознімок має дев'ять елементів орієнтування – три ЕВО і шість ЕЗО. З шести елементів зовнішнього орієнтування три – лінійні та три – кутові. При тому елементи і або і фіксують напрямок головного оптичного променя, а поворот знімка навколо головного променя.

Знаючи ЕВО і ЕЗО можна відтворити зв'язку променів, який існував в момент знімання, встановити його так, що він займе те саме положення, яке займав у момент фотографування.[7]

2.2 Особливості прокладання маршрутів для аерознімання.

Для проведення аерофотознімання зазвичай застосовують три способи складання маршрутів:

- візуальний;
- полуінструментальний;
- інструментальний.

Для прокладання аерофотознімальних маршрутів візуальним методом використовують наземні орієнтири з допомогою великомасштабних спеціально підготовлених карт. Цей спосіб достатньо важко реалізувати та його головним недоліком є недостатня точність, сфера його застосування – прокладання коротких маршрутів та великомасштабна зйомка.

При пів-інструментальному способі прокладання маршрутів та зальоти проходять з використанням приладів за попередніми розрахунками окремих частин польоту і зберігаючи контроль за фактичною лінією шляху за оглядкою на наземними орієнтирами.

Використовуючи інструментальний спосіб складання аерофотознімальних маршрутів, на підставі даних попереднього розрахунку застосовують спеціальне обладнання та прилади.

При виборі способу слід враховувати кваліфікаційні навички екіпажу, спеціальне обладнання аерофотознімального літака, технічні вимоги і умови виконання завдання.

Перед початком аерофотознімальним польотом, метеостанція приймає рішення про виліт, ґрунтуючись на прогнозі погоди та метеозведенні для району аерофотознімання, вибирається основний та запасний район аерофотознімання. Запасна ділянка зйомки потрібна у разі, якщо в районі основної ділянки погода буде несприятлива для аерофотознімання, в той час як в стороні від неї погода буде відповідати вимогам. Тому резервна ділянка зазвичай вибирається в напрямку, протилежному до основної ділянки. Наступним кроком розраховується час сходу сонця та визначається час проведення аерофотознімання і зльоту. [3]

Перед польотом оператор повинен перевірити роботу всієї аерофотознімальної системи, годинника та фотореєструючого пристрою. Оператор повинен переконатися в чистоті захисного скла, об'єктива та інших механізмів аерофотоапарата, підключенні джерела живлення та налаштуванні аерофотоапарата. Він перевіряє наявність картографічного матеріалу, необхідного для аерофотознімання.

Потім ЛА злітає, набирає висоту і прямує до місця зйомки. Пролітає за початковим маршрутом, коригує висоту польоту, визначає необхідну витримку і діафрагму, вмикає радіовисотомір, статоскоп і гіростабілізатор, вмикає командний пристрій, встановлює на лічильнику попередньо розраховані значення "експозиції" та "інтервальну експозицію" і виконує пробну аерофотозйомку.

Оператор використовує бортовий видошукач для визначення кута вильоту і швидкості польоту літака в прямому і зворотному напрямку по маршруту. Кут вильоту визначається для того, щоб розвернути льотний апарат проти вітру і в зворотному напрямку так, щоб аерофотокамера не

виглядала як "ялинка", тобто, щоб сторони аерозображення були паралельні і перпендикулярні до напрямку маршруту.

Визначається швидкість ЛА на землі, щоб встановити правильний часовий інтервал між моментами зйомки. Після завершення всіх вимірювань і розрахунків у прямому і зворотному напрямках ЛА наближається до осі першого маршруту.

Прогалини та розриви, що виникають під час аерофотознімання, повинні бути покриті безперервним маршрутом у межах мінімальної площі зйомки. У цьому випадку аерофотознімання виконується на наступний день зйомки тим самим аерофотознімальним апаратом або тим самим типом аерофотознімального апарата.

На основі розрахованих параметрів аерофотознімання готується робоча карта для проведення аерофотознімання (рис. 2.2.). Для цього на топографічну карту наносяться осі маршрутів аерофотознімання та центри аерофотознімання. Осі маршрутів повинні проходити по довгих сторонах ділянки, щоб уникнути необхідності переходу з одного маршруту на інший.

Далі визначається ось першого маршруту (Рисунок 2.2.), від довгого краю ділянки відкладається прямий відрізок, що дорівнює відстані l_u , розрахованої в масштабі карти, і через кінець відрізка паралельно боковій стороні ділянки проводиться вісь першого маршруту.

Осі всіх маршрутів, починаючи з другого, проводяться паралельно осі першого маршруту на відстані, що дорівнює горизонтальній основі фотографії B_u в масштабі карти. Після того, як всі маршрути нанесені на ділянку, перевіряється їх кількість, яка повинна дорівнювати розрахованому значенню. Осі маршрутів наносяться суцільними лініями в межах ділянки та пунктирними лініями за її межами.

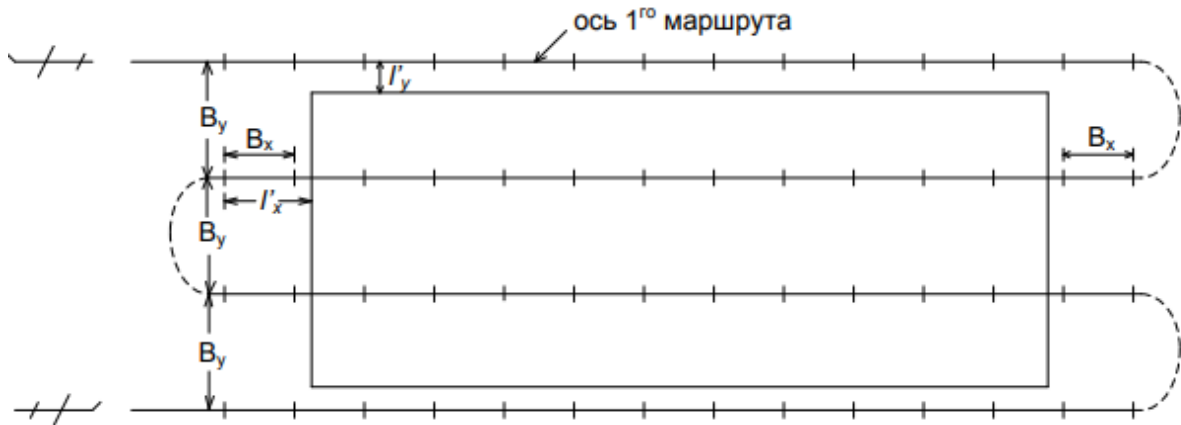


Рисунок 2.2. Робоча карта для фотографування ділянки місцевості

Після того, як вісь маршруту побудована, на ній знаходять положення центру аерофотознімка. Положення центру першого знімка визначається наступним чином: від межі ділянки вздовж осі маршруту в масштабі карти відкладають розраховану відстань l'_x , яка позначає положення центру першого аерознімка. Звідти відкладають положення центру другого і всіх наступних аерофотознімків вздовж осі маршруту через розраховану відстань, що дорівнює поздовжній базовій точці B_x аерофотознімка в масштабі карти. Таким чином визначається положення центру всіх аерофотознімків на всіх маршрутах. Для закріплення меж ділянки фотознімки вздовж осі маршруту розміщуються за межами ділянки щонайменше однією фотоосною зі стандартним поздовжнім перекриттям 60%, двома фотоосновами зі стандартним поздовжнім перекриттям 80% і чотирма фотоосновами зі стандартним поздовжнім перекриттям 90%.

Потім на робочу карту аерофотознімання наносять площу, покриту одним аерофотознімком, і розмір вертикального та горизонтального перекриття. Вираховується розмір сторін аерофотознімка на місцевості, виходячи з масштабу і формату кадру аерофотознімка. Отриманий розмір ділять навпіл і відкладають половину відстані від центру будь-якого аерофотознімка по осі маршруту в масштабі робочої карти в обидві сторони, потім по вертикалі в обидві сторони. На кожному кінці відкладеної відстані

будують квадрат, сторони якого повинні бути паралельні і перпендикулярні до осі маршруту.

