Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

Кафедра геодезії та землеустрою

Шкромида Святослав Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Оцінка ефективності доступних фотограмметричних технологій на основі безпілотних літальних апаратів для картографування
(назва роботи)

Землеустрій та кадастр
(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

_____
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник д.т.н., проф. Приходько Микола Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

_____
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

м. Івано – Франківськ
2025р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень магістр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____

«____»_____20__року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Шкромида Святослав Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оцінка ефективності доступних фотограмметричних технологій на основі безпілотних літальних апаратів для картографування

Керівник роботи д.т.н., проф. Приходько Микола Миколайович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від "__"_____ 2025 року №__

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Звіт з переддипломної практики, матеріали польових досліджень

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

Досліджувана територія

Матеріали та методи

Результати

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2,3	Приходько М.М.		

7.Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Досліджувана територія		
2	Матеріали та методи		
3	Результати		

Студент _____ Шкромида С.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Приходько М.М.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

У контексті стрімкого розвитку новітніх систем, застосування дронів (безпілотних літальних апаратів) для швидкого збору просторової інформації стає критично важливим.

Головною метою цього наукового опрацювання є аналіз та оцінка продуктивності сучасних фотограмметричних підходів, що базуються на використанні БПЛА, для потреб географічного картографування.

Предметом розгляду, або об'єктом, є послідовність дій для отримання, накопичення та подальшої обробки геопросторових даних, де ключову роль відіграють фотограмметричні методи, реалізовані за допомогою автономних повітряних систем.

Об'єктом цього дослідження виступають методики, програмні алгоритми та апаратні засоби для створення високоточних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) і ортофотопланів, які водночас відповідають вимогам щодо точності та економічної обґрунтованості картографічної діяльності.

Мета роботи – здійснити глибокий аналіз, порівняти характеристики та оцінити практичну ефективність існуючих фотограмметричних підходів, що інтегруються з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) для вирішення картографічних завдань у широкому діапазоні масштабів і рівнів складності.

Задля успішного виконання поставленої головної мети, визначено наступний перелік завдань дослідження:

1. Здійснити апробацію методу зйомки зображень квадрокоптером, адаптованого для річкової долини зі складною топографією та значними просторовими розмірами.

2. Протестувати рівень дієвості підходу "структура-з-руху", що базується на використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у

вищезазначених умовах, здійснивши оцінку точності одержаних цифрових моделей рельєфу.

3. Проаналізувати корисність розробленої цифрової моделі рельєфу як ефективного інструменту для детального картографування річкових терас.

Наукова цінність цієї праці полягає у всебічному аналізі дієвості наявних фотограмметричних методів за різного антуражу зйомки.

Це уможливлює ідентифікацію найкращих налаштувань для застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сфері картографування, беручи до уваги показники точності, цінову політику та тривалість подальшої обробки даних.

Практична значимість полягає в тому, що здобуті висновки можна застосовувати для прискорення та покращення виконання земельно-кадастрових, геодезичних і суто картографічних операцій.

Крім цього, вони можуть слугувати основою для доопрацювання методичних посібників, що стосуються використання фотограмметричних технік із залученням БПЛА як у польових, так і в лабораторних умовах.

Ключові слова: фотограмметрія, безпілотний літальний апарат, картографування, ортофотоплан, цифрова модель рельєфу, точність, ефективність.

Abstract

In the context of the rapid development of geographic information systems, the use of drones (unmanned aerial vehicles) for rapid spatial information collection is becoming critically important.

The main purpose of this scientific study is to analyze and evaluate the performance of modern photogrammetric approaches based on the use of UAVs for the needs of geographic mapping.

The subject of consideration, or object, is the sequence of actions for obtaining, accumulating and further processing of geospatial data, where photogrammetric methods implemented using autonomous aerial systems play a key role.

The object of this study are methods, software algorithms and hardware for creating high-precision digital terrain models (DTMs) and orthophotomaps, which at the same time meet the requirements for accuracy and economic feasibility of cartographic activities.

The purpose of the work is to conduct an in-depth analysis, compare the characteristics and assess the practical effectiveness of existing photogrammetric approaches that integrate with unmanned aerial vehicles (UAVs) to solve cartographic tasks in a wide range of scales and levels of complexity.

In order to successfully fulfill the main goal, the following list of research tasks has been defined:

1. To test the method of capturing images with a quadcopter, adapted for a river valley with complex topography and significant spatial dimensions.

2. To test the level of effectiveness of the "structure-from-motion" approach based on the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the above conditions, assessing the accuracy of the resulting digital terrain models.

3. To analyze the usefulness of the developed digital terrain model as an effective tool for detailed mapping of river terraces.

The scientific value of this work lies in a comprehensive analysis of the effectiveness of existing photogrammetric methods in various shooting environments.

This makes it possible to identify the best settings for the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the field of mapping, taking into account accuracy indicators, pricing policy and the duration of further data processing.

The practical significance lies in the fact that the conclusions obtained can be used to accelerate and improve the performance of land cadastral, geodetic and purely cartographic operations.

In addition, they can serve as the basis for the development of methodological manuals related to the use of photogrammetric techniques involving UAVs both in the field and in laboratory conditions.

Keywords: photogrammetry, unmanned aerial vehicle, mapping, orthophotomap, digital terrain model, accuracy, efficiency.

ЗМІСТ

Вступ

1. Досліджувана територія

2. Матеріали та методи

2.1. Отримання аерознімків з дронів у важкодоступних районах і накопичення наземної інформації

2.2. Робочий процес фотограмметрії метод структури з руху

2.3. Оцінка точності

2.4. Картування та аналіз річкових терас

3. Результати

3.1. Цифровий контроль даних із поєднаних знімків

3.2. Точність цифрової моделі рельєфу

3.3. Річкові тераси

3.4 Картографування складних рельєфів на відносно великих просторових ділянках

3.5 Оцінка точності цифрової моделі рельєфу та чинників, що на неї впливають

3.6 Виявлення рівнів річкових терас і оцінка методології

Висновки

Список використаних джерел

Вступ

Річкові тераси — це, по суті, досить пласкі зони на поверхні землі, які розміщуються вище по відношенню до теперішнього русла водотоку.

