

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

Чорнописький Вадим Любомирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Дослідження точності 3D-позиціонування при фотограмметричній зйомці
з БПЛА методом структури з руху та багатовидового стерео на прикладі
тестової ділянки

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня

В.Л. Чорнописький

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Ільків Євгеній Юрійович к.т.н.доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

(посада)

(підпис) (дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

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

Чорнописький Вадим Любомирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Дослідження точності 3D-позиціонування при фотограмметричній зйомці з БПЛА методом структури з руху та багатовидового стерео на прикладі тестової ділянки »

керівник роботи: _____

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

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

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

1. Збір даних
2. Методологія дослідження
3. Аналіз результатів досліджень

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Збір даних		
2	Методологія дослідження		
3	Аналіз результатів досліджень		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

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

Керівник роботи

Анотація

Бурхливе удосконалення безпілотних рухомих засобів, доповнене техніками фотограмметричної візуалізації, зокрема використанням підходів Structure from Motion (SfM) та Multi-View Stereo (MVS), створило нинішній потужний апарат для формування деталізованих тривимірних проєкцій земної площини.

Залучення дронів для аерофотозйомки з невеликої висоти надає неабиякі переваги для генерації цифрових моделей висот, точних планів місцевості (ортофотопланів) та насичених точкових хмар, які знаходять широке застосування у геодезичних інженерних завданнях, нагляді за зміщеннями ґрунту, дослідженні змін у ландшафтах, кошторисі об'ємів гірських порід та фіксації локаційних змін ділянок.

Попри те, що ця технологія отримала значне поширення, ступінь внутрішньої точності тривимірної локалізації, здобутої виключно за допомогою фотограмметрії на основі БПЛА (БПЛА-SfM) без залучення додаткових наземних геодезичних вимірювань, залишається об'єктом недостатнього вивчення.

Це питання набуває особливої ваги для українських реалій, адже підсумки аерофотознімання нерідко стають основою для розв'язання завдань інженерної геодезії, землевпорядкування та нагляду за схильними до небезпеки природними явищами.

У межах цієї бакалаврської роботи бакалавра було здійснено практичну апробацію точності 3D-координатування, отриманого після аерофотознімання безпілотником DJI Phantom 4 RTK, на спеціально облаштованому полігоні із поверхнею, що характеризується помірною стабільністю.

Мали місце три окремі повітряні фотосесії тієї ж ділянки, виконані з ідентичними умовами польоту.

Відзнятий матеріал піддавався обробці за допомогою методів Structure-from-Motion та Multi-View Stereo, завдяки чому для кожного етапу зйомок було створено цифрові моделі висот (DSM), ортофотозображення (DOM) та насичені хмари точок.

Аби зважити на те, як часто та де саме повторюються результати, задіяли метод аналізу вибірових вікон у межах хмар точок.

Це дало змогу виявити, наскільки відрізняються координати по горизонталі й вертикалі між моделями, що були зняті під час різних прольотів.

Окрім того, створили моделі різниці поверхонь (DoD — Difference of DSM), аби розібратися у природі та масштабі просторових зсувів, що існують між цифровими моделями.

Ці дані дали змогу констатувати: якщо витримуються ідентичні параметри фіксації зображень та забезпечена незмінність площини, то можна отримати точність вимірювання позицій пунктів до одного сантиметра, причому як за горизонтальною, так і за вертикальною складовими.

Окрім того, з'ясувалося, що територіальні відрізки з поверхнею, яка пройшла стабілізацію та ущільнення, демонструють вищу стабільність (повторюваність) отриманих значень, аніж ділянки, схильні до змін, спричинених порами року чи механічним впливом.

Отримані висновки дають змогу визначити практичні рамки використання аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів для інженерно-геодезичних та геоморфологічних наукових розробок у межах України, а також можуть стати ґрунтовною методологією для вдосконалення планів накопичення інформації за допомогою технології структурної з фототриангуляції та багаторакурсного стереофотограметричного моделювання.

Ключові слова: БПЛА, фотограмметрія, Structure from Motion, Multi-View Stereo, цифрова модель поверхні, ортофотоплан, точність позиціонування, повторні спостереження, різницева модель.

Abstract

The rapid development of unmanned mobile vehicles, complemented by photogrammetric visualization techniques, in particular the use of Structure from Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) approaches, has created the current powerful apparatus for forming detailed three-dimensional projections of the earth's plane.

The use of drones for aerial photography from a low altitude provides significant advantages for the generation of digital elevation models, accurate terrain plans (orthophotos) and rich point clouds, which are widely used in geodetic engineering tasks, monitoring soil displacements, studying landscape changes, estimating rock volumes and recording locational changes of plots.

Despite the fact that this technology has gained significant popularity, the degree of internal accuracy of three-dimensional localization obtained exclusively using UAV-based photogrammetry (UAV-SfM) without the involvement of additional ground-based geodetic measurements remains an object of insufficient study.

This issue is of particular importance for Ukrainian realities, because the results of aerial photography often become the basis for solving problems in engineering geodesy, land management and monitoring of hazardous natural phenomena.

Within the framework of this bachelor's thesis, a practical test of the accuracy of 3D coordination obtained after aerial photography with a DJI Phantom 4 RTK drone was carried out on a specially equipped polygon with a surface characterized by moderate stability.

Three separate aerial photo shoots of the same area were carried out under identical flight conditions.

The captured material was processed using the Structure-from-Motion and Multi-View Stereo methods, thanks to which digital elevation models (DSM),

orthophotos (DOM) and saturated point clouds were created for each stage of the shooting.

To take into account how often and where the results are repeated, the method of analysis of selected windows within the point clouds was used.

This made it possible to find out how much the horizontal and vertical coordinates differ between the models that were shot during different flights.

In addition, difference of surface models (DoD) were created to understand the nature and scale of spatial shifts that exist between the digital models.

These data made it possible to state: if identical image fixation parameters are maintained and the invariance of the plane is ensured, then it is possible to obtain an accuracy of measuring the positions of points up to one centimeter, both in the horizontal and vertical components.

In addition, it was found that territorial segments with a surface that has undergone stabilization and compaction demonstrate higher stability (repeatability) of the obtained values than areas prone to changes caused by seasons or mechanical impact.

The obtained conclusions make it possible to determine the practical framework for the use of aerial photography from unmanned aerial vehicles for engineering, geodetic and geomorphological scientific developments within Ukraine, and can also become a solid methodology for improving information accumulation plans using structural phototriangulation technology and multi-angle stereophotogrammetric modeling.

Keywords: UAV, photogrammetry, Structure from Motion, Multi-View Stereo, digital surface model, orthophotomap, positioning accuracy, repeated observations, difference model.

ЗМІСТ

Вступ

1. Збір даних

- 1.1 Досліджувана територія
- 1.2 Схема збору даних повторних спостережень із застосуванням БПЛА
- 1.3 Програмне забезпечення та параметри виконання повторних польотів
- 1.4 Методика фотограмметричної обробки в Agisoft Metashape

2. Методологія дослідження

- 2.1 Технічна основа дослідження
- 2.2 Побудова цифрової моделі поверхні методом SfM–MVS
- 2.3 Методи віконної вибірки та диференціальної обробки

3. Аналіз результатів досліджень

- 3.1 Візуалізація та інтерпретація типових класів земельного покриття
- 3.2 Порівняльний аналіз 3D-точності типових класів поверхні на основі віконної вибірки
- 3.3 Аналіз точності 3D-моделей БПЛА за допомогою DoD-DSM

Висновки

Список використаної літератури

Вступ

Протягом недавніх років методи 3D-реконструкції рельєфу, що базуються на підходах Structure from Motion (SfM) та Multi-View Stereo (MVS), знайшли значне поширення у таких галузях, як інженерна геодезія, земельне управління, геоморфологічні дослідження та спостереження за загрозливими природними явищами.

Інтеграція цих алгоритмів зі знімками високої деталізації, захопленими за допомогою безпілотних авіаційних систем (БПЛА), дає змогу швидко генерувати насичені хмари точок, а також отримувати цифрові моделі рельєфу (DSM), цифрові моделі земної поверхні (DTM) та ортофотоплани.

На противагу традиційним підходам, як-от аерофотозйомка чи сканування лазером із землі, фотограметрія, що базується на використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА), вирізняється помірною складністю організації знімальних операцій та фінансовою вигодою.

Формування об'ємної (3D) моделі вимагає лише гарантування необхідного ступеня накладання знімків, не потребуючи заплутаних етапів попереднього налаштування параметрів камери.

Саме завдяки цьому технологія UAV-SfM (Structure from Motion з використанням БПЛА) швидко здобула поширення у топографо-геодезичних роботах на території України, особливо при проведенні проєктувальних вишукувань, спостережень за зсувними процесами, інспектування кар'єрів, підрахунку обсягів переміщеного ґрунту та фіксації об'єктів інфраструктури.

Цифрові моделі терену, отримані шляхом опрацювання аерофотознімків за допомогою технології SfM-MVS, знаходять застосування у дослідженні форми рельєфу, виявленні трансформацій у

конфігурації об'єктів, підрахунку об'ємів та здійсненні просторових обчислень.

При цьому якість цих моделей детермінована сукупністю умов: висотою апарату над поверхнею, деталізацією зображення (масштабом), ступенем надійного накладання кадрів по ходу руху та впоперек, нахилом оптичної осі, характеристиками сенсора, освітленістю сцени, а також обраними методами узгодження зображень та прив'язки до координат.

Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) все частіше комплектуються двочастотними системами супутникового позиціонування (GNSS), які підтримують функціонал RTK чи PPK.

Це дає змогу фіксувати географічне положення центрів знімків із точністю до сантиметра. Якщо задіюються мережі референціальних точок, що працюють безперервно (CORS), виникає перспектива суттєво скоротити, а то й зовсім уникнути потреби у великій кількості точок контролю на землі.

Попри це, навіть при використанні високоточного RTK-позиціонування, тема внутрішньої узгодженості та стійкості цифрових моделей, створених за технологією UAV-SfM, досі потребує глибшого вивчення.