Для позначення ступеня перекриття аналогічно будується рамка з центру аерофотознімка наступного маршруту так, щоб вона перекривала аерофотознімок попереднього маршруту. Далі на робочу карту наносяться орієнтири, за якими ЛА буде орієнтуватися вздовж осі маршруту.

Розробка завдань має свої особливості при використанні сучасних технічних засобів аерофотознімання, таких як навігаційні системи GPS та комп'ютерні системи типу ASCOD, що керують польотом і роботою аерофотокамер.

Для того, щоб отримати координати проектного центру зйомки використовують дигітайзер, тобто точки, в якій відкривається (експонується) затвор аерофотоапарата, а також отримують координати поворотних точок на межах ділянки зйомки і вводять їх в бортовий комп'ютер. Крім того, в комп'ютер вводиться масштаб аерофотознімання, розмір вертикального і горизонтального перекриття, фокусна відстань і формат кадру. Ці дані використовуються для обчислення координат центру зйомки, спроектованих у системі координат WGS-84.

Після завершення всіх розрахунків форма технічного проекту та робочі карти передаються аерофотознімальній групі, і починається аерофотознімання.

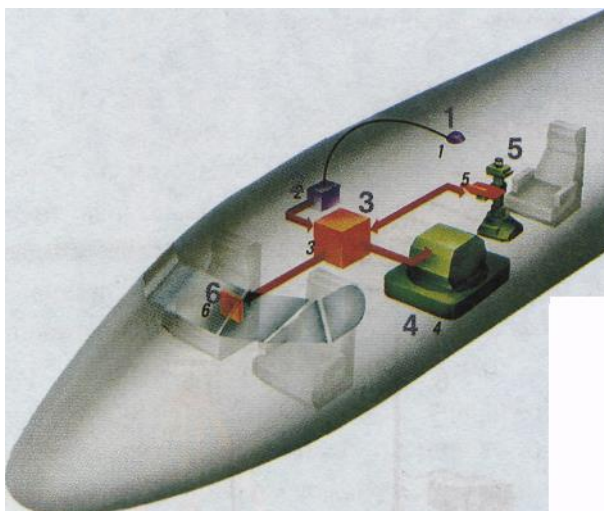
2.3 Застосування сучасних технологій аерофотознімання в галузі землеустрою

Для аерофотознімання потрібні аерофотокамери та спеціальне допоміжне обладнання, яке витримує всі параметри і відповідає вимогам зйомки. Через дуже високі швидкості польоту літальних апаратів зйомка відбувається в автоматичному режимі і не завжди є час для правильного налаштування траєкторії польоту і положення камери. Сучасні досягнення

електроніки, радіотехніки та супутникової навігації дозволяють повністю автоматизувати процес аерофотознімання.

Наприклад, Aerial Survey Control Tool (ASCOT) - система аерофотознімання, розроблена компанією Leica (Швейцарія). Це багатофункціональна система, яка дозволяє планувати аерофотознімальні проекти, проводити аерофотозйомку, автоматичне ведення аеронавігаційних вимірювань і реєстрацію координат літаючих об'єктів у досліджуваному просторі. Технічне оснащення системи показано на рисунку 2.3.

Рис. 2. 3. Технічні прилади системи ASCOT



- 1- GPS антена
- 2- GPS приймач
- 3- керуючий комп'ютер
- 4- аерофотоапарат

На рисунку 2.4. показано польотну навігацію і дисплей оператора, на якому відображається фактичний маршрут AFZ і положення літака під час зйомки (позначено білим колом).

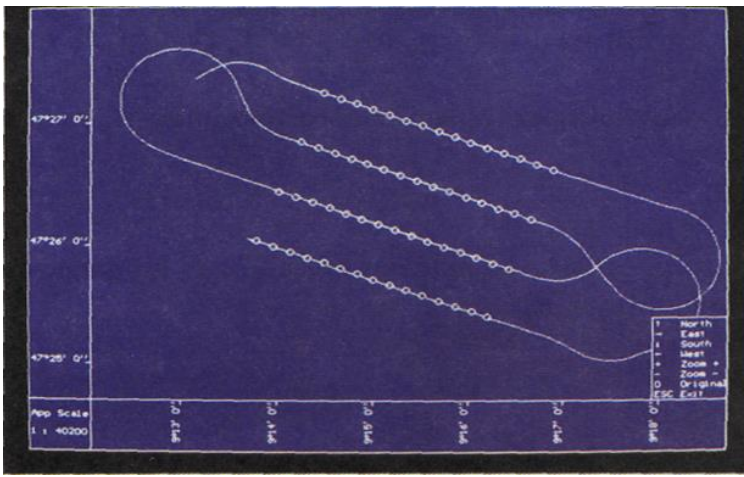


Рис. 2.4. Маршрут аерофотознімання на дисплеї

Для використання рельєфного ADF необхідно розрахувати параметри і провести проектне дослідження. По-перше, тип аерофотокамери вибирається на основі фокусної відстані. Відповідно до практичного досвіду та певних теоретичних обґрунтувань, у гірській місцевості та на територіях з високою забудовою (великі карти) слід використовувати телефотоапарати з фокусною відстанню 20 см, 35 см та 50 см. [9]

При картографуванні рівнинної місцевості використовуються короткофокусні або середньофокусні камери з фокусною відстанню 7, 10, 14 або 15 см.

Вісі маршрутів плануються на дрібномасштабних топографічних картах, які використовуються аерофотокамерою під час зйомки; для типу ASCOT карти попередньо оцифровуються, тобто з карт беруться координати початкової та кінцевої точок кожного маршруту. Ці дані вводяться в бортовий комп'ютер, і програмне забезпечення автоматично виконує завдання управління аерофотозніманням, такі як відстеження маршруту аерофотознімання та оптимізація підходу до наступних маршрутів.

БПЛА запускається вручну, злітає і сідає автоматично (автопілот) за задалегідь визначеним маршрутом. БПЛА летить за маршрутом, задалегідь запланованим в ГІС, і проводить цифрову зйомку місцевості. Результатом зйомки є зображення запрограмованих точок з високою роздільною здатністю на основі GPS-координат. Після польоту БПЛА приземляється в тій точці, звідки він вилетів. Для кожного знімка отримується цифрова

інформація, така як географічні координати центральної точки знімка, висота і кут зйомки, а також повний набір телеметричних даних для передачі в звичайну ГІС-систему (наприклад, ArcView або MapInfo) для використання. Таким чином, всі знімки мають географічну прив'язку і можуть бути зшиті в одну велику ортофотоплан поля: за один день одна група операторів з одним Supercam-350 зробить аерофотозйомку площі 20*20 км. Таким чином, аерофотознімання з БПЛА може замінити для сільського господарства супутникові знімки високої роздільної здатності, які можна отримати за допомогою різних супутникових приладів для космічного спостереження Землі.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі розглянуто ключові аспекти методики проведення аерофотознімальних робіт, які мають важливе значення для геодезії та кадастру.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволяє виконувати знімання великих площ з високою роздільною здатністю. Це забезпечує високу точність географічної прив'язки знімків та можливість їх подальшої обробки у ГІС-системах, що значно спрощує процес створення ортофотопланів і підвищує ефективність землеустрою. Для прокладання маршрутів аерознімання використовуються візуальні, полуінструментальні та інструментальні методи, кожен з яких має свої особливості та сфери застосування. Вибір методу залежить від точності вимог, наявного обладнання та навичок екіпажу

Для забезпечення точності вимірювань з аерофотознімків важливо визначити елементи внутрішньої орієнтації, такі як фокусна відстань, координати головної точки знімка та елементи зовнішньої орієнтації. Ці

параметри дозволяють точно визначати положення знімка у просторі, що є критичним для аналітичної і цифрової обробки знімків.