Вони формуються через комплексні геоморфологічні процеси, головним чином шляхом циклічної зміни етапів розмивання і накопичення, коли річка зазвичай або руйнує, або відкладає шари осадових порід у межах долини.

Також трапляється, що тераси можуть виникати як результат ерозійного прорізання у фундаментальних гірських породах, що слугує індикатором поетапної еволюції будови річкової долини.

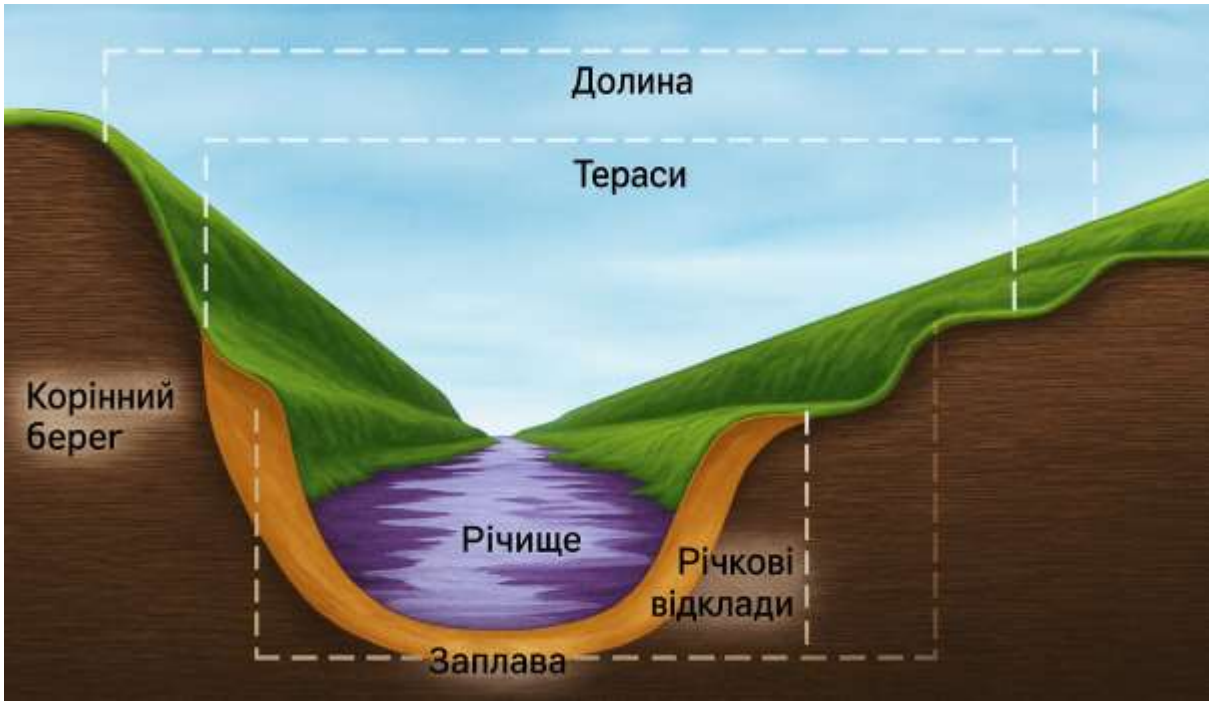


Рисунок 1 Річкові тераси

Утворення річкових терас відбувається внаслідок періодичного чергування періодів глибинної ерозії, яку здійснює річковий потік, та етапів накопичення алювіальних відкладень.

У той момент, коли річка змінює фазу відносно повільного поглиблення та горизонтального розширення річища на стадію стрімкого вертикального врізання у свій субстрат, на її бортах залишаються горизонтальні ділянки — це колишні рівні заплав або дна долини, звані терасами.

Отже, ці геоморфологічні утворення слугують дзеркалом, що відображає послідовність розвитку річкової мережі, динаміку тектонічних рухів, процеси денудації (руйнування) та становлення сучасної форми земної поверхні.

Виникнення цих форм рельєфу зазвичай пов'язане з циклічними змінами клімату, коли коливання обсягів дощових і талих вод (опадів та стоку) призводять до послідовної зміни періодів поглиблення русла та нагромадження відкладень.

Ретельний морфометричний опис терас є ключовим, оскільки лише він дає змогу застосовувати їх як надійні геоморфологічні маркери. Ці маркери фіксують і відображають взаємодію між тектонічною активністю та кліматичними змінами, що відбувалися в історичному минулому.

Аналіз річкових терас надає неоціненні дані щодо швидкості вертикальних зсувів земної поверхні, зміни рівня ерозійного базису, а також часової протяжності окремих стадій формування річкової долини.

Дослідницька робота та нанесення терас на карти вимагало використання низки різних методологічних підходів.

Історично, одним із найбільш доступних і перших застосованих методів була просторова наземна зйомка, яка ефективно забезпечувала глибокі відомості про окремі території.

Однак, така техніка вимагала великих ресурсів, як людських, так і часових, і була обмежена лише невеликими ділянками для аналізу.

Серед інших усталених методик — дослідження поперечних перерізів річкових долин, створених на базі топографічних матеріалів, або ж дешифрування аерознімків, що надавало можливість ідентифікувати терасові рівні на підставі різниці в їхній будові та абсолютної висоти.

Кардинальне поліпшення у сфері картографії настало завдяки впровадженню цифрових рішень.

Поширення використання числових моделей місцевості (ЦММ) надало змогу впровадити автоматичні або частково автоматичні методи розпізнавання терасових уступів.

Початкові методики оперували ЦММ з низькою деталізацією, що дозволяло лише приблизно окреслити положення терасних площин, спираючись на розподіл висотних даних (гістограми).

