

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА
Географічний факультет
Кафедра геодезії, картографії та управління територіями**

**Особливості використання програмного продукту Leica Infinity
при обробці результатів аерофотознімання**

**Кваліфікаційна робота
Рівень вищої освіти - другий (магістерський)**

Виконав:

здобувач II курсу, групи 208-М

спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»

ОПП «Геодезія»

ПАХОЛОК Максим Миколайович

Керівник:

к.геогр.н., доц. Білокриницький С. М.

До захисту допущено:

протокол засідання кафедри № 3

від «18» «листопада» 2025 р.

Зав. кафедрою _____ доц. Дарчук К. В.

Чернівці – 2025

АНОТАЦІЯ

Пахолок М. М. Особливості використання програмного продукту Leica Infinity при обробці результатів аерофотознімання – Рукопис.

Кваліфікаційна робота

зі спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій». ОПП «Геодезія»

У магістерському дослідженні розглянуто теоретичні та практичні аспекти виконання аерофотознімання із застосуванням безпілотних літальних апаратів, а також методи камеральної обробки отриманих матеріалів. Проаналізовано сучасні теоретико-методичні підходи до планування та проведення аерофотознімання, визначено ключові вимоги до точності, перекриття та орієнтування знімків. Виконано огляд провідних програмних продуктів для фотограмметричної обробки, зокрема Agisoft Metashape, Pix4Dmapper та Leica Infinity, із порівнянням їх можливостей та сфер застосування. Особливу увагу приділено функціоналу програмного комплексу Leica Infinity як інструменту для інтеграції геодезичних і фотограмметричних даних. Проведено аерофотознімання території дослідження та здійснено повний цикл камеральної обробки матеріалів із побудовою хмари точок, цифрової моделі рельєфу та ортофотоплану.

Ключові слова: аерофотозйомка, БПЛА, фотограмметрія, Leica Infinity, дані GNSS, ортофото, хмара точок, цифрова модель рельєфу, обробка геопросторових даних

SUMMARY

Pakholok M. Features of using the Leica Infinity software product when processing aerial photography results – Manuscript.

Qualification work on the specialty

193 "Geodesy and land management" OPP "Geodesy"

The master's thesis examines the theoretical and practical aspects of performing aerial photography using unmanned aerial vehicles (UAVs), as well as the methods of photogrammetric and geodetic processing of the obtained data. The research analyzes modern theoretical and methodological approaches to planning aerial surveys, including accuracy requirements, image overlap, flight parameters, and the use of ground control points. A comparative review of leading software solutions for photogrammetric processing – Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, and Leica Infinity—has been conducted, highlighting their functionality, advantages, and applicability. Special attention is given to Leica Infinity as a powerful tool for integrating GNSS, total station, and UAV-based data within a unified processing environment. An aerial survey of the study area was carried out, followed by a full cycle of data processing, including image alignment, point cloud generation, DEM creation, and orthophoto production.

Key words: aerial photography, UAV, photogrammetry, Leica Infinity, GNSS data, orthophoto, point cloud, digital elevation model, geospatial data processing

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

_____ Максим ПАХОЛОК

Заява

Студента ПАХОЛОК Максима Миколайовича

Номер студентської книжки: _____

Я заявляю, що наукова робота: «Особливості використання програмного продукту Leica Infinity при обробці результатів аерофознімання»

1) Була підготовлена виключно мною, * і:

А. Не порушує авторські права третіх осіб у відповідність із законом про авторське право.

Б. Повністю або частково була використана в якості основи для отримання диплому про вищу освіту або наукового ступеня мною чи іншою особою.

2) Крім того, я заявляю, що надана мною для перевірки електронна версія роботи збігається з друкованою.

Даною заявою я підтверджую, що була, проінформована про права та обов'язки студентки Університету, про правила, що стосуються перевірки оригінальності наукових робіт. Тому я заявляю, що я згідна на обробку моїх письмових робіт у відповідності з антиплагіатними процедурами Університету, а також на архівування цих робіт в базі даних інтернет системи Turnitin Similarity згідно з антиплагіатними правилами і процедурами Університету.

Я також свідому того, що у випадку, якщо робота написана мною, за рішенням Комісії університету буде містити факти, які суперечать умовам зазначеним у цій заяві, або, якщо коефіцієнти виходять за межі гранично допустимих норм (згідно **Додатку 2**), робота буде повернута на доопрацювання.

5/12/2025 р.

Дата

Підпис

**Беручи до уваги істотний внесок з боку керівника наукової роботи.*

Зміст

АНОТАЦІЯ / SUMMARY	2
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВИКОНАННЯ АЕРОФОТОТОПОГРАФІЧНОГО ЗНІМАННЯ	8
1.1. Огляд сучасного стану галузі великомасштабного повітряного знімання	8
1.2. Сучасні технології виконання аерофототопографічного знімання	10
1.3. Аналітичний огляд БПЛА	16
РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ	21
2.1. Мобільні додатки з організації аерофотознімання	22
2.2. Програмні продукти обробки результатів аерофотознімання	26
2.3. Прикладні аспекти використання додатків	34
2.4. Огляд можливостей програмного комплексу Leica Infinity для цілей фотограмметрії	37
РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ LEICA INFINITY ПРИ ОБРОБЦІ РЕЗУЛЬТАТІВ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ	44
3.1. Загальна характеристика ділянки проведення робіт	44
3.2. Підготовчі роботи та аерофотознімання використовуючи БПЛА DJI Mavic 2 Zoom	49
3.3. Камеральна обробка результатів аерофотознімання у програмному продукті Leica Infinity	54
ВИСНОВКИ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні технології аерофотознімання стрімко розвиваються, що зумовлює зростання обсягів даних та підвищення вимог до їх точності, оперативності обробки й інтеграції в геоінформаційні системи. У цих умовах використання ефективних програмних засобів є ключовим для забезпечення високої якості кінцевих результатів. Leica Infinity виступає одним із провідних рішень для комплексної обробки даних аерофотознімання, пропонуючи широкий спектр інструментів для імпорту, калібрування, орієнтування, вирівнювання та контролю точності знімків.

Актуальність застосування Leica Infinity полягає в можливості поєднання даних різних сенсорів, автоматизації рутинних процесів, забезпеченні прозорого контролю якості та точності, а також у зручній інтеграції результатів у подальші картографічні або ГІС-проєкти. Програма дозволяє оптимізувати процес створення ортофотопланів, 3D-моделей та інших продуктів дистанційного зондування, що є особливо важливим для практичних завдань у геодезії, кадастрі, екологічному моніторингу та інфраструктурному плануванні. Таким чином, дослідження можливостей Leica Infinity у контексті обробки аерофотознімків є актуальним і відповідає сучасним потребам галузі.

Об'єктом дослідження виступили землі території житлового масиву по вулиці Руській у місті Чернівці, в контексті збору та обробки даних дистанційного зондування, зокрема аерофотознімання..

Так, **метою** дослідження стало виявлення особливостей використання програмного комплексу Leica Infinity, в якості технологічного базису обробки результатів аерофотознімання

- 1) проаналізувати теоретико-методичних підходів виконання аерофотознімання;
- 2) здійснити огляд програмних продуктів з обробки результатів аерофотознімання;
- 3) ознайомитися із функціональними можливостями програмного комплексу Leica Infinity;
- 4) провести аерофотознімання території дослідження;

5) виявити специфіку камеральної обробки даних отриманих з БПЛА.

У роботі використано сукупність загально та конкретно **наукових методів**, кожен з яких застосовувався в рамках єдиного системного підходу. З поміж усіх методів дослідження варто окремо виділити методи аналізу та синтезу, що застосовувались в процесі написання всіх розділів роботи, історичний метод застосований для написання першого пункту першого розділу та картографічний і геоінформаційний методи, що використовувалися для побудови геопросторових моделей представлених в третьому розділі магістерського дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі опрацювання значної кількості літературних та нормативно-правових джерел, а також технічних проектів й документацій, нами:

вперше:

- проведено знімання території житлового масиву за допомогою БПЛА;
- проведено глибоку обробку даних отриманих за допомогою БПЛА;

набули подальшого розвитку:

- реалізація технологічної схеми аерофотознімання, за допомогою БПЛА;
- методико-технологічні прийоми обробки фотограмметричних даних;
- теоретичні та практичні аспекти подальшого розвитку аерофотознімання на території м. Чернівці.

Практичне значення одержаних результатів. Результати виконаного магістерського дослідження із особливостей використання БПЛА та програмного комплексу Leica Infinity, можуть бути використані для відображення системно упорядкованого та конкретизованого стану безпілотного дослідження територій, висвітлення проблем його розвитку та оновлення, рекомендацій можливих шляхів їхнього вирішення. Теоретичні й методичні положення роботи, окрім того, можна використовувати при аналогічних дослідженнях для інших територій населеного пункту або інших поселень. Результати досліджень можуть бути впроваджені при читанні освітніх компонент «Фотограмметрія», «Основи дистанційного зондування Землі» та «Використання БПЛА у геодезії та землеустрої».

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, доповнена списком використаних джерел, який налічує 57 найменування. Загальний обсяг роботи складає 68 сторінки машинописного тексту (основна частина на 58 сторінках). Робота супроводжується 5 таблицями та ілюструється 32 рисунками.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВИКОНАННЯ АЕРОФОТОТОПОГРАФІЧНОГО ЗНІМАННЯ

1.1. Огляд сучасного стану галузі великомасштабного повітряного знімання

Галузь аерофотозйомки – це швидкозростаючий сектор, який використовує літаки або дрони для збору даних високої роздільної здатності з метою картографування, моніторингу та аналізу різних сфер господарської діяльності, таких як інфраструктура, довкілля та сільське господарство. Вона використовує такі технології, як LiDAR та фотограмметричні підходи обробки даних, що зумовлено попитом на точні та ефективні геопросторові дані в урбанізації, розвитку інфраструктури та управлінні ресурсами. Ключові інновації включають аналіз за допомогою штучного інтелекту та інтеграцію передових датчиків для перетворення необроблених даних із подальшим залученням результатів у практичній діяльності, від міського планування до моніторингу навколишнього середовища [12].

Галузь інтегрує передові технології, такі як LiDAR для високоточних картографічних досліджень, фотограмметрію для створення 3D-моделей та складні системи візуалізації, такі як ГІС. Інерціальні навігаційні системи (INS) також мають вирішальне значення для точного геоприв'язування. Дрони стають все більш поширеними завдяки своїй здатності виконувати детальні обстеження менших територій, доповнюючи традиційні літаки з фіксованим крилом для більших проєктів.

Широко використовується для планування, будівництва та обслуговування доріг, залізниць, ліній електропередач та трубопроводів. Підтримує створення розумних міст та планування житлового фонду, комунальних послуг та дорожніх мереж. Також допомагає відстежувати зміни навколишнього середовища, моніторинг популяцій диких тварин та проводити екологічні дослідження. У сільському господарстві використовується для моніторингу врожаю, прогнозування врожайності та точного землеробства. Надає необхідні дані для оцінки та управління наслідками стихійних лих

Прогнозується, що світовий ринок значно зросте, зі сукупним річним

темпом (CAGR) близько 10,3 % з 2025 по 2032 рік. Це зростання підживлюється прискоренням урбанізації, ініціативами «розумних міст» та потребою в швидших та точніших даних порівняно з традиційними наземними дослідженнями.

При цьому галузь переходить від простого збору зображень до збору на основі даних, з дедалі більшим акцентом на аналітиці. Підприємства використовують аерофотодані для прийняття обґрунтованих рішень, і спостерігається сплеск попиту на аналітику в режимі реального часу для таких завдань, як моніторинг прогресу будівництва.

Штучний інтелект (ШІ) використовується для підвищення ефективності, особливо в таких сферах, як моніторинг дикої природи та аналіз зображень. Досягнення в сенсорних технологіях та розробка дронів eVTOL (літаки з електричним вертикальним зльотом і посадкою) забезпечують вищу точність та ефективність на великих площах.

Важливим також є розвиток програмного забезпечення. Розробляються нові підходи для автоматизації завдань, таких як обробка зображень, для досягнення значної економії часу.

Основними підходами виконання аерофототопографічного знімання є ортогональне та перспективне знімання. Перше передбачає знімання з такої висоти, щоб промені, що йдуть від центру об'єктива, були перпендикулярні до поверхні землі, що дає змогу отримати зображення без спотворень. Друге, перспективне, передбачає знімання з меншої висоти під кутом, що створює зображення з ефектом перспективи, але потребує додаткової обробки для створення топографічної карти [9].

Ортогональне знімання здійснюється строго перпендикулярно до поверхні землі, що забезпечує отримання зображення без спотворень і значно спрощує подальшу роботу над картою.

Перспективне знімання проводиться під кутом до поверхні землі, що створює ефект перспективи на фотографії. Це менш точний метод, але він може бути корисним для створення тематичних карт або для візуального аналізу місцевості.

Аерофототопографічне знімання – це процес отримання аерофотознімків

для створення топографічних карт, які використовуються для різних цілей, таких як геологічні та геоморфологічні дослідження, транспортне будівництво, а також для обліку природних ресурсів.

Отримані аерофотознімки потребують подальшої обробки для створення топографічної карти, яка включатиме фотограметричну обробку, дешифрування та нанесення на карту умовних знаків, визначення відстаней та площ.

Світовий ринок безпілотних літальних апаратів (БПЛА) оцінюється більш ніж у \$130 млрд, а за прогнозами до 2030 року зросте майже втричі, сягнувши близько \$490 млрд. Найбільші сегменти ринку – послуги для моніторингу інфраструктури (понад \$45 млрд), сільське господарство (\$32 млрд) та транспортна галузь (\$13 млрд). Зазначається, що до кінця 2025 року комерційні БПЛА стануть найбільшим сегментом ринку, обігнавши військові.

Найпопулярніші моделі БПЛА варіюються залежно від призначення, але до них належать дрони від DJI (наприклад, Mavic 3E Enterprise) та Autel, які часто використовуються військовими. У сільському господарстві популярні DJI Matrice 100 та Smarter Farming Package, а також AGCO Solo і Yamaha RMAX. В Україні також активно використовуються українські моделі, як наприклад ударний дрон Vampire.

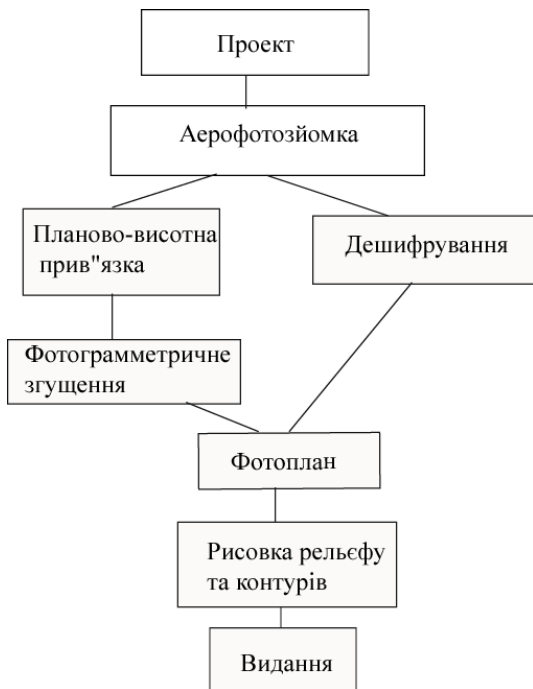
1.2. Сучасні технології виконання аерофототопографічного знімання

Аерофототопографічне знімання – це метод створення топографічних карт і планів місцевості шляхом обробки аерофотознімків, отриманих з літальних апаратів. Це поєднання аерофотозйомки, польових геодезичних робіт та камеральних фотограметричних робіт, що дозволяє визначати планове і висотне положення об'єктів.

Особливості аерофотознімання полягають у тому, що воно виконується з повітря за прокладеним маршрутом, який може бути як прямолінійним, так і криволінійним. Важливими аспектами є забезпечення перекриття сусідніх знімків для подальшого створення карт, використання специфічних технік для роботи з криволінійними маршрутами, а також вимоги до якості знімків, що

встановлюються для фотограмметричних робіт.

Ключовими особливостями є фотографування з повітря, яке виконується з літальних апаратів, що дозволяє охопити великі території. Зйомка проводиться заздалегідь розробленим маршрутом. Кожен наступний знімок повинен частково



перекривати територію попереднього. Це критично важливо для створення стереоскопічних моделей та точних карт.

Для складних об'єктів використовується метод криволінійного маршруту, який передбачає послідовні довороти літака для проходження по складній траєкторії. Існують суворі вимоги до якості аероматеріалів, які встановлюють правила щодо проміжку часу між зйомками та максимальних кутів довороту.

Обов'язковою при складанні топографічних карт та планів є планово-висотна прив'язка зображень.

Планово-висотна підготовка аерознімання – це процес визначення точних географічних координат (X,Y) та висот (Z) для точок на аерознімках, що є частиною геодезичної прив'язки. Ця підготовка необхідна для точного картографування та створення топографічних планів, оскільки вона забезпечує прив'язку аерофотознімків до місцевості та перетворює плоскі зображення на точні геопросторові моделі [10].

Етапи планово-висотної підготовки:

- 1) За допомогою наземних геодезичних вимірювань встановлюються координати характерних точок на аерознімках (наприклад, вершини об'єктів, перетини доріг);
- 2) точки зіставляються з контрольними точками, які мають вже відомі координати з державної геодезичної мережі;
- 3) включає визначення висотних координат точок за допомогою стереоскопічного аналізу аерознімків та даних наземних вимірювань.

Значення для створення карт

- планово-висотна підготовка забезпечує високу точність топографічних планів, що важливо для інженерних вишукувань, будівництва, картографування, а також для створення точних 3D-моделей місцевості.

- процес дозволяє систематизувати дані аерознімання, перетворивши їх на стандартизовані геопросторові дані, які можуть бути використані в різних системах.

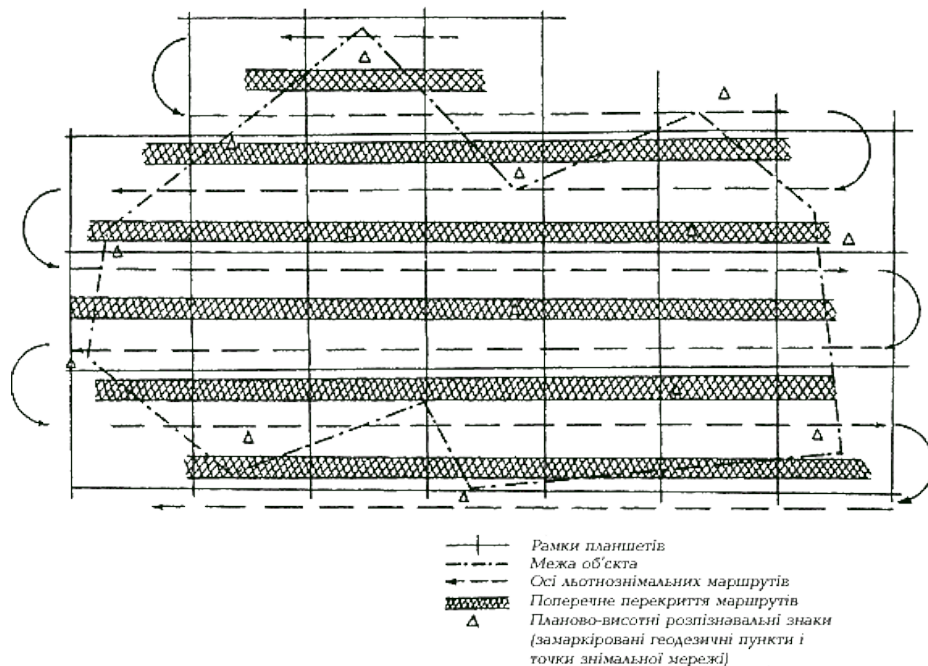


Рис 1.1. Схема планово-висотної прив'язки зображень

Для виконання планово-висотної підготовки, створюють розпізнавальні знаки. *Розпізнавальний знак*— це точка, яка чітко розпізнана як на фотозображенні так і на місцевості, після чого закріплена на місцевості одним з найпростіших центрів (кований цвях, кілок, штир, цвях у пні, фарба, вапно, окопка тощо) [23].