Використання сучасних технологій, таких як системи автоматизації аерофотознімання, значно підвищує ефективність та точність робіт. Прикладом є система Aerial Survey Control Tool (ASCOT), яка забезпечує повну автоматизацію процесу зйомки, від планування до реєстрації координат літальних об'єктів.

РОЗДІЛ.3. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПІДГОТОВКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ.

3.1. Особливості проведення аерофотознімання різної складності з використанням БПЛА для створення ортофотопланів

Технічно БПЛА можуть літати майже всюди. Їхня гнучкість висока, і цей факт дозволяє їм легко змінювати спостережуване місце та кут огляду за короткий проміжок часу.

Для кожного проекту аерофотознімання з використанням БПЛА першим обов'язковим кроком є планування польоту. Для картографування ця частина вимагає таких заходів, як отримання дозволу на політ, вибір програмного забезпечення, детальний аналіз території та вимог до розміру пікселя на землі (наземна вибірка відстані, GSD) та інших. Слід також враховувати такі важливі аспекти, як висота польоту, використання GNSS та бортової інерціальної навігаційної системи (INS), вимірювання наземних контрольних точок (GCP) із необхідним технічним обладнанням. Якість кінцевого продукту, що використовуватиметься для картографування – зазвичай ортофотоплану, значною мірою залежить від якості отриманих зображень. Для підвищення якості кінцевих продуктів, зокрема, результатів щільного збігу зображень, зазвичай використовується високе перекриття (наприклад, 80%) між зображеннями. Також рекомендується високе перекриття з метою уникнення пропусків через нестабільність платформи, спричинену можливими турбулентними потоками.[17]

Основною метою фотограмметрії є вилучення 3D інформації з 2D зображень. Для цього необхідно обчислити внутрішню орієнтацію (ВО), що визначає положення проєкційного центру камери відносно зображення, головну віддаль або фокусну відстань і спотворення об'єктива, а також

зовнішню орієнтацію (ЗО), що визначає положення проєкційного центру камери та обертання осі її оптичної системи відносно картографічної системи координат на зображеннях.

Для калібрування камери та орієнтування зображень потрібні виділені спільні ознаки (зв'язуючі точки), видимі на декількох зображеннях. Вибір відповідних точок на зображеннях нині виконується автоматично за допомогою спеціального алгоритму виділення ознак. У процедурі глобальної мінімізації помилок помилки, пов'язані з геометрією зображень та камери, а також відповідними вимірами зображень розподіляються. Якщо надаються наземні контрольні точки (GCP), вони допомагають геометрично підтримувати весь блок зображень і водночас визначають належну систему координат для об'єкта. Якщо на борту БПЛА доступна інформація GNSS/INS, то зібрані дані допомагають в автоматичному виділенні зв'язуючих точок, оскільки можливе попереднє прогнозування перекритих ділянок зображень. Навігаційна інформація також підтримує геоприв'язку всього зображення, оскільки проєкційні центри зображення вже оцінені (орієнтування датчика за допомогою GNSS). Якщо ці дані відсутні або низької якості, то використовується непряма орієнтація датчика шляхом включення GCP. Розподіл GCP має велике значення не лише для орієнтування зображень, а й для запобігання ефектам деформації блоку, які можуть бути результатом залишкових систематичних помилок у калібруванні камери. Як зробили висновок Gerke і Przybilla (2016), для уникнення деформацій блоку пропонується планувати перехресні польоти (різні напрямки польоту та висота) для деяких частин досліджуваної території. Ця процедура особливо допоможе підвищити якість результатів на рівнинній місцевості завдяки більш надійному самокалібруванню.

Після отримання точних параметрів ВО і ЗО необхідно застосувати метод щільного збігу для представлення об'єкта у вигляді щільної хмари точок. Ці хмари точок згодом потрібно структурувати, за необхідності

інтерполювати, спростити та текстурувати для фотореалістичного представлення та візуалізації. Основні методи збігу зображень: методи на основі патчів та напівглобальні методи.

Підходи на основі патчів дуже часто є багатозображувальними (тобто вони використовують багато зображень одночасно для визначення однорідних точок та їхнього 3D-положення), тоді як напівглобальні підходи працюють із стереопарами, а згенеровані хмари точок потім об'єднуються в єдиний набір даних. Їхня якість залежить від параметрів зйомки, таких як наземне розрізнення (GSD), перекриття зображень та якість датчика. Наявність перекриттів, тіней і ділянок зі зменшеною текстурою може призвести до пропусків і збільшення шуму в згенерованій ЦМР, яка інтерполюється з хмари точок.

Остаточне представлення для картографування створюється за допомогою ортофотоплану, що вимагає точної інформації про поверхню для усунення проєктивних спотворень вихідних зображень. Ортофотоплан відображає всі об'єкти в картографічній проєкції. Необхідну поверхню можна отримати за допомогою цифрової моделі рельєфу (ЦМР) або ЦМР: в останньому випадку результат ортофотоплану називається справжнім ортофотопланом. Зображення сцени на аерофотознімках у поєднанні з її точною геометрією, заданою ортогональною проєкцією, дозволяє навіть користувачам, не обізнаним у картографії, розуміти, читати та точно вимірювати присутні на зображенні об'єкти. Однак для того, щоб використовувати цей кінцевий продукт як надійне джерело для вилучення об'єктів, створений ортофотоплан повинен бути вільним від спотворень і неправильних проєкцій.

Таким чином, якісна та кількісна оцінка і корекція ортофотоплану можуть бути необхідними. Наприклад, на справжніх ортофотопланах не повинні бути видимі фасади будинків, хоча вони можуть бути видимі на вихідних зображеннях або звичайних ортофотопланах (Рис. 2).

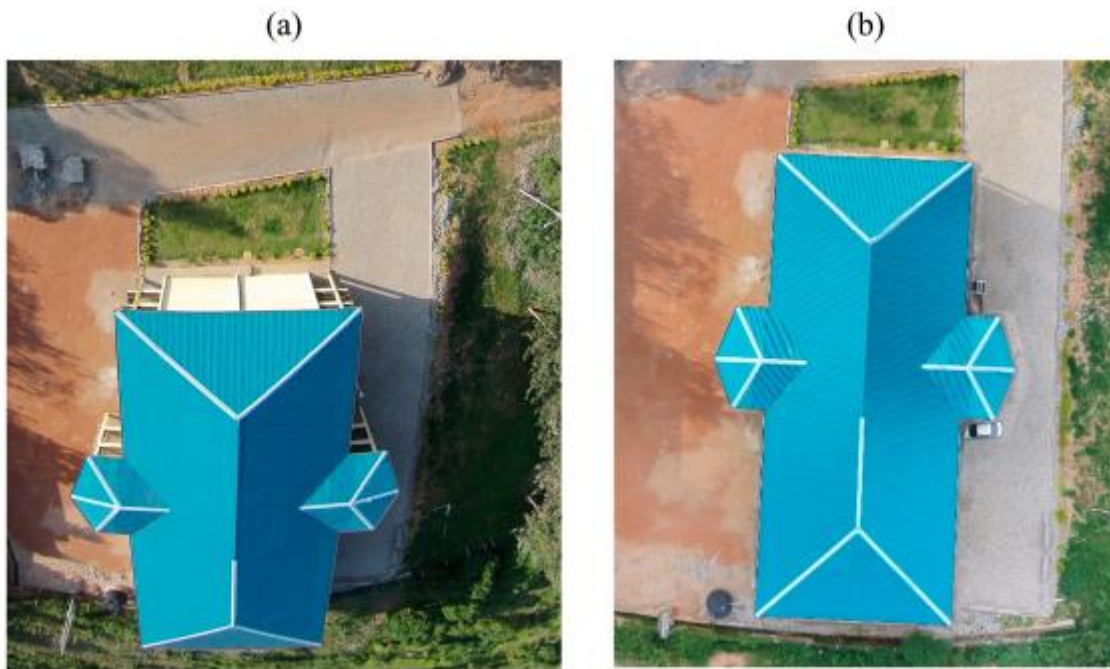


Рис.3. Приклад видимості фасаду на вихідному зображенні a, яке необхідно видалити для отримання правильного ортофото b

Кінцевий ортофотоплан і ЦМР дуже корисні для ручного або напівавтоматичного вилучення об'єктів для створення або оновлення карт. Високоточні фотограмметричні продукти, отримані за допомогою традиційних платформ, таких як супутники або літаки, використовуються для вилучення об'єктів протягом багатьох десятиліть.