З метою вдосконалення точності були розроблені спеціалізовані програми, зокрема, TerEx, що виконує напівавтоматичне ідентифікування ймовірних терасних поверхонь, ґрунтуючись на критеріях локальної морфології, загальної площі поверхні та її віддаленості від водотоку.

Новітні досягнення у галузі комп'ютерної геоморфології сприяли значному покращенню ефективності цих інструментів.

Сучасні методи автоматичної ідентифікації терас використовують лише обмежений набір числових характеристик, а саме — локальний ухил поверхні та показник перевищення над найближчою водотокою.

Ці показники можуть бути розраховані засобами статистики без будь-якої участі людини, що значно полегшує механізм автоматизованого створення карт.

Водночас, достовірність отриманих даних напряму залежить від якості початкової інформації.

Цифрові моделі рельєфу високої чіткості є запорукою успішної та правдивої ідентифікації терасних утворень.

Наявні загальнодоступні світові моделі, такі як ASTER GDEM чи SRTM, володіють просторовою деталізацією близько 30 метрів, чого часто виявляється замало для фіксації мінімальних відмінностей у формі між різними рівнями терас.

Зняти це обмеження є змога, використовуючи сучасні методики віддаленого зондування — серед них лазерне сканування (LiDAR), що містить аеросканування (ALS) і наземне (TLS), або ж фотозйомка за допомогою безпілотних апаратів (БПЛА).

Завдяки цим підходам є можливість формувати цифрові моделі рельєфу (ЦМР) з роздільною здатністю, яка сягає одного метра, проте це потребує значних витрат на апаратуру та висококваліфікованих фахівців для роботи з отриманими даними.

Натомість, дієвим замінником виявилась методика "структури з руху" (Structure from Motion, SfM) у поєднанні з мульти-видовою стереофотограмметрією (MVS).

Даний метод дає змогу створювати ґрунтовні цифрові моделі земної поверхні. Для цього використовується комплект зображень, що частково перекриваються і зняті з різних точок.

Перевагою є відсутність потреби у скрупульозному налаштуванні камер або великому числі опорних позначок.

Концепція "структури з руху" (Structure from Motion – SfM) бере свій початок із засад комп'ютерного зору.

Вона передбачає синхронне обчислення як позиції знімального пристрою, так і просторової конфігурації об'єкта.

Це досягається завдяки автоматичному ідентифікуванню та зіставленню характерних точкових елементів між кадрами.

Наступний крок передбачає прив'язку сформованої хмари точок до дійсної просторової системи координат.

Далі, використовуючи багатокадрову стереофотограмметрію, спеціалізований алгоритм ущільнює ці дані, забезпечуючи створення надзвичайно точної цифрової моделі земної поверхні (ЦМР).

Хоча цей підхід є дієвим, кінцева якість моделей, що продукуються за допомогою SfM, тісно пов'язана з обставинами зйомки, зокрема, з видом текстури поверхні, рівнем освітленості та заданими параметрами аерофотозйомки.

У той самий час, завдяки появі та вдосконаленню спеціалізованих програмних комплексів, на зразок Agisoft PhotoScan (Metashape), даний підхід став набагато простішим у використанні для наукової спільноти.

Інтеграція підходу "структура з руху" (Structure from Motion, SfM) та мульти-видової стереофотограмметрії з аерознімальними даними, отриманими безпілотними літальними апаратами (БПЛА), відкрила шлях до генерації високоточної топографічної інформації за досить помірних фінансових витрат.

Множинні наукові роботи однозначно засвідчили, що комбінований метод фотограмметрії та зйомки з БПЛА забезпечує можливість побудови цифрових моделей поверхні з точністю до декількох сантиметрів.

Ця висока точність робить цей метод потужним інструментом для детального вивчення різноманітних геоморфологічних явищ: від змін льодовикових мас і зсувних процесів до процесів руйнування берегових ліній та формування ярів.

Проте, складання карт руслових терас є більш непростим процесом, оскільки вони здебільшого знаходяться у вузьких і глибоких міжгір’ях, у яких складніше досягти стійкого накладання кадрів із безпілотника.

Враховуючи вищезазначене, у нашій магістерській роботі було визначено наступні завдання:

1. Розробити та впровадити методику збору знімків топографічно непростої долини, використовуючи квадрокоптер, для побудови високоточної моделі рельєфу.
2. Здійснити оцінку результативності використання методу S-ф-P (Структура з руху), базуючись на даних з БПЛА, в умовах складного ландшафту, провівши аналіз достовірності отриманої цифрової моделі поверхні.
3. Застосувати створену модель для детального картографування річкових терас і перевірити її корисність як інструментарію для геоморфологічного дослідження.

1. Досліджувана територія

Область, що є предметом вивчення, простягається навколо населеного пункту Хмелева, що знаходиться у Городенківському районі Івано-Франківської області (див. Рис. 2).

Ця місцевість характеризується яскраво вираженою горбистою місцевістю, яка типова для передгірських районів Прикарпаття.

Завдяки цим особливостям, вона ідеально підходить як тестовий майданчик для впровадження методик просторового аналізу, а також для створення комп'ютерних (цифрових) моделей місцевого рельєфу.

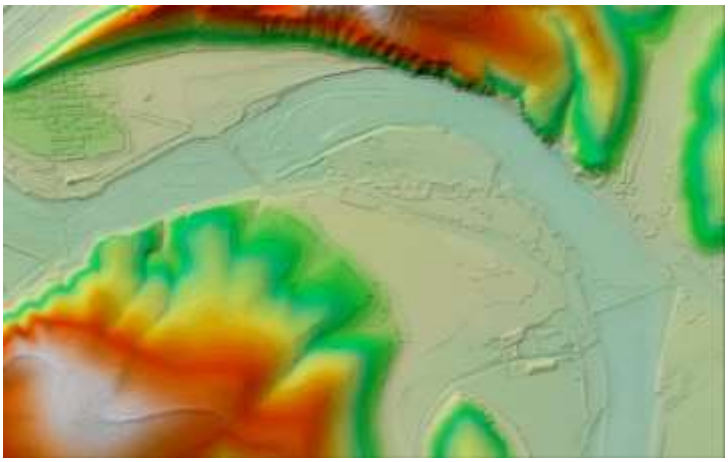


Рисунок 2. Географічне розташування досліджуваної території

Село Хмелева знаходиться на лівобережній частині річки Дністер, що формує собою елемент чарівного Дністровського каньйону — одного з найбільш глибоких та розлогих каньйонів в межах Європейського континенту.