Проект розміщення розпізнавальних знаків виконують у графічних програмних продуктах, за допомогою котрих попередньо наносять:

- чорним кольором межі об'єкту знімання;
- синім кольором – номенклатурну розграфку планів;
- напрям осей запроектованих маршрутів аерознімання-зеленим кольором;
- всі пункти тріангуляції, полігонометрії і репери нівелювання-чорним кольором;
- перший маршрут суміщають з північною або південною границею

об'єкта або трохи на північ чи на південь від цієї границі;

- наносять центри всіх аерознімків, центри крайніх знімків розміщують за східною і західною границями об'єкту на віддалі 1-2 базисів фотографування;
- згідно з розрахунковою величиною поперечного перекриття маршрутів, зафарбовують їх жовтим кольором;

Розпізнавальний знак, для якого визначають планові координати X , Y , називають плановим розпізнавальним знаком, а для якого визначені висоти H – висотним розпізнавальним знаком. Розпізнавальний знак, для якого визначають і планові координати X , Y і висоти H називають планово-висотним розпізнавальним знаком.

Планова підготовка розпізнавальних знаків буває суцільною та розрідженою. З метою скорочення обсягів польових робіт, як правило, застосовують розріджену планову підготовку аерознімків. В цьому випадку планові розпізнавальні точки проєктують посередині смуг поперечного перекриття знімків.

Віддалі між плановими розпізнавальними точками в зонах поперечного перекриття повинні бути в одному ряду через 80-100 см в масштабі створюваного плану (1,5-2 км для масштабу 1:2 000), а в наступному через 160-200 см в масштабі створюваного плану (3,0-4 км для масштабу 1:2000). При цьому початок і кінець кожного маршруту повинен бути забезпечений розпізнавальними точками розміщеними за границями ділянки знімання. На північній та південній границях об'єкту планові розпізнавальні знаки розміщують в 2 рази густіше, тобто через 0,8-1 км. Планові розпізнавальні знаки на схемі позначають червоними кружечками діаметром 3 мм.

Опорними точками можуть бути: натуральні об'єкти з чітко окресленими контурами, які безпомилково розпізнаються на зображеннях; замарковані перед аерофотозніманням точки на місцевості спеціальними знаками правильної геометричної форми; такі точки пізніше на знімках розпізнаються безпомилково.

Вибір натуральних об'єктів в якості опорних точок залежить насамперед від вимог замовника до кінцевої продукції і зокрема від масштабу створюваної карти. Якщо карту створюють в масштабі 1:250 000, то це можуть бути будинки,

кути сільськогосподарських угідь, лісових масивів, перехресття доріг тощо. При великомасштабному картографуванні, наприклад, для створення топоплану в масштабі 1:2 000, це можуть бути: кут будівлі, люк підземних комунікацій, невисокий стовп, виступ бетонної огорожі, чітке перехресття доріг тощо. Загальна вимога наступна: опорна точка повинна бути розпізнана на знімку з точністю до 0,1 мм в масштабі створюваної карти чи плану. Не можна вибирати опорні точки на крутих схилах, бо це може спричинити помилки у визначенні висот; допустима величина помилки має бути не більше 1/10 від висоти перерізу рельєфу для створюваної карти [23].

Маркування опорних точок перед аерофотозніманням є надзвичайно важливим, бо тоді майже на 100 відсотків виключається можливість помилитись у розпізнаванні опорної точки на знімку та суттєво підвищується точність фотограмметричного візування на дану точку.

Маркувальний знак – це майже завжди правильна геометрична фігура – квадрат, прямокутник, круг, хрестоподібна, Г-подібна тощо. Розмір знака в натурі дорівнює $(0.3-0.5 \text{ мм}) \cdot M$, де M - знаменник масштабу знімка. Колір маркувального знака повинен забезпечувати максимальний контраст з поверхнею, на якій він викладається. На зеленому чи темному фоні найкраще читається білий знак. Матеріал для маркування - фарба, пісок, вапно та різний підручний матеріал.

Залежно від вимог, які ставляться до топографічного плану або карти, а також від визначеної технології виробництва робіт, виконують суцільні або розріджену прив'язку. При суцільній прив'язці кожна стереопара або аерофотознімок забезпечується необхідною кількістю опорних точок.

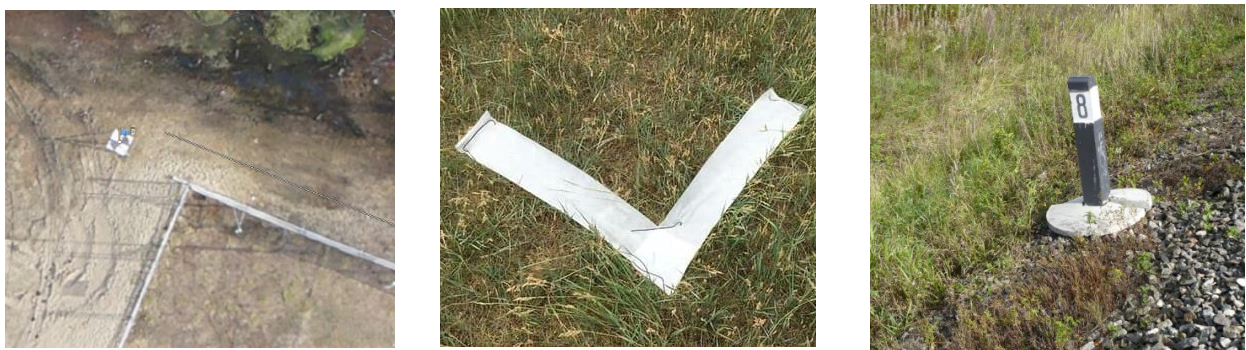


Рис. 1.2. Способи маркування території

Суцільна висотна підготовка виконується при створенні топографічних

планів з висотою перерізу рельєфу 0,25 м. Допускається також суцільна висотна підготовка при створенні планів масштабу 1:500-1:5 000 з перерізом рельєфу 0,5 м.

Розріджена прив'язка виконується, якщо точність послідовних фототріангуляційних робіт забезпечить необхідну точність створення плану або карти. Це основний вид прив'язки при середньомасштабному і великомасштабному картографуванні незабудованих територій.

Залежно від вибраної технології робіт виконується розрахунок густоти планово-висотних і висотних опознаків, забезпечуючих точність плану або карти, що створюється.

Похибки взаємного положення точок на плані не повинні перевищувати 0,4 мм.

При складанні проекту розташування опознаків враховується метод фотограмметричного згущення. При аналітичній і аналоговій фототріангуляції опознаки проектують рядами, розташованими поперек аерофотознімального маршруту [22].

Після зйомки виконується дешифрування, тобто розпізнавання та позначення об'єктів на знімках умовними знаками. Воно буває візуальним та інструментальним. Аерофотознімання є основою для створення топографічних карт, а також використовується в геологічних, геоморфологічних, лісогосподарських та інших дослідженнях.

1.3. Аналітичний огляд БПЛА

Принцип роботи та класифікація БПЛА

БПЛА працюють, використовуючи комбінацію аеродинамічних принципів та систем керування для польоту, причому їхній рух визначається чотирма силами: підйомною силою, опором, тягою та вагою. Контролер польоту, який отримує команди від віддаленого оператора або попередньо запрограмовані інструкції, керує двигунами для регулювання швидкості обертання пропелерів. Ця маніпуляція швидкістю обертання пропелерів дозволяє БПЛА контролювати свій рух, дозволяючи йому зависати, підніматися, опускатися або рухатися в будь-якому напрямку.

Контролер польоту отримує вхідні дані від пілота або автономної системи та дані від датчиків. Потім він надсилає сигнали двигунам для підтримки стабільності та керування рухом.

Двигуни перетворюють електричну енергію з акумулятора в механічну енергію для обертання пропелерів.

Електронний регулятор швидкості (ESC) контролює швидкість кожного двигуна, регулюючи напругу на основі команд від контролера польоту.

Пропелери створюють підйомну силу, необхідну для протидії силі тяжіння. Змінюючи швидкість різних пропелерів, БПЛА може контролювати свій тангаж, крен та рол [29].

Датчики (GPS, гіроскопи та акселерометри), надають дані контролеру польоту про положення та орієнтацію БПЛА, дозволяючи йому самостабілізуватися. Керування та рух

Усі пропелери обертаються з постійною швидкістю, створюючи підйомну силу, достатню для ваги БПЛА, утримуючи його нерухомим. Підйом/Спуск: Для збільшення висоти швидкість усіх пропелерів збільшується; для зниження вона зменшується. Рух вперед/назад: Збільшення швидкості задніх пропелерів та зменшення швидкості передніх рухає БПЛА вперед. Зворотний рух досягається шляхом реверсування цього руху. Поворот (рол): Для повороту ліворуч швидкість правих пропелерів збільшується, а швидкість лівих пропелерів зменшується. Протилежне робиться для повороту праворуч. Крен (тангаж/крен):

Для нахилу або крену швидкість двигунів з одного боку регулюється відносно іншого.

БПЛА можна класифікувати за різними критеріями, включаючи їхню фізичну конструкцію, таку як з фіксованим крилом, гвинтокрил або гібридні; їх розмір і вагу, від нано до великих; їхню дальність і тривалість польоту, від моделей дуже близької до далекої дальності; та їхнє застосування, таке як військове, цивільне, сільськогосподарське або комерційне використання. Інші методи класифікації включають тип двигуна, висоту польоту, рівень автоматизації та вантажопідйомність.

Класифікація за конструкцією

- з фіксованим крилом – нагадують традиційні літаки та потребують злітно-посадкової смуги для запуску та посадки (хоча деякі можна запускати вручну);

- гвинтокрилі - використовують ротори для досягнення підйомної сили та маневреності. До них належать одномоторні гелікоптери та багатороторні системи, такі як квадрокоптери, гексакоптери та октокоптери.

- гібридні – поєднують характеристики конструкцій з фіксованим крилом та гвинтокрилих, щоб скористатися перевагами кожної з них.

Класифікація за розміром і вагою [42]:

- нано (менше 250 грамів);
- мікро (від 250 грамів до 2 кг) ;
- малі (від 2 кг до менше 25 кг) ;
- середні (від 25 кг до 150 кг) ;
- великі (150 кг та більше)

Класифікація за дальністю польоту та тривалістю польоту

- дуже близький: дальність менше 5 км, тривалість польоту менше 0,75 години.

- близький: дальність від 5 до 50 км, тривалість польоту 1-6 годин.

- малий: дальність від 50 до 150 км, тривалість польоту 8-12 годин.

- середній: дальність від 150 до 650 км, тривалість польоту 12-36 або 48 годин.

- великий: дальність понад 650 км, тривалість польоту понад 36 або 48 годин.

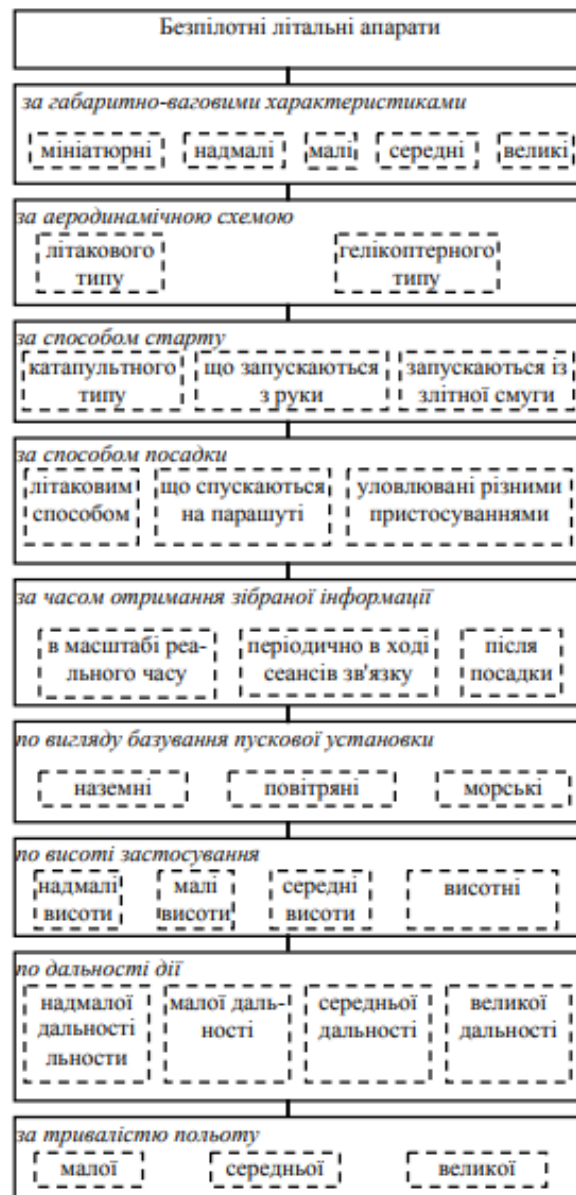


Рис.1.3. Класифікація за технічними ознаками

Класифікація за застосуванням:

- військові: використовуються для таких завдань, як розвідка, спостереження та бойові дії.
- цивільний: використовуються для широкого кола цілей, таких як фотографування, доставка та будівництво.
- сільськогосподарські: використовуються для моніторингу посівів, обприскування та інших завдань, пов'язаних із сільським господарством.

Конструкція та характеристики

Конструкція БПЛА базується на модульності та ефективності,

використовуючи легкі матеріали, такі як вуглецеві композити, для максимізації корисного навантаження та часу польоту. Ключові характеристики різняться залежно від типу: БПЛА з фіксованим крилом пропонують більшу тривалість та дальність польоту, тоді як багатороторні дрони відомі своїми можливостями вертикального зльоту та посадки (VTOL) та стабільністю зависання, але мають менший час польоту та дальність польоту. Обидва вимагають передових систем керування польотом, часто використовуючи зворотний зв'язок для коригування поведінки, та джерел живлення, починаючи від акумуляторів і закінчуючи паливними елементами, для тривалих місій.

Аспекти проектування

У конструкціях часто пріоритет надається модульним компонентам, таким як змінні крила та хвостові секції, щоб адаптувати БПЛА до різних місій. Оскільки БПЛА повинні нести датчики, електроніку та корисне навантаження, виробники пріоритет надають легким матеріалам, таким як вуглецеві композити, щоб максимізувати ефективність, дальність польоту та вантажопідйомність.

Конструкція повинна підтримувати структурну цілісність, мінімізуючи при цьому вагу порожнього літального апарату. Для балансування міцності та ваги використовуються передові методи, такі як аналіз кінцевих елементів.

Джерело живлення:

- акумулятори – звичайні для менших дронів, але важкі, що вимагає легшого планера.

- паливні елементи з протонно-обмінною мембраною (PEMFC) використовуються для досягнення більшого часу польоту та тривалості польоту, особливо для конструкцій з фіксованим крилом.

Аеродинаміка: Такі особливості, як вигнуті носи для оптимальної аеродинаміки та обтічні конструкції, важливі для ефективності.

Роглянемо ключові характеристики різних БПЛА

БПЛА з фіксованим крилом мають довший час польоту, більша дальність польоту та краща тривалість польоту. Проте, як правило, для зльоту та посадки потрібна злітно-посадкова смуга, на відміну від багатороторних дронів.

Багатороторні БПЛА здатні до вертикального зльоту та зависання,

високомодульні, відносно доступні та недорогі ,але мають коротший час польоту, меншу вантажопідйомність та обмеженк дальність польоту.

БПЛА на сонячних батареях зазвичай великомасштабні, легкі та мають низьку швидкість польоту, що може зробити їх схильними до деформації крила.

Продуктивність:

Витривалість: Може коливатися від менше години для менших дронів до понад 17 годин для більш просунутих моделей з фіксованим крилом на паливних елементах. Швидкість: Значно варіюється залежно від конструкції, деякі екземпляри рухаються зі швидкістю близько 40 кілометрів на годину. Маневреність: Безпілотні літальні апарати можуть виконувати більш різкі маневри, ніж пілотовані літальні апарати, обмежені лише міцністю конструкції (наприклад, обмеженнями перевантаження).

РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

АЕРОФОТОЗНІМАННЯ

Програмні засоби забезпечення аерофотознімання — це спеціалізоване програмне забезпечення, яке використовується на всіх етапах аерофотознімального процесу: від планування польоту безпілотної літальної апарату (БПЛА) чи літака до обробки отриманих знімків і створення кінцевих геопросторових продуктів, таких як ортофотоплани, цифрові моделі місцевості (ЦММ) та 3D-моделі.

Програмне забезпечення для аерофотознімання можна поділити на три основні функціональні групи:

1. Програми для планування та управління польотом (Data Acquisition). Ці засоби необхідні для підготовки та виконання місії. Дозволяють задати область зйомки, висоту польоту, рівень перекриття знімків (поздовжнього та поперечного), швидкість та параметри камери для забезпечення необхідної роздільної здатності. Забезпечують автономний політ дрона по заданому маршруту, автоматичний спуск затвора камери у потрібних точках та моніторинг стану апарату в реальному часі. До цієї групи входять DJI Pilot/Terra, DroneDeploy, Pix4Capture.

2. Програми для фотограмметричної обробки (Data Processing). Це найбільш важлива група, яка перетворює набір окремих знімків на точні геопросторові продукти. Зрівнювання та орієнтування знімків: Визначають точне положення та орієнтацію кожного знімка в просторі (тріангуляція). Будують щільну тривимірну хмару точок, що відображає геометрію об'єктів на місцевості. Генерують цифрову модель місцевості (ЦММ/ЦМР), модель висот поверхні, ортофотоплан та 3D-моделі території. До них відносять Agisoft Metashape, Pix4D Mapper, Bentley ContextCapture.

3. Геоінформаційні системи (ГІС) та засоби аналізу. Використовуються для подальшого аналізу та інтеграції отриманих результатів. Дозволяють проводити вимірювання, класифікацію об'єктів, розрахунок об'ємів, векторизацію (перетворення зображень на цифрові карти). Інтегрують ортофотоплани та ЦММ з іншими геоданими (наприклад, кадастровими картами) та створюють фінальні

тематичні карти. Найпопулярнішими на теперішній момент є продукти ArcGIS та QGIS.

2.1. Мобільні додатки з організації аерофотознімання

Мобільні додатки з організації аерофотознімання – це спеціалізовані програмні додатки для смартфонів або планшетів, які використовуються для планування, виконання та моніторингу польотів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з метою отримання аерофотознімків.

По суті, вони є інтерфейсом між оператором і дроном, що перетворює складний процес польоту та зйомки на автоматизовану місію.

Ці додатки виконують критично важливі *функції* на етапі збору даних:

1. Планування місії (Route Planning).

- визначення області зйомки: Користувач на карті (зазвичай на основі Google Maps або супутникових знімків) задає межі території, яку необхідно зняти;

- автоматичне генерування маршруту: додаток самостійно розраховує оптимальну траєкторію польоту (сітку або смуги) з урахуванням: висоти польоту, що впливає на роздільну здатність знімків, врахування ерекриття знімків, що забезпечує необхідний відсоток поздовжнього та поперечного перекриття (зазвичай 60-80%), що є критичним для подальшої фотограмметричної обробки. Налаштування швидкості та орієнтації дрона та налаштування параметрів камери: Дозволяє налаштувати кут нахилу підвісу, інтервал зйомки, витримку та ISO.

2. Управління польотом (Flight Control).