Їх додана вартість порівняно з традиційними методами геодезичної зйомки з точки зору часу, витрат і точності була доведена, хоча існують певні недоліки через відсутність атрибутивних даних (назви вулиць) або затулених об'єктів. Це дослідження ставить за мету вивчити придатність ортофотопланів, зокрема вироблених із зображень БПЛА, для створення та оновлення карт. Щоб отримати високоякісні векторизовані карти впорядковано, чітко і повно, процедура вилучення об'єктів має керуватися чітко сформульованими правилами. На практиці такі правила та пояснення

об'єднуються в так звані керівництва з вилучення. Перш ніж розпочати ручне вилучення об'єктів, ці правила повинні бути прийняті та затверджені уповноваженим фахівцем (наприклад, керівником підрозділів, що працюють у муніципалітетах). Під час оцифрування кожному вилученому об'єкту в базі даних має бути присвоєно унікальний ідентифікатор разом з атрибутами, визначеними керівництвами з вилучення.

Якість орієнтації зображень і ортофотоплану аналізувалася якісно та кількісно. Можливі деформації ортофотоплану включають радіометричні помилки, спричинені неідеальним змішуванням зображень і радіометричними відмінностями між окремими зображеннями БПЛА. Деформація також може бути видимою через недоліки в ЦМР, що викликає неправильне ортофотопроектування окремих зображень. За допомогою візуального огляду наведено деформації та артефакти. Обговорюються їх відповідні причини, а також заходи, які можна вжити для запобігання або пом'якшення дефектів.[18]

Руанда зазнала значного зростання населення та економічного розвитку протягом останніх років, що підвищило потребу в актуальній геопросторовій інформації для підтримки ефективного планування. У 2008-2009 роках було здійснено традиційну аерофотозйомку всієї країни, в результаті чого були згенеровані дані про рельєф та створені високоточні ортофотоплани. Базова карта масштабу 1:50 000, що охоплює всю територію Руанди площею 26 338 кв. км, була створена шляхом ручної оцифровки та включає такі об'єкти: кордони, гідрографію, рельєф, фізичну й соціальну інфраструктуру, тематичні дані про земельний покрив, землекористування, забудовані території та земельні ділянки.

У 2010 році ці ортофотоплани використовувались для створення Генерального плану землекористування Руанди (1:250 000) та топографічних карт (1:50 000), що стало значним прогресом порівняно з картами 1970-х років, які переважно використовувались у країнах, що розвиваються. Однак з

того часу не було зроблено жодних зусиль для оновлення цієї геопросторової інформації.

Таким чином, на прикладі цього дослідження проводимо аналіз застосування сучасних методів збору даних для часткового оновлення похідної геопросторової інформації про Руанду.

Район дослідження, розташований в Ньярутарамській комуні міста Кігалі, Руанда. Цей район обрали для дослідження, оскільки тут сталися значні зміни після створення ортофотоплану, і він таким чином ілюструє важливість оновлення національної базової карти, яка становить основу для багатьох політичних рішень та планів розвитку.[13]

Використовуючи додаток Pix4DCapture, був розроблений план польоту на висоті 50 м над землею для досягнення середнього наземного розрізнення 3,3 см. БПЛА виконав автономний політ за цим планом.

Незважаючи на те, що планувалося отримати 1172 геопозначених надирних знімки, реально було отримано 954 знімки. Однак це забезпечило достатнє перекриття - близько 85% для поздовжнього і 75% для поперечного напрямків.

Загальна тривалість польоту, включаючи зліт та посадку, склала близько 2 годин. Обробка отриманих даних, а саме ідентифікація та маркування наземних опорних точок, орієнтація знімків, їх щільне узгодження та створення ортофотоплану, зайняла приблизно 2 дні.

Оскільки вбудований ГНСС-приймач Phantom 2 має відносно низьку точність позиціонування (5-10 м), для створення точно прив'язаних продуктів були зібрані високоякісні опорні точки на місцевості.

Ці опорні точки були визначені на статичних об'єктах, легко ідентифікованих на знімках БПЛА, з використанням ГНСС-кінематики в режимі реального часу з точністю близько 2 см. Використовувалась місцева система координат TM_Rwanda.

Із 13 зібраних опорних точок 7 використовувались як опорні для орієнтації блоку зображень, а 6 - як контрольні для оцінки точності. Кожна точка була позначена щонайменше на 14 знімках.

Після орієнтації зображень був виконаний процес щільного узгодження в повній роздільній здатності для генерації дуже щільної хмари точок. Це програмне забезпечення використовує підхід на основі патчів.

Хмара точок була інтерпольована для побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР).

На основі ЦМР був здійснений процес ортопроекування для усунення спотворень рельєфу і створення істинного ортофотоплану.

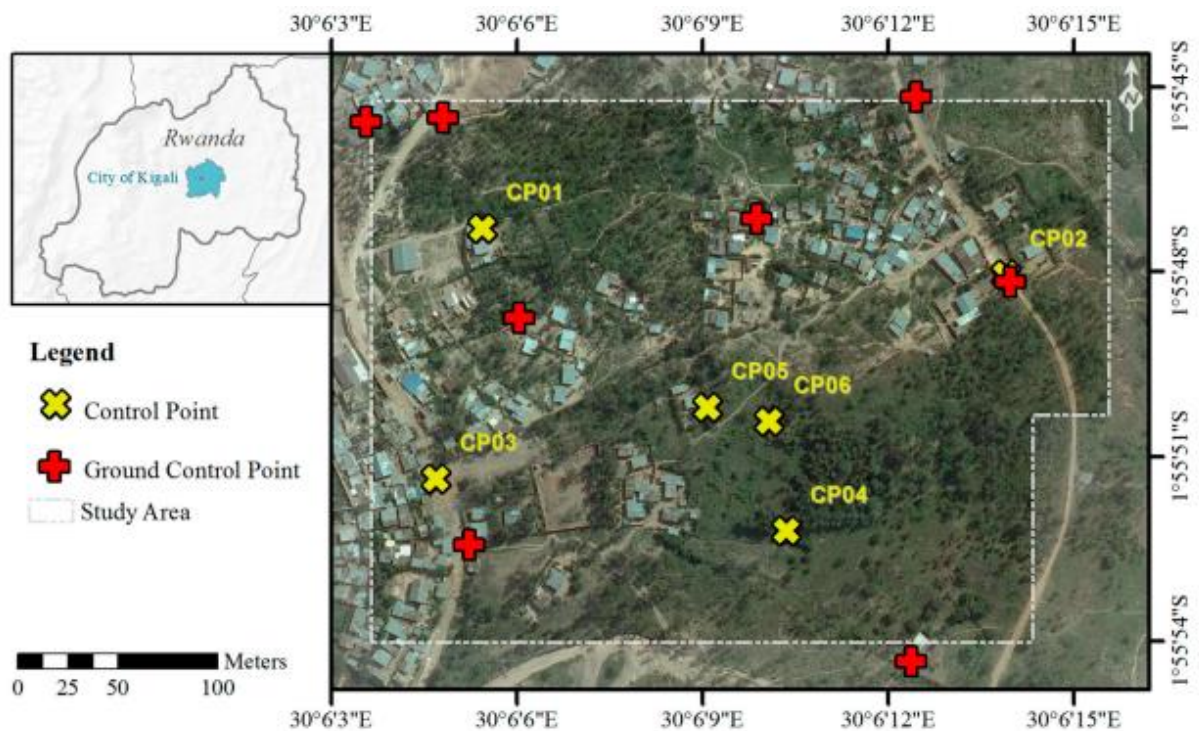


Рисунок 3.1. Розташування території дослідження

В результаті описаних кроків обробки дослідники отримали високоякісний RGB-ортофотоплан досліджуваної території з наземним розрізненням 3,3 см та радіометричним розрізненням 8 біт (3.1). Візуальний огляд показав, що якість зображення є придатною для візуального інтерпретування та вилучення об'єктів.[13]

Отриманий високоякісний ортофотоплан досліджуваного району був використаний для оновлення існуючої базової карти шляхом вилучення (оцифровки) різних просторових об'єктів. Оригінальна базова карта з 2009 року слугувала основою для визначення керівних принципів вилучення та оновлення наявних шарів даних.