Область, що є предметом розгляду, простягається вздовж річкової долини на відстань приблизно 1,7 км, маючи усереднену ширину близько 1,1 км, що сукупно охоплює приблизну площу 1,9 км².

Показники абсолютної висоти в межах цієї території варіюються від 86 до 200 метрів над морським рівнем, створюючи таким чином різницю висот, що становить приблизно 120 метрів.

Топографія даної місцевості визначається характерними особливостями, притаманними долині гірської річки.

Ухили тут можуть досягати 70 градусів, а середній показник становить близько 25°, що забезпечує ідеальні умови для тестування технологій БПЛА-зйомки у важкодоступній, сильно розсіченій місцевості.

Основою геологічної структури долини є алювіальні шари, представлені, головним чином, піщано-гравійними відкладеннями терасових рівнів.

В окремих місцях на денну поверхню виходять корінні гірські породи, що особливо помітно вздовж річища Дністра та на схилах долини.

Активних тектонічних порушень у досліджуваній зоні не виявлено, що підтверджує її геологічну відносну стійкість.

Загальна протяжність водного шляху Дністра становить приблизно 1362 км, з них близько 925 км річка протікає в межах України.

Площа водозбірного басейну, що охоплює річку, становить приблизно 72 100 квадратних кілометрів.

Сама природа русла річки зазнає глибоких змін по всій своїй довжині: у межах Карпатських гір Дністер демонструє енергійний, швидкий та виразно гірський характер, що характеризується безліччю порогів; навпаки, у своїй середній течії, особливо навколо Могилева-Подільського, річка набуває рис, типових для рівнини, прорізаючи глибокий каньйон зі звивистим шляхом.

Далі вниз за течією в басейні долина значно розширюється, переходячи в низинну заплаву, всіяну болотистими елементами.

Бічна ерозія, що здійснюється потоком, значною мірою сприяє утворенню корінних схилів на увігнутих берегах річки, де сама висота уступів може сягати 20 метрів.

На противагу цьому, протилежна, опукла сторона долини спостерігає розвиток обширних зон, схильних до повеней, що утворюються внаслідок безперервних осадових (акумулятивних) дій.

Деякі підвищені плато зазнали подальшої фрагментації внаслідок ерозійних процесів, що призвело до тріщинуватого розташування річкових терас.

Межі нинішньої заплави простягаються на 50–90 метрів, де чітко видно багатоступеневі рівні минулих річкових терас, що утворилися через послідовне піднесення земної поверхні.

Хоча господарська діяльність суттєво трансформувала ландшафт, річкові тераси залишаються добре ідентифікованими як на цифрових картах рельєфу, так і в умовах натурних досліджень.

Нижчі яруси терас здебільшого зайняті під транспортну інфраструктуру, житлові комплекси та рілля, тоді як вищі рівні часом зберігають свій первинний геоморфологічний вигляд.

Досліджувана місцевість характеризується землекористуванням, де домінують сільськогосподарські площі, найбільшу частку в яких займають оброблювані поля.

Місцями також зустрічаються фрагменти дикої рослинності та суцільні кущові угруповання.

Домінуюча сільськогосподарська культура, яку обробляють на цій площі, це кукурудза, оскільки вона легко пристосовується до ґрунтово-кліматичних особливостей регіону.

Кліматичні умови досліджуваної місцевості відповідають помірно континентальному типу з явно вираженою зміною пір року.

Зимові місяці тут зазвичай характеризуються м'якою погодою, з типовими середньомісячними показниками температури близько –3…–5 °C. Навпаки, літо тепле, і середня температура липня коливається в межах +19…+21 °C.

Річний обсяг атмосферних опадів коливається в діапазоні від 650 до 750 мм, більшість із яких випадає саме протягом теплого річного сезону.

Ці фактори створюють сприятливі обставини для активного поверхневого водовідведення та процесів ерозії, що істотно впливає на формування поточного топографічного вигляду місцевості.

Ґрунти здебільшого є чорноземами типово-карбонатними, а також дерново-опідзоленими, що мають високий потенціал родючості.

Там, де схили мають значний уклон, поширені еродовані ґрунтові шари, а в понижених частинах долини — зустрічаються алювіальні відкладення.

Подібна строкатість ґрунтового покриву безпосередньо зумовлена формою рельєфу та циклами руху поверхневих і підземних вод.

Водна система досліджуваної місцевості є розгалуженою.

Крім домінуючої водної артерії — річки Дністер, на території присутні численні невеликі потоки та періодичні водотоки, які живлять основне річище.

Ці водні об'єкти відіграють ключову роль у регулюванні стоку поверхневих вод і впливають на формування схилових ландшафтних форм.

Весняна повінь спричиняє інтенсивне змивання та зсув ґрунтових мас, що призводить до видимої трансформації мікрорельєфу на поверхнях схилів.

Ця місцевість входить до природної зони лісостепу за характером рослинного покриву.

Схили зі значним ухилом вкриті густими чагарниками, серед яких домінують кущі ліщини, глоду та кизилу, натомість на більш пологих ділянках переважають різноманітні види трав.

Хоча більшість земель обробляється, природна рослинність все ж збереглася на окремих фрагментах схилів та у заплавах річок.

Ці залишки природного покриву вкрай важливі, оскільки вони слугують як природний бар'єр, що ефективно знижує вплив ерозії.