Автономний старт/політ, а саме після завантаження плану місії додаток надсилає команди дрону для автоматичного зльоту, виконання польоту по точках маршруту та зйомки. Забезпечує моніторинг у реальному часі (FPV): Відображення на екрані мобільного пристрою того, що бачить камера дрона, а також ключових телеметричних даних (висота, швидкість, заряд батареї, GPS-координати). Доступні також аварійні функції, дозволяючи втрутитися в автоматичний політ, перехопити керування або активувати функцію повернення додому (Return to

Home).

3. Збір та перевірка даних, зокрема геотегування із автоматичним присвоєнням кожному знімку точних географічних координат та висоти (геотегів), що значно спрощує подальшу обробку. Тут же, йде зереження логів польоту, що містять інформацію про маршрут, час, кількість зроблених знімків та їхню якість.

Розглянемо найпопулярніші мобільні додатки з організації аерофотознімання.

DJI Fly — це мобільний додаток від компанії DJI, який використовується для керування дронами, зйомки фото та відео, а також для їх редагування та обміну. Він призначений для спрощення керування дроном завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу та пропонує функції, такі як навчальні посібники для новачків, можливість миттєвого редагування контенту та доступ до соціальної мережі SkyPixel для обміну своїми аерофотознімками та відео.

DJI Pilot— це застосунок, призначений переважно для корпоративних дронів, який пропонує професійні функції, такі як передача HD-зображень у режимі реального часу, детальне планування польоту та розширене керування камерою. Огляд його останньої версії, DJI Pilot 2, виділяє зручний інтерфейс, контрольні списки перед польотом та інтегроване керування станом. На противагу цьому, споживчі дрони DJI, такі як серії Mavic, Mini або Air, використовують застосунок DJI Fly, а не DJI Pilot. Тобто для корпоративних дронів (Matrice, Mavic 3 Enterprise тощо), використовуйте DJI Pilot, а для споживчих дронів (Mavic, Mini, Air тощо): Використовуйте DJI Fly.

DJI Pilot має новий, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача та розроблений для корпоративних контролерів, з кнопками, розташованими для легшої навігації, особливо в рукавичках. Він підтримує розширені польотні місії, такі як картографування точок маршруту, та пропонує такі функції, як синхронізація записів польоту в режимі реального часу.



Рис. 2.1. Лого програмної лінійки DJI та вигляд додатку DJI Fly

Користувачі можуть налаштовувати параметри камери для отримання професійних результатів та переглядати різні зображення камери, такі як масштабування та ІЧ (тепловізійне), у вигляді поруч.

Застосунок включає систему керування станом та функції безпеки, такі як розблокування геозони та режим локальних даних. Вбудований контрольний список допомагає переконатися, що всі системи функціонують належним чином перед зльотом.

DroneDeploy – це програмна платформа для автоматизації польотів дронів, яка дозволяє створювати високоякісні аерофотознімки, карти (ортофотоплани) та 3D-моделі. Вона використовується для планування місій, збору даних та їх аналізу в різних галузях, таких як будівництво, сільське господарство, геодезія, гірничодобувна промисловість та сонячна енергетика. Основна функція програми – автоматизація польотів для отримання точних та стандартизованих даних (рис. 2.2).

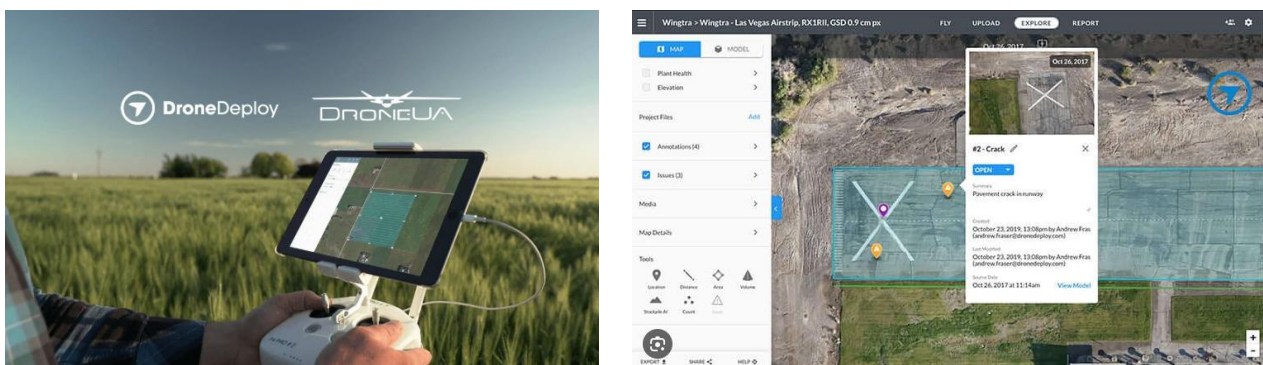


Рис. 2.2. Вигляд програмного продукту DroneDeploy

Ключові можливості: Автоматизовані польоти: Забезпечує легке планування та виконання складних польотних місій без участі оператора, включаючи зліт, політ і посадку.

Збір та аналіз даних: Дозволяє збирати фото, відео та панорами, а також створювати інтерактивні карти та 3D-моделі безпосередньо з мобільного пристрою.

Картографування в реальному часі: Надає можливість оцінювати дані безпосередньо під час польоту, навіть без підключення до інтернету.

Використовується для різних задач, таких як:

- сільське господарство: розрахунок вегетаційних індексів, підрахунок врожайності, виявлення бур'янів тощо.

- будівництво: моніторинг прогресу будівництва, створення карт майданчиків.

- геодезія та інспекції: інспектування споруд, геодезичні дослідження.

Pix4Dcapture – це безкоштовна програма для планування польотів дронів, яка дозволяє оптимізувати збір даних для картографування та створення тривимірних моделей місцевості. Вона допомагає автоматично створювати плани польотів, щоб забезпечити професійну та точну зйомку з повітря (рис. 2.3).

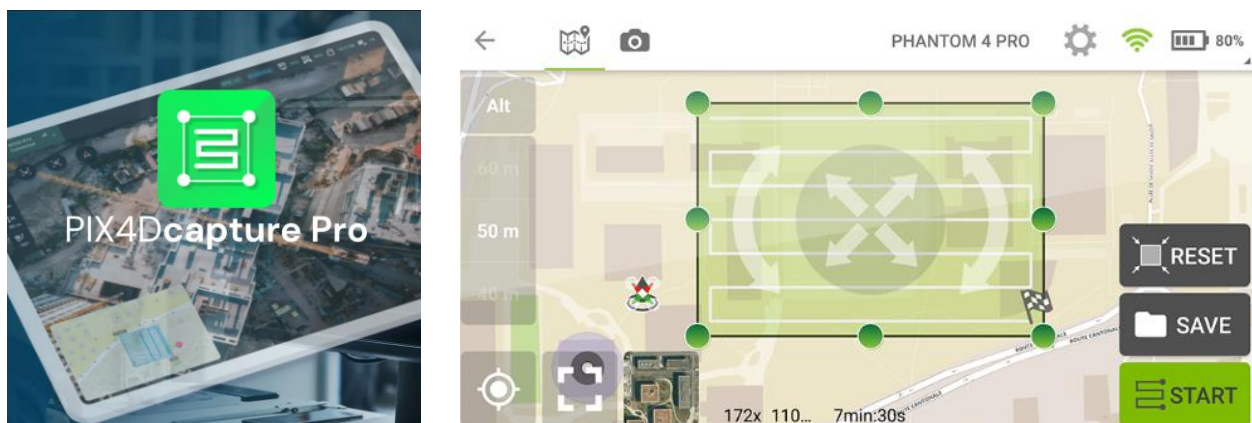


Рис. 2.3. Вигляд додатку Pix4Dcapture

Ключові функції:

Планування польотів: Дозволяє автоматично створювати маршрути для картографування та збору даних.

Збір даних: Програма керує дроном для оптимального збору фотографій з повітря, які потім використовуються для створення 3D-моделей.

Автоматизація: Дозволяє автоматично завантажувати фотографії зі смартфона або планшета після завершення польоту, а також синхронізувати їх з хмарним сервісом Pix4D Cloud.

Pix4Dcapture Pro: Нова версія програми, яка включає розширення Mission Planner, що дає можливість планувати польоти в Інтернеті через веб-браузер.

Підтримка RTK: Сумісна з найновішими моделями дронів, оснащеними RTK, для точних вимірювань.

Мобільні додатки зробили аерофотознімання більш доступним, швидким та автоматизованим, дозволяючи операторам зосередитися на якості даних, а не на ручному керуванні БПЛА.

2.2. Програмні продукти обробки результатів аерофотознімання

Аерофотознімання стало одним із ключових методів збору геопросторових даних у різних галузях. Воно широко використовується в геодезії, картографії, будівництві, сільському господарстві, екології та інших сферах для оперативного отримання актуальної інформації про місцевість. З розвитком БПЛА (дронів) та безпілотних літальних апаратів аерофотографія отримала новий імпульс: завдяки доступності та швидкості виконання робіт фотозйомка з дронів практично витіснила авіацію для локальних завдань, забезпечуючи високу точність знімання та підвищуючи ефективність інженерних і аграрних проєктів. У сільському господарстві, зокрема, аерофотознімання застосовується для інвентаризації площ, моніторингу стану полів і врожайності, складання карт ґрунтово-рослинних показників тощо.

Аерофотознімання: забезпечує швидке та точне створення високодетальних цифрових моделей місцевості (ЦМР) та ортофотопланів, необхідних для планування, моніторингу та контролю робіт. Наприклад, за допомогою аерофотознімання успішно картографували вершину Маттерхорну та статую Христа-Спасителя. У будівництві та інфраструктурі фотограмметрія використовується для створення топографічних планів і 3D-моделей об'єктів, у тому числі для контролю будівельних робіт і моніторингу деформацій. Сучасні системи зображень (GPS, ЛБПА, сенсори) дають змогу оперативно охоплювати великі території, робити детальну (до субметрової чи сантиметрової похибки) прив'язку знімків до реальних координат.

Етапи обробки аерофотознімання

Типова обробка аерофотознімальних даних складається з кількох ключових етапів:

1) *планування і збір даних* – вибір режиму і параметрів знімання (маршрут польоту БПЛА, висота, перекриття кадрів тощо), калібрування камери, збір знімків із супутніми метаданими (GPS-координати, час зйомки). Часто використовуються спеціальні мобільні додатки для автоматичного планування польоту (наприклад, Pix4Dcapture).

2) *попередня обробка зображень* – конвертація та корекція фотографій, врахування екстремальних значень експозиції, радіометрична корекція та калібрування (визначення внутрішніх параметрів камери: фокусної відстані, дисторсії).

3) *стереофотограмметрична обробка (SfM)* – пошук спільних точок (ключових ознак) на перекритих знімках і геометричне вирівнювання зображень (bundle block adjustment). На цьому етапі програмне забезпечення автоматично зіставляє тисячі пари ключових точок, визначає положення і орієнтацію камер та створює розріджену хмару контрольних точок (sparse point cloud) і «хмара променів» (ray cloud).

4) *побудова щільної хмари точок* – з використанням алгоритмів багатозображувального стереозору (Multi-View Stereo) генерується густа точкова хмара з мільйонів точок, що описують детальну тривимірну форму поверхні. Потім створюється полігональна 3D-мережа (mesh) та наноситься текстура із вихідних знімків.

5) *генерація цифрової моделі рельєфу (ЦМР)* – із щільної хмари точок вилучається цифрова модель поверхні (DEM/DTM), яка відображає висоти місцевості.

6) *ортотрансформування і створення ортофотоплану* – на основі DEM зображення «вирівнюються» по рельєфу – виконується геоприв'язане перетворення для отримання єдиного ортофотоплану. Кінцевий продукт – ортозображення (наприклад, у форматі GeoTIFF) – геоприв'язане і вільне від перспективних спотворень.

7) *аналіз і візуалізація* – одержані 3D-дані (моделі, ортофотоплани) використовуються для вимірювань (довжини, площі, об'єми), складання тематичних карт, інженерних розрахунків. Можлива класифікація хмар точок, інтеграція з ГІС-системами тощо.

Кожен етап може опрацьовуватися різними програмами: від готових фотограмметричних пакетів (які виконують усі стадії «під ключ») до окремих інструментів (алгоритми SfM, редактори хмар точок, спеціалізовані плагіни).

Програмні засоби на різних етапах обробки

Для фотограмметричної обробки та подальшої роботи з результатами часто використовують комплекси програм:

- планування польоту: мобільні додатки (Pix4Dcapture, DroneDeploy, MapPilot тощо) для автоматичного створення маршрутів зйомки. Pix4Dcapture, зокрема, безкоштовно дозволяє створювати місії польоту з урахуванням типу дрона і ракурсів;

- калібрування та первинна обробка: наприклад, інструменти OpenCV або Camera Calibration Toolkit, а також вбудовані модулі у фотограмметричних програмах, де виконується внутрішня калібрування камери та корекція дисторсії;

- обробка SfM і побудова 3D: провідні комерційні пакети – Agisoft Metashape (раніше PhotoScan) і Pix4Dmapper – реалізують весь цикл фотограмметричної обробки: від з'єднання знімків до побудови моделей і DEM. Аналоги – ContextCapture (Bentley), RealityCapture, DroneDeploy та інші. Є також відкриті SfM-бібліотеки: COLMAP, OpenDroneMap, MicMac, Meshroom (AliceVision);

- редагування хмари точок і ЦМР: часто використовуються інструменти огляду і обробки хмар точок (CloudCompare, LASTools, QGIS/LIDAR-плагіни тощо), а також модулі у згаданих пакетах (наприклад, класифікація хмар точок у Metashape, ручне редагування хмар у Pix4D);

- орто- та карти: геоінформаційні системи (QGIS, ArcGIS) або вбудовані модулі фотограмметричних продуктів (генерація ортофото у Metashape, Pix4Dmapper) використовуються для складання фінальних карт.

Кожен із цих етапів потребує специфічного програмного забезпечення, яке може відрізнятися за можливостями та форматом вхідних/вихідних даних. Далі розглянемо детально деякі популярні рішення – Agisoft Metashape, Pix4D (Pix4Dcapture/Pix4Dmapper) та Leica Infinity.

Більш детально розглянемо ці три програмні комплекси

Agisoft Metashape

Agisoft Metashape – самостійний програмний продукт для фотограмметричної обробки цифрових знімків. За допомогою Metashape можна автоматично обробити аерофотознімки та згенерувати геопросторові дані для ГІС, архітектури, культурної спадщини тощо. Серед ключових функцій Metashape (професійне видання) – триангуляція фотознімків (SfM) з автоматичним вирахуванням внутрішніх і зовнішніх параметрів камер, будова густої хмари точок та 3D-моделі, створення і редагування цифрових моделей рельєфу, формування ортофотоплану і стереопар, класифікація хмари точок (автоматично чи вручну). Програма підтримує роботу із супутниковими та аерознімками різних форматів, обробку багатоспектральних даних, інтеграцію із системами супутникового позиціювання (GPS/GNSS) та керованими маркерами (GCP) для геоприв'язки. Metashape дозволяє імпортувати/експортувати точки, лінії, ортофотоплани, DEM у поширених форматах (GeoTIFF, KML тощо), а також мережі (mesh) з текстурями.

Переваги Metashape: велика гнучкість налаштувань, можливість тонкого регулювання точності побудови (розподілений підхід до калібрування, фільтрація хмари тощо). Завдяки цьому професійне видання часто використовується для наукових досліджень у геонауці, археології та інших галузях (можливість роботи з опорними пунктами, експорт DEM і прив'язаного ортомозаїки). Зокрема, у магістерських роботах зазначається, що Agisoft Metashape – основне комерційне SfM-ПЗ для геології та археології. Програма працює локально, інтенсивно використовуючи обчислювальні ресурси (CPU/GPU), що дозволяє одразу виконувати обробку без підключення до інтернету. Після купівлі ліцензії подальші оновлення (протягом року) безкоштовні.

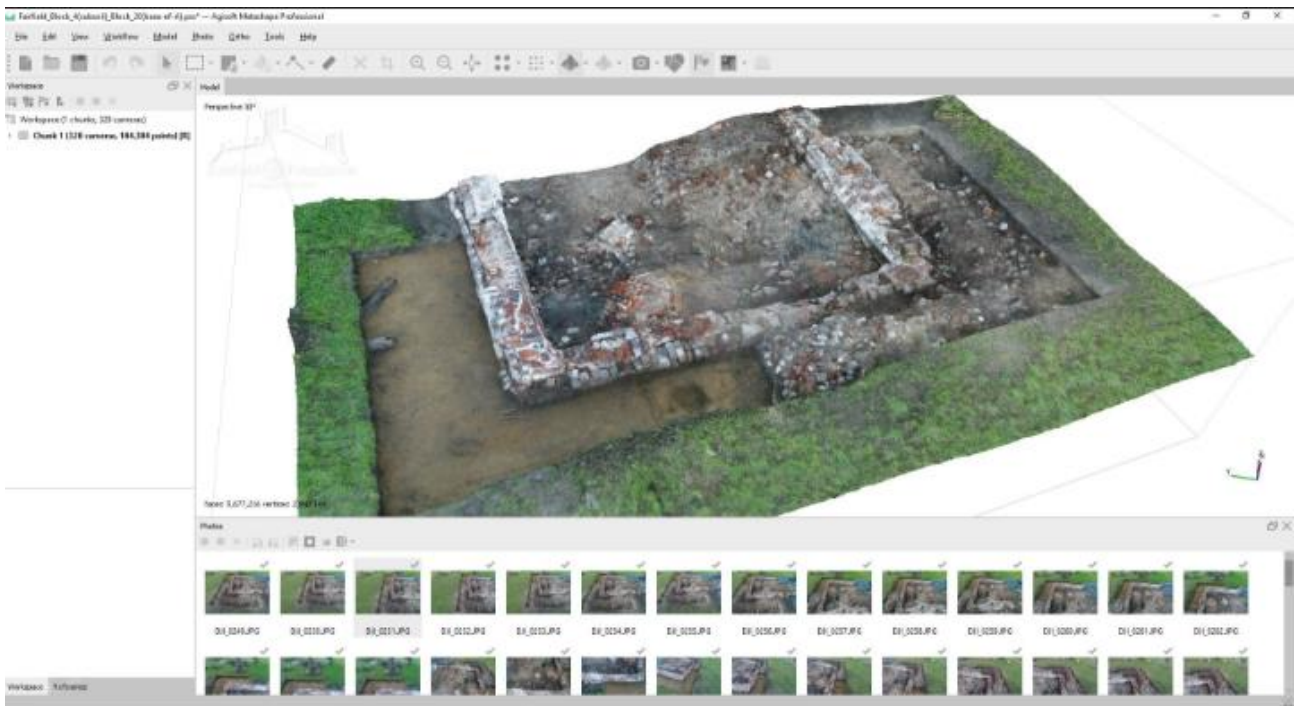


Рис. 2.4. Вигляд додатку Agisoft Metashape

Недоліки Metashape: висока вимогливість до апаратного забезпечення (велика оперативна пам'ять, потужний GPU потрібні для швидкої побудови хмари та текстуровання). Інтерфейс доволі «насичений» опціями, тому для початківців може бути складним. Деякі параметри, як-от рівні фільтрації або алгоритми згладжування, потребують експериментальної оптимізації. Metashape продається як разова ліцензія: Standard (\$179) та Professional (\$3499) (також доступні академічні знижки). Власники ліцензії самі відповідають за обчислювальні потужності, адже обробка йде локально.

Pix4D (Pix4Dcapture, Pix4Dmapper)

Pix4D – швейцарська компанія, що спеціалізується на пакетах ПЗ для аерофотограмметрії. Основним продуктом є *PIX4Dmapper* – програмний комплекс для перетворення аерофото- та наземних знімків у точні геоприв'язані карти і 3D-моделі. Для збору даних існує безкоштовний мобільний додаток *Pix4Dcapture* (Android/iOS), який спрощує планування польоту дрона: достатньо намалювати маршрут, і дрон автоматично виконує зйомку. Зібрані зображення імпортуються до *Pix4Dmapper*, де відбувається обробка – від зв'язування знімків (bundle adjustment) до генерації результатів.