Розгляд останніх наукових праць показує, що дослідження того, як висота зльоту, орієнтація повітряних ліній, кут камери та кількість наземних опорних точок впливають на достовірність результатів фотограмметрії.

З'ясовано, що знімки, зроблені під кутом, можуть підвищити якість просторового моделювання об'єктів зі складною геометрією, тоді як зйомка прямо згори гарантує надійніші результати у плані горизонтальних координат.

Проте, дані різноманітних пілотних випробувань демонструють певну нерівномірність досягнутої точності, що підкреслює потребу в додатковому, детальному тестуванні потенціалу цієї методики у практичних сценаріях використання.

Зважаючи на вищесказане, нагальним постає вивчення збіжності та просторової коректності цифрових моделей рельєфу, що формуються після серійних зніманих ідентичної території, використовуючи ідентичні параметри аерофотозйомки.

Завданням цієї випускної кваліфікаційної роботи є емпірична апробація точності й відтворюваності цифрових моделей рельєфу, здобутих фотограмметричним методом з використанням безпілотних літальних апаратів та застосуванням методик SfM-MVS, окрім того, визначення практичних лімітів застосовності цієї технології для виконання інженерно-геодезичних завдань у межах України.

Аби досягти означеної цілі, заплановано здійснити низку кроків: вивчити поточний етап розвитку технології UAV-SfM; з'ясувати, які чинники впливають на ступінь точності цифрових моделей; провести серію повторних аерофотозніманих визначеної тестової території, використовуючи безпілотні літальні апарати з функцією RTK; здійснити фотограмметричну переробку отриманих даних для формування хмар точок та ЦМР (цифрових моделей рельєфу); виконати просторовий аналіз відмінностей між підсумками різних зніманих, застосовуючи підходи вибіркового зіставлення та створення моделей розбіжностей (DoD); визначити точність результатів як у плані, так і за висотою, а також розробити практичні поради для вдосконалення параметрів знімального процесу.

У фокусі нашого дослідження перебуває процес творення цифрових мап рельєфу, що формуються на основі даних аерофотографування з безпілотника, із застосуванням підходу Structure from Motion.

Натомість, об'єктом вивчення стали такі параметри, як ступінь точності, відтворюваність та геометричні властивості цих цифрових моделей земної поверхні.

Ці моделі були здобуті шляхом використання технології UAV-SfM, інтегрованої із системою RTK-визначення координат, задля подальшої фотограмметричної обробки.

Набуті відомості є корисними для поліпшення надійності геопросторової інформації, яка задіюється при здійсненні топографічних, геодезичних та наглядових заходів у межах України, а саме в системі референцних координат УСК-2000.

1. Збір даних

1.1 Досліджувана територія

Для того, аби здійснити експериментальне підтвердження рівню точності, було відібрано полігон у межах Івано-Франківщини, котрий вирізняється доволі стійкою поверхнею та не займається активними процесами деформації.

Такий вибір місцевості дав змогу зменшити вплив природних трансформацій ландшафту на дані наступних знімальних сесій і цілком сфокусуватися на визначенні якості збудованих фотограмметричних моделей.

Обстежувана територія лежить у відкритому просторі, де небосхил проглядається добре, що гарантує надійне приймання сигналів від супутників GNSS та точне визначення координат методом RTK.

Дана місцевість позбавлена суттєвих бар'єрів, які б блокували шлях сигналу (наприклад, височених споруд чи густого лісу), отже, складаються ідеальні передумови для виконання аерофотознімальних робіт за допомогою безпілотного літального апарату.

Територія, яку ми досліджуємо, здебільшого являє собою пласкі землі, де висоти змінюються зовсім несуттєво, локально.

Краєвид формується як рукотворними, так і природними елементами: можна побачити шматки проїжджої частини, деталі облаштування простору, окремі будівлі та зелені зони, вкриті травою.

Рослинність займає приблизно шістдесят-вісімдесят відсотків усієї площі, що дає змогу проаналізувати, як різні види основ впливають на якість отриманої тривимірної моделі.

Орієнтовні габарити зразкової ділянки сягають 60 метрів у ширину та 65 метрів у довжину, загальна площа якої складає приблизно 0,4 гектара.

Цей обсяг є достатнім для того, аби зібрати репрезентативну вибірку ключових об'єктів, необхідну для ефективного функціонування методів SfM-MVS та створення деталізованої просторової моделі (щільна хмара точок).

Водночас, такий розмір зберігає його практичність для виконання серії однакових льотних випробувань.

План розміщення цієї території для дослідження можна побачити на ілюстрації під номером 1.



Рисунок 1. Схема розташування досліджуваної території

1.2 Схема збору даних повторних спостережень із застосуванням БПЛА

З метою здійснення аерофотознімання ділянки, що підлягала дослідженню, залучали безпілотник DJI Phantom 4 RTK.

Цей апарат був обладнаний вбудованим двочастотним приймачем супутникових навігаційних систем (GNSS), що підтримує функціонування у режимах як RTK, так і PPK.

Використання даної апаратної бази дає змогу досягти вищої точності у визначенні координат точок центру знімкування, а також мінімізувати похибки, пов'язані з геодезичним прив'язуванням.

Увесь комплект для аерофотознімання складається з самого літального апарата (БПЛА), системи, що відповідає за управління польотом, навігаційного блоку GNSS, а також інтегрованого цифрового фотоапарата, параметри фокусної відстані якого є незмінними.

Керування польотом реалізується на основі попередньо розробленого плану місії, де вже встановлені такі характеристики, як робоча висота, швидкість пересування, необхідний ступінь накладання зображень та орієнтація лінії польоту.

Бортовий навігаційний комплекс безпілотного літального апарату (БПЛА) оперує на базі сигналів від сузір'їв низки світових навігаційних систем (маються на увазі GPS, ГЛОНАСС, Галілео та Бейдоу), що дає змогу зберігати високу надійність визначення місця розташування навіть тоді, коли частина сигналів недоступна.

Завдяки функції підтримки режиму RTK, є можливість досягати сантиметрової точності координат відразу, якщо є доступ до мережі стаціонарних базових станцій (CORS).

Це надзвичайно цінно, зокрема, для виконання геодезичних та топографічних завдань, що проводяться на території нашої держави.

Інформацію збирали шляхом проведення багаторазових прольотів, дотримуючись однакових умов: фіксована висота аерофотозйомки, постійний рівень накладання знімків по лінії польоту та убік, незмінний курс польотних трас, а також ідентичні параметри експонування.

Завдяки такій методиці вдається зменшити вплив випадкових змін зовнішнього середовища, що є запорукою тотожності порівняльних цифрових моделей рельєфу.

Зняті матеріали реєструвалися із прив'язкою до географічних координат точок центру знімків, які згодом застосовувалися для обробки у фотограмметричній програмі за технологією SfM-MVS.

Суттєві технічні особливості безпілотного апарату та апаратури камери представлені у Таблиці 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики дрона DJI Phantom 4 RTK

Параметр платформи БПЛА	Значення	Параметр камери	Значення
Модель	DJI Phantom 4 RTK	Модель	FC6310R
Маса (з гвинтами та акумулятором)	1391 г	Розмір зображення	5472 × 3648 пікселів
Тривалість польоту	30 хв	Розмір сенсора	13,2 × 8,8 мм
Максимальна висота зльоту	6000 м	Розмір пікселя	2,4 мкм
Максимальна горизонтальна швидкість	50 км/год (режим позиціонування) 58 км/год (режим Attitude)	Фокусна відстань об'єктива	8,8 мм
Система позиціонування	RTK GNSS	Кут огляду (FOV)	84°

1.3 Програмне забезпечення та параметри виконання повторних польотів

Комп'ютерні роботи з аерофотознімками та то структуральне моделювання здійснювалися на робочій станції, оснащій процесором Intel® Xeon® E5-2609 v4 з тактовою частотою 1,70 ГГц та 32 гігабайтами оперативної пам'яті.

Цей рівень апаратної конфігурації є цілком спроможним для забезпечення необхідної швидкості виконання усього фотограмметричного робочого процесу, що охоплює вирівнювання знімків, формування насиченої хмари точок та створення цифрових моделей рельєфу.

У процесі ґрунтового експериментального вивчення було проведено тестування низки програмних рішень, призначених для створення тривимірних моделей за методом Structure from Motion (SfM).

До них належали такі продукти, як Pix4D, Agisoft PhotoScan (нині Metashape), Bentley ContextCapture та низка інших розробок.

Здійснивши суміжне зіставлення отриманих результатів, було виявлено, що програмний комплекс Agisoft Metashape демонструє найбільш надійну якість у плані відновлення об'єктів, забезпечує адекватну насиченість точковими даними та точне відображення геометричних параметрів будівель та ландшафту на дослідженій території.

З огляду на це, саме ця програмна платформа була обрана як основна для подальшої роботи з отриманими даними.

Софт від Agisoft Metashape – це комерційне рішення для створення тривимірних моделей шляхом фотограмметрії, яке впроваджує методики Structure from Motion та Multi-View Stereo.

Ця програма здатна опрацьовувати як звичайні цифрові світлини, зняті з безпілотників, так і супутникові знімки (якщо доступні раціональні поліноміальні коефіцієнти – RPC).

У межах повноцінного робочого процесу обробки зображень створюються класичні фотограмметричні результати: насичені хмари точок, цифрові моделі рельєфу (поверхні – DSM), цифрові карти висот (місцевості – DTM) та ортофотомозаїки.

Складання плану польотів здійснювалося із застосуванням софту DJI Pilot.

Траєкторію аерофотозйомки розробляли, беручи до уваги характерні особливості рельєфу ділянки та обов'язковий ступінь накладання кадрів.

З метою гарантування зіставності даних для подальшого аналізу достовірності отриманих результатів, було виконано три зальоти, кожен з яких проходив за тими ж самими заданими критеріями.

Кожен виліт був здійснений згідно з єдиним шаблоном:

- висота, на якій апарат рухався — 40 метрів;
- зсув по лінії руху — 80 відсотків;
- зсув по лінії, перпендикулярній руху — 80 відсотків;
- загальна кількість кадрів, зафіксованих під час одного обліту — 65 штук.