Сукупність топографічних параметрів та геологічної будови цієї території формує оптимальні передумови для успішного виконання комплексних геодезичних робіт та фотограмметричного аналізу.

Значна амплітуда висотних показників, багатогранність геоморфологічних утворень та наявність відкритих площ роблять цей регіон ідеальним для апробації методик дистанційного спостереження.

Сюди належать як лазерне, так і фотограмметричне сканування.

З огляду на ці обставини, територія Наддністрянщини поблизу населеного пункту Хмелева слугує оптимальною експериментальною

базою для валідації способів створення високодеталізованих цифрових моделей місцевості.

Крім суто природних і геоморфологічних особливостей, цей район має відчутну практичну цінність.

Результати, отримані в ході цих наукових робіт, можуть бути застосовані для актуалізації картографічної інформації, раціоналізації землеустрою, а також для контролю процесів мінливості на схилах.

Окрема деталізована кібернетична модель окреслення рельєфу надає можливість як встановлювати особливості конфігурації тераз, так і вираховувати ймовірні загрози, пов'язані з вивітрюванням ґрунту чи зсувами земляних мас, що виступає критичною складовою для подальшого прогресу даної місцевості.

2. Матеріали та методи

2.1. Оторимання аерознімків з дронів у важкодоступних районах і накопичення наземної інформації

Для проведення даного дослідження було задіяно безпілотний авіаційний комплекс (БАК), представлений квадрокоптером моделі DJI Phantom 4 Pro+ від виробника DJI Technologies (що базується у місті Шеньчжень, Китай).

Ця авіаційна платформа позиціонується як малогабаритний БПЛА, оснащений високоякісною бортовою камерою, здатною фіксувати зображення із просторовою деталізацією, яка є цілком прийнятною для подальшого формування цифрових моделей рельєфу та об'єктів місцевості (див. ілюстрацію 3).

Рисунок 3 Квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro + (Plus)

Дрон DJI Phantom 4 Pro+, що був застосований у цьому науковому дослідженні, класифікується як портативний малогабаритний квадрокоптер.

Його загальна вага не перевищує 1,4 кг, а габаритний розмір (між протилежними двигунами) становить приблизно 350 мм.

Дана модифікація, розроблена інженерами компанії DJI Technologies, є частиною їхньої професійної серії безпілотних систем, яка вирізняється підвищеною стійкістю польоту, загальною відмовостійкістю та високоточною системою позиціювання.

Завдяки своїй модернізованій конструкції та вбудованому комплексу для запобігання зіткненням, цей апарат здатний якісно виконувати завдання аерофотозйомки навіть при роботі у несприятливих польових обставинах.

Квадрокоптер має на борту 20-мегапіксельну камеру, оснащену CMOS-матрицею розміром 1 дюйм, що дає змогу записувати

відеоматеріали у роздільній здатності 4K зі швидкістю 60 кадрів за секунду, а також захоплювати статичні фотознімки із частотою до 14 кадрів на секунду.

Цей дизайн уможливлює здобуття різких, першокласних знімків із ледь помітним викривленням перспективи.

Сам літальний апарат зібрано з магнієвого композиту, що надає йому легкості, проте водночас він залишається досить надійним для тривалого використання.

Вбудована система розпізнавання перешкод на п'яти напрямках гарантує безпечне пілотування навіть у важкодоступних зонах або за присутності як природних, так і створених людиною перепон.

Граничний час польоту сягає приблизно тридцяти хвилин, а зона стійкого радіоз’єднання поширюється до 7 кілометрів (згідно зі стандартами FCC) або 3,5 кілометра (за нормами CE).

Враховуючи ці параметри, DJI Phantom 4 Pro+ є ідеальним інструментом для регулярного картографування ділянок помірного розміру із забезпеченням високої деталізації зображень.

Літальний апарат обладнаний інерційно-вимірювальним модулем (ІВМ), висотоміром, електронним компасом, а також навігаційним комплексом GPS/ГЛОНАСС, що в сукупності сприяє надійній фіксації положення та стійкості під час виконання аерозйомки.

Для реалізації контролю за рухом дрона використовувався бездротовий контролер, який функціонував у тандемі з портативним комп'ютером типу планшет.

Застосування спеціалізованого програмного забезпечення для автоматизованого генерування завдань дало змогу виконувати польоти в повністю автоматичному режимі, слідуючи заздалегідь визначеними траєкторіями з чітко заданими координатами для фотофіксації.

Оскільки досліджувана місцевість відзначається значними висотними варіаціями та нерівномірним рельєфом, досягнення необхідного ступеня перекриття кадрів із застосуванням традиційних підходів виявилося нежиттєздатним.

Для знаходження розв'язку цього завдання було використано підхід адаптивного проєктування польотного завдання, що базувався на сегментуванні досліджуваної ділянки на дві окремі зони для знімання.

Використання цієї стратегії допомогло істотно зменшити різницю в абсолютній висоті польоту апарата відносно рельєфу: початкові 120 м для всієї просторої ділянки вдалося знизити до 50 м та 60 м для кожного із субсекторів.

Завдяки цьому вдалося зберегти постійний масштаб фотофіксації та отримати необхідний рівень накладення (перекриття) сусідніх кадрів.

Аерозйомка здійснювалася 28 березня 2020 року, в час, коли рослинність перебувала у фазі мінімального розвитку (міжсезоння), таким чином гарантуючи максимальну прозорість для зйомки безпосередньо земної поверхні.

Погодні умови на час аерозйомки були ідеальними: світило яскраве сонце, а швидкість вітру не підіймалася вище 7 метрів на секунду.

Це дозволило забезпечити стабільний політ апарату та гарантувало, що отримані зображення будуть максимально чіткими та якісними.

Було проведено два окремі, попередньо сплановані рейси, траєкторії яких пролягали паралельно одна одній та орієнтувались за напрямком зі сходу на захід.

Перший прохід виконувався на висоті 150 метрів, тоді як другий – на 120 метрах над землею.