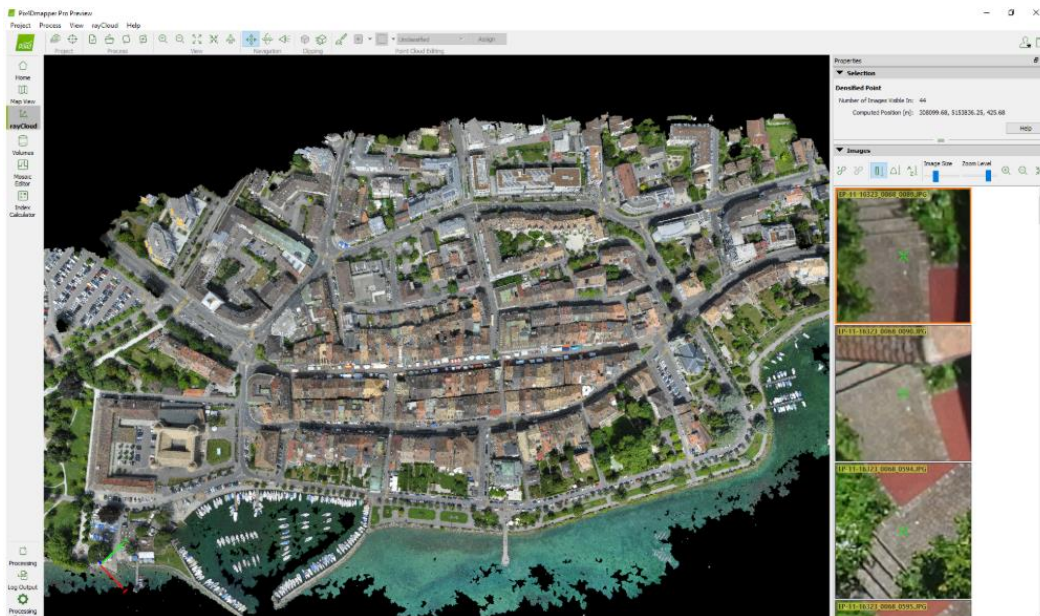


Рис. 2.5. Інтерфейс додатку Pix4Dcapture

Функціональні можливості Pix4Dmapper включають: обробку RGB-, теплових та багатоспектральних знімків, автоматичне розпізнавання параметрів камер, рендеринг розріджених і густих хмар точок, генерацію мережі та ортофотоплану. За заявою розробників, Pix4Dmapper дає «survey-grade» результати з субсантиметровою точністю (1–2 пікселя по XY та 1–3 пікселя по Z). Інструмент містить інтуїтивний інтерфейс rayCloud для контролю якості (зв'язок кожної точки хмари з вихідними знімками), а також можливості вимірювань відстаней, площ та об'ємів поверхонь.

Переваги Pix4D: висока швидкість і простота використання, особливо для рутинних завдань. Шаблони обробки дають стабільний результат «із коробки», що цінується у комерційних проєктах і сільському господарстві. Pix4D має хмарну платформу (Pix4Dcloud), що дозволяє передавати знімки на віддалені сервери і не залежати від локального комп'ютера. Наприклад, невеликі команди можуть обробляти 50+ ГБ даних, завантаживши на сервери Pix4D. Додатково є спеціалізовані модулі – *Pix4Dfields* (аналіз посівів, NDVI-карти), *Pix4Dreact*, *Pix4Dsurgery* тощо.

Недоліки Pix4D: підхід «автоматичного режиму» дає менше контролю над деталями: у випадку складних чи «шумних» наборів даних налаштування можуть бути обмеженими. Наприклад, у деяких дослідках Metashape виявив більше дрібних деталей архітектури, ніж Pix4D при стандартних налаштуваннях.

Оскільки Pix4D зареєстрований до підписки, при тривалому використанні вартість може бути вищою (щомісячна підписка на Pix4Dmapper ~\$370) з включеним хмарним сховищем. Ліцензія активна тільки під час оплати; для команд, що масштабуються, потрібні кілька підписок. Проте підписка знижує початкові витрати та включає оновлення і підтримку.

Leica Infinity

Leica Infinity – офісне програмне забезпечення від Leica Geosystems для управління та обробки геодезичних даних. Воно призначене для обробки результатів GNSS-вимірювань, тахеометричної зйомки, нівелювання та інших польових вимірів. Крім звичайної векторної обробки, Infinity містить «Imaging» модуль, що дозволяє генерувати хмари точок із фотознімків та вимірювати координати точок на зображеннях (обробка даних тотальноготахеометра з інерційною системою GNSS, наприклад Leica GS18 I) eprints.kname.edu.ua.

Leica Infinity інтегрується з польовим ПЗ Leica Captivate – дані з контролера (GNSS, тахеометр, цифрова камера) імпортуються в офісну програму для подальшої обробки і калібрування. Infinity підтримує повний цикл обробки – від завантаження необроблених вимірювань до отримання кінцевих звітів eprints.kname.edu.ua. Серед ключових функцій – обробка даних тахеометрів (включаючи накладання рівнів, компенсацію нахилу, експорт відстаней/кутів), обчислення результатів GNSS на основі базових станцій, побудова 3D поверхонь (з набору виміряних точок), а також потужні інструменти візуалізації результатів у 3D. Програма дозволяє імпортувати та експортувати велику кількість форматів (Leica SmartWorx, ASCII, DXF/DWG, SHP, PTS/PTX, LAS/LAZ та інші) для сумісності з іншими CAD/GIS-системами.

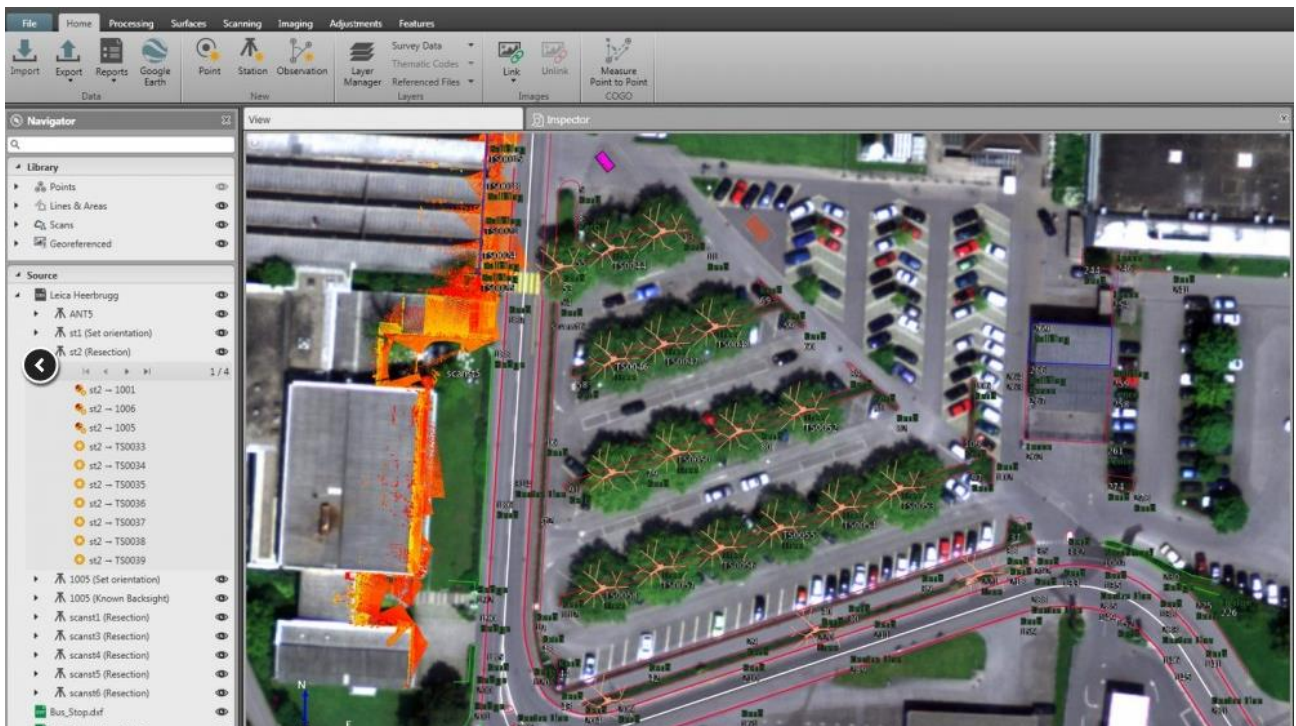


Рис. 2.6. Робоче вікно програмного комплексу Leica Infinity

Переваги Infinity: забезпечує єдиний конвеєр обробки геодезичних даних «поле–офіс» для користувачів обладнання Leica. Інтуїтивний інтерфейс орієнтований на інженерно-геодезичні workflows, які поєднують GNSS, тахеометри і сканери. Infinity спрощує контроль якості вимірів та побудову звітів, дозволяє візуалізувати результати у 3D в режимі реального часу. Велика кількість підтримуваних форматів і можливість складати хмарні бази GNSS даних роблять Infinity гнучким у роботі з різними наборами даних.

Недоліки Infinity: на відміну від чисто фотограмметричних систем, Infinity не призначено для великомасштабної обробки аерофотознімків (визначення тисяч точок на літаку). Його силою є інтеграція зі спеціалізованими приладами Leica, але для деталізованого 3D-модельовання із сотень знімків швидших методів краще використовувати окремі пакети (Metashape, Pix4D). Крім того, Infinity випускається в основному як компонент ліцензії Leica (позначається як підписка/або perpetual залежно від договору), і орієнтований переважно на клієнтів, що вже користуються Leica-обладнанням.

2.3. Прикладні аспекти використання додатків

Вибір ПЗ для обробки аерофотознімання залежить від конкретних завдань і ресурсів. *Agisoft Metashape* краще підходить, коли потрібна максимальна точність та глибоке налаштування процесу (наукові дослідження, деталізоване моделювання). *Pix4Dmapper* ефективніший у комерційних і масових застосунках – дозволяє швидко отримувати якісні результати «під ключ» і вивантажувати обчислення в хмару. В аграрних і будівельних проєктах його функціонал оптимізований для стандартних задач (карт урожайності, моніторинг будмайданчиків). *Leica Infinity* доцільно використовувати разом з обладнанням Leica у традиційних геодезичних роботах – він забезпечує єдину середу для обробки GNSS/тахеометричних вимірів, проте має обмежені фотограмметричні можливості.

Таблиця 2.1. Порівняльна таблиця програм

Кри- терій	Agisoft Metashape	Pix4Dmapper (+Pix4Dcapture)	Leica Infinity
Точність	Дуже висока за правильної настройки, можливість суб-метрової/сантиметрової точності (професійна версія). Повне використання GCP і жорсткі алгоритми SfM.	Висока («survey-grade»), за замовчуванням ~1–3 пікселі помилки по осях. Менший контроль за деякими деталями, але для більшості задач достатньо.	Висока точність GNSS і тахеометра для топографічних вимірів, фотограмметричні можливості обмежені (більш підходить для маркування точок на зображеннях). Підтримка контрольних точок для підвищення точності.
Швид- кість	Ресурсоємний локальний розрахунок. Швидкість залежить від комп'ютерного заліза (ефективно використовує потужний GPU). На слабких ПК – повільна.	Швидкість на боці хмарної обробки (опційно Pix4Dcloud) або локально. Стандартна обробка досить швидка, шаблони оптимізовані для швидкого отримання результату. Передача великих наборів даних в хмару потребує інтернет-каналу.	Працює локально в офісі. Швидкість залежить від типу обробки (розв'язання базових ліній GNSS, обчислення тахеометра) – загалом відповідає сучасним робочим станціям. Не має хмарної опції.
Інтер- фейс	Багатофункціональний інтерфейс з великою кількістю налаштувань і модулів. Вимагає навчання, але дозволяє детально контролювати процес.	Зручний інтерфейс з фокусом на покроковому workflow (rayCloud). Підійде як новачкам (автоматичні шаблони), так і досвідченим через численні опції.	Системний інтерфейс, адаптований до геодезичних робіт. Менше фотограмметричних налаштувань, зате розвинуті інструменти GNSS/тахеометрії, звітів і візуалізації вимірів.

Кри- терій	Agisoft Metashape	Pix4Dmapper (+Pix4Dcapture)	Leica Infinity
Формат и даних	Підтримка знімків у різних форматах, імпорт EXIF. Експорт ортофото (GeoTIFF), DEM, хмари точок (LAS, XYZ), mesh (PLY, OBJ тощо).	Підтримка широкого спектру знімків (RGB, NIR, теплові). Експортує ортомозаїки, DSM/DTM, хмари точок (LAS), mesh, а також GCP/індекс-карти і звіти. Сумісний з Pix4Dcloud сервісами.	Приймає дані Leica (SmartWorx), ASCII, XML, DXF/DWG, SHP та інші. Експортує робочі звіти, топографічні плани, зображення та хмари точок у форматах LAS/PTX.
Ліцензу- вання	Одноразова покупка ліцензії (Standard ~179\$, Professional ~3499\$). Безстрокова ліцензія (оновлення за рік безкоштовні). Вартість академічних ліцензій істотно нижча.	Підписка (щомісячна або річна). Наприклад, ~370\$/міс із хмарним сховищем. Підписка включає оновлення та техпідтримку. Ліцензію можна призупинити, зменшити або наростити кількість місць.	Як правило, ліцензія постійна або за підпискою у складі сервісних контрактів Leica (ціни обговорюються з постачальником). Надається підтримка і оновлення під час дії контракту.

Таким чином, для топографічного моделювання і об'єктів складної форми перевагу можуть віддавати Metashape, адже він дозволяє «витискати» максимум точності з даних. Для масштабних картографічних і аграрних задач (постійний моніторинг полів, ортофото великих територій) часто обирають Pix4D за його автоматизацію та можливість хмарної обробки. Якщо ж основне завдання – геодезичні розрахунки і оформлення результатів (зведення тахеометричних і GNSS-вимірювань у виконком), то Leica Infinity забезпечує простий і прозорий.

Приклади використання

- картографія та дослідницькі проекти: Pix4Dmapper застосовувався для цифрового моделювання відомих географічних об'єктів – наприклад, Монблану та Маттерхорна в Альпах, статуї Христа-Спасителя в Бразилії, а також зйомки вулканічної ерупції на Гаваях 2018 року;

- геодезія і будівництво: Leica Infinity широко використовується у прикладних геодезичних роботах: імпорт даних з GNSS-мереж і тотальних станцій зняв з інженерів багато рутинної роботи. Наприклад, за допомогою Captivate+Infinity виконують топографічну зйомку будівельних майданчиків з наступним створенням цифрових двійників місцевості

- аграрні дослідження: Програмні продукти Pix4D мають численні кейси в агроменеджменті. Компанія AgroLab (Данія) у дослідницькому центрі використовувала модуль Pix4Dfields (спеціалізований для агрокартування) разом

з Pix4Dcapture для обстеження експериментальних посівів – систематично отримували ортофотоплани і НВРІ-карти для оцінки впливу пестицидів на врожай. Зібрані зображення аналізували за допомогою Pix4Dfields, що дозволяло точно вимірювати зони впливу і контролювати агрономічні експерименти.

- наукові дослідження: У геонауках та археології Agisoft Metashape часто застосовують для створення 3D-моделей пам'яток і опрацювання зібраних польових знімків. Наприклад, на міжнародних конференціях публікувалися роботи з використанням Metashape для документації давніх наскальних малюнків (Native American cave art) та археологічних розкопок.

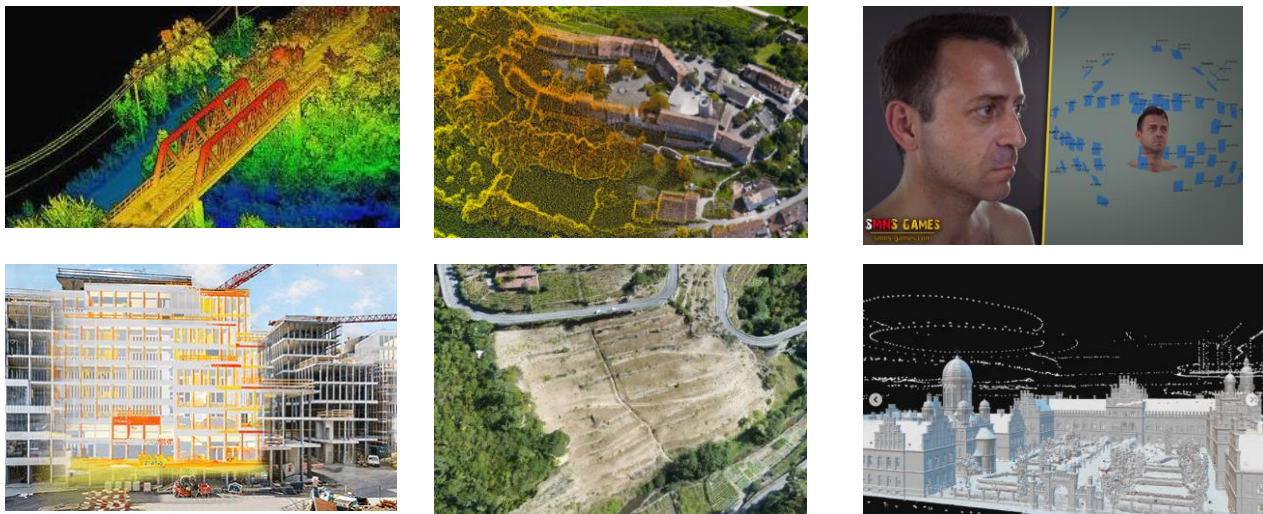


Рис. 2.7. Приклади використання результатів обробки даних

Проте варто пам'ятати що, жодна програма не є універсальною для всіх задач. Оптимальний вибір робиться на основі розміру проєкту, бажаної точності, доступних ресурсів (часу, техніки) та сумісності з існуючим обладнанням. Експериментальні проєкти можуть поєднувати декілька інструментів: наприклад, збирати дані за допомогою Pix4Dcapture, обробляти фотографії в Metashape для тонкого налаштування точності, а виконувати геодезичні обчислення в Leica Infinity. Такий гнучкий підхід дозволяє досягати кращих результатів у кожній окремій сфері застосування.

2.4. Огляд можливостей програмного комплексу Leica Infinity для цілей фотограмметрії

Програмне забезпечення Infinity побудоване на модульному принципі, що надає користувачам виняткову гнучкість у масштабуванні функціоналу відповідно до їхніх геопросторових потреб. Користувачі можуть розпочати роботу з базового пакета, який включає основні функції підготовки даних та керування файлами, і поступово розширювати можливості, додаючи опціональні модулі.

До числа опціональних модулів, які підтримують додаткові спеціалізовані робочі процеси, належать "Imaging" (Обробка зображень/Фотограмметрія), "Point Clouds" (Хмари точок), "Surfaces" (Поверхні) та модулі для обробки даних TPS, GNSS, та нівелювання. Ця модульність має пряме застосування для менеджерів проектів, оскільки дозволяє інвестувати лише у необхідний функціонал, такий як обробка GNSS та фотограмметрії, усуваючи необхідність придбання надмірних можливостей.

Що стосується ліцензування, Leica Infinity пропонує гнучку модель, що включає як одноразову постійну (perpetual) ліцензію, так і підписку (subscription plan). Корпоративна політика також передбачає вибір між двома основними типами ліцензій:

1. Прив'язані до комп'ютера (Node locked licenses) – фіксовані до одного комп'ютера, підходять для автономної роботи.
2. Плаваючими ліцензіями (Floating licenses): Встановлюються та розподіляються в межах однієї мережі, що дозволяє різним користувачам на різних комп'ютерах спільно використовувати ліцензію.