Льотні роботи здійснювалися за ідентичних метеорологічних умов (сонячна погода без вітру), завдяки чому вдалося звести до мінімуму вплив освітленості та атмосферних явищ на підсумки опрацювання.

Аби спростити майбутній аналітичний процес, групи знімків були умовно класифіковані як H40-1, H40-2 та H40-3.

Тут цифра 40 вказує на висоту, з якої виконувалася аерофотозйомка, а порядковий номер позначає черговість здійснення кожного польоту.

Ці три окремі масиви даних лягли в основу для подальшого дослідження точності та виявлення просторових відмінностей між цифровими моделями, створеними за тотожних умов знімання.

1.4 Методика фотограмметричної обробки в Agisoft Metashape

Опрацювання матеріалів аерофотозйомки з використанням фотограмметрії проводилося у фаховому програмному забезпеченні Agisoft Metashape Professional.

Це програмне забезпечення втілює підходи Structure from Motion (SfM) та Multi-View Stereo (MVS) для створення просторових моделей рельєфу, базуючись на цифрових знімках, що дотичні один до одного.

Робота з кожною з трьох комплектів фотографій (позначених як Н40-1, Н40-2 та Н40-3) виконувалась окремо.

При цьому використовувалися ідентичні налаштування, що гарантувало достовірність подальшого зіставлення збудованих моделей.

На початковій стадії здійснювався автоматичний пошук специфічних орієнтирів (детектування ознак) та зіставлення їх між собою на знімках, що накладаються.

Під час процедури баричного вирівнювання (орієнтування) були визначені такі складові:

- внутрішні характеристики апарату (фокусна відстань, спотворення лінз);
- зовнішні параметри позиціонування (просторова орієнтація та кутові зміщення апаратури);
- первинний, нещільний масив об'ємних точок.

Аби гарантувати відмінну якість позиціонування, було застосовано режим високої точності, а також проведено автоматичне доведення до оптимальних значень калібрувальних констант через процес **bundle adjustment**.

По закінченні стадії обчислення збіжності розпочато формування насиченої хмари точок, використовуючи технологію багатопланового стереозображення (MVS).

Для цього залучався режим високої інтенсивності опрацювання з помірним ступенем очищення від сторонніх шумів.

На даній фазі створювався деталізований, тривимірний контур поверхні з високою деталізацією, що фіксував як природні геоморфологічні риси, так і рукотворні споруди.

Опісля формування насиченої хмари точок, проводилося її первинне очищення для усунення невідповідних та відокремлених точок, котрі могли з'явитися через збої у процесі узгодження зображень.

Використовуючи цю насичену точкову хмару, формувалася числова модель рельєфу (ЦМР), що репрезентує реальну конфігурацію земної поверхні, а також усіх розташованих на ній елементів (дерев, будівель, інфраструктури).

Процедура згладжування (інтерполяції) застосовувалася через стандартний метод тріангуляції, вбудований у програмне забезпечення Metashape.

Точність просторового відображення моделі відповідала значенню піксельного розміру на місцевості (GSD), котре безпосередньо залежало від параметрів аерофотографування (висота польоту 40 м та технічні характеристики апаратури).

Остаточним кроком обробки стало створення ортофотоплану, базисом для якого слугувала збудована ЦМР (цифрова модель рельєфу).

Процедура ортотрансформування враховувала як параметри зовнішнього орієнтування, так і саму конфігурацію моделі.

Здобуті ортофотоплани застосовувалися для візуальної перевірки якості проведеної реконструкції, а також для дослідження відповідності планового положення результатів, отриманих із послідовних аерофотознімальних сесій.

Варто зазначити, що через застосування RTK-технології під час зйомки, визначення координатних положень центрів експонування було досягнуто з точністю до сантиметра.

Увесь процес обробки відбувався у геодезичному референцному полі, що було синхронізовано з державною системою координат України (УСК-2000).

Для задоволення потреб застосовувалось додаткове вдосконалення орієнтування, беручи до уваги еталонні або референтні точки з метою визначення тих неточностей, що лишилися.

Отже, фотограмметрична обробка кожного з трьох комплектів світлин проводилася за ідентичною послідовністю дій, що гарантувало можливість порівняння збудованих цифрових моделей рельєфу.

Це підготувало ґрунт для подальшого чисельного дослідження достовірності та визначення просторових розбіжностей між даними, отриманими під час послідовних замірів.

2. Методологія дослідження

2.1 Технічна основа дослідження

З метою проведення експериментального дослідження рівня точності виявлення змін, а також оцінки стабільності (повторюваності) цифрових моделей рельєфу, створених на основі матеріалів аерофотозйомки, виконаної безпілотними літальними апаратами (БПЛА) споживчого сегменту, була сконструйована уніфікована методологічна схема.

Ця схема встановлює чіткий порядок дій щодо збору, подальшої обробки та зіставлення інформації, отриманої під час багаторазового обльоту тієї ж самої (незмінної, інваріантної) території.

Центральною ідеєю цієї роботи є серійне проведення аерофотографування однієї й тієї ж ділянки місцевості, використовуючи при цьому незмінні параметри як для самого польоту, так і для подальшої обробки даних.

Це робиться задля того, щоб визначити рівень внутрішньої узгодженості (стабільності) отриманих фотограмметричних вимірювань.

Завдяки застосуванню цієї методології стає можливим чітко розмежувати збійні значення, що виникають внаслідок роботи алгоритмів, відповідальних за відновлення тривимірної моделі та прив'язку її до координат, від тих змін, які фактично відбулися на самій земній поверхні.

Технічне підґрунтя дослідження охоплює низку визначальних елементів:

1. Етап знімання на місці — здійснення серії повторних облітів за допомогою безпілотних літальних апаратів, оснащених RTK-системою, при цьому параметри висоти, ступеня перекриття кадрів та маршруту польоту залишаються незмінними.

2. Фотограмметрична стадія обробки — створення окремих цифрових моделей рельєфу (DSM) для кожного здійсненого обліту, використовуючи при цьому ідентичні налаштування у програмному комплексі Agisoft Metashape.

3. Стадія аналізу полягає у чисельному зіставленні збудованих моделей, виконуваному за допомогою просторового відбору проб та конструювання моделей розходжень (DoD).

4. Визначення достовірності передбачає обчислення планових та рельєфних розбіжностей між даними повторних вимірювань та розрахунок відповідних статистичних метрик (середнє зміщення, середньоквадратична помилка, граничні екскурсії).

У межах даного вивчення значна увага була сфокусована на детальному розгляді поверхонь, які не пропускають вологу (зокрема, дорожнього полотна з асфальту, компонентів облаштування території, а також твердих майданчиків), з огляду на те, що такі структури відзначаються фіксованою просторовою конфігурацією та мінімальними змінами протягом року.

Така властивість дає змогу коректно визначити похибку самого методу UAV-SfM, усуваючи вплив таких факторів, як зміни у стані рослинності або рух об'єктів.

Послідовність дій, яка охоплює етапи польових зйомок, обробки матеріалів у приміщенні та подальшого аналізу, візуалізована на схемі, представлений на рисунку 2.

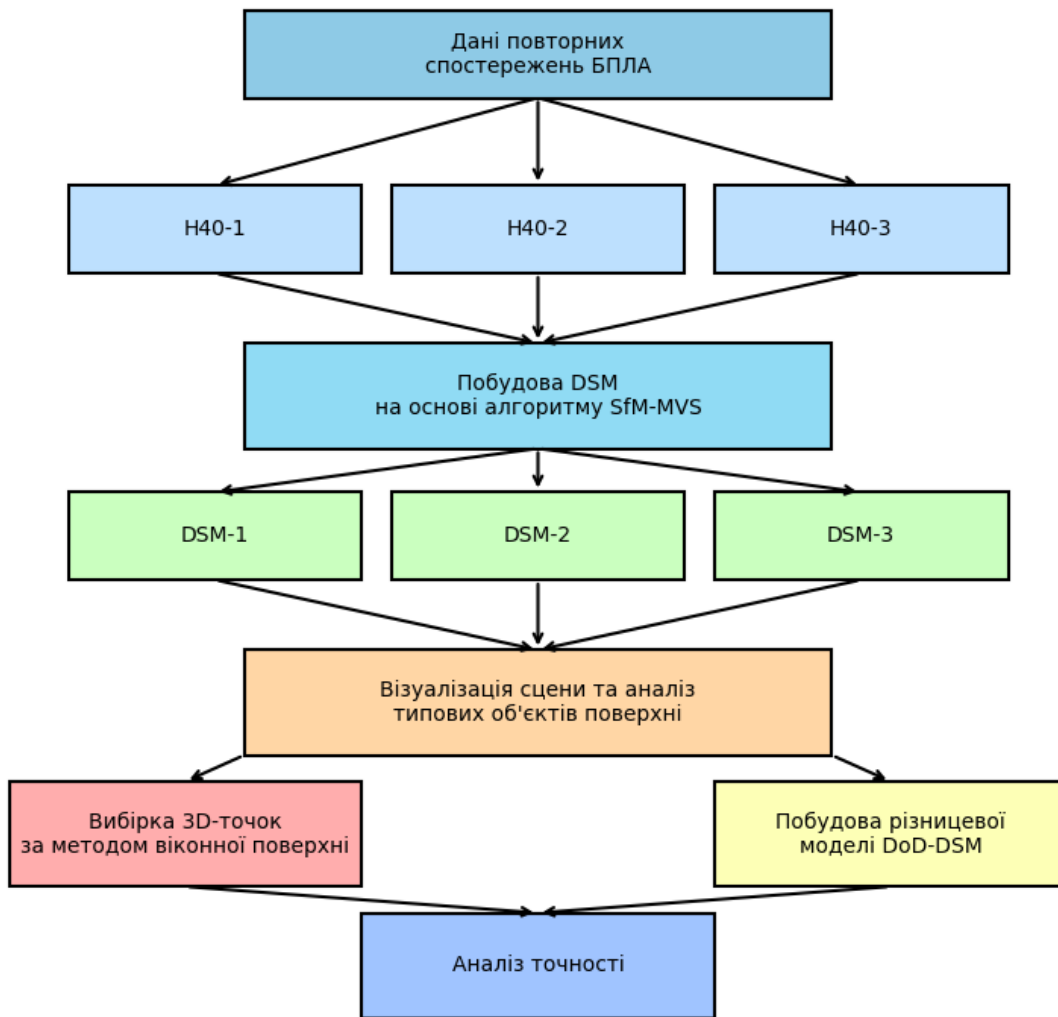


Рисунок 2. Блок-схема загальної схеми дослідження

У межах цього підходу, ключові методологічні кроки охоплюють три складові.