Таким чином, загальна площа покриття склала 0,9 км² для першої зони та 1,0 км² для другої. Це забезпечило повний, без пропусків, набір фотографій із належним рівнем перекриття (поздовжнього та

поперечного), критично необхідним для подальшої фотограмметричної обробки даних.

Рисунок 4 План польоту

Для кожної з двох запланованих аерофотознімальних операцій, задана швидкість переміщення безпілотного літального апарата становила 10 метрів за секунду.

Цей параметр обрано для досягнення ідеальної золотої середини: максимальної якості отриманих світлин та високого показника ефективності щодо площі охоплення.

Параметри перекриття (накладання) послідовних кадрів були жорстко регламентовані: у поперечному напрямку – 70 %, а у поздовжньому – 80 відсотків.

Така конфігурація забезпечила формування необхідного об'єму точок взаємного прив'язування, критично важливих для прецизійного фотограмметричного процесу юстування.

Старт (зліт) БПЛА ініціювався поблизу геометричного осередку (центру) кожної ділянки, що підлягала зйомці.

Така локалізація точки початку маршруту дозволила максимально раціоналізувати споживання електричної енергії та мінімізувати період функціонування акумуляторних батарей до їхнього вичерпання.

Як підсумок, було успішно завершено 7 та 8 окремих повітряних коридорів (ліній руху) протягом загального часу польоту, що становив орієнтовно 40 та 45 хвилин відповідно.

Застосування цієї методики гарантувало однорідне й цілісне покриття всієї цільової території при дотриманні якомога стисліших часових лімітів.

Прокладання маршрутних шляхів відбувалося із залученням зовнішнього програмного забезпечення Map Pilot for DJI – інструменту, що дає змогу розробляти автономні польотні завдання, адаптовані до особливостей рельєфу ділянки.

Також застосовувалася система розумного контролю стану батареї, чия функція полягала в гарантуванні безпечного припинення польоту і повернення безпілотника на стартову позицію в разі критичного зменшення рівня енергії.

Незважаючи на те, що передбачуваний час функціонування батареї квадрокоптера складає приблизно 30 хвилин, для забезпечення безпечної процедури приземлення було зарезервовано додатковий час – 9 хвилин.

Приблизно 2 хвилини додатково витрачається на переміщення апарата від початкової точки до місця старту безпосередньо за маршрутом.

Відтак, загальний дієвий час для проведення зйомок складає приблизно 19 хвилин, що передбачає потребу у залученні трьох батарейних блоків на кожен авіарейс.

Під час виконання знімальних робіт було зібрано 516 та 594 графічних файли з географічною прив'язкою, при цьому просторова

роздільність становила 4,43 см/піксель та 3,54 см/піксель відповідно для першої та другої місій.

Зйомка проводилась у форматі JPEG із автоматичним інтегруванням GPS-метаданих безпосередньо у кожен кадр, що колосально полегшило процес подальшої георефернціації при фотограмметричному опрацюванні.

З метою гарантування високої прецизійності при створенні ортофотопланів, а також числової моделі поверхні, було встановлено 19 контрольних опорних точок на місцевості (Ground Control Points, GCPs).

Вони відігравали ключову роль як референтні маркери при георефернсуванні побудованих моделей.

Мітки ці наносились яскраво-червоною фарбою на ділянках, що легко візуалізувались та були відкритими: 7 з них знаходились на краях шляхів, а решта 12 — на ділянках аграрного призначення (див. мал. 5).

Завдяки високій контрастності та ідеальній геометрії, ці знаки було безпомилково ідентифіковано на аерознімках, навіть коли умови світла змінювались.

Перед стартом політної місії, географічні координати усіх цих контрольних позначок було точно зафіксовано високоточним GNSS-обладнанням у режимі RTK, що дало змогу досягти точності прив'язки до сантиметра.

На етапі подальшої комп'ютерної обробки ці координати були використані для юстирування створеної моделі та для верифікації фактичної просторової достовірності кінцевих даних.

Окрім того, під час виконання завдання особливого значення надавалося стійкості апарата в повітрі та бездоганності візуального матеріалу.

Щоб усунути будь-які коливання, була задіяна інтегрована система тривісної стабілізації (підвіс), яка гарантувала чіткість і деталізацію зображень навіть при слабкому поривчастому вітрі.

Такий підхід є критично важливим, якщо зйомка відбувається на місцевості зі складним ландшафтом, де динаміка та сила повітряних мас здатні непередбачувано змінюватися.

Рисунок 5 Наземні цілі

Усі траєкторії літання були ґрунтовно протестовані у спеціальному віртуальному тренажері (симуляторі) польоту, який є частиною застосунку Map Pilot.

Це надало можливість завчасно оцінити ймовірність зіткнення з особливостями ландшафту (рельєфом) та електричними мережами.

Для гарантування сталого зв'язку між безпілотним літальним апаратом (БПЛА) і пристроєм управління, польоти здійснювали виключно в зоні прямої видимості оператора.

Під час виконання завдань, дрон безперервно записував ключові показники польоту — такі як висота, швидкість руху, напрямок (азимут) та географічні координати.

Ці дані пізніше застосовувалися для перевірки якості й підтвердження достовірності кінцевих результатів.

Загальне оцінювання якості отриманих фотоматеріалів показало високий рівень: знімки були чіткими (добра різкість), без дефектів (спотворень) і з рівномірним розподілом світла (освітлення).

Це забезпечило стійке взаємне покриття суміжних кадрів, що є критично важливим для формування густої хмари точок та розробки цифрової моделі земної поверхні.

Скрупульозне дотримання знімальних параметрів дозволило суттєво зменшити неточності під час наступної фотограмметричної обробки й підвищити геометричну точність кінцевих даних.

Слід підкреслити, що раціональне планування польотних завдань та застосування оптимальних налаштувань апаратури мали визначальне значення для досягнення необхідного рівня прецизійності цифрового моделювання.