Однак висока деталізація ортофотоплану БПЛА дозволила також виявити додаткові об'єкти інтересу, такі як дрібні топологічні елементи - дренажні системи, вузькі стежки тощо. Це відкрило можливість створення нових наборів векторних даних, які можуть забезпечити більш обґрунтоване прийняття рішень у різних сферах міського планування.

Були розроблені детальні керівні принципи вилучення для таких об'єктів: осьові лінії доріг, дороги, забудовані території, пішохідні доріжки та дренаж. Ці принципи містили визначення об'єктів, інструкції щодо їх оцифровки, тип геометрії, унікальні коди та необхідні атрибути.

В результаті векторизації за ортофотопланом було оцифровано:

- 948,7 м доріг
- 16553,0 м² будівель
- 778,8 м дренажних систем
- 1510,3 м пішохідних доріжок
- 1078,0 м² шкільних територій

Після оцифровки об'єктів була перевірена їхня просторова точність шляхом порівняння оцифрованих координат із вимірними на місцевості. В результаті було визначено, що об'єкти були оцифровані з середньою похибкою 1,3 см по осі X і 3,2 см по осі Y, а також середньоквадратичною планіметричною похибкою 8,8 см.

Підвищена роздільна здатність ортофотоплану БПЛА значно покращила інтерпретованість об'єктів для цілей їх вилучення (оцифровки). Стало можливим легше ідентифікувати та розрізняти різноманітні об'єкти, а

також зручно оцифрувати нові типи об'єктів, такі як лінії дренажу, ліхтарні стовпи, електроопори тощо, які були дуже чітко видимі.

Для створених векторних шарів були додані метадані) з метою документування їх якості та полегшення подальшого використання в аналізах на основі оновленої базової карти.

Для демонстрації результатів були створені зразкові карти масштабу 1:1000: кадастрова (Рис 3.2.) та топографічна (Рис 3.3.).



Рис 3.2. Кадастрова карта масштабу 1:1000



Рис 3.3. Топографічна карта масштабу 1:1000

3.2 Подальше використання ортофотопланів в землеустрої

Ортофотоплани в подальшому використовуються для вирішення різноманітних завдань у галузі землеустрою, забезпечуючи точну, детальну і актуальну просторову інформацію. Вони використовуються для створення і оновлення кадастрових карт, інвентарізації, моніторингу землекористування та багатьох інших завдань.

- *Оновлення топографічних та кадастрових карт.*

Процес оновлення карт починається з порівняння старих картографічних матеріалів з новими ортофотопланами для виявлення змін. Це включає ретельний аналіз змін у забудові, інфраструктурі, землекористуванні та природних об'єктах. Порівняння проводиться шляхом накладання нового ортофотоплану на існуючі карти та візуального виявлення областей, де відбулися зміни. Детальний огляд дозволяє ідентифікувати нові будівлі, дороги, зміни у гідрографічній мережі, вирубку або озеленення територій тощо. Цей процес є ключовим для підтримки актуальності картографічних матеріалів.

На основі ретельно виявлених змін вносяться коригування в існуючі карти та геопросторові дані. Це може включати додавання нових об'єктів, таких як будівлі, дороги або водойми, видалення застарілих або змінених об'єктів, а також оновлення інформації про межі земельних ділянок відповідно до нових даних. Карты коригуються шляхом редагування векторних шарів, додавання або видалення об'єктів та зміни їх атрибутів. Це забезпечує актуальність картографічних матеріалів та відображення реального стану території.[24]

Ортофотоплани, створені з використанням високоточних GNSS даних, забезпечують високу геодезичну точність оновлених карт. Вимірювання координат наземних опорних точок з використанням GNSS дозволяє точно прив'язати ортофотоплани до системи координат та забезпечити високу

просторову точність кінцевого картографічного продукту. Це є критично важливим для планування територій, кадастрові роботи та управління земельними ресурсами.

Регулярне оновлення ортофотопланів дозволяє моніторити зміни в землекористуванні, виявляти незаконні забудови, слідкувати за виконанням містобудівних норм та правил. Порівняння нових даних з попередніми ортофотопланами дає можливість виявляти нові об'єкти, зміни в цільовому призначенні земель, порушення встановлених правил забудови. Це допомагає своєчасно реагувати на виявлені відхилення та вживати необхідних заходів. Крім того, детальні та точні дані з ортофотопланів допомагають в обґрунтуванні рішень щодо розподілу земель, зміни меж ділянок, а також у вирішенні земельних спорів.

Важливим аспектом є те, що ортофотоплани легко інтегруються з геоінформаційними системами (ГІС), що значно розширює їх функціональні можливості та підвищує цінність для вирішення широкого кола завдань. ГІС надає потужні інструменти для управління, аналізу та візуалізації просторових даних, а ортофотоплани стають незамінним джерелом детальної та точної інформації про місцевість. Така інтеграція дозволяє створювати багатопланові бази геоданих з усією необхідною.

Ортофотоплани використовуються як основа для створення багатопланових ГІС-баз даних, що включають різні типи просторової інформації, такі як кадастрові дані, інформацію про інфраструктуру, екологічні дані тощо. На ортофотоплани можна накладати векторні шари з різноманітними об'єктами, межами, зонами та атрибутивною інформацією, створюючи повноцінну картографічну модель території. Це забезпечує наочність, деталізацію та можливість комплексного аналізу ситуації.[20]

Використовуючи різноманітні аналітичні інструменти ГІС, можна виконувати буферизацію, накладання шарів, мережевий аналіз, 3D-

моделювання рельєфу та інші операції для вирішення складних просторових задач та генерації корисних похідних даних.

Інтеграція ортофотопланів з веб-ГІС робить їх доступними для широкого кола користувачів через онлайн-платформи та геопортали. Це забезпечує зручний доступ до актуальної картографічної інформації для державних органів, бізнесу, науковців та громадськості. Веб-ГІС дозволяє візуалізувати, аналізувати та поширювати дані, надаючи потужні інструменти для взаємодії з просторовою інформацією через інтернет.

- *Інвентаризація*

Ортофотоплани, отримані за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), є корисним інструментом для інвентаризації будівель та споруд на великих територіях. Вони забезпечують високоточні візуальні дані у вигляді ортогонально скоригованих аерофотознімків із метричними властивостями. Завдяки високій роздільній здатності, яка може сягати кількох сантиметрів на піксель, на ортофотопланах можна чітко розрізнити контури та деталі будівель, їх розміри, форми, матеріали огорожувальних конструкцій, стан покрівель тощо. Це дозволяє проводити детальний аналіз забудованих територій, виявляючи нові, знесені чи реконструйовані об'єкти.

Процес інвентаризації будівель та споруд, як правило, починається з векторизації видимих об'єктів прямо на ортофотоплані. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення оператори оцифровують контури кожної будівлі як окремий полігональний об'єкт у векторному шарі. Для кожного об'єкта можна додавати атрибутивну інформацію, таку як тип будівлі, кількість поверхів, матеріали стін і даху, рік побудови тощо. Крім візуальної інтерпретації, параметри будівель можуть бути автоматично виміряні або розраховані на основі даних ортофотоплану та цифрової моделі рельєфу (ЦМР), наприклад, площа забудови, периметр та висота будівлі.