Плаваючий тип ліцензування є ідеальним для великих проектних офісів, де потреба у ресурсоємних функціях, як-от обробка фотограмметричних даних, виникає періодично, забезпечуючи економічну ефективність використання програмного забезпечення.

Фотограмметричний функціонал комплексу зосереджений в опціональному модулі "Imaging". Цей модуль забезпечує повний цикл роботи з візуальними даними, підтримуючи створення, обробку та генерацію кінцевих

продуктів на основі зображень, отриманих з БПЛА та інших візуалізуючих інструментів Leica (рис. 2.8).

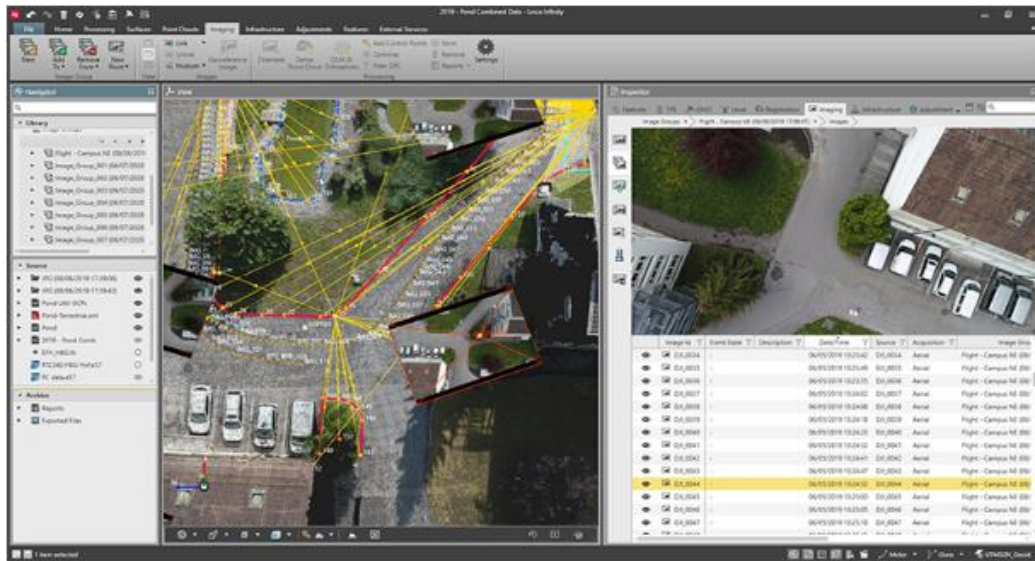


Рис. 2.8. Leica Infinity із модулем Imaging

Основні фотограмметричні можливості, підтримувані комплексом, включають:

- обробка та генерація хмар точок із зображень (Point Clouds from Images);
- створення та фільтрація Щільної Хмари Точок (DPC);
- генерація Цифрової Моделі Поверхні (DSM) та Цифрової Моделі Рельєфу (DTM);
- формування ортофотопланів (Orthophoto);
- аналітичні інструменти для розрахунку об'ємів та порівняння поверхонь.

Leica Infinity дозволяє користувачам вимірювати та генерувати кінцеві продукти безпосередньо із зображень, що підкреслює його роль як потужного інструменту для збору геопросторової інформації.

Infinity розроблений для підтримки високоточних геодезичних робочих процесів від початку до кінця. Він забезпечує підготовку, обробку та створення кінцевих продуктів, підтримуючи дані від усіх типів геодезичних сенсорів.⁴

Ключові джерела фотограмметричних даних включають:

1. Зображення з БПЛА (UAV): Використовуються для великих площ та високої деталізації.

2. Дані з Leica GS18 I: Унікальний мультисузір'євий GNSS-приймач з інтегрованою фотограмметричною камерою, що дозволяє виконувати візуальне позиціонування та вимірювати недоступні елементи.

Для забезпечення геодезичної жорсткості та абсолютної точності фотограмметричних моделей, Infinity ефективно інтегрує високоточні опорні дані. Система підтримує імпортування GNSS-даних та вимірювань тахеометрів, які використовуються як наземні контрольні точки (GCP). Додатково, підтримка Leica AP20 AutoPole, системи, що компенсує нахил, дозволяє імпортувати та ідентифікувати вимірювання з компенсацією нахилу, які використовуються для встановлення та прив'язки проекту, що покращує якість наземного контролю.⁹ Infinity також підтримує стандартні набори калібрування антен для забезпечення точності GNSS-даних, які є основою для геореференціювання.

Критичним етапом фотограмметричної обробки є аеротриангуляція (Aerotriangulation), що включає точне визначення зовнішньої та внутрішньої орієнтації кожного зображення.

Leica Infinity пропонує спеціалізований *Режим точної орієнтації (Precise Orientation mode)*. Цей режим значно покращує час обробки та якість даних, особливо при роботі з наборами зображень, отриманих з ручних систем, таких як Leica GS18 I. Ця перевага у продуктивності пояснюється глибокою інтеграцією апаратного та програмного забезпечення Leica.

Системи Leica, особливо GS18 I та професійні аерофотосистеми, надають високоточні початкові значення для зовнішнього орієнтування, використовуючи інтегровані IMU та GNSS-вимірювання. Використання цих попередньо скоригованих, якісних вихідних даних мінімізує кількість ітерацій, необхідних для вирішення рівнянь Балансування променів (Bundle Adjustment) у процесі аеротриангуляції. Для великих проектів БПЛА, що містять тисячі зображень, ця здатність використовувати високоточні дані з бортової системи для прискорення обробки є прямою причиною підвищення офісної продуктивності та надійності геометричної моделі.

Система забезпечує простежуваність та надійність обробки, генеруючи детальні *звіти*. Зокрема, для аеротриангуляції генеруються звіти, які деталізують метрики точності.

До ключових показників точності, які аналізуються, належать:

- стандартні відхилення скоригованих параметрів орієнтації: це включає середню точність для позиційних компонентів (X, Y, Z) та кутових компонентів (Omega, Phi, Kappa).
- залишкові похибки вимірювань зображень (RMS): ці показники оцінюють, наскільки добре вимірювання точок збігаються після виконання коригування пучків.

Крім того, Infinity підтримує важливий інженерний принцип оцінки якості моделі. Точність моделі оцінюється не лише на основі контрольних точок, що використовувалися для прив'язки (GCP), але й за допомогою незалежних контрольних точок (Independent Check Points). Використання незалежних контрольних точок дозволяє уникнути переоцінки фактичної точності моделі, забезпечуючи підтвердження відповідності інженерним специфікаціям, наприклад, досягнення 8.0 см горизонтальної та вертикальної точності при відповідній роздільній здатності зображення (GSD).

Після успішної аеротриангуляції наступним етапом є генерація **Щільної хмари точок** (Dense Point Cloud, DPC) за допомогою алгоритмів щільного зіставлення. Модуль Imaging в Leica Infinity дозволяє ефективно створювати та фільтрувати DPC.

Ключовим функціоналом, який демонструє здатність Infinity до інтеграції, є управління даними хмар точок, отриманих із зображень (Point Clouds from Images). Програмне забезпечення дозволяє балансувати вигляд хмари точок залежно від її щільності, що є критично важливим при об'єднанні фотограмметричних даних із даними, отриманими за допомогою лазерних сканерів. Ця можливість створення уніфікованих хмар точок (unified points clouds) є центральною для досягнення максимальної повноти та точності 3D-моделі.

Стратегічна цінність Leica Infinity полягає в його унікальній ролі як єдиного програмного середовища для злиття даних (Data Fusion). Це особливо важливо в геодезії, де велика кількість вимірювань, отримана з різних джерел, повинна бути приведена до єдиної системи координат.¹

Leica Infinity дозволяє керувати та обробляти в одному інтуїтивно зрозумілому інтерфейсі:

- фотограмметричні зображення (UAV, GS18 I).
- високоточні GNSS-дані.
- вимірювання тахеометрів (TS).
- дані наземного лазерного сканування (TLS).
- інформаційні моделі будівель (BIM-дані).

Цей високий рівень інтеграції критично важливий для складних будівельних майданчиків або інфраструктурних проектів.¹ Коли сайт вимагає використання різноманітних пристроїв, обробка даних стає більш схильною до помилок. Об'єднання всіх цих джерел у спільному опорному каркасі, керованому Infinity, значно зменшує ці помилки та дозволяє отримати геодезично релевантні результати.¹ Наприклад, об'єднання детальних, кольорово насичених фотограмметричних хмар точок з високоточними, але потенційно менш насиченими кольором хмарами точок від лазерних сканерів забезпечує найбільш повне та точне моделювання фактичного стану об'єкта ("as-built" model).⁴

Фотограмметрична Щільна Хмара Точок (DPC) є основою для генерації *цифрових моделей*. Leica Infinity дозволяє створювати DTM (із виключенням об'єктів) та DSM (із включенням усіх об'єктів), які можуть бути представлені у 2.5D або у більш складних 3D-форматах (Refined, Regular, Interpolated).

Модуль "Surfaces & Volumes" пропонує розширені можливості редагування поверхонь, що є необхідним для підготовки інженерних моделей. Функціонал включає додавання та видалення елементів (features), обрізку, заповнення порожнин (Fill holes) та автоматичне створення горизонталей (Contours). Така деталізація контролю над моделлю дозволяє геодезисту точно відокремлювати рельєф від рослинності чи будівель, що є критичним для точних розрахунків.

Створення високоточного, геореференційного *ортофотоплану* є стандартним та необхідним кінцевим продуктом фотограмметричної обробки, який також підтримується комплексом.

При генерації ортомозаїки можливий вибір моделі, на яку буде проектуватися зображення: сітка (Mesh) або цифрова модель висот (DEM/DTM). Технічний досвід показує, що використання DTM/DEM зазвичай дає кращу якість та менше артефактів, особливо поблизу вертикальних об'єктів, таких як будівлі.¹⁶ Таким чином, якість фінального Ортофотоплану безпосередньо залежить від точності та деталізації DTM, створеного Leica Infinity.

Leica Infinity забезпечує прямий та ефективний експорт оброблених геопросторових даних до провідних інженерних та дизайнерських додатків. Це гарантує, що дані, які пройшли жорстку геодезичну обробку та корекцію в офісі, можуть бути легко інтегровані в наступні етапи проекту (CAD, GIS, BIM).

Ключові формати експорту включають:

- Експорт даних 3D-сітки (Mesh) у форматі AutoCAD DXF.
- Прямий експорт у популярні CAD, GIS, та BIM-додатки.

Наприклад, оброблена хмара точок може бути імпортована в Revit або AutoCAD Civil 3D для подальшого моделювання зовнішнього вигляду будівлі та навколишньої топографії, що було успішно продемонстровано у практичних кейс-стаді. Експортована 3D-сітка у форматі DXF може бути використана також для польових інспекційних програм, таких як Leica Captivate Inspect Surfaces, що забезпечує неперервність робочого процесу від офісу до поля.

Фотограмметрична обробка, особливо етап генерації Щільної хмари точок (Dense Matching), є найбільш вимогливою до апаратних ресурсів. Для забезпечення економічної ефективності та високої продуктивності при роботі з великими наборами зображень необхідні високопродуктивні робочі станції.

Leica Geosystems надає чіткі рекомендації щодо апаратного забезпечення, особливо для обробки зображень. Аналіз цих вимог показує, що інвестування у висококласний комп'ютер є обов'язковою умовою для використання модуля Imaging.

Критично важливими компонентами є:

1. Центральний Процесор (CPU): Рекомендовано Multi-Core процесор з тактовою частотою 3.5 GHz або вище.

2. Оперативна Пам'ять (RAM): Для великих проектів вимагається 64 GB або більше RAM.

3. Графічний Процесор (GPU): рекомендовано 8 GB GPU з обов'язковою підтримкою NVIDIA CUDA. Пряма вимога підтримки CUDA свідчить про те, що Leica Infinity використовує паралельні обчислення графічного процесора для значного прискорення найбільш тривалих етапів обробки, що є необхідною умовою для досягнення бажаної виробничої швидкості.

4. Дисковий Простір: мінімум 1 TB SSD або більше для зберігання та швидкого доступу до великих наборів даних.

Таблиця 6.1.1: Рекомендовані Апаратні Вимоги для Обробки Зображень у
Leica Infinity

Компонент	Мінімум	Рекомендовано	Рекомендовано для Обробки Зображень
Процесор (CPU)	Dual core 1.8 GHz	Multi-Core 2.4 GHz або краще	Multi-Core 3.5GHz або краще
Оперативна пам'ять (RAM)	4 GB	32 GB або більше	64 GB або більше
Графічний процесор (GPU)	Direct X9 сумісний, 512 MB	4 GB	8 GB, NVIDIA CUDA capable
Дисковий простір	50 GB	256 GB або більше	1TB SSD або більше

РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ LEICA INFINITY ПРИ ОБРОБЦІ РЕЗУЛЬТАТІВ АЕРОФОЗНІМАННЯ

3.1. Загальна характеристика ділянки проведення робіт

Приступаючи до експерименту нашого дослідження, а саме аерофотознімальних та камеральних робіт на ділянку місцевості, яка знаходиться у східній частині в м. Чернівці, необхідно добре вивчити ті умови, в яких будуть виконуватися фотограмметричні, зокрема льотнознімальні роботи. Це, стосується як орографічних та метеорологічних умов так економіко-господарських передумов. Ця інформація має бути збалансованими, їх надлишкова деталізація буде лигше ускладнювати та заважати повітряному зніманню. Тому, в параграфі 3.2 нашого магістерського дослідження, ми розглянемо основні умови, які потрібні оператору БПЛА для якісного проєктування, організації й подальшого проведення аерофотознімальних та інших дотичних робіт. При відборі показників, ми слідували загальному правилу: відбирати лише ті дані, які мають безпосереднє відношення до постановки льотнознімальних робіт.

Основними інформаційними ресурсами стали результати власного рекогностування, виписки Чернівецької міської ради, фізико-географічний опис місцевості, енциклопедичні довідники й словники, web-портали, джерела вікіпедичного та ШІ-змісту, літературні відомості й описи тощо. Аерофотознімання проводилося у червні 2024 року, тому увесь опис є актуальним саме на цей період.

Місцезрешташування ділянки. Враховуючи значну площі м. Чернівці, а також відмінностей, у першу чергу в забудованості й рослинному покриві, слід виокремити територію аерофотознімання, на фоні усього обласного центру. Так територія яка підлягала зніманню знаходиться в Східному житловому масиві, яка об'єднує агломерацію із мікрорайонами Гравітон, Фастівська та Авангардна. Роботи проводились у межах житлового масиву по вулиці Руській, який об'єднує будинки від 219 до 233 за 3,5 км від центру міста та 1,5 км від міжнародного аеропорту «Чернівці». Довкола житлового масиву розташовані вулиці та провулки з асфальтовим, гравійним та ґрунтовим покриттям. На півночі масиву

розташовані гаражні кооперативи. Площа земельної ділянки на котрій проводилось аерофознімання складає 15 га, проте рекогностування проводилося по всій прилеглій території.

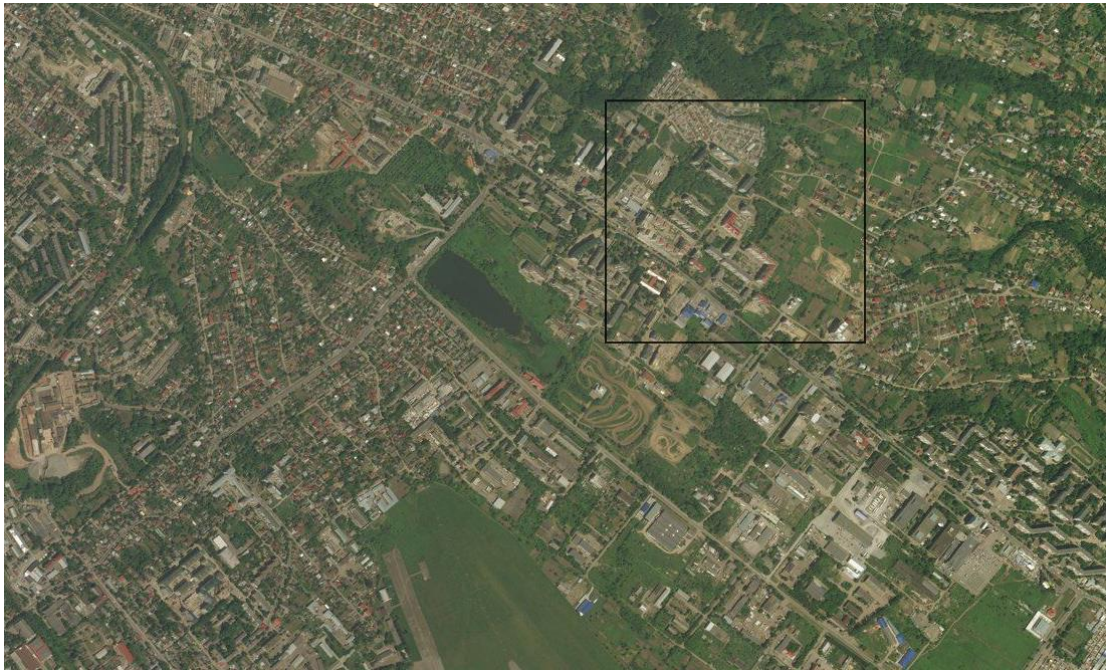


Рис. 3.1. Розташування території знімання та частини м. Чернівці

У плані *топографічного забезпечення*, то територія дослідження покривається топографічними картами масштабу 1:10 000 номенклатури М-35-136-Г-в-3 та аркушем топографічного плану масштабу 1:2000 номенклатури М-35-157-(32-а) (рис. 3.2).

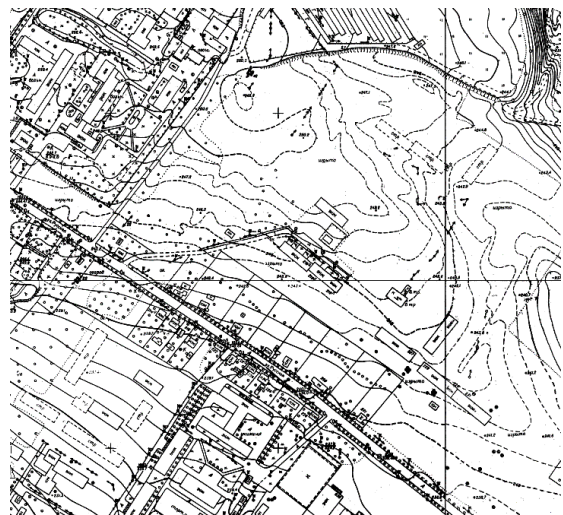


Рис. 3.2. Картографічне забезпечення території аерофотознімання

Стан *геодезичного забезпечення*, а саме пунктами ДГМ або полігонометрії цієї частини міста є незадовільним, так пункт полігонометрії 2-го розряду біля ЖК «Ріка» №1034 ми не змогли відшукати, так як тротуарне покриття було

зміненню на бруківку (рис. 3.3). Стосовно пунктів ДГМ, то їх розташування є досить віддаленим, тому вони мало придатні для вирішення наших задач. Проте ми їх використовували як базові станції для GNSS-знімання.