Як видно із зображення 2, робота стартувала з проведення низки повторних аерофотографічних знімків певної випробувальної території.

Виконано три окремі вильоти безпілотного літального апарату (БПЛА), використовуючи ідентичні налаштування знімання, що призвело до отримання трьох комплектів зображень, які умовно названі як H40-1, H40-2 та H40-3.

Далі, стосовно кожного окремого комплексу зображень, ми здійснили стереофотограмметричну обробку, застосовуючи методики SfM-MVS.

Це зрештою дало нам змогу сформувати три окремі цифрові моделі висот рельєфу: DSM-1, DSM-2 та DSM-3.

Після створення цих моделей було проведено їх графічне представлення для первинного контролю точності відновлених даних та перевірки їхньої просторової коректності.

З метою подальшого вивчення у межах визначеної зони інтересу було ідентифіковано репрезентативні фрагменти місцевості, що відрізняються характером рослинного чи штучного покриття.

Зокрема, було виділено площі з пористою основою (зелені насадження) та зони з щільним покриттям (асфальтобетон, бруківка, утрамбована земля).

Межі цих територій були окреслені, спираючись на ортофотоплан (DOM), що дало змогу забезпечити точне просторове співвідношення розрахункових моделей.

Фінальною стадією була реалізація кількісної оцінки просторових розбіжностей, виявлених у межах трьох виконаних польотів.

З цією метою використано підхід вилучення 3D-координатних точок у межах попередньо визначених зон поверхні, паралельно формуючи моделі різниць (DoD — Difference of DSM).

Це дало змогу встановити ступінь вертикальних зсувів між створеними цифровими моделями та верифікувати ступінь збіжності результатів, отриманих під час аерофотограметрії.

2.2 Побудова цифрової моделі поверхні методом SfM–MVS

Створення тривимірних моделей рельєфу, здобутих шляхом аерофотографування з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а саме із застосуванням апарату "Структура з Руху" (SfM), належить до найважливіших галузей сучасної фотограмметрії та машинного зору.

Цей підхід ґрунтується на опрацюванні знімків, які мають значне взаємне перекриття та були зроблені з різних ракурсів, з метою реконструювати об'ємну геометрію сцени через обчислення як позицій самих фотокамер, так і просторових координат точок на об'єктах.

На початковому етапі залучається алгоритм SfM, метою якого є автоматичне знаходження та узгодження виразних елементів на отриманих знімках.

З цією метою застосовуються техніки пошуку та кодування локальних опорних точок, як-от варіації SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) чи аналогічні підходи.

Знайдені особливості співвідносяться між тими кадрами, що мають спільну область, через розрахунок евклідової дистанції між їхніми векторами опису, що й уможливорює визначення кореспонденцій між цими точками.

Використовуючи виявлені відповідні пари точок, розраховується фундаментальна або есенціальна матриця, що відображає геометричну залежність між отриманими зображеннями.

Після цього, шляхом триангуляції, визначаються попередні просторові координати об'єктних точок.

На виході отримуємо нещільну (розріджену) хмару таких точок, а також налаштування зовнішньої орієнтації камер.

Зважаючи на те, що в початкових вимірах присутні як випадкові, так і системні неточності, отримані дані піддаються корекції через процес, відомий як "bundle adjustment" (пучкове коригування).

Ця стадія вимагає зведення до мінімуму загальної квадратичної похибки репроекції.

Це досягається одночасним налаштуванням як параметрів проєкційних матриць камер, так і координат точок у просторі.

Як кінцевий результат, отримуємо відкалібровані положення камер та просторову тривимірну модель сцени, що є узгодженою на геометричному рівні.

Проте, цей розріджений хмарний набір точок не дає змоги отримати достатню деталізацію для формування цифрової моделі рельєфу.

З огляду на це, наступний крок передбачає використання алгоритму Multi-View Stereo (MVS), метою якого є здійснення густої реконструкції.

Спираючись на орієнтовані зображення разом із камеровими параметрами, для кожного пікселя створюється глибинна карта, що, своєю чергою, уможливорює визначення просторових координат значної кількості точок.

Глибока обробка даних гарантує значне збільшення концентрації відображень (точок) та дає змогу зафіксувати тонкі нюанси у вигляді нерівностей місцевості та предметів.

Завдяки насиченому хмарищу точок формується цифрова модель рельєфу (ЦМП), котра відображає реальну конфігурацію терену, включно з усіма природними й антропогенними елементами, що на ньому знаходяться.

Отже, зведення алгоритмів SfM та MVS утворює цілісний ланцюжок фотограмметричної ревізії — починаючи від автоматичного з'ясування орієнтації фотоапаратів і аж до створення деталізованої об'ємної моделі рельєфу.

Здобута ЦМР (цифрова модель рельєфу) слугує фундаментом для подальшого дослідження просторових розбіжностей між даними наступних замірів та для визначення степеня вірності ужитого підходу UAV-SfM.

2.3 Методи віконної вибірки та диференціальної обробки

Перевірка хибності даних, отриманих під час наступних аерофотознімальних робіт, проводилася, спираючись на загальноприйняті засади оцінювання похибок у топографічних та геодезичних зйомках.

Ключовий задум полягає у зіставленні координат одних і тих самих ділянок земної поверхні, зафіксованих у різні часові інтервали за умови ідентичних умов проведення вимірювань.

Цей метод дає змогу встановити рівень просторової коректності цифрових моделей, що були сформовані після кожного окремого польоту.

У ході цієї наукової роботи було проведено аналіз здвоєної придатності чи узгодженості цифрових моделей рельєфу (DSM), згенерованих на основі трьох різнорідних (незалежних) комплектів аерофотознімків.

Виходячи з того, що ділянка, яка була предметом вивчення, визнавалася стабільною (тобто без фактичних трансформацій земної поверхні), будь-які виявлені розбіжності між цими моделями трактувалися як наслідок неточностей, спричинених як самим процесом вимірювання, так і особливостями застосованих програмних алгоритмів.

Підхід зі зразковим виділенням на основі "вікон"

Для проведення кількісних оцінок застосовувався метод вибірки з використанням фіксованих "вікон".

Цей спосіб полягає у визначенні невеликих, чітко окреслених зон (вікон) сталої величини на всій площі, що підлягає дослідженню.

У межах кожного такого визначеного вікна проводилося порівняння (зіставлення) координат 3D-точок або отриманих показників абсолютної висоти з різних цифрових моделей поверхні (DSM).

Цей підхід дає змогу:

- Зменшити до мінімуму дію локальних викидів,
- Провести оцінку надійності відновлення у межах поверхонь з однаковими властивостями,
- Роздільно досліджувати покриття, що пропускають та не пропускають середовище.

Для будь-якої точки чи елемента зображення у межах визначеної області розраховувалась розбіжність координат між двома створеними моделями.

Ключовим критерієм для визначення якості була різниця у висотах або ж просторове зміщення точки, яке визначається таким чином:

$$\Delta Z_i = Z_i^{(1)} - Z_i^{(2)}$$

де

Висота точки в межах першого зразка позначається як $Z^{(1)}i$;

Відповідне числовий показник висоти у другому зразку — це $Z^{(2)}i$;

Різниця у висоті між цими двома вимірами на позиції i визначається ΔZ_i .

Зважаючи на віднайдені розбіжності, було здійснено розрахунок низки статистичних мірил, а саме: середнього значення (арифметичного), стандартного відхилення та кореневого виразу середньоквадратичної похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta Z_i)^2}$$

де n – це обсяг вибірки.

Різницева модель (DoD)

З метою більш ґрунтовного визначення просторових розбіжностей між рельєфами, було запроваджено підхід, що базується на створенні різницевої моделі (Difference of DSM, DoD).

Цей спосіб полягає у генерації нової растрової моделі через попіксельне віднімання значень, отриманих із двох наявних цифрових моделей поверхні:

$$DoD = DSM_1 - DSM_2$$

Сформована модель різниць демонструє розкид вертикальних невідповідностей у межах усього ареалу дослідження, уможливорюючи ідентифікацію як невідповідностей, так і потенційно прихованих систематичних зсувів.

Коли комбінується техніка вибірки за вікнами із диференціальним аналізом, це гарантує глибше розуміння як точності, так і стабільності відтворених даних, отриманих за допомогою UAV-SfM.

Використання віконної вибірки дає змогу провести локалізований статистичний розгляд, тоді як аналіз "Різниця над Різницею" (DoD) надає змогу просторово представити, як саме похибки розподілені по всій вивченій місцевості.

У рамках цього наукового пошуку центральним завданням являлося з'ясування ступеня відтворюваності даних аерофотограмування, здобутих із застосуванням безпілотних літальних апаратів, а також експертна оцінка консистентності створених цифрових моделей рельєфу.

Для реалізації окресленого завдання було задіяно дві взаємно підсилюючі методології: підхід, базований на просторовій вибірці тривимірних координат точок, та порівняльний аналіз модельної різниці висот (DoD-DSM).

При оцінці точності, котра проводилася за технікою віконного зразкування, ми використовували цифрові моделі висот місцевості (ЦМВ), здобуті шляхом деталізованої реставрації за алгоритмом MVS.

Здійснивши інтеграцію відомостей із ЦМВ, площинних зображень та зібраних на місці даних, ми здійснили поділ ландшафту на категорії в межах визначеної робочої зони.

Зокрема, розрізняють два види покриттів:

- укріплені (ізолюючі) площі — це асфальтобетон, цементні розчини, а також ущільнені шари;
- незміцнені (водопроникні) ділянки — маються на увазі ґрунтові та трав'яні покриття.