Інвентаризація не обмежується лише будівлями. На ортофотопланах також можна ідентифікувати та картографувати інші інфраструктурні

об'єкти, такі як дороги, мости, естакади, лінії електропередач, труби, огорожі тощо. Їх можна векторизувати як лінійні чи полігональні об'єкти з відповідними атрибутами. Комплексний аналіз будівель, споруд та інфраструктури дозволяє скласти повну картину забудованих територій, що має важливе значення для містобудівного планування, оцінки нерухомості, управління земельними ресурсами та багатьох інших цілей. Регулярне отримання актуальних ортофотопланів за допомогою БПЛА забезпечує своєчасний моніторинг змін у забудові та ефективну інвентаризацію усіх наземних об'єктів.

3.3 Програмне забезпечення для аерофотознімання.

Сучасні тенденції розвитку систем цифрової фотограмметрії означають, що спеціалізоване програмне забезпечення переважає над апаратним забезпеченням, яке часто розглядається окремо. Однією з головних переваг цифрової фотограмметрії над аналітичною фотограмметрією є її гнучкість. Якщо аналітична фотограмметрія вимагає використання спеціальних інструментів для створення кожного типу продуктів, то для цифрової фотограмметрії потрібен лише комп'ютер. Продукти цифрової фотограмметрії отримують у процесі роботи програмних пакетів. Однак постачальники програмного забезпечення не пропонують універсального пакету, в якому були б доступні всі типи продуктів.[12]

Натомість, системи орієнтовані на різні сфери застосування та конкретні потреби користувачів. Деякі додатки призначені виключно для картографічних цілей і працюють з ними кваліфіковані користувачі з високою продуктивністю та ефективністю. Інші призначені для наземної фотограмметрії та користувачів ГІС. Більшість цифрових фотограмметричних робочих станцій здатні обробляти наземні та супутникові зображення на додаток до традиційних зображень, отриманих за допомогою аерофотокамер центральної проекції. У багатьох випадках

важливо, щоб систему можна було адаптувати для обробки різноманітних даних, включаючи дані, отримані сучасними повітряними та космічними датчиками високої роздільної здатності. Сучасні системи каротажу можуть обробляти дані з різних моделей датчиків і напівавтоматично або автоматично створювати внутрішнє і взаємне орієнтування, повітряну триангуляцію і цифрові моделі рельєфу.

У відповідь на попит користувачів на більш автоматизовану та гнучку DFS, деякі постачальники тепер включають модуль автоматичної векторизації для таких об'єктів карти, як дороги та берегові лінії. [10]

Фотограмметричне програмне забезпечення слугує потужним каталізатором у перетворенні двовимірних фотографій на точні 3D моделі та карти. Фотограмметричне програмне забезпечення працює, аналізуючи просторові відносини та перспективи на декількох зображеннях для реконструкції форми та розмірів сфотографованого об'єкта. Враховуючи вище сказане можна вивести такий алгоритм процесу створення аерофотознімків:

- Численні фотографії одного й того ж об'єкта чи сцени роблять з різних точок огляду. Ці зображення повинні мати значне перекриття для забезпечення точної реконструкції.
- Програмне забезпечення виявляє та виділяє характерні особливості або точки на кожному зображенні. Ці особливості можуть бути кутами, краями або іншими унікальними візерунками, які можна легко поєднати на декількох фотографіях.
- Відповідні особливості на різних зображеннях поєднуються шляхом аналізу їх позицій, орієнтацій та дескрипторів. Цей процес встановлює відповідності між точками на різних фотографіях.
- Використовуючи поєднані особливості, програмне забезпечення розраховує положення та орієнтацію камери для кожного зображення в 3D-просторі. Цей крок включає розв'язання геометрії сцени на основі

відомих параметрів камери та встановлених відповідностей особливостей.

- Програмне забезпечення генерує хмару точок, що є набором 3D-координат, які представляють місця розташування поєднаних особливостей у реальному просторі. Ця хмара точок, по суті, є розрідженим представленням поверхні об'єкта.
- Розріджена хмара точок використовується для створення більш щільної та деталізованої хмари точок, яку часто називають густою хмарою точок або 3D-хмарою точок. Можуть застосовуватись додаткові алгоритми для інтерполяції та заповнення проміжків між точками.
- Хмара точок потім використовується для створення поверхневої сітки, з'єднуючи точки для формування безперервного 3D-представлення поверхні об'єкта. Сітка складається з вершин, ребер та граней, що визначають геометрію об'єкта.
- Якщо початкові зображення містять кольорову інформацію, програмне забезпечення може нанести текстури з зображень на згенеровану 3D-модель, забезпечуючи реалістичні візуальні деталі.
- Деякі фотограмметричні програмні забезпечення можуть пропонувати інструменти для доопрацювання згенерованої моделі, такі як згладжування поверхонь, видалення викидів або коригування параметрів для підвищення точності та візуальної якості.[18]

З широким розповсюдженням БПЛА виникла необхідність у створенні програмного забезпечення для планування та проведення аерофотознімання.

Продукт швейцарської компанії Pix4D - це програмне забезпечення для планування та проведення аерофотознімання за допомогою БПЛА, яке повністю відповідає вимогам аерофотознімання за допомогою БПЛА". Pix4Dcapture" (рис. 3.2) є вільно розповсюджуваним безкоштовним програмним забезпеченням і набув великої популярності серед державних

установ та приватних компаній, що займаються аерофотозйомкою з метою картографування. "Pix4Dcapture - це типова програма для аерофотознімання...

Для успішного проведення аерофотознімання за допомогою Pix4Dcapture необхідно

- Встановити зв'язок між програмою та БПЛА за допомогою Bluetooth-приймача.
- Вибрати польотне завдання відповідно до цілей місії.
- Вказати необхідну висоту та швидкість польоту.
- Запустити БПЛА в безпечному місці.
- Спостерігайте за БПЛА під час автоматичного виконання польотної місії.
- Після завершення польотної місії БПЛА повертається до місця вильоту власним ходом.

ПЗ Pix4Dmapper (Рис. 3.4.) – програмне забезпечення дозволить обробити результати аерофотознімання місцевості у видимому спектрі і зроблені на мультиспектральну камеру. Результатом обробки Pix4Dmapper для БПЛА, будуть ортофотоплани великої якості, тривимірні моделі будівель, цифрові моделі місцевості і рельєфу, карти висот.