Як наслідок, отримані зображення характеризувалися не лише високою деталізацією, але й відповідною якістю кольоропередачі, що уможливило виконання глибокого аналізу структурних особливостей річкових терас у межах досліджуваного річкового басейну.

Задля гарантування найвищого рівня геометричної коректності фотограмметричних моделей, локалізацію кожної наземної контрольної точки (NKT) фіксували, застосовуючи двочастотний геодезичний апарат GPS, функціонуючий у режимі кінематики реального часу (RTK).

Устаткування включало базову станцію та рухомий приймач (ровер), які функціонували синхронно, що забезпечувало моментальний обмін диференційними корекціями.

Застосування цієї методики дало змогу досягти детермінації просторових координат з точністю до сантиметра, навіть за наявності несприятливих ландшафтних умов.

Згідно з офіційною інформацією виробника, прилад характеризується точністю обмірів у межах: ±1 см + 1 мільйонна частка (ppm) середньоквадратичного відхилення (СКВ) для планового положення та ±2 см + 1 ppm СКВ для вертикальної позиції.

Ці показники були верифіковані в ході експериментів, спрямованих на перевірку ідентичності повторних вимірів.

Це забезпечує значний рівень надійності даних, що застосовані для георефернсування фотограмметричних моделей, а також для вимірювання похибок цифрової моделі висот (ЦМВ).

З метою здійснення окремої, незалежної валідації точності створеної моделі рельєфу, додатково були визначені польові контрольні точки, які не використовувалися в процесі врівноваження (зведення).

Ці точки функціонували як еталонні посилання для визначення вертикальної точності фінальної ЦМВ, дозволяючи обчислити розміри відхилень між змодельованими й фактично виміряними координатами.

Розташування наземних контрольних точок під час їхнього встановлення було обрано таким чином, щоб охопити повний спектр висотних позначок на території досліджуваної долини — починаючи від найнижчих ділянок річкової заплави і до найвищих областей схилів та вершин пагорбів.

Така організація розташування у просторі надала змогу рівномірно охопити всю площу, а також поліпшила достовірність налаштування (калібрування) моделі.

Значний акцент було зроблено на вимірюваннях, проведених на ріллі та сільськогосподарських угіддях, де м'якість ґрунту могла призводити до заглиблення антени GPS-приймача на декілька сантиметрів,

що, своєю чергою, спричиняло систематичні розбіжності у визначенні висоти.

Щоб обійти цю проблему, використовували спеціалізовану тонку та рівну основу, яка ефективно запобігала просіданню геодезичного штатива у ґрунт і гарантувала сталість і точність замірів.

Підсумком польових досліджень стало накопичення масиву з 196 наземних контрольних точок, координати яких були встановлені як у світовій системі WGS84, так і в національній українській просторовій системі УСК-2000.

Зібрані відомості слугували для георефернціювання фотограмметричного проєкту, а також для перевірки достовірності і точності топографічних моделей (як показано на мал. 4).

По закінченню польових робіт із вимірювань, координати наземних пунктів контролю були завантажені в програмний комплекс Agisoft Metashape Professional.

На етапі початкового фотограмметричного узгодження ці пункти застосовувалися як ключові орієнтири, що дозволило прив'язати всю цифрову модель до уніфікованої просторової системи координат.

Для кожного окремого маркеру вручну вказувалось його місце розташування на відповідних зображеннях, після чого відбувалося доведення до точності внутрішніх та зовнішніх характеристик камер за допомогою методу тріангуляції (пучкової) фотограмметричних променів.

По завершенню процесу зрівнювання, програмне забезпечення здійснило доведення до оптимальних значень параметрів калібрування знімальних камер, завдяки чому вдалося знизити до мінімуму систематичне відхилення у координатах точок та значно підвищити якість моделі.

Це дало змогу створити дуже точну тривимірну модель обстеженої ділянки, яку було інтегровано в геодезичну координатно-висотну систему УСК-2000.

Крім того, задля підтвердження достовірності сконструйованої цифрової моделі земної поверхні (ЦМП) та ортофотознімків, було здійснено зіставлення географічних координат окремих контрольних пунктів із їхнім відображенням на остаточно сформованій моделі.

Згідно з висновками проведеного аналізу, середній квадратичний збіг (СКП) не перевищив 5 сантиметрів у горизонтальній площині та 7 сантиметрів по вертикалі, що відповідає стандартам високоточного картографічного виробництва і свідчить про високу якість зібраних фотограмметричних вимірів.

Отже, застосування наземних контрольних точок мало подвійний позитивний ефект: воно не тільки гарантувало високий рівень метричної точності сформованого ортофотоплану, але й дало можливість провести всебічну, деталізовану перевірку достовірності сконструйованої цифрової моделі рельєфу.

Ці здобуті висліди заклали міцний фундамент для наступного етапу – проведення морфометричних досліджень річкових терас, що включало точне окреслення їхніх просторових контурів та оцінку всього комплексу геоморфологічних параметрів у межах цієї досліджуваної долини.

2.2. Робочий процес фотограмметрії метод структури з руху

Для створення цифрової моделі земної поверхні (ЦМП) та ортофотоплану на основі фотографій, здобутих у ході двох окремих польотів безпілотника, було застосовано програмний комплекс Agisoft PhotoScan Professional.

Зазначений програмний засіб втілює методику Structure from Motion (SfM), що надає змогу без втручання оператора реконструювати тривимірну форму об'єктів, спираючись на масив знімків із суміжними ділянками.

PhotoScan дозволяє опрацьовувати зображення, отримані з різних рівнів висоти польоту, автоматично коригуючи розбіжності в масштабі через процес оптимізації внутрішніх та зовнішніх характеристик знімального обладнання.

Таким чином, кінцевим продуктом є високоточні цифрові ортофотоплани та моделі рельєфу, де середня похибка фактично не перевищує рівень похибки вихідного фотоматеріалу.