З метою порівняння, для кожного з двох існуючих різновидів покриття було відібрано три репрезентативні квадрати метром (1×1 м), які слугували зонами для аналізу.

У межах кожного з визначених квадратів здійснювався збір тривимірних точок, отриманих із відповідних цифрових моделей поверхні (ЦМП), сформованих після різних етапів польоту.

Згодом, для кожного зібраного масиву точок розраховувалися усереднені горизонтальні координати та середні значення висот.

Спираючись на ці розраховані величини, визначалися параметри розбіжності між самими моделями, а також обчислювалися медіанні та середньоквадратичні похибки, згідно з формулами, які вже були представлені раніше.

Ще однією гілкою аналізу була диференційна опрацювання цифрових уявлень про поверхню.

Техніка формування різницевої моделі (Difference of DSM) досить часто використовується для знаходження змін у рельєфі, зсувів та інших перетворень земної поверхні.

Однак у межах цієї наукової праці її задіяли для дещо іншої мети — визначення ступеня точності показників, знятих безпілотником, коли фактичних змін на місці немає.

Оскільки досліджувана територія вважалася інваріантною, усі зафіксовані відмінності між цифровими моделями трактувалися як результат впливу технологічних та алгоритмічних похибок.

Для забезпечення коректності аналізу в якості базових даних використовувалися саме DSM, а не DEM.

Цей метод дав змогу:

1. запобігти виникненню додаткових неточностей, що часто трапляються при сортуванні та рознесенні точок під час формування ЦМР;
2. провести пряму валідацію узгодженості даних, оперуючи безпосередньо на рівні фотограмметричного відновлення;
3. детальніше простежити, як параметри аерофотографування та застосовані підходи SfM-MVS впливають на фінальну структуру моделі.

Отже, зведення воедино пошарового аналізу (на основі віконного сканування) та просторової експертизи розрахованих різницевих поверхонь (DSM) дало змогу всебічно оцінити надійність та ступінь метрологічної відповідності даних, отриманих під час аерознімання з використанням БПЛА.

3. Аналіз результатів досліджень

3.1 Візуалізація та інтерпретація типових класів земельного покриття

Моделі рельєфу цифрові (DSM), створені шляхом фотограмметричного опрацювання матеріалів, отриманих з аерофотозйомки безпілотними літальними апаратами (БПЛА), стали підґрунтям для просторової репрезентації досліджуваної ділянки.

Створення тривимірних макетів проводилося з огляду на необхідність якісного зіставлення ступеня деталізації відновлених даних, демонстрації морфологічних характеристик місцевості та дослідження просторового розташування елементів.

Створення зображень було реалізовано через тривимірні зразки, які надавали змогу змінювати точку огляду, розмір та досліджувати окремі частини рельєфу.

Таке підійшло для ясного зрозуміння, наскільки геометрично сумісні дані отримані з наступних повітряних зйомок, і де можуть бути зони із значними розбіжностями.

Здійснивши розгляд ортофотоплану (DOM) та об'ємних моделей, ми ідентифікували характерні типи земної оболонки, які стали підставою для подальшого вимірювального обстеження достовірності.

До них зараховують:

- тверді (непроникні) ділянки – дорожнє полотно з асфальту, бетонні площини, капітальні споруди інфраструктури;
- м'які (проникні) ділянки – земля, вкрита рослинністю, трав'яний килим та інші природні ландшафти.

Аналіз візуальних даних продемонстрував, що тверді покриття відзначаються більш усталеним і виразною фактурою, що забезпечує надійніше виявлення відповідних вузлів у процесі фотограмметричної проробки.

Натомість, території, вкриті рослинністю, виказують значніші розбіжності у своїй будові, що може позначатися на достовірності реставрації їхніх координат у просторі.

Збудовані тривимірні сцени, ілюстрація яких міститься на рисунку 3, послужили фундаментом для подальшого визначення зон для дослідження та підрахунку просторових розбіжностей між цифровими моделями рельєфу, створеними на основі даних різних польотів.

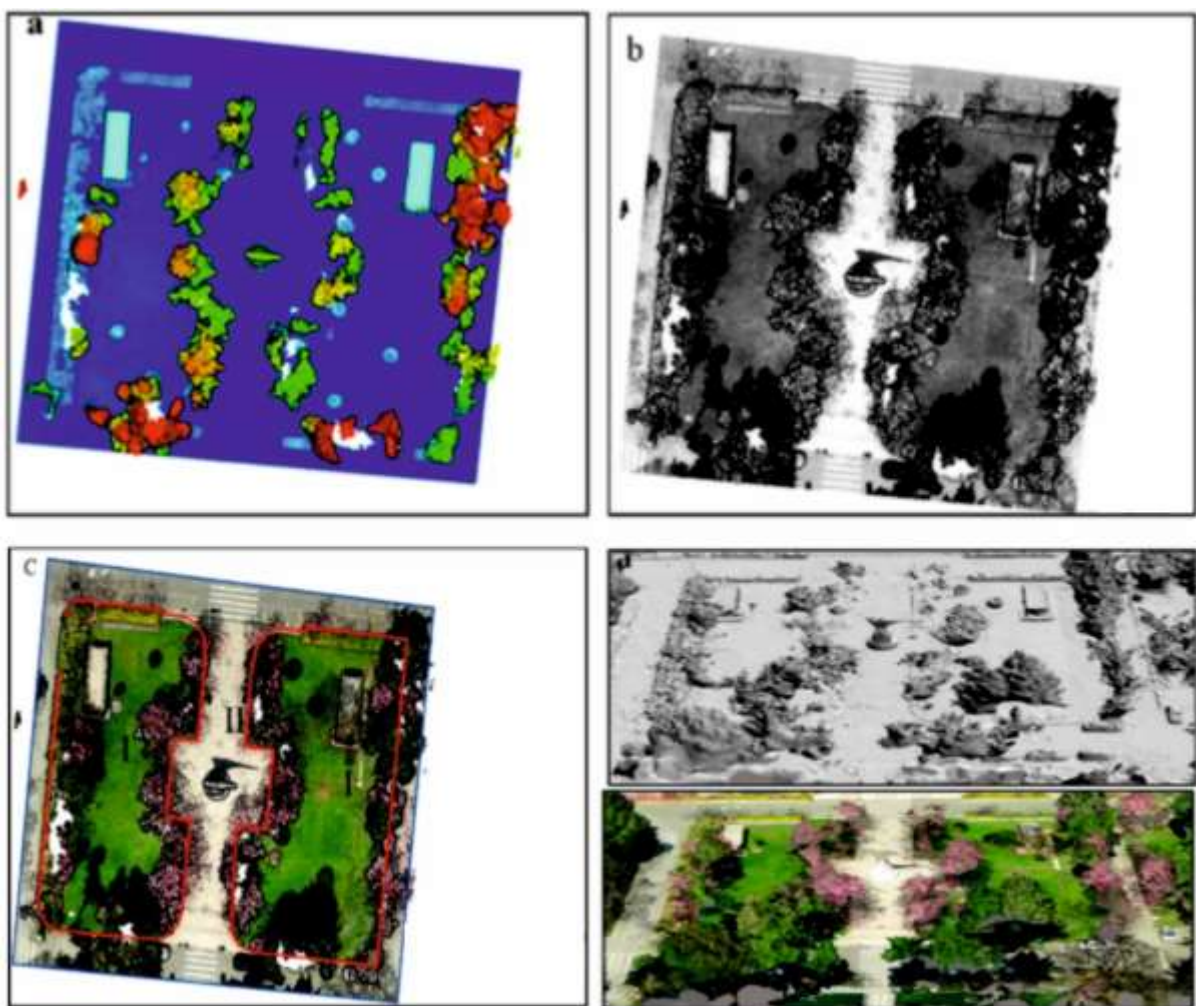


Рисунок 3. Візуальний аналіз

На рис. 3а бачимо візуалізацію висот на основі цифрової моделі поверхні (DSM+), яка демонструє загальну картину змін рельєфу на цій ділянці.

Розгляд цього висотного зображення свідчить про те, що висотні позначки коливаються у межах від 1933 до 1946 метрів, що дає загальний перепад близько 13 метрів.

Місця, де висота зростає, переважно зумовлені наявністю рослинності, яка створює додаткові перепади по вертикалі на самій поверхні.

На рис. 3б демонструється візуальне представлення потужності відбитого випромінювання (якщо застосовується режим DSM+Intensity).

Такий спосіб відображення дає можливість оцінити, як розподіляється коефіцієнт відбивання по площі.

Показники інтенсивності у межах області, що досліджується, демонструють суттєвий розкид – від 2555 до 59 047 умовних одиниць.

Середній показник інтенсивності сягає 28 056,642, що вказує на помітну відмінність у матеріалах та будові поверхні.

Велика амплітуда зміни інтенсивності відбиття слугує підтвердженням існування різнорідних типів покриттів та нерівномірності текстурних особливостей даної території.

На рис. 3в бачимо зливу проекцію, що поєднує ЦМР та фактуру, де до тривимірної моделі включено кольорові дані (RGB), здобуті знімками безпілотної.

Цей метод дає змогу скомбінувати з точністю розмірів цифрову модель із живописними деталями покриття поверхні.

Внаслідок цього досягається не лише коректне відображення розташування предметів у просторі, але й здатність сортувати їх з огляду на те, як вони виглядають.

Розглядаючи малюнок 3в, можна чітко простежити просторовий поділ між ділянками, які не зазнали зміцнення (позначені як I), та тими, що були укріплені (позначені як II).

Укріплені зони вирізняються значно більш рівномірною структурою поверхні та сталою формою.

На противагу цьому, необроблені поверхні ідентифікуються за присутністю рослинного покриву, який варіюється за висотою та щільністю.

Такий стан спричиняє додаткову нерівномірність у вертикальній проекції, що потенційно здатне вплинути на точність відновлення тривимірної моделі засобами фотограмметрії.

Об'ємні макети, які можна побачити на ілюстраціях 3г та 3д, демонструють типовий рельєф цієї місцевості.

Терен, загалом, вирівняний, з відсутністю значних варіацій у позначках висоти, а фактура рослинності прив'язана переважно до територій, що не були укріплені.