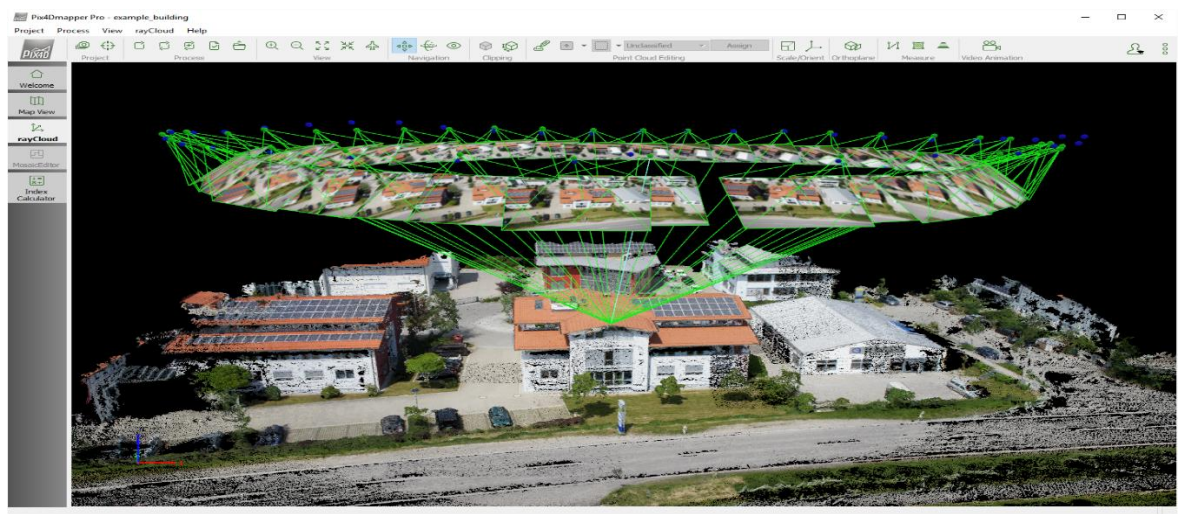


Рисунок 3.4. Автоматичне створення 3D моделі в результаті обробки аерозйомки

ПЗ DronDeploy 3D (Рис. 3.5.)– Пілоти, які використовують пристрої DJI, можуть використовувати мобільний додаток DroneDeploy. Це спрощує планування польотів і забезпечує високу якість постобробки завдяки правильному перекриттю знімків. Обробка та аналіз даних за допомогою сервісу DroneDeploy на основі зібраних даних можна створювати 3D-моделі, карти та ортофотознімки. Програмне забезпечення включає в себе можливість вводити інформацію про місцевість і фотографії, що дозволяє створити всеосяжну базу даних про умови місцевості.



Рисунок 3.5. Визначення площі знімання для ЛА

ПЗ Drone2Map for ArcGIS (Рис. 3.6.) – дозволяє обробляти похилі зображення з будь-якого безпілотного літального апарата (БПЛА) і створювати безшовні гео-прив'язані мозаїки, цифрові моделі рельєфу, текстуровані 3D моделі та точки хмари на основі оригінальних зображень. Додаток є частиною платформи ArcGIS.

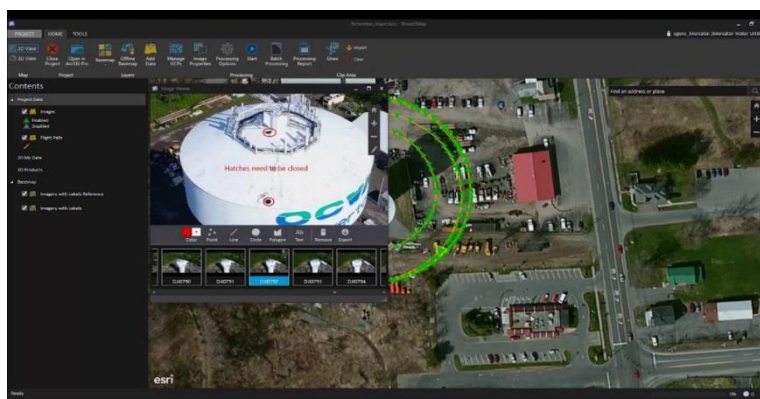


Рисунок 3.6. Фрагмент планування аерозйомки для створення 3D-моделі

ПЗ Agisoft PhotoScan (Рис 3.7.) – У програмі реалізована сучасна технологія створення високоякісних 3D-моделей на основі цифрових фотографій. Для відтворення 3D-моделі об'єкта Agisoft PhotoScan може використовувати фотографії, зроблені під будь-яким кутом будь-якою цифровою камерою (за умови, що кожен елемент реконструйованої сцени видно щонайменше з двох точок). За допомогою Agisoft PhotoScan можна також вимірювати відстані та обчислювати площі і об'єми поверхонь для моделей заданого масштабу. Масштабована модель базується на попередніх вимірюваннях реконструйованої сцени.[22]

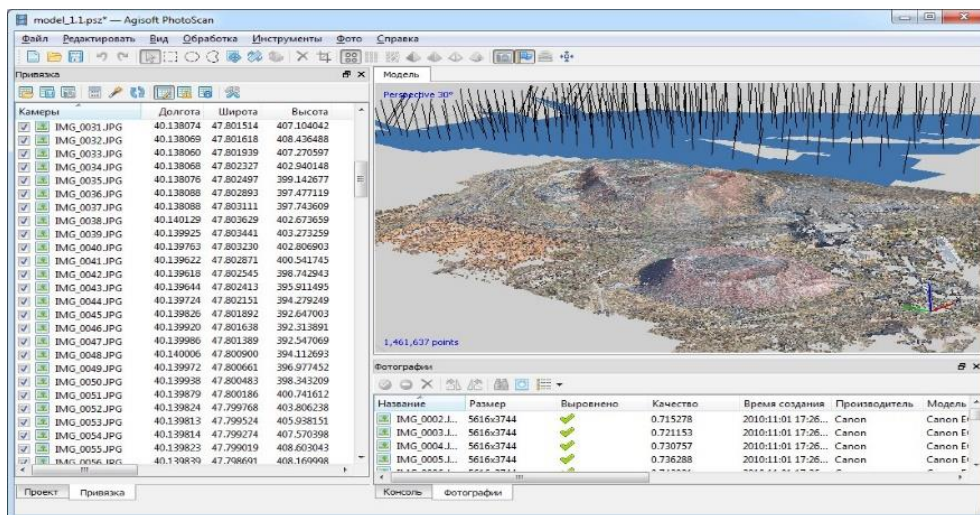


Рисунок 3.7. Визначення точок фотографування

Загальна тенденція розвитку платформ полягає в тому, щоб перекласти рутинні завдання з обробки даних від людини до комп'ютера. І незважаючи на значний прогрес у цьому напрямку, на існуючих платформах все ще є простір для розвитку. Багато користувачів з власного досвіду знають, скільки часу потрібно програмному забезпеченню для вирішення основних завдань, для яких воно створюється, і скільки часу витрачається на виконання необхідних рутинних завдань.

3.4 Збільшення результативності робіт землеустрою шляхом покращення аерофотознімання різних видів місцевості за допомогою безпілотних літальних апаратів

Мною було отримано практичний досвід управління безпілотним літальним апаратом. Через це емпіричне знайомство з процесом аерофотознімання, я набув розуміння оптимальних методик зйомки з повітря з метою отримання результатів, які є найбільш придатними для подальшого використання в галузі землепорядкування та кадастрових робіт. Зокрема, я засвоїв критерії відносно висоти польоту, перекриття знімків, просторового розрішення в контексті різних видів місцевості та інших технічних параметрів аерофотознімання, дотримання яких дозволяє максимізувати якість та інформативність фотограметричних даних для наступної обробки та інтерпретації в рамках геоінформаційних проектів та землепорядних завдань.

Для отримання якісних результатів аерофотознімання з використанням БПЛА літакового типу необхідне горизонтальне перекриття 60% і вертикальне перекриття не менше 80%. Для підвищення точності результатів рекомендується використовувати наземні контрольні точки.

Особливості аерофотознімання насаджень

- Аерофотознімання насаджень проводиться нижче 300 м над рівнем землі. Дерева гойдаються на вітрі, і Metashape може не знайти спільну точку на знімках, якщо їх фотографувати з висоти менше 300 м.
- Не слід проводити аерофотозйомку лісів, коли на деревах немає листя. Безлисті дерева мають багато дрібних структур (гілок), що ускладнює для Metashape пошук спільних рис на зображенні, а отже, реконструкція дерев не буде успішною.

Особливості проведення аерофотознімання міських районів:

- У міській аерофотозйомці слід провести два перехресних польота, щоб отримати подвійне перекриття, і фотографувати стіни будівель з усіх кутів.



Рисунок 3.8. – Приклад некоректного знімка

- Не фотографуйте конструкції з блискучих матеріалів, які відбивають світло в ясну погоду.
- Якщо потрібно реконструювати детальну 3D-модель, не використовуйте БПЛА лише з надирною камерою, а використовуйте БПЛА з багатокамерною системою (надирна камера + нахилена камера) або комбінуйте польоти БПЛА з різних ракурсів з однією камерою. Такий підхід допомагає отримати коректну модель і відновити текстуру вертикальних поверхонь (наприклад, стін будівель).