Враховуючи, що загальний обсяг зібраних фотограмметричних даних є значним, а кількість відзнятих кадрів сягнула понад тисячу для обох виконаних польотів, процес обробки було реалізовано на потужному обчислювальному кластері, спеціально оптимізованому для ефективної взаємодії з програмним забезпеченням PhotoScan.

Цей кластер включав один домінуючий (головний) сервер та три допоміжні клієнтські робочі станції (вузли), які функціонували в єдиній гігабітній локальній мережі.

Подібна організація обчислювальних ресурсів дозволила значно прискорити часові межі проєктування та гарантувала стабільність продуктивності на всіх стадіях, зокрема при формуванні густої хмари точок та подальшій побудові ортофотомозаїки (див. табл. 1).

Кожен з елементів кластерної структури мав на борту новітній багатоядерний ЦП, щонайменше 32 гігабайти оперативної пам'яті, а також графічний прискорювач, що забезпечував обчислення з використанням технологій CUDA та OpenCL.

Таблиця 1. Конфігурація вузлів системи

Вузол	Процесор (CPU)	Оперативна пам’ять (RAM)	Відеокарта (GPU)
Host1	Intel i7 6900K 3.2 ГГц, 8 ядер	32 ГБ DDR4	2×NVIDIA GeForce GTX1080 2560 CUDA ядер і 8 ГБ RAM
Host2	AMD Ryzen 7 1800X 3.6 ГГц, 8 ядер	16 ГБ DDR4	NVIDIA GeForce GTX1080 2560 CUDA ядер і 8 ГБ RAM
Host3	Intel i7 6700K 4.0 ГГц, 4 ядра	16 ГБ DDR4	NVIDIA GeForce GTX1060 1280 CUDA ядер і 6 ГБ RAM
Server	Intel i7 4790 3.6 ГГц, 4 ядра	16 ГБ DDR3	NVIDIA Quadro 2000 192 CUDA ядра і 1 ГБ RAM

Це дало змогу втілити розподілену обробку інформації на стадіях фототріангуляції та створення моделі поверхні, зберігаючи при цьому велику точність і насиченість деталями навіть на територіях зі значною пересіченістю рельєфу.

Окрім цього, в програмному продукті PhotoScan було задіяно режим підвищеної точності ("Режим Високої Точності") для фаз узгодження зображень та формування густої хмари просторових точок.

Незважаючи на зростання загальних витрат часу на обробку, цей метод забезпечив одержання цифрової моделі поверхні з надзвичайною геометричною достовірністю, яка є придатною для подальшого морфометричного вивчення та складання карт руслових терас.

У такій конфігурації обчислювальна система (кластер) забезпечує можливість одночасного застосування декількох копій програми Agisoft PhotoScan, що функціонують на різних робочих машинах системи.

Це дає можливість одночасно опрацьовувати великі масиви фотограмметричної інформації, де кожен сегмент завдання розраховується автономно, а потім консолідується у фінальний продукт.

Завдяки цьому методу, загальний період виконання робіт значно зменшується, зростає продуктивність використання технічних засобів, а

також гарантується надійна функціональність, навіть у випадках із гігантськими об’ємами знімків найвищої якості.

Ключова перевага паралельної обробки криється в тому, що кожна робоча одиниця бере на себе виконання конкретного елементу процесу — як-от, синхронізація кадрів, генерація набору точок або ж створення 3D-моделі рельєфу, — що в кінцевому підсумку забезпечує відчутне прискорення загальної послідовності дій.

Це набуває особливої значущості під час маніпуляцій із сетами, що налічують тисячі фотографій, оскільки стандартна однопроцесорна обробка здатна тривати тижнями.

Загальна послідовність дій для обробки візуальних даних, використана в цій науковій роботі, охоплювала кілька ключових фаз:

1. Завантаження матеріалів та їх початковий аналіз, включаючи відсів кадрів, що не відповідають вимогам якості.
2. Припасування позицій знімків із залученням методології “Структура з Руху” (Structure from Motion) для точного визначення експозиційних параметрів камер.
3. Прив’язка створюваної моделі до географічних координат за допомогою опорних точок, розміщених на місцевості (GKП).
4. Формування просторової щільної хмари точок, що виконується з високою деталізацією.
5. Створення цифрової моделі рельєфу (ЦМП) та мозаїчного ортофотоплану.
6. Збереження кінцевих результатів у вигляді файлів GeoTIFF та LAS для їх подальшої аналітичної обробки у геоінформаційних системах.

Характеристики, властиві кожній стадії, визначалися дослідним шляхом, виходячи з результатів попереднього тестування, а також

порівняльного аналізу випробувань із застосуванням різних рівнів якості обробки.

Найбільш ефективні значення параметрів, що забезпечили оптимальний баланс між швидкістю виконання та точністю, представлено у Таблиці 2.

Таблиця 2. Параметри фотограмметричної обробки

Параметри вирівнювання зображень				
Точність		Вибір пар	Обмеження точок	
Висока		Еталонна (Reference)	80 000	
Оптимізація				
Точність камери		Точність маркерів	Точність проєкції	Точність зв’язкових точок
5 м		0.005 м	0.1 пікселя	4 пікселі
Побудова щільної хмари точок				
Якість		Фільтрація глибин		
Надвисока (Ultra-high)		Помірна (Moderate)		
Побудова сітки				
Класи точок	Тип поверхні	Джерело даних	Кількість полігонів	Інтерполяція
Усі	Модель висот (Height field)	Щільна хмара (Dense cloud)	50 000 000	Увімкнено (Enabled)

Робота з даними в програмному комплексі Agisoft PhotoScan стартувала з фази узгодження знімків (Image Alignment).

Під час цієї фази програмне забезпечення автоматично ідентифікувало та виявляло спільні (характерні) точки на сусідніх фотографіях, а потім здійснювало їхнє зіставлення, ґрунтуючись на аналізі локальних областей навколо пікселів.

З цією метою PhotoScan застосовує свій унікальний алгоритм, який за своєю функціональною суттю схожий на масштабно-інваріантне

перетворення ознак (SIFT), але модифікований