Кущі та декоративні чагарники створюють невеликі піднесення, які чітко простежуються на тривимірній моделі, що засвідчує точність відновленої картини.

Отже, зображення отриманих даних підтверджує задовільну якість зведених цифрових моделей поверхні (DSM) і дає змогу розпочати числовий розрахунок просторових розбіжностей між даними, отриманими під час повторних аерофотознімальних робіт.

3.2 Порівняльний аналіз 3D-точності типових класів поверхні на основі віконної вибірки

Щоб отримати числову оцінку того, наскільки точно позиціоновані результати аерофотознімання на різних типах земної поверхні, ми скористалися підходом вибірки по вікнах.

Цей метод загальноприйнятий у сфері дистанційного зондування Землі та при роботі з цифровими моделями висот.

Такий вибір методології був зумовлений потребою у порівнянні координат у межах однорідних зон поверхні, щоб максимально зменшити вплив будь-яких позасистемних чинників.

На попередній стадії дослідження ми вивчали можливості використання вибірок різного просторового охоплення, включно з розширеними зонами для аналізу.

З'ясувалося, однак, що розширення зони вибірки тягне за собою потрапляння до неї додаткових морфологічних ознак (таких як нерівності, елементи рослинного покриву, окремі споруди чи об'єкти), котрі здатні спотворити результати статистичної ваги.

З огляду на це, найкращим рішенням було визнано застосування квадратних вікон з габаритами 1 на 1 метр; це дає змогу досягти потрібного співвідношення між достатнім обсягом даних для статистичних розрахунків та збереженням рівномірності досліджуваної поверхні.

З метою проведення аналізу порівняльного характеру застосовувалися дві усталені категорії поверхонь; їх ідентифікація базувалася на опрацюванні ортофотоплану та відображенні

Цифрової Моделі Поверхні (ЦМП) (див. Рис. 3):

- нетверді поверхні (категорія I) — це території, вкриті рослинністю або оголеним ґрунтом;
- тверді поверхні (категорія II) — покриття з міцних матеріалів, як-от асфальт, бетон, чи ущільнені майданчики.

У межах будь-якої з виділених класів поверхонь було відібрано по три репрезентативні локації.

Для кожної з них були згенеровані аналітичні зони розміром квадрат 1 м на 1 м.

З кожної такої зони було вилучено набір тривимірних точок, які походять із цифрових моделей рельєфу, сформованих за підсумками трьох послідовних аерофотозйомок.

Розміщення цих обраних аналітичних зон у просторі демонструється на ілюстрації 4.

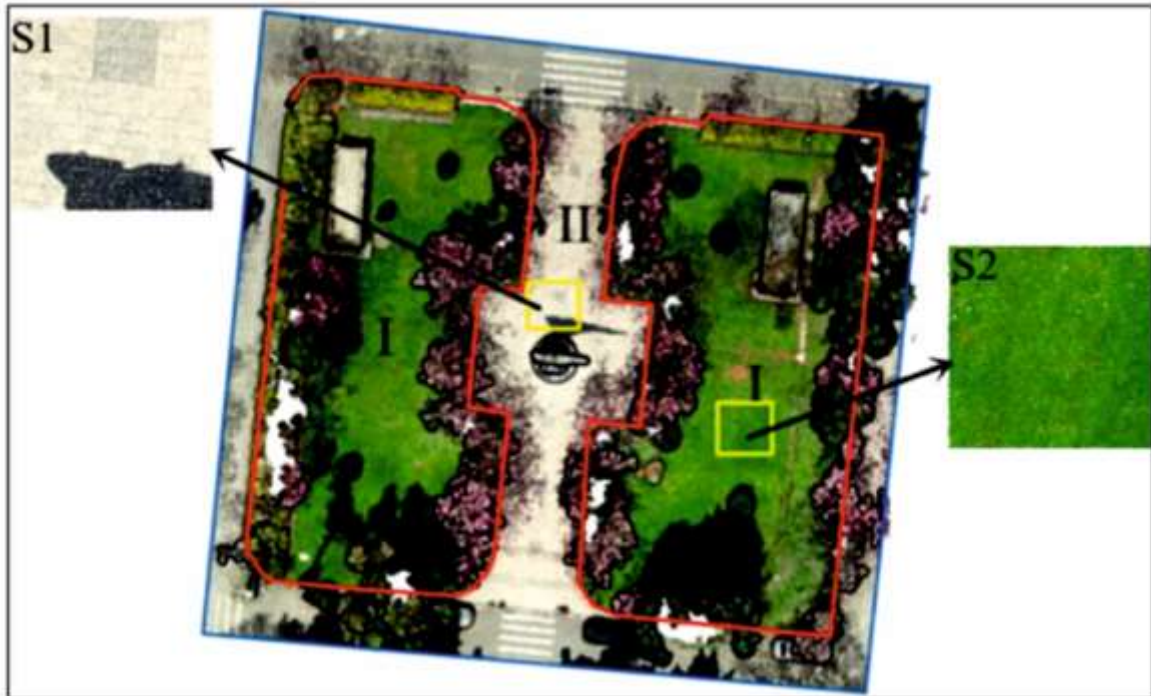


Рисунок 4. Класифікація геоморфології та вибір поверхні

Щодо кожного відкритого часового проміжку (вікна) проводився розрахунок середніх значень для планових координат і відміток, а далі вже виявлялися розбіжності між даними, отриманими з різних польотів.

Таким чином, стало можливим з'ясувати ступінь відтворюваності процесу відновлення (реконструкції) окремо для кожного різновиду поверхні.

Здійснений порівняльний розбір виявив, що укріплені ділянки демонструють кращу стійкість та меншу розбіжність у висотних показниках між представленими зразками.

Це пояснюється їхньою гомогенною фактурою та відсутністю елементів, схильних до руху чи сезонних трансформацій.

На противагу цьому, ділянки без зміцнення характеризуються помітно ширшим діапазоном значень, що зумовлено присутністю рослинного покриву та нерівномірністю будови поверхневого шару ґрунту.

Отже, завдяки застосуванню методу віконного аналізу вдалося здійснити локальне визначення тривимірної достовірності результатів, отриманих з використанням UAV-SfM, а також встановити взаємозв'язок між розміром помилок та характером поверхні.

Це має суттєве значення для майбутнього застосування створених цифрових моделей у цілях відстеження трансформацій рельєфу.

Ділянка, охоплена вибіркоvim вікном S1, являє собою необротовану територію.

Вона складається з масиву просторових координат, які фіксують ділянку з ґрунтовим покривом та рослинністю, що має рівномірний розподіл.

Для цього регіону властиві коливання висот на локальному рівні, що спричинені природною будовою трав'яного шару.

Натомість, вікно вибору S2 опинилося в межах армованої зони, вирізняючись доволі рівною та геометрично впорядкованою структурою.

Тривимірна точкова модель цієї ділянки демонструє однорідну площину з незначними коливаннями висоти.

З обох вікон (S1 та S2) було вилучено набори 3D-точок, сформовані на основі цифрових моделей рельєфу, які були здобуті шляхом багаторазових облітів безпілотними літальними апаратами.

Опісля, для кожної сукупності точок, було зведено середні ортогональні (планові) координати та усереднену висоту.

Це дало змогу виявити розбіжності між чинними моделями.

Спираючись на виявлені величини, розраховано метрики точності, використовуючи формули визначення похибок, які були представлені раніше.

Дані, отримані внаслідок статистичного опрацювання, можна знайти у Таблиці 2.

Ця таблиця містить розрахунки 3D-точності для фрагментів території, обраних розміром один на один метр.

Завдяки цим значенням, надається можливість зіставити, наскільки стабільно виконується відновлення моделі для поверхонь, які були укріплені, і тих, що залишилися без змін, а також визначити, як характер поверхневого покриття позначається на масштабі просторових розбіжностей.

Таблиця 2 Похибки у кожному напрямку

Тип покриття	Модель	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$	δx	δy	δz	$\delta xy / \delta p$
I-S1	DSM1	9.886	6.814	1934.933	0.004	0.009	-0.012	0.010 / 0.015
	DSM2	9.876	6.801	1934.956	-0.006	-0.004	0.011	0.007 / 0.013
	DSM3	9.883	6.801	1934.946	0.001	-0.004	0.001	0.005 / 0.005
	Середнє	9.882	6.805	1934.945	0.004	0.006	0.008	0.007 / 0.011
II-S2	DSM1	3.730	9.807	1934.888	0.003	0.003	-0.006	0.004 / 0.007
	DSM2	3.728	9.806	1934.905	0.001	0.002	0.011	0.002 / 0.011
	DSM3	3.723	9.800	1934.889	-0.004	-0.004	-0.005	0.006 / 0.008
	Середнє	3.727	9.804	1934.894	0.003	0.003	0.007	0.004 / 0.009

Згідно з обчисленнями, представленими у Таблиці 2, ступінь відповідності просторового розміщення точок визначався за допомогою вибірових вікон габаритами 1×1 м, застосованих до окремих різновидів покриття.

Застосування цієї методики забезпечило можливість детального вивчення амплітуди зсувів координат у межах територій зі схожими характеристиками.

Для покриттів, що не мають зміцнення, категорії I–S1, найменші показники σ_{ai} (похибки) зафіксовано на рівні 0,001 м вздовж осі X, 0,004 м — вздовж осі Y та 0,001 м — вздовж осі Z.

Щодо зміцнених покриттів категорії II–S2, найменші розбіжності виявилися такими: 0,001 м по осі X, 0,002 м по осі Y і 0,002 м по осі Z.

На підставі зведення багатомірного аналізу даних виявлено, що клас I–S1 характеризувався середньою похибкою у плані на рівні 0,007 м, тоді як кумулятивна похибка у тривимірному просторі сягала 0,011 м.

Для другої категорії, II–S2, зафіксовані значення були скромнішими: похибка в площині становила 0,004 м, а загальне відхилення по осях 3D дорівнювало 0,009 м.

Ці дані демонструють, що зміщення по вертикалі має більшу розбіжність, аніж похибки, визначені у горизонтальних напрямках.