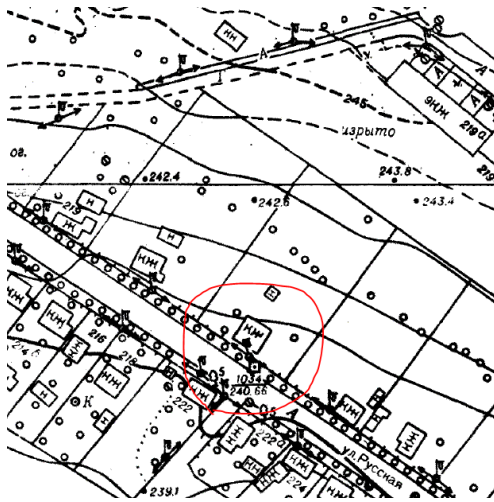


Рис. 3.3. Геодезичне забезпечення території аерофотознімання

Рельєф місцевості. Характеризуючи орографічні особливості, у першу чергу необхідно визначити перепади висот, тобто відносні перевищення окремих точок місцевості. Тому слід врахувати саме відносні перевищення його в межах території знімання й окремих масивів, з максимальними і мінімальними позначками висот. Відмітки висот коливаються від 250,7 м (в північній частині), до 245,2 метрів (в південній та західній частинах масиву). Тобто, експозиція схилу є південною, хоча і маловираженою. Варто відзначити, що в умовах щільної багатоповерхової забудови та густого рослинного покриву орографічні особливості місцевості не є визначальними.

Ситуація на місцевості. На території ділянки присутній ряд багатоповерхівок, зокрема 9-типоверхових та об'єкти соцікультур побуту. У північній частині, присутні елементи промзони – автопаркінг та гаражі. Вздовж південно-західної частини проходить вулиця Руська (рис. 3.4).

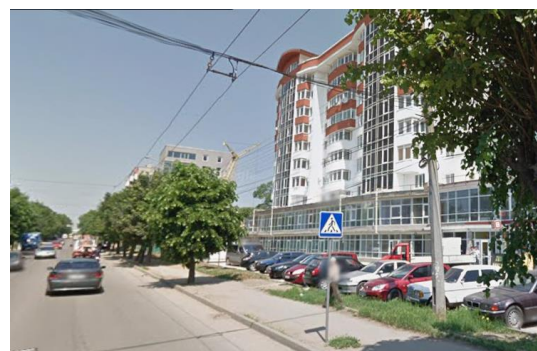
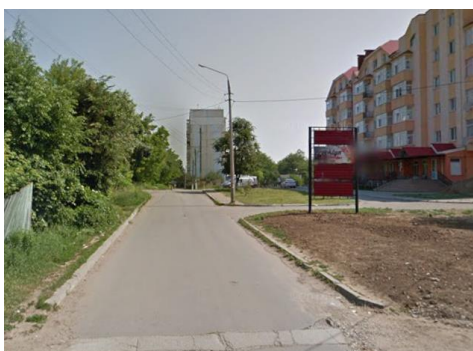


Рис. 3.4. Ситуація на території закладу на час знімання (23.06.2024 р)

На цій же території, увесь квартал містить низку проїздів та провулків. Як вже зазначалося, для організації та проведення льотнознімальних робіт має велике значення поділ на забудовану й незабудовану територію. Забудовані території вимагають більш ретельного вибору висоти польоту, а також враховувати висотність будівель та споруд, падаючу від них тінь при геодезичному супроводі робіт. Отже, враховуючи присутність щільної забудови, об'єм геодезичних робіт при створенні розпізнавальних знаків буде значним.

Метеорологічні умови. При проведенні льотнознімальних робіт необхідно враховувати наступні відомості: панівні напрямки й швидкості вітру; частоту виникнення туманів; період випадання атмосферних опадів; тривалість польового періоду; амплітуду сезонних і добових коливань температури повітря. Знання зазначених елементів клімату дозволяє більш оптимально планувати терміни проведення аерофотознімальних робіт, проводити роботи при найбільш сприятливих метеоумовах (стабільність польоту, температурний режим, видимість), що формує більш високу якість знімання. Для вирішення цього завдання, ми обрали синоптичний веб-порталів «GisMeteo.com.ua», за допомогою якого було обрано один із найсприятливіших (безвітряних) днів на той період (рис. 3.5). Варто відзначити, що найсприятливішим усеж таки є пізньоосінній період знімання, із низьким розташуванням сонця та суцільною хмарністю. Так із відсутністю рослинного покриву, та однаковими рівнями освітленості поверхні, ми отримаємо найкращу якість.



Рис. 3.5. Використання інтернет-ресурсу для визначення погодних умов

Рослинний покрив. Ключовий аспект при проєктуванні льотнознімальних робіт, а саме місця посадки та взльоту. На цій ділянці, міжбудинковий простір заповнений деревною та чагарниковою рослинністю. Уздовж вулиць та проїздів спостерігаються зелені насадження лінійного типу. Зазначене, вимагає перегляду методу знімання, тобто воно суттєво впливає на кінцевий вибір у доцільності використання суто повітряного методу отримання даних, із залученням наземного топографічного знімання. Тобто, рослинність створює серйозні перешкоди при проведенні подібних робіт, тому ми подальше дознімання виконували більш традиційними методами. Тобто по усьому периметру ділянки, для забезпечення об'єктивності, може виникнути необхідність створення додаткових точок наземного знімання, із використанням лінійних та інших засічок.

Тип поверхні. Характер ґрунтів на ділянці, визначають умови пересування транспортних засобів, а також підбір місця старту та посадки дрона. Склад поверхні, матеріал її оздоблення, зумовлює вибір матеріалу маркування центрів розпізнавальних знаків при планово-висотній підготовці території.

Економіка району робіт. Вона істотно впливає на рівень організації польових робіт. Зокрема нами виявлено, що земельна ділянка житлового масиву

має організовану забудову. На території розташовано декілька об'єктів громадського використання, магазинів та салонів, це полегшить при необхідності, вирішення деяких завдань, як місця розміщення операторів, їх перепочинку, постобробки результатів знімання та підзарядці техніки.

Транспортні та інші зв'язку. Територія знімання знаходиться у зручному місці, із прямим транспортним сполученням. Як вже зазначалося, при необхідності виконання більшого обсягу робіт, є можливість підзарядки акумуляторних батарей та смартфонів. Для підвищення оперативності робіт, є можливість підключення до бездротового інтернету WiFi частотою 2,4 ГГц або 5,0 ГГц, також присутній мобільний 2G, 3G, LTE та 5G інтернет-зв'язок операторів Vodafone, LifeCell та KyivStar.

3.2. Підготовчі роботи та аерофотознімання використовуючи БПЛА DJI Mavic 2 Zoom

Підготовчий етап передбачає підбір і перевірку БПЛА. Для виконання робіт на територію житлового масиву можуть застосовуватися різноманітні різновиди дронів. Як вже зазначалося, на вітчизняному ринку безпілотних засобів, не погано себе зарекомендували квадрокоптери компанії DJI, із основних переваг яких є відносно не висока ціна (2000-5000 \$), мобільність та належні технічні характеристики.

Також даний етап необхідний для вивчення й оцінки якості вихідних геодезичних, картографічних, фотограмметричних й літературно-довідкових матеріалів на територію аерознімання, для складання технічних проєктів, а також для підготовки матеріалів та технічного оснащення, які використовуються для виконання аерофотознімальних та камеральних робіт.

Для виконання поставлених завдань, повинен бути попередньо складений технічний проєкт робіт в якому визначений методологічний підхід, яким буде виконуватись аерофотографічне знімання, а також наземний геодезичний супровід.

Для цієї магістерської роботи, враховуючи всі умови й особливості території житлового масиву по вулиці Руській, обираємо комбінований метод,

при котрому аерофототопографічне знімання виконують із використанням БПЛА, а польову планово-висотну підготовку отримують використовуючи GNSS-знімання (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Технологічна схема виконання аерофотозйомки з БПЛА

Подальший етап підготовки стає створення точок ПВП аерофотознімання. Так для складання крупномасштабного плану в масштабі 1:500 на територію знімання, необхідно запроектувати місця розташування цих пунктів. Для цих цілей ми використали програмний продукт ArcMap v. 10.8.

Контурні точки, які обрані в якості точок ПВП, мають чітко зображуватися на всіх аерофотознімках, які перекриваються, і надійно розпізнаватися на місцевості. Їх обирали приблизно в центрі поперечного перекриття в зоні потрібного поздовжнього перекриття фотозображень на чітких, добре видимих на фотознімках контурах місцевості. Обов'язково ми виключали точки ПВП фотознімків які перетинаються під гострими кутами або на овальних контурах, а також у затінених місцях.

Ураховуючи вищезазначені рекомендації, ми попередньо запроектували розпізнаки рівномірно по всій території масиву, враховуючи умови місцевості. Досить проблемними виявилися місця із падаючою тінню та ці частини ділянки які перекривалися кронами дерев. Так у місцях відсутності природніх контурів, ми склали схему маркерів, які мають чітко відображатися на фотознімках. Для

цього ми обрали аерозольну фарбу світлого кольору, якими відмічали розпізнавальні знаки на асфальтовій та ґрунтовій поверхнях.

Визначення координат пунктів ПВП ми виконували за допомогою 2-х частотних GNSS-приймачів в режимі RTK. Як відомо цей режим дозволяє нам отримувати поправки до вимірювань. При сприятливих метео- та інших умовах, сервіс дає можливість протягом декількох секунд визначити місце розташування з точністю ± 2 см в плані і ± 3 см по висоті. Загалом у реальних умовах часу нам знадобиться 3 год для визначення планово-висотних координат 15 маркерів.

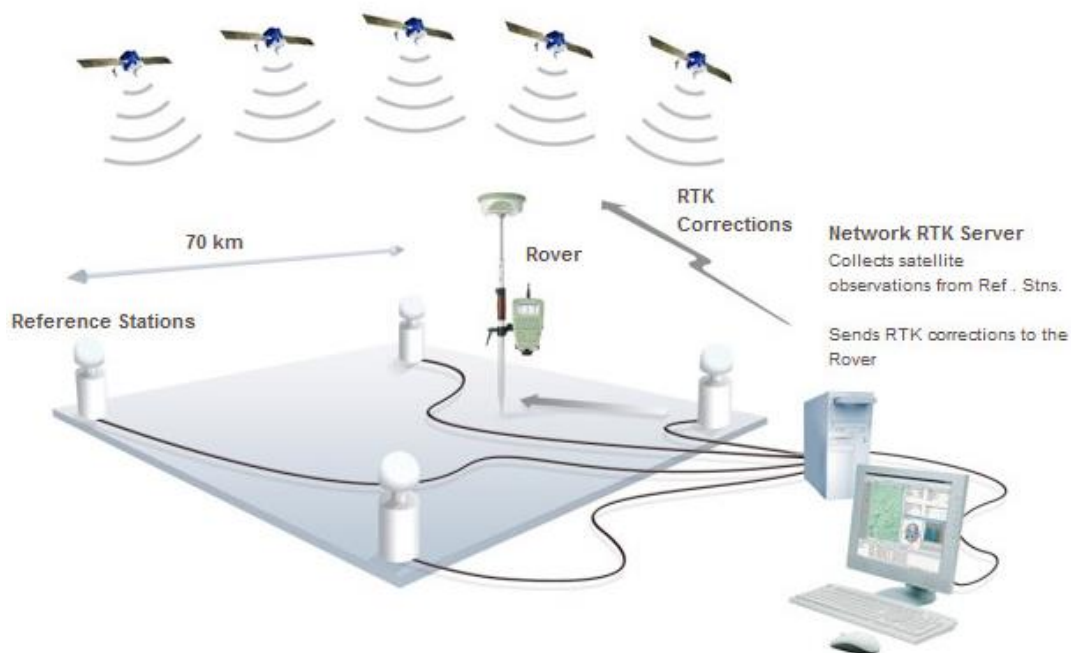


Рис. 3.7. Схема отримання координат в RTK-режимі

У Чернівецькій області найбільш популярним є сервіс компанії SystemSolutions. Ми зареєструвалися в цій мережі і підписатися на пакет послуг роботи у режимі реального часу (рис. 3.8).

Одним із проблемних моментів, стало виконання знімання в 10-кілометровій зоні від аеропорту. Тобто, політ у цій зоні був заборонений і квадрокоптер відмовлявся запускатися.

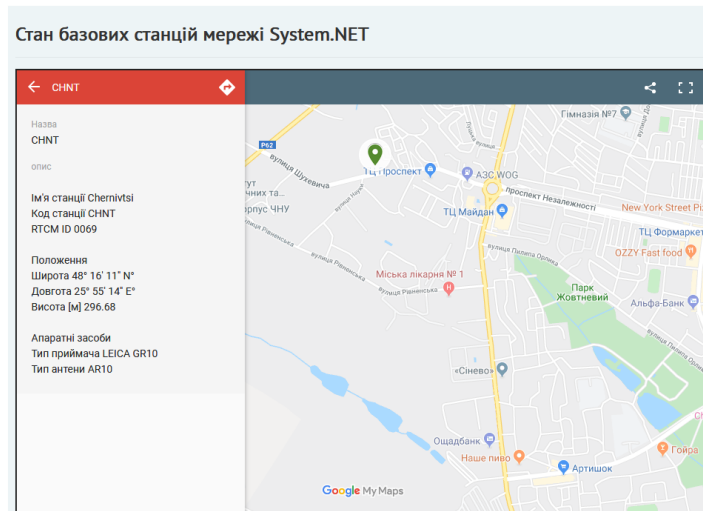


Рис. 3.8. Видяг веб-сервісу SystemSolutions та найближчої станції CHNT

Для розблокування зони польоту ми використали персональну заявку на офіційному сайті DJI NFZ і за серійним номером контролера – 0M6DF91001X25D надсилаємо запит на виконання польоту навколо мікрорайону (рис. 3.9)

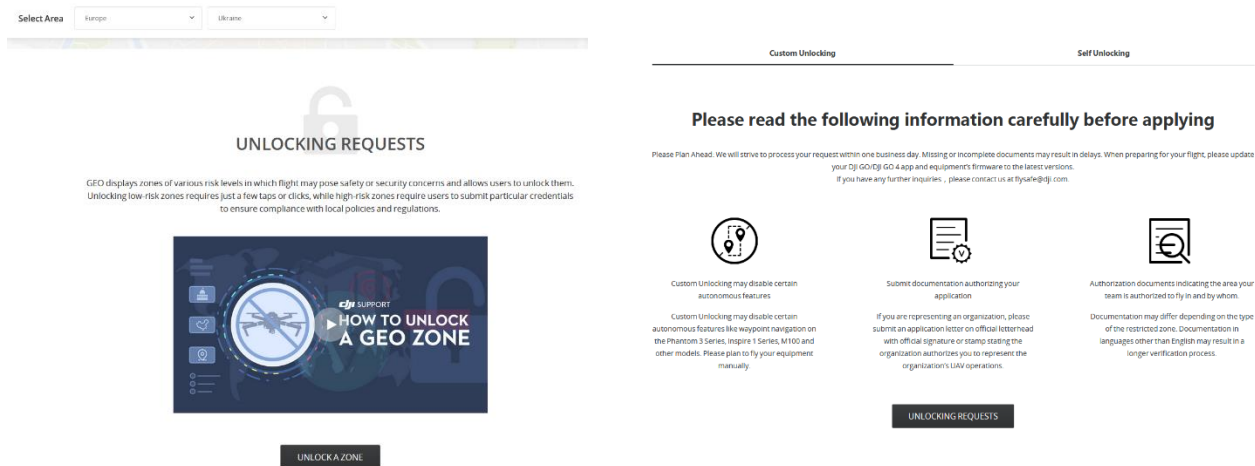


Рис. 3.9. Процедура подачі запиту

При формуванні заявки, обов'язковим є зазначення причини польоту, у комерційних або особистих цілях, максимальної висоти та радіус польоту. Для розрахунку останнього параметру, пропонується віртуальна карта із позначенням області інтересу (рис. 3.10). На ній різними кольорами відображено зону заборони усіх цивільних польотів (помаранчевий, територія злітно-посадкової смуги), обмежень та радіусу запроєктованого польоту.

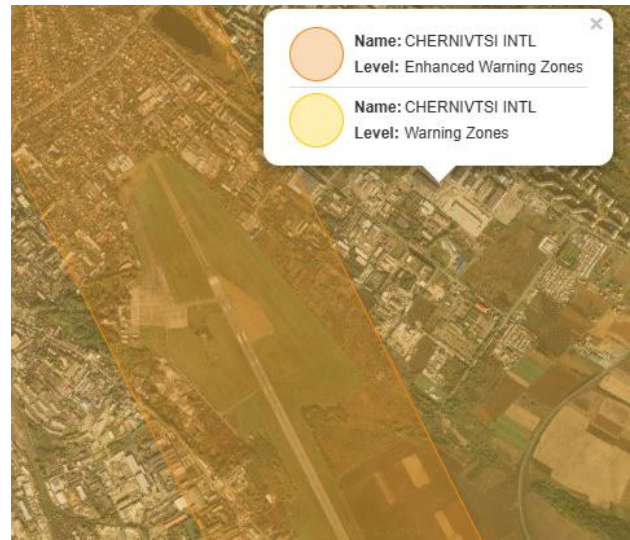


Рис. 3.10. Позначення зони польоту на інтерактивній карті

На цьому ж етапі ми сформуваємо польотне завдання для БПЛА. Загалом, складання його відбувалося у віртуальному режимі в середовищі смартфона iPhone 12 ProMax у додатку DroneDeploy. Слід відзначити, що програмний комплекс автоматично розраховує завдання на льотнознімальні роботи, виходячи із початкових показників, які ми ввели (рис. 3.11).

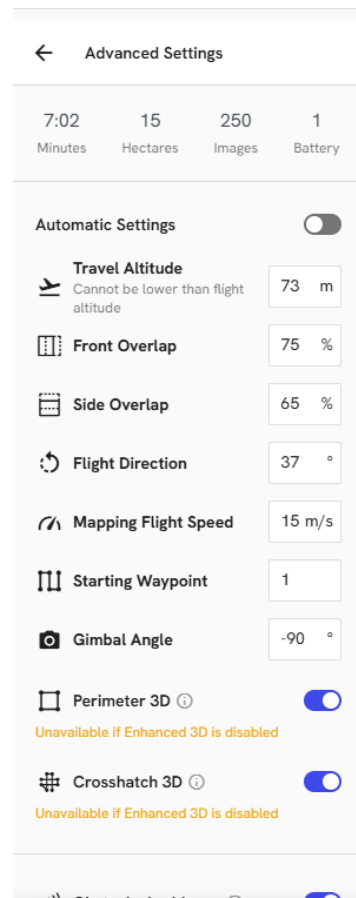
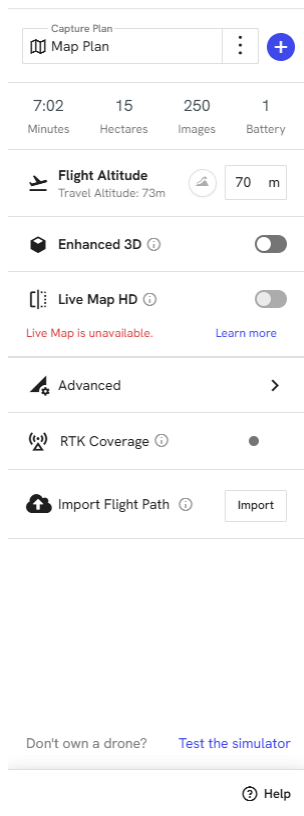


Рис. 3.11. Формування польотного завдання

Тобто, для покриття аерофотознімальної ділянки мікрорайону необхідно

прокласти 11 паралельних маршрутів із загальною кількістю 250 аерофотознімків при поперечному та поздовжньому перекриттях у 65 % та 75 % відповідно (рис. 3.12) Велике значення перекриттів, особливо поздовжнього, є однієї із основних вимог при використанні легких та надлегких літальних засобів. Це при подальшій постобробці результатів знімання, дозволить мінімізувати похибки кренажу та рискання дрона.