Особливості проведення аерофотознімання районів з водними об'єктами:

- Співвідношення суші та води на знімку має бути 50/50.
- Для отримання кращого результату з відображенням води рекомендується робити подвійні або потрійні аерофотознімки однієї і тієї ж ділянки з різної висоти.

- Не фотографуйте акваторії в ясну погоду - відблиски можуть вплинути на аерофотознімки.



Рисунок 3.9. – Правильне співвідношення землі і води.

Особливості проведення аерофотознімання гірських районів:

- Не плануйте політ без актуальної підкладки (моделі висоти) на територію аерофотознімання.
- Не виконуйте аерофотознімання гірських районів нижче 100 метрів над землею.
- Рекомендується проводити подвійну або потрійну аерофотозйомку гірського району з різної висоти, щоб отримати добрі результати реконструкції схилу.

Висновки до розділу 3

БПЛА (безпілотні літальні апарати) демонструють високу гнучкість у проведенні аерофотозйомок, що дозволяє оперативно змінювати місце спостереження та кут огляду. Це значно спрощує процес збору геодезичної інформації для землеустрою.

Ефективне використання БПЛА для картографування вимагає ретельного планування польоту, яке включає вибір програмного забезпечення, аналіз території та визначення вимог до розміру пікселя на землі (GSD). Важливими аспектами є також висота польоту, використання GNSS та INS, а також вимірювання наземних контрольних точок (GCP).

Після обчислення параметрів внутрішньої та зовнішньої орієнтації застосовується метод щільного збігу для створення щільної хмари точок, яка потім використовується для створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та ортофотопланів.

Ортофотоплани, отримані з аерофотознімання з використанням БПЛА, демонструють велику сферу застосування, полегшують процес створення та оновлення картографічних та кадастрових даних.

Важливо дотримуватися необхідних вимог аерофотознімання за допомогою БПЛА для отримання геоданих, щоб максимізувати точність подальшої обробки ортофотопланів з метою отримання якісних кінцевих картографічних продуктів.

ВИСНОВКИ

Було проаналізовано теоретичні аспекти та загальну інформацію щодо планування та виконання аерофотознімання з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Було проаналізовано історію розвитку аерофотознімання та розглянуто різні способи та види проведення аерофотознімання. Основна увага приділялася контролю точності матеріалів аерофотознімання, що є ключовим фактором для забезпечення високої якості даних. Розуміння цих теоретичних аспектів необхідно для ефективного планування та виконання аерофотознімання, що є первинною ланкою отримання геоінформації для потреб землеустрою.

Було приділено увагу методиці проведення аерофотознімальних робіт. Розглянуто основні принципи орієнтування, особливості прокладання маршрутів для аерознімання та застосування сучасного обладнання для планування та забезпечення аерофотознімання. Для прокладання маршрутів аерофотознімання найбільш ефективним способом є інструментальний спосіб: на підставі даних попереднього розрахунку застосовується спеціальне обладнання та прилади, які максимізують точність вимірювань.

Використання БПЛА дозволяє виконувати знімання великих площ з високою роздільною здатністю, що значно підвищує точність географічної прив'язки знімків та ефективність подальшої обробки даних у геоінформаційних системах (ГІС).

Також було висвітлено особливості проведення аерофотознімання різної складності з використанням БПЛА для створення ортофотопланів, а також подальше використання цих ортофотопланів у землеустрої. Ортофотоплани, отримані за допомогою БПЛА, забезпечують високу точність та актуальність даних, що є основою для створення та оновлення кадастрових карт, а також для інших видів геодезичних робіт. Було проведено аналіз програмного забезпечення для обробки даних аерофотознімання. Використання спеціалізованого програмного

забезпечення дозволяє автоматизувати процес обробки аерофотознімків, що значно спрощує та прискорює створення ортофотопланів і картографічних матеріалів. Це підвищує точність і ефективність робіт із землеустрою, забезпечуючи більш надійні та актуальні дані для прийняття рішень.

Загалом, використання безпілотних літальних апаратів для аерофотознімання в контексті геодезії та землеустрою виявило свою ефективність як більш економний, швидший та більш точний спосіб збору геоданих. Використання БПЛА дозволяє отримувати високоякісні та точні аерофотознімки з мінімальними затратами, що значно підвищує ефективність робіт із землеустрою. Отримані дані можуть бути легко інтегровані з ГІС, що забезпечує комплексний підхід до управління земельними ресурсами та прийняття обґрунтованих рішень на основі актуальної інформації. Це підтверджує важливість та актуальність використання БПЛА для аерофотознімання в сучасній геодезії та землеустрої.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дані зі статті historical development of areal photography [Електронний ресурс]. – режим доступу:
https://www.academia.edu/13382790/historical_development_of_aerial_photography
2. Пеньков В. О. Фотограмметрія : конспект лекцій для бакалаврів спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій) / В. О. Пеньков; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 100 с
3. Картографія і аерофотознімання /. Глотов В.М., Кордуба Ю.Г., Національний університет «Львівська політехніка», 2011. 97-101с.)
4. Dr. SHYAMA PRASAD Aerial Photograph Types and Characteristics [Електронний ресурс]. – режим доступу:
<https://dspmuranchi.ac.in/pdf/Blog/Aerial%20Photograph%20Types%20and%20Characteristics.pdf>
5. Білоус В.В., Боднар С.П., Курач Т.М. Дистанційне зондування з основами фотограмметрії: навч. посібник. - К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2011. - 317 с.
6. Про затвердження Інструкції про умови і правила здійснення аерофотозйомочних, топографо-геодезичних, картографічних робіт, кадастрових зйомок суб'єктами підприємницької діяльності, порядок надання ліцензій та контролю за їх дотриманням (ГКНТА-2.07-01-93)
7. “Елементи внутрішнього орієнтування” [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://studfile.net/preview/5198791/>
8. Іванова Л.І., Єгоров О.І. Основи фотограмметрії: Навчальний посібник.-К.: КНУБА, 2002.

9. Чорнокінь В. Я., Сушко В. Г., „ Практика застосування сучасних фотограмметричних технологій та аерофотознімання”. Вісник геодезії та картографії. –К., №4 2001.
10. Навчальний посібник «Фотограмметрія» / Ю.Г. Кордуба, Є.І. Смірнов. – К., 2007. – 256 с.
11. Зацерковний В. І., Бурачек В. Г., Железняк О. О., Терещенко А. О. Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. – Кн. 2 /В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2017. 237 с.
12. “Using UAVs for map creation and updating. A case study in Rwanda” [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00396265.2016.1268756>
13. Скубієв С.І. Використання БПЛА для цілей картографії /С.І. Скубієв // Землеустрій, кадастр и моніторинг земель, 2010.-№12.
14. Al-Tahir, R., & Ali, A. (2014). UAV-based mapping in urban environments. Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2014 Joint, 1-4.
15. Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138-146.
16. Colomina, I., & Blázquez, M. (2013). A view from the top: Towards a UAV standardization for photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 28(142), 204-214.
17. Everaerts, J. (2008). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B1).
18. Hardin, P. J., & Jensen, R. R. (2011). Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 48(1), 99-111.

19. Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., & Gabbianelli, G. (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, 5(12), 6880-6898.
20. Nebiker, S., Lack, N., & Deuber, M. (2014). Building change detection from historical aerial photographs using dense image matching and object-based image analysis. *Remote Sensing*, 6(10), 8310-8336.
21. Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15.
22. Rango, A., & Laliberte, A. (2010). Impact of flight regulations on effective use of unmanned aircraft systems for natural resources applications. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1), 043539.
23. Römer, H., Reich, M., Strecha, C., & Rosu, C. (2012). Process and accuracy evaluation of automatic photogrammetric UAV image processing for cadastral surveying applications. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 400-408.
24. Saadatseresht, M., & Fathi, M. (2012). UAV-based photogrammetry and GIS for large scale mapping. *International Journal of Digital Earth*, 5(5), 486-500.