При цьому домінуюча частка як планових, так і висотних розбіжностей не перевищує міліметрового діапазону, що слугує підтвердженням адекватної точності, досягнутої завдяки фотограмметричному відновленню.

Зіставлення отриманих даних для різноманітних типів поверхонь виявило, що укріплені ділянки демонструють вищу стійкість та мають менші розбіжності у показниках порівняно з тими, що залишилися необробленими.

Причина цього криється у ролі, яку відіграють мікротопографія та рослинний покрив у процесі формування хмари точок.

Проведене візуальне дослідження тривимірної моделі засвідчило, що присутність трав'янистої рослинності та природної нерівності ґрунту спричиняє виникнення додаткових місцевих коливань у висотних відмітках.

Отже, з'ясувалося, що шорсткість якоїсь поверхні разом із тим, наскільки вона вкрита, мають пряму залежність від точності, з якою можна щось відтворити за допомогою технологій SfM–MVS: якщо поверхня більш рівна та гладенька, то й цифрові моделі, які виходять, будуть точнішими.

3.3 Аналіз точності 3D-моделей БПЛА за допомогою DoD-DSM

Цифрова модель рельєфу (ЦМР), що постає наслідком фотограмметричної переробки за допомогою методу "Структура з руху" - Мультисенсорна візуалізація (SfM–MVS), слугує головним та найбільш вичерпним підсумком просторового моделювання певної ділянки.

Ця модель фіксує справжню конфігурацію ландшафту, включаючи як природні елементи, так і антропогенні споруди, вирізняючись надзвичайною деталізацією, яка практично збігається з реальною топографією.

У рамках цього вивчення було розроблено три моделі цифрової поверхні — DSM1, DSM2 та DSM3 — базуючись на даних, отриманих під час трьох окремих прольотів безпілотного літального апарату (БПЛА), проведених за ідентичних умов знімання.

Створення кожної моделі здійснювалося незалежно, що було ключовим для забезпечення достовірності наступного порівняльного розбору та можливості оцінити стабільність (репродукованість) процесу відновлення рельєфу.

Для ідентифікації просторових розбіжностей між цими моделями використовувалася методика диференціальної обробки DoD (Різниця між ЦПМ).

Принцип цього підходу полягає у попільсльному (поелементному) відніманні відповідних значень висот двох цифрових моделей поверхні, що дає змогу кількісно визначити регіональні зміни (відхилення):

$$DoD = DSM_i - DSM_j$$

Цифрові моделі рельєфу DSM_i та DSM_j були сформовані на основі даних, зібраних у різних часових точках.

З огляду на те, що досліджувана ділянка була визнана стабільною щодо змін висот, будь-яка різниця між цими моделями була віднесена до похибок, притаманних фотограмметричному відновленню, а не до фактичних зсувів земної поверхні.

Відтак, застосування аналізу DoD (Difference of Differences) дало змогу визначити кількісні межі точності, яких можна досягти за використання технології UAV-SfM.

Аналіз і графічне представлення різницевих моделей були проведені в програмному комплексі LiDAR360, який надає інструментарій для просторового дослідження хмар точок та створення графіків розподілу розбіжностей.

Застосування цієї апаратної платформи дало змогу:

- отримати тривимірне зображення областей із найбільшими та найменшими відхиленнями;
- розрахувати ключові статистичні параметри різниць між двома моделями;
- провести аналіз закономірностей просторового розташування неточностей.

Разом з даними, отриманими шляхом вибірки за певними вікнами, диференціальна модель сприяла формуванню цілісної оцінки точності.

Схеми поширення розбіжностей, що впливають з проведеного DoD-аналізу, представлені на ілюстрації 5.

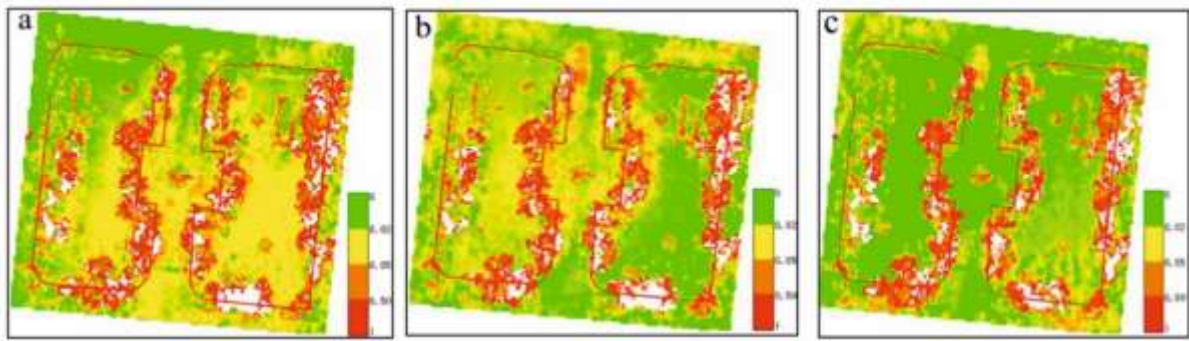


Рисунок 5. Діаграма моделі виявлення змін у DOD-DSM

Подані дані вказують на те, що переважна частина похибок концентрується у діапазоні міліметрів чи сантиметрів, причому локальні зростання розбіжностей зумовлені головним чином зонами, вкритими рослинністю.

Як наслідок, це засвідчує, що якість відновлення об'єктів напряду залежить від характеру поверхні та її мікрорельєфу.

При проведенні диференціального аналізу параметри для обчислень були визначені наступним чином: комірка сітки мала габарити 0,5 на 0,5 метра, а максимально допустима величина (поріг) вертикальних розбіжностей встановлена на позначці 1 метр.

Завдяки такому налаштуванню вдалося досягти належної просторової чіткості отриманих даних, мінімізуючи водночас вплив непередбачуваних локальних викидів.

Як ілюструє рис. 5, аналіз моделі різниці висот (DoD-DSM) показує, що переважна більшість розбіжностей по висоті сконцентрована у діапазоні від нуля до одного метра.

При цьому загальний профіль зміни є досить схожим для всіх трьох версій моделі, які використовувалися для зіставлення.

Це дає підстави стверджувати про відсутність серйозних планових зсувів між даними, отриманими під час повторних аерофотознімальних робіт.

Контрастний розгляд виявив, що модель DoD-DSM3 демонструє більший відсоток територій із розбіжностями у діапазоні 0–0,2 м, ніж дві інші апробовані моделі.

Ймовірно, це вказує на кращу відповідність відновленої моделі до наявних вихідних даних.

Окрім того, було з'ясовано, що на неукріплених площинах лівова частка розходжень по висоті концентрується в межах 0–0,05 м.

Області, де спостерігаються значні відхилення, що перевищують 0,5 м, здебільшого прив'язані до зон квітників та озелених ділянок, які характеризуються наявністю дерев різної висоти.

Отже, завищені показники розходжень спричинені, очевидно, не деформацією самого рельєфу, а варіативністю рослинного покриву та специфікою фотограмметричного відновлення тривимірних об'єктів.

Світлі плями на моделі різниці вказують на області, де дані у ЦМР (цифровій моделі рельєфу) відсутні.

Утворення таких прогалін сталося через те, що крони дерев частково закривали територію під час аерофотографування, спричинивши втрату певної частини даних у ході процесу щільного вирівнювання.

Для того, аби точніше оцінити результати аналізу DoD (Difference of Difference), було здійснено статистичний підрахунок площ ділянок, що зазнали трансформації, й обсягів змін.

Ці фінальні цифри представлені у Таблиці 3, що дає змогу комплексно описати, як саме виявлені розбіжності розподілені у просторі та якими є їхні масштаби.

Таблиця 3. Статистичні показники DoD аналізу

Модель DoD	Std.D (м)	RMSE (м)	Середнє Δz (м)	Площа збільшення (м ²)	Площа зменшення (м ²)	Площа перекриття (м ²)
DoD-DSM1	0.067	0.084	0.076	753	554	3933.0
DoD-DSM2	0.067	0.082	0.071	707	577	3926.5
DoD-DSM3	0.067	0.084	0.075	711	567	3933.3
Середнє	0.067	0.083	0.074	714	570	3930.9

З огляду на обчислення, представлені у Таблиці 3, зіставлення трьох різницевих моделей DoD-DSM виявило, що показник стандартного відхилення (Std.D) для кожної з груп є ідентичним, а саме $\pm 0,067$ м.

Такий збіг демонструє надійність результатів, отриманих шляхом диференціальної обробки, та вказує на те, що суттєвих розбіжностей у дисперсії між окремими вимірюваннями (польотами) не спостерігається.

Із представлених трьох варіантів, показник середньоквадратичної помилки (RMSE) виявився найнижчим саме в моделі DoD-DSM2, сягнувши $\pm 0,082$ м.

Ця ж модель продемонструвала й найменше середнє значення вертикального зсуву (Δz), яке дорівнює 0,071 м.

Ба більше, DoD-DSM2 має найменшу площу, де зафіксовано зростання висоти (707 м²), і найменшу площу зон перекриття (3926,5 м²), при цьому найбільша територія, де спостерігалось зниження висоти, для неї становить лише 577 м².

Сукупність цих даних вказує на те, що результати цього конкретного польоту є, порівняно, найбільш збалансованими з іншими доступними наборами даних.

Наступний етап роботи полягав у розрахунку середніх величин для усіх статистичних індикаторів, які були отримані з трьох моделей різниць.

Здійснивши зіставлення кожної окремої моделі із цим усередненим показником, ми змогли визначити величину розбіжностей у результатах та з'ясувати, наскільки тісно між собою корелюють дані, зафіксовані під час різних польотів безпілотних літальних апаратів.

Свідчення про значну сталість просторових параметрів цифрових моделей рельєфу були виявлені під час аналізу результатів.

На рисунку 6 представлена графічна інтерпретація статистичних розбіжностей для кожного параметра у відповідних різницевих моделях, що дає змогу чітко побачити, як похибки розподіляються, та наскільки моделі узгоджуються між собою.