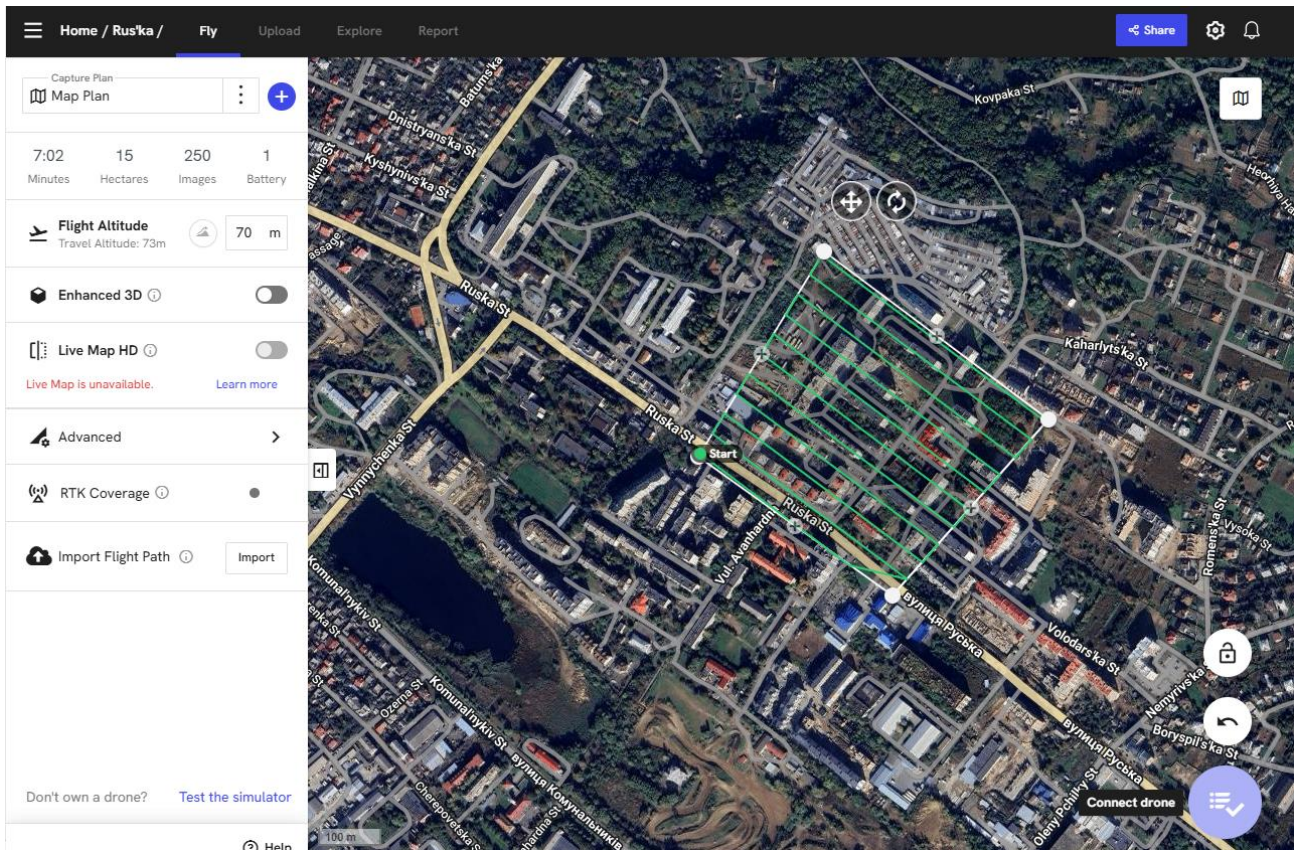


Рис. 3.12. Маршрути аерофотознімання та процес знімання на інтерактивній карті

3.3. Камеральна обробка результатів аерофотознімання у програмному продукті Leica Infinity

Здійснення обробки аерофотозображень із БПЛА в фотограмметричних продуктах й цифрових фотограмметричних станціях, загалом аналогічна обробці цих даних отриманих із повнорозмірних літальних засобів. Для цих цілей можна використати цілу низку прикладних програмних комплексів, які розглядались в другому розділі магістерської роботи.

Для оцінки якості фотоматеріалів використовувався фрагмент блоку, що складається з 7-х маршрутів по 8 знімків в кожному. В якості опорних

використовувалися 15 точок, планово-висотні координати XYZ їх були отриманні із використанням GNSS-спостережень. Після фотограмметричного зрівнювання СКП координат на опорних точках, координати по X, Y і Z склали відповідно 15 см, 13 см і 32 см. СКП координат зв'язуючих точок склали 3 см, 3 см, 7 см. Розмір пікселя на місцевості для цього блоку GSD склав приблизно 6 см.

Подальші дії заключалися в складанні фотомозайки аерофотознімання, зокрема відображення базисів фотографування й побудові фототріангуляційної моделі в Leica Infinity, який є досить новим засобом для генерації ортофотопланів та 3D-моделей поверхні об'єктів знімання по їх фотозображеннях.

Розглянемо ключові дії, які виконуються при обробці даних у програмі Leica Infinity. Так, процес обробки результатів містить 7 послідовних етапів:

1. *Створення нового проєкту* є фундаментальним кроком, який дозволяє організувати всі дані аерофотознімання в єдиному робочому середовищі. Проєкт визначає структуру файлів, зв'язки між об'єктами та логіку подальшої обробки. Це також забезпечує можливість зберігати метадані, історію змін і налаштування в одному місці, що важливо для повторюваності та контролю якості. У межах проєкту можна керувати різними типами даних: зображеннями, точками, моделями, полігонами, ортофото. Правильно створений проєкт дозволяє уникнути плутанини та спрощує навігацію між етапами обробки. Крім того, структура проєкту забезпечує можливість роботи в команді та передачі даних між спеціалістами без втрати інформації.

Для цього використовуємо стандартні вкладки та меню File → New Project (рис. 3.13):

- 1) вказуємо назву: Pacholok_Chernivtsi_Ruska_2024;
- 2) обираємо директорію для проєкту C:\Users\DKV\Documents\Leica Geosystems\Infinity\Projects
- 3) натискаємо Create

Новий проєкт

Створити	
Шаблони проєктів	
Назва шаблону	За замовчуванням
Деталі проєкту	
Назва проєкту	Pacholok_Chernivtsi_Ruska_2024
Власник проєкту	
Головний геодезист	
Номер геодезиста	
Email геодезиста	
Коментарі	
Замовник проєкту & Деталі	
Ім'я клієнта/Id	
Контактна особа	
Номер	
Email	
Skype	
Веб-сайт	
Зберігання	
Розташування проєкту	C:\Users\DKV\Documents\Leica Geosystems\Infinity\Projects
Створити підкаталог проєкту	☒
Кодування	
Таблиця кодів	Немає
Класифікація хмари точок	
Таблиця класифікації	LAS format 1.1 - 1.4

Рис. 3.13. Створення нового проєкту

2. На цьому ж етапі *встановлюємо систему координат* (WGS 84 / UTM zone 35N (EPSG:32635)). Встановлення правильної системи координат є критично важливим для точності усіх подальших результатів – від обчислення траєкторії до формування ортофотоплану. Вибір системи координат визначає, як будуть інтерпретуватися всі координати на зображеннях. Якщо система обрана неправильно, модель може бути зміщена, масштаб викривлений, а відстані – неточними. Налаштування повинні збігатися з тією системою, в якій планується подальше використання результатів у GIS або кадастрових системах. У Leica Infinity можна використовувати стандартні EPSG-системи або завантажувати власні файли проєкцій. Коректно налаштована система координат гарантує узгодженість результатів із топографічними чи кадастровими базами даних.

Для реалізації цього ми заходимо у вкладку Project → Properties → Coordinate System:

- 1) обираємо: WGS 84 / UTM zone 35N (EPSG:32635)
- 2) Підтверджуємо через OK

Інструменти

Таблиці кодів



Цілі



Антени



Системи координат



Геоприв'язані зображення



Таблиці класифікації

Менеджер

Видалити

І

Система координат

Ім'я	Востаннє змінено
UTM21S	18.09.2025 11:32:53
UTM22N	18.09.2025 11:32:45
UTM22S	18.09.2025 11:32:54
UTM23N	18.09.2025 11:33:04
UTM23S	18.09.2025 11:33:14
UTM24N	18.09.2025 11:33:25
UTM24S	18.09.2025 11:33:36
UTM25N	18.09.2025 11:33:47
UTM25S	18.09.2025 11:33:56
UTM26N	18.09.2025 11:34:06
UTM27N	18.09.2025 11:34:17
UTM28N	18.09.2025 11:34:27
UTM29N	18.09.2025 11:34:37
UTM30N	18.09.2025 11:34:48
UTM31N	18.09.2025 11:34:59
UTM32N	18.09.2025 11:35:10
UTM32S	18.09.2025 11:35:21
UTM33N	18.09.2025 11:35:32
UTM33S	18.09.2025 11:35:43
UTM34N	18.09.2025 11:35:54
UTM34S	18.09.2025 11:36:05
UTM35N	18.09.2025 11:36:16

Одиниці виміру

Кут	Гони [0,0001]
Напрямок	Азимут - Гони [0,0001]
Площа	Метр² [0,0001]
Відстань	Метр [0,0001]
Шир/Довг	Град, мин., сек. [0,01"]
Порядок координат	Y, X
Тиск	Мілібар [0,1]
Температура	Цельсій [0,1]
Об'єм	Метр³ [0,0001]
Ухил	% [0,0001]
Нахил	h:v [0,0001]

Система координат

Ім'я	UTM35N
Трансформація	
Тип трансформації	
Кінцевий розподіл	Немає
Еліпсоїд	WGS 1984
Проекція	UTM35N
Тип проекції	UTM
Геоїд Модель	egm08_0N-90N_0E-180E_5x5
CSCS Модель	

Рис. 3.14. Вибір системи координат

3. *Імпорт знімків БПЛА*. Імпорт знімків у проєкт дозволяє Leica Infinity автоматично зчитати їх метадані: GPS-координати, висоту польоту, орієнтацію камери, час зйомки. Ця інформація є основою для подальшого вирівнювання та побудови моделі. Дуже важливо завантажувати всі файли в початковому форматі без перейменувань, оскільки деякі алгоритми використовують послідовність знімків. Правильне завантаження зображень допомагає уникнути помилок у геометрії моделі, таких як перекося або обриви. Також на цьому етапі можна виконати первинний контроль якості: перевірити різкість, експозицію та перекриття. Якісні вихідні дані – ключ до точного та чистого фінального ортофото.

Ці дії виконуємо через вкладку Home → Import:

- 1) обираємо папку зі знімками;
- 2) переконуємось у наявності EXIF GPS
- 3) натискаємо Import

4. Імпорт наземних GCP (якщо є). Цей етап виконує просторове вирівнювання фотографій, визначає їх положення та орієнтацію у просторі

відносно одна одної. Алгоритм шукає спільні точки на різних знімках і використовує їх для побудови геометрично узгодженої структури. Результатом є базова 3D-структура польоту — так звана “каркасна модель”. Вирівнювання є особливо важливим, бо від нього залежить точність щільної хмари точок і цифрових моделей. Після вирівнювання виконують аналіз похибок, перевіряють статистику та якість вирівнювання. Неправильне або погане вирівнювання призводить до хвильових деформацій, зміщень та перекручувань у фінальних продуктах.

Ці дії виконуємо через вкладку Import → Survey Data:

- 1) формат CSV: ID, Easting, Northing, Height
- 2) прив’язати GCP на фото (Mark Point)

5. Первинне орієнтування (Aerial Triangulation). Вирівнювання знімків (Aerial Triangulation) виконує просторове вирівнювання фотографій, визначає їх положення та орієнтацію у просторі відносно одна одної. Алгоритм шукає спільні точки на різних знімках і використовує їх для побудови геометрично узгодженої структури. Результатом є базова 3D-структура польоту — так звана “каркасна модель”. Вирівнювання є особливо важливим, бо від нього залежить точність щільної хмари точок і цифрових моделей. Після вирівнювання виконують аналіз похибок, перевіряють статистику та якість вирівнювання. Неправильне або погане вирівнювання призводить до хвильових деформацій, зміщень та перекручувань у фінальних продуктах.

Для цього Виділяємо усі фото та через контексне меню Process → Aerial Triangulation; Tie Points: High; Camera Calibration: Auto; Use GCP: Yes Start

На цьому ж етапі через вкладку «Головне меню» / Картографічні сервіси додаю растрову підкладку ESRI. World Imagery.

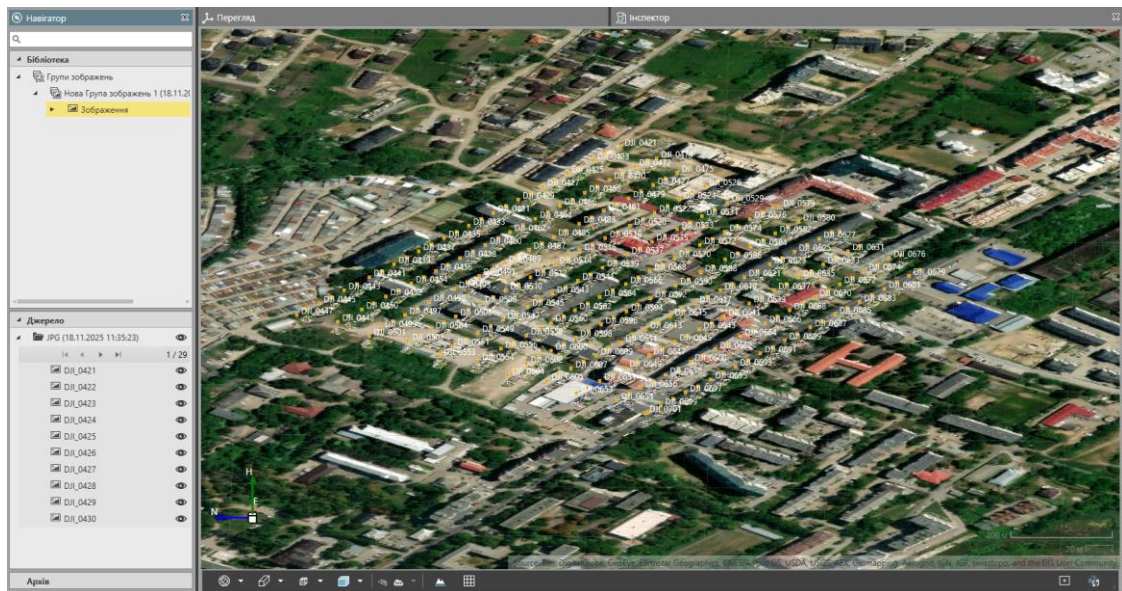


Рис. 3.15. Вирівнювання та візуалізація фотозображень

6. Створення щільної хмари точок. Щільна хмара точок утворюється на основі вирівняних знімків і являє собою детальну 3D-модель місцевості. Кожна точка має координати X, Y, Z та часто RGB-колір, що робить її майже аналогом лазерного сканування. Хмара точок є основою для побудови ЦМР/ЦММ та подальшого ортофото. Детальна хмара дозволяє виявити дрібні елементи поверхні — будівлі, дороги, паркани, рослинність. Важливо вибрати правильний рівень деталізації: надто щільна хмара збільшить обсяг обчислень, але може не дати істотної різниці для потреб проєкту. Точність щільної хмари напряму залежить від якості вирівнювання та перекриття знімків.

Для створення щільної хмари точок заходимо у Process → Point Cloud → Dense Reconstruction, обираємо Quality: Medium або High та Output: LAS/E57

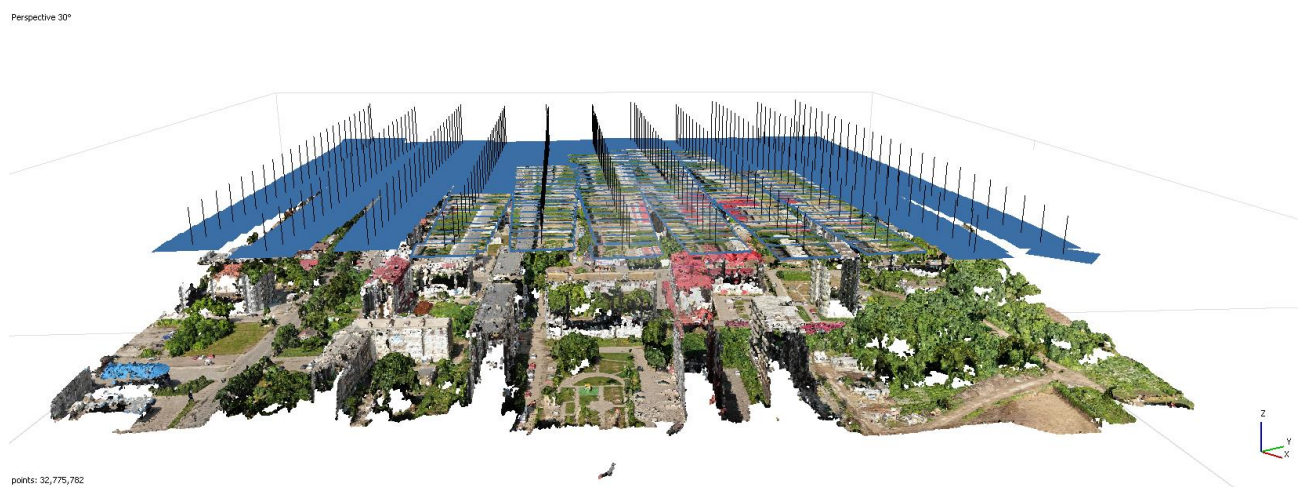


Рис. 3.16. Щільна хмара точок

7. Побудова поверхні (DSM/DTM). Цифрова модель місцевості (DTM) та цифрова модель поверхні (DSM) відображають реальну геометрію території. DSM включає всі об'єкти: дерева, будівлі, транспорт, а DTM показує лише голу землю — без усіх надземних елементів. Моделі дозволяють аналізувати рельєф, ухили, профілі та об'єми, що важливо для інженерних і будівельних робіт. Для міських територій, таких як вул. Руська в Чернівцях, DSM особливо цінна, бо детально передає структуру забудови. Побудова моделей потребує правильної фільтрації — відокремлення шумів і рослинності. Без якісних моделей неможливо створити точний ортофотоплан.

Для цього знадобиться меню Process → Surface → Generate Surface

- Джерело: Dense Point Cloud
- Тип: DSM або DTM
- Grid: 5–10 см

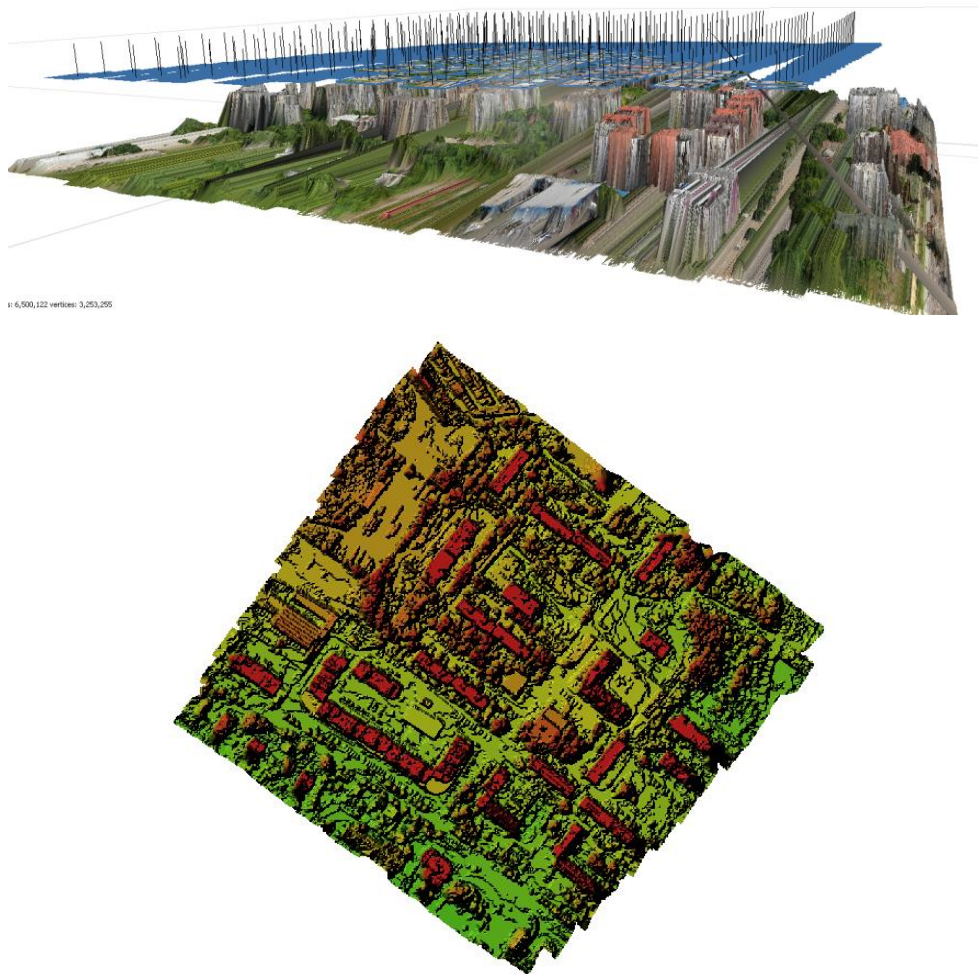


Рис. 3.18. Цифрові моделі

8. Створення ортофото. Ортофото — це геометрично виправлене зображення місцевості, приведене до масштабу з урахуванням ЦМР або ЦММ. Воно дозволяє проводити точні вимірювання відстаней та площ як у GIS-системах, так і в кадастрових роботах. Ортофото є найбільш затребуваним кінцевим продуктом зйомки БПЛА, оскільки поєднує реалістичність фотографії та точність карти. Важливо обрати правильну роздільну здатність (GSD), щоб не отримати надто великий, але малоприматний файл. На цьому етапі виконується кольорова корекція, узгодження швів та видалення артефактів. Якісне ортофото є офіційним картографічним документом, який використовується у проєктуванні, містобудуванні, благоустрої та топографічних роботах.

Для цього використовуємо модель Process → Orthomosaic → Generate Orthophoto; із наступними параметрами: Pixel size: 2–5 см /- Source: DSM; Color Balancing: On; Seamlines: Auto; Start



Рис. 3.19. Ортофотоплан на територію дослідження

9. Перегляд результатів у Infinity. Перегляд результатів у Leica Infinity дозволяє оцінити якість обробки та переконатися, що всі моделі сформовано коректно. На цьому етапі можна відкрити щільну хмару точок, DSM/DTM та ортофото, накласти їх одне на одне й перевірити узгодженість геометрії.

Інструменти візуалізації дають змогу здійснити вимірювання, аналіз рельєфу, перевірити висотні позначки та відповідність моделі реальному ландшафту. Дуже важливо переглянути наявність артефактів: “дірки”, шум, подвійні об’єкти, хвилі на дахах або завали перспективи. Завдяки панелі якості можна перевірити статистику вирівнювання, розподіл залишків та загальну точність моделі. Перегляд фінальних результатів — це контрольний етап, який гарантує, що експорт у GIS відбудеться без втрати інформації або спотворення геометрії. Якщо виявлено помилки, саме тут приймається рішення про повернення на попередні етапи та повторну обробку.

Для перегляду отриманих матеріалів використовуємо вкладку - Orthophoto → 2D View - DSM/DTM → 2D/3D View - Dense Point Cloud → 3D View - Керування шарами: Layer Manager

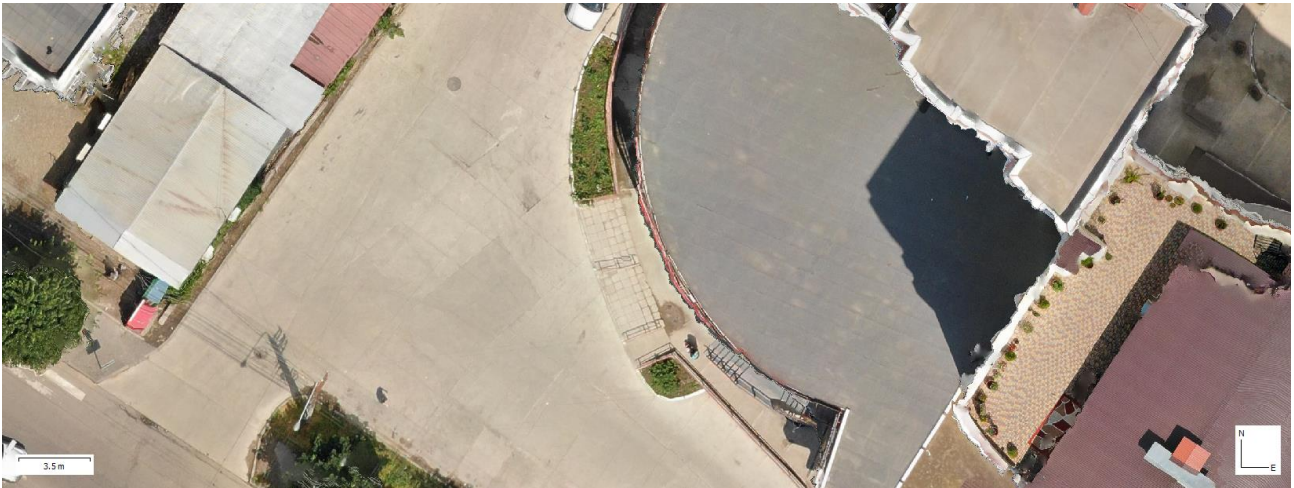


Рис. 3.20. Перегляд отриманих зображень

10. Експорт результатів/ Експорт із Leica Infinity в ArcMap 10.8 дозволяє інтегрувати створені моделі у GIS-середовище для подальшого аналізу, картографування та створення тематичних шарів. На цьому етапі можна експортувати ортофотоплан у форматі GeoTIFF, цифрові моделі рельєфу та поверхні — у TIFF/IMG, а хмару точок — у LAS/LAZ. Дуже важливо зберегти правильну систему координат (наприклад, UTM Zone 35N), щоб дані коректно прив’язалися у ArcMap без зміщень. Під час експорту варто врахувати розмір пікселя: надто висока роздільна здатність створить надмірно великі файли, що можуть уповільнити роботу ArcMap. Після імпорту в ArcMap виконують перевірку прив’язки, регулюють відображення, створюють мозаїки або додають

додаткові шари. Експорт у GIS є заключним кроком, який перетворює моделі з інженерного формату у картографічний продукт, готовий для аналізу, презентацій або технічної документації.

Для експорту матеріалів використовуємо вкладки Ортофото (GeoTIFF): Export → TIFF; DSM/DTM: Export → Surface → GeoTIFF та Point Cloud: Export → Point Cloud → LAS/LAZ/E57

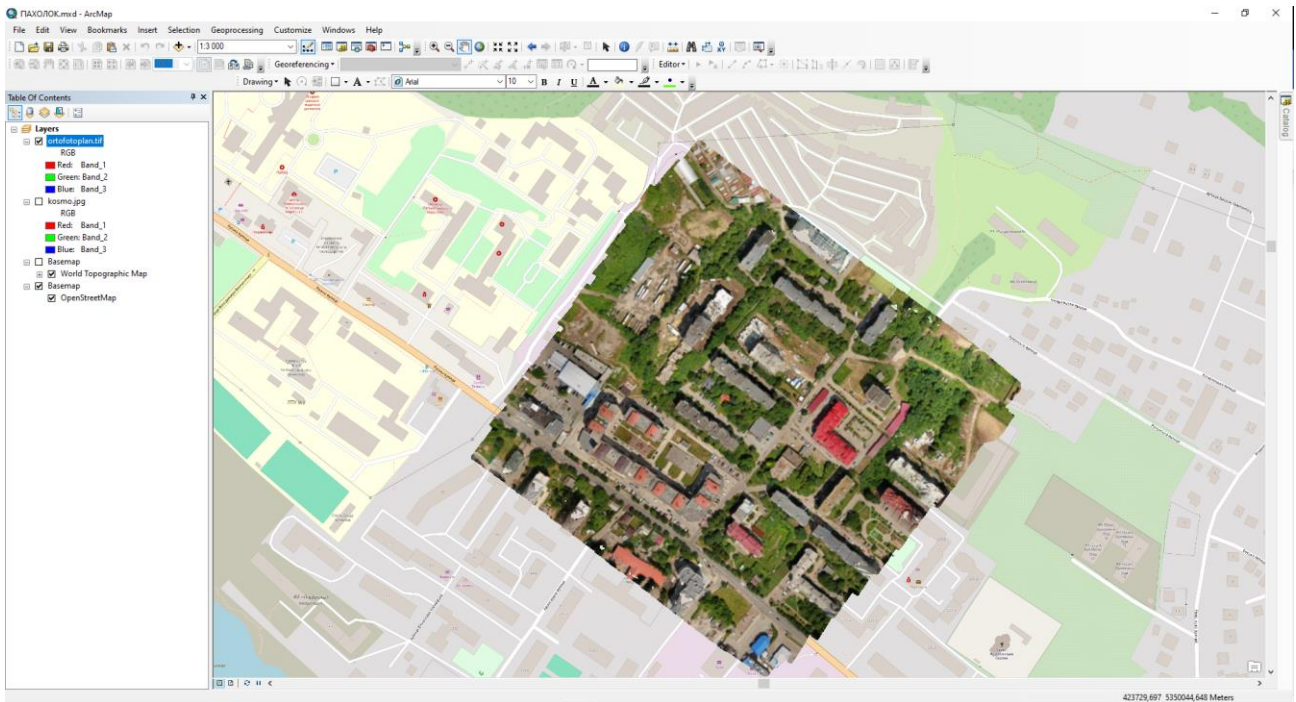


Рис. 3.21. Імпортований ортофотоплан у середовище ArcMap 10.8

ВИСНОВКИ

У результаті аналізу встановлено, що сучасні теоретико-методичні підходи до аерофотознімання ґрунтуються на поєднанні класичних принципів фотограмметрії з інноваційними цифровими технологіями. Розглянуті методи організації польотів, принципи планово-висотної прив'язки, використання розпізнавальних та опорних точок, а також особливості ортогонального та перспективного знімання. Показано, що застосування БПЛА істотно оптимізує процес збору геопросторових даних, забезпечуючи високу точність, оперативність та доступність знімальних робіт. Теоретичні основи аерофотознімання залишаються ключовими для забезпечення точності кінцевого картографічного продукту.

Проведений огляд програмного забезпечення підтвердив, що ринок інструментів для фотограмметричної та ГІС-обробки активно розвивається. Agisoft Metashape, Pix4Dmapper та інші програмні комплекси демонструють високий рівень автоматизації, підтримують сучасні алгоритми SfM та MVS, забезпечують побудову щільних хмар точок, DEM/DTM та ортофотопланів. Кожен із комплексів має специфіку: Metashape відзначається широкими налаштуваннями та точністю, Pix4D — швидкістю та інтеграцією з хмарию, тоді як Leica Infinity більш орієнтований на геодезичні вимірювання та роботу з GNSS/тахеометричними даними. Огляд програм показав, що вибір ПЗ визначається характером завдання, вимогами до точності та рівнем інтеграції з польовим обладнанням.

Досліджено, що Leica Infinity є потужною офісною платформою для обробки та узгодження геодезичних даних, включаючи GNSS-вимірювання, тахеометрію, нівелювання та фотограмметричні матеріали, отримані з приладів Leica. Програма забезпечує структуровану обробку вимірювань, контроль якості, зручну візуалізацію, підтримку різних форматів та можливість комплексної інтеграції з Leica Captivate. Підтверджено, що Infinity ефективна не лише для класичних геодезичних задач, а й для базової обробки фотознімків, що дозволяє покращити точність і повноту даних, отриманих під час аерофотознімання.

Виконане аерофотознімання території житлового масиву продемонструвало ефективність використання БПЛА для отримання високоякісних зображень із необхідним перекриттям та роздільною здатністю. Зйомка була проведена із дотриманням методичних вимог, що забезпечило коректність подальшої фотограмметричної обробки. Зібрані матеріали містять достатній обсяг інформації для побудови цифрових моделей місцевості, ортофотопланів та інших геопросторових продуктів, підтверджуючи придатність технологій БПЛА для великомасштабних досліджень.

У ході камеральної обробки встановлено, що особливості обробки аерофотознімків містять важливі етапи: імпорт та попередню корекцію знімків, автоматизоване вирівнювання, формування хмар точок, побудову цифрових моделей рельєфу та створення ортофотоплану. Виявлено, що використання Leica Infinity дає змогу коректно поєднувати фотограмметричні матеріали з традиційними геодезичними даними, забезпечуючи підвищену точність кінцевих результатів. Особливу увагу приділено розстановці GCP, контролю помилок, перевірці точності та відповідності вимогам до картографічних робіт. Камеральна обробка підтвердила важливість комплексного підходу та правильного вибору програмного забезпечення.

Список використаних джерел

1. Agisoft LLC. Metashape Professional User Manual. – St. Petersburg / EU Office, 2023.
2. Agisoft PhotoScan Professional Edition v 1.2: мануал. Електронне видання. 119 с.
3. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014.
4. DJI. Mavic 2 Series User Manual. – Shenzhen, 2022.
5. Eisenbeiss H. UAV Photogrammetry. – ETH Zurich, 2009.
6. European Environment Agency. Copernicus Programme: Data Handbook. – Copenhagen, 2020.
7. Fritz A., Stewart K. UAV Applications in Urban Planning. *Urban Science Journal*, 2022.
8. Harwin S., Lucieer A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds from UAVs. *Remote Sensing*, 2012.
9. ISPRS. Best Practices for UAV Photogrammetry. – Hannover, 2021.
10. Kraus K. Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. – Berlin: De Gruyter, 2011.
11. Leica Geosystems. Leica Infinity User Manual. – Heerbrugg (Switzerland), 2023.
12. Lucieer A., de Jong S. Unmanned aerial systems in precision agriculture. *International Journal of Remote Sensing*, 2019.
13. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. – Berlin: Walter de Gruyter, 2020.
14. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping: a review. *Applied Geomatics*, 2018.
15. Pix4D. Pix4Dmapper Technical Documentation. – Lausanne, 2023.
16. Remondino F. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry. *Remote Sensing*, 2011.
17. Štroner M. et al. Evaluation of UAV measurement accuracy using ground control points. *Sensors*, 2020.

18. Turner D., Lucieer A. UAV-based mapping for environmental monitoring. *Remote Sensing*, 2015.
19. United Nations GGIM. Future Trends in Geospatial Information Management. – New York, 2020.
20. Westoby M. et al. Structure-from-Motion photogrammetry: a low-cost tool. *Geomorphology*, 2012.
21. Wolf P. R., Dewitt B. A., Wilkinson B. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. – New York: McGraw-Hill, 2014.
22. Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки. Матеріали доповідей 1-ї Всеукраїнської конференції. (Київ, 3-5 червня, 2008 р.). Київ : Наук, думка, 2008. 264 с.
23. Білокриницький С. М. Фотограмметрія і дистанційне зондування Землі: навчальний посібник. Чернівці: Рута, 2007. 320 с.
24. Буйвал Маркіян, Пелих В. Технології застосування БПЛА для створення топографічних планів. // Геодезія та картографія. – 2021. – №2.
25. Гасюк Ю. Г., Білокриницький С. М. Геоінформаційні системи та цифрові методи картографування. – Чернівці: ЧНУ, 2020.
26. Геопортал Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру : Науково-дослідний інститут геодезії та картографії. Режим доступу: <http://dgm.gki.com.ua/map>
27. Греков Л. Д., Красовський Г. Я., Трофимчук О. М. Космічний моніторинг забруднення земель техногенним пилом. К. : Наук, думка, 2007. 123 с.
28. Гриньків Н. З., Фаргал А. М. Використання матеріалів космічного знімання з метою актуалізації картографічної інформації. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наук. праць. Львів : Ліга-Прес.
29. Гриньків Н., Почкін С. Створення та оновлення базових картографічних матеріалів із використанням аерокосмічних зображень. Вісник національного університету «Львівська політехніка», 2008. 8 с.
30. Гриньків Н., Почкін С. Створення та оновлення базових картографічних матеріалів із використанням аерокосмічних зображень. Вісник національного університету «Львівська політехніка», 2008. 8 с.

31. Гутиряк О. П. Сучасні методи дистанційного зондування в геодезії. – Львів: Видавництво ЛНТУ, 2021.
32. Дистанційне зондування Землі : тлумачний словник ; за ред. В. С. Готиняна. К. : НКАУ, Природа, 1996. 518 с.
33. *Дорожинський О. Л., Р. Тукай.* Фотограмметрія : підручник. Л. : Вид-во Львів, нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2008. 332 с.
34. ДСТУ ISO 19101:2015 Географічна інформація. Стандарти та принципи. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2015.
35. ДСТУ Б Б.1.1–17:2013. Склад та зміст топографо-геодезичних робіт. – К.: Мінрегіон України, 2013.
36. Закон України «Про Державний земельний кадастр». – К.: Верховна Рада України, 2011.
37. Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність». – К.: ВРУ, 1998.
38. Класифікатор інформації, яка відображається на топографічних картах масштабів 1:25000, 1:50 000, 1:100 000 . К. : Головне управління геодезії, картографії та кадастру при КМУ, 1998. 43 с.
39. Класифікатор інформації, яка відображається на топографічних планах масштабів 1:500, 1:1 000, 1:2 000, 1:5 000. К. : Головне управління геодезії, картографії та кадастру при КМУ, 1998. 43 с.
40. *Космічні знімки серії Ikonos:* електронний ресурс, режим доступу через SAS. Planet / Google Maps 2014.
41. *Кохан С. С., Востоков А. Б.* Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи : підручник. К.: Вища шк., 2009. 511 с.
42. *Красовський Г. Я., Петросов В. А.* Інформаційні технології космічного моніторингу водних екосистем і прогнозу водоспоживання міст. К. : Наук, думка, 2003. 224 с.
43. Кузьменко Т. І. Основи аерофотознімання та фотограмметрії. – Харків: ХНАМГ, 2019.
44. Мазур А. Дистанційне зондування Землі: теорія та практика. – Львів: ЛНУ, 2020.

45. Облікова картка м. Чернівці, від 1.01.2025 р. офіційний веб-сайт Верховної Ради України : <http://gska2.rada.gov.ua/pls/z7502/A005?rdat1=16.11.2011&r7571=13163>.

46. Паламарчук В. П. Фотограмметрія. – Київ: КНУБА, 2017.

47. План топографічний масштабу 1:2000 номенклатури М-35-136-(235-г).

48. *Сохнич А. Я.* Оптимізація землекористування в умовах реформування земельних відносин. Львів : “Українські технології”, 2000. 108 с.

49. *Сохнич А. Я.* Проблеми використання і охорони земель в умовах ринкової економіки. Монографія. Львів : “Українські технології”, 2002. 252 с.

50. *Сохнич А. Я., Богіра М. С., Козаченко Л. М.* Використання геоінформаційних технологій для моніторингу земель. Вісник Львів. держ. аграр. ун-ту : землевпорядкування і земельний кадастр. 2007. №10. С. 299-303.

51. *Сохнич А. Я., Горлачук В. В., Наход А. В. та ін.* Управління земельними ресурсами : регулювання земельних відносин. Навч. посібник. Львів, 2008. 255 с.

52. Топографо-геодезична та картографічна діяльність : законодавчі та нормативні акти. В 2-х частинах : Ч. 1. 252 с.

53. Україна з космосу. Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів, за ред. В. І. Лялька, О. Д. Федоровського. К. : НАН України, 1999. 34 с.