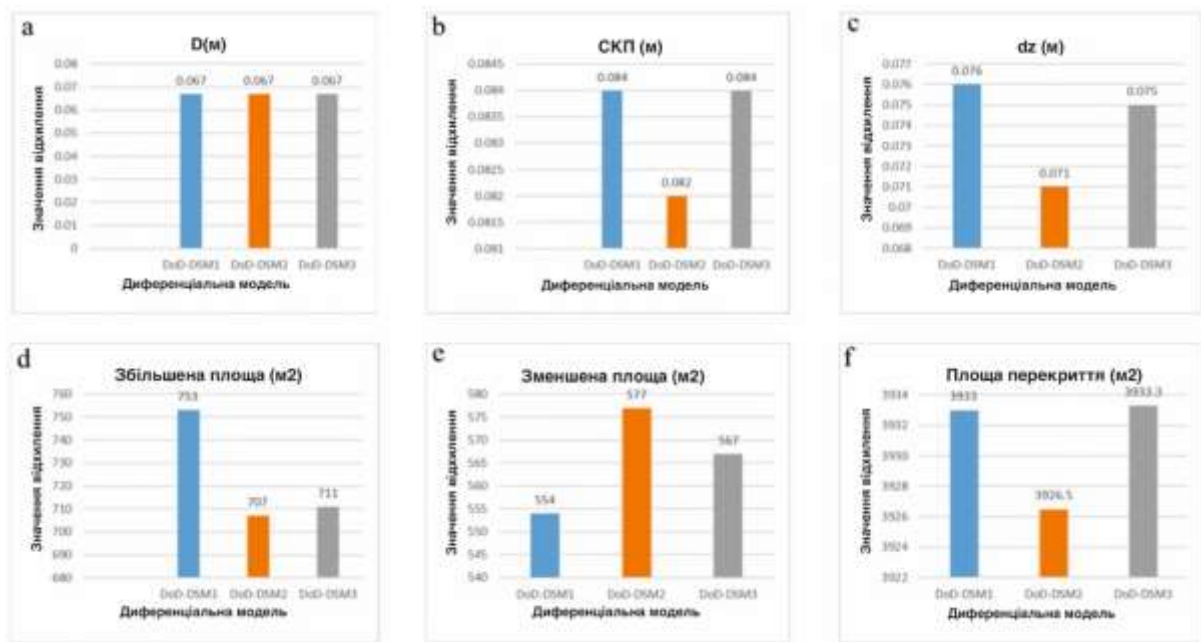


Рисунок 6. Статистичний графік відхилення кожного оціночного показника в моделі DOD-DSM

Як можна побачити із зображення 6а, варіативність стандартного відхилення (Std.D) є ідентичною для усіх представлених трьох варіантів моделі DoD-DSM, зупиняючись на позначці 0,067 м.

Це підтверджує, що розкид результатів експериментальних замірів є послідовним.

Згідно з рисунком 6б, найнижчий показник середньоквадратичної помилки (RMSE) демонструє модель DoD-DSM2, досягаючи значення 0,082 м.

Таку ж закономірність ми фіксуємо і на графіку 6в: середнє зсув по вертикалі (Δz) є мінімальним саме для DoD-DSM2, складаючи 0,071 м.

Розгляд показників площі також підтверджує виявлену закономірність.

Як видно з рисунка 6г, найменший обсяг приросту висоти (707 м²) спостерігається у моделі DoD-DSM2. Так само, на рисунку 6д, найбільше скорочення площі (577 м²) було зафіксовано саме для цієї моделі.

Відповідно до даних рисунка 6е, найменша площа суміщення (3926,5 м²) також асоціюється з DoD-DSM2.

Ретельне вивчення статистичних даних нашої роботи на думку, що показники, отримані в ході DoD-DSM3, вирізняються найменшим загальним розкидом відносно середніх величин, а отже, можна стверджувати про значну збіжність у межах згаданих комплектів інформації.

По суті, це вказує на те, що показники, зафіксовані під час кожного окремого вильоту, є досить стабільними та мають схожі просторові характеристики.

Водночас було з'ясовано, що розбіжності між різними парами знімків можуть бути більш суттєвими, що виражається у зростанні величин площ, де відбулися зміни, та амплітуди вертикальних зсувів.

Це наводить на думку про те, що чинники знімання та специфіка подальшої обробки впливають на кінцевий вимір.

Підсумовуючи здобуту інформацію, доцільно констатувати, що показники стандартного відхилення та середньоквадратичної помилки коливаються в межах сантиметрів.

Цей факт засвідчує, що модель DoD-DSM, створена за допомогою даних, отриманих із послідовних знімків SfM-MVS, цілком придатна для верифікації точності та фіксації деформацій.

Варто окремо підкреслити, що ступінь достовірності відтвореної моделі значною мірою зумовлений природою об'єктів.

Моделі дерев та чагарників матимуть суттєво більшу неточність, якщо порівнювати їх із площинами, вкритими травою, чи з твердими покриттями.

Причина криється у тому, що при здійсненні серії аерознімків ми не можемо цілком усунути вплив чинників зовнішнього середовища, як-от зміна інтенсивності світла чи сила вітру.

Коливання у положенні листя та гілок, а також зсуви у розташуванні сонячних тіней, додають змінних до процесу відновлення.

Ба більше, на якість поверхневого відтворення, що досягається за допомогою методу фотограмметрії (SfM), прямий вплив мають фактурність та колірна гама об'єкта, що, своєю чергою, позначається на надійності ідентифікації відповідних маркерних точок.

Висновки

У процесі написання цієї бакалаврської роботи для акумуляції первинної інформації застосовувався безпілотник споживчого сегменту, а саме DJI Phantom 4 RTK.

Серійну аерофотозйомку проводили, тримаючи висоту апарата на рівні 40 метрів, використовуючи при цьому незмінні параметри виконання польоту.

Опрацювання отриманих даних реалізовано за допомогою технології SfM–MVS, що призвело до генерування цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та ортофотопланів (ОФП) досліджуваної ділянки.

Шляхом інтеграції даних, отриманих у ході багаторазових замірів, та залучення техніки вибірки 3D-точок за методом "вікна", було здійснено визначення просторової правильності, дотримуючись усталених критеріїв розрахунку помилок при картографічному знімальному процесі.

Окрім того, для з'ясування рівня відповідності між даними, отриманими під час окремих льотних сесій, були сформовані моделі різниць (DoD-DSM).

На основі проведеного аналізу були зроблені такі ключові твердження:

1. Визначення достовірності за допомогою методу віконного підходу

Розгляд тривимірних скупчень точок у межах тестових ділянок розміром 1 на 1 метр засвідчив, що розбіжності як у горизонтальній площині, так і по висоті при повторних зйомках з використанням безпілотного літального апарату (БПЛА) фактично не перевищують міліметрового діапазону.

Щодо міцних (бетонованих чи подібних) поверхонь:

- Середнє значення похибки у площині зафіксовано на рівні $\pm 0,004$ м;

- Спільна похибка у просторі (інтегральна 3D) у середньому сягає $\pm 0,009$ м.

Для м'яких (неукріплених) поверхонь:

- Середня похибка у площині дорівнює $\pm 0,007$ м;
- Середня похибка у тривимірному просторі становить $\pm 0,011$ м.

Наявні дані демонструють, що ступінь точності при відновленні твердих (ущільнених) поверхонь перевершує таку для необроблених (незміцнених).

Це зумовлено переважно тим, що текстура поверхні (шорсткість) і рослинний покрив спричиняють суттєвіше розходження у показниках висоти.

2. Оцінка вірності за допомогою техніки DoD-DSM

Здійснений порівняльний розбір моделей, сформованих за методикою DoD-DSM, засвідчив значний ступінь відповідності між моделями, отриманими з незалежних прольотів.

Конкретно, показники DSM для прольотів H40J2 та H40J3 демонструють ледь помітні розбіжності, тоді як суттєвіші відмінності фіксуються при зіставленні результатів H40J1 і H40J3.

Для трьох моделей з різницями ці сумарні статистичні міри виглядають так:

- стандартне відхилення дорівнює 0,063 м;
- похибка середнього квадрата складає 0,083 м.

За цими даними, точність досягає сантиметрового діапазону.

Технологія DoD-DSM якісно спроможна верифікувати, наскільки узгоджуються виміри, отримані у різні моменти часу.

Виявлено, що зсуви рельєфу близько 6–7 см цілком можливо фіксувати з достатньою надійністю.

Якщо ж амплітуда коливань менша, слід брати до уваги вплив систематичних похибок, які виникають під час збору та подальшої обробки даних.

Головною причиною розбіжностей у диференційних моделях слугує шум, що виникає через рослинність різної висоти, а також через зовнішні чинники, такі як освітлення та вітрове навантаження.

3. Узагальнений висновок щодо правильності та сфери застосування

На підставі проведеного експерименту було доведено, що цифрові моделі рельєфу, сформовані завдяки багаторазовим аерофотозйомкам за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) аматорського класу, із застосуванням технологій аерофотограмметрії (SfM–MVS), здатні досягати точності у плані та по висоті на рівні сантиметрів, а час від часу — показники, що наближаються до міліметрового діапазону.

Водночас, варто зазначити деякі межі цього дослідження:

1. Опрацювання отриманих даних відбувалося виключно у програмному комплексі Agisoft Metashape, а порівняльний аналіз із застосуванням альтернативних програмних рішень не проводився.
2. Аналітичні розрахунки охопили лише невеликий діапазон типів покриття (дві визначені групи), без охоплення багатоманітніших ландшафтних конфігурацій.
3. Верифікація точності здійснювалася лише на еталонних фрагментах площею один квадратний метр, не вивчаючи при цьому впливу масштабування.

Загалом, реалізована праця демонструє потенціал використання безпілотних літальних апаратів споживчого сегменту для формування точнісних тривимірних моделей рельєфу та встановлення граничних показників точності технології UAV-SfM у контексті періодичних моніторингових заходів.

Список використаної літератури

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

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

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

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Дослідження точності 3D-позиціонування при фотограмметричній зйомці з БПЛА методом структури з руху та багатовидового стерео на прикладі тестової ділянки »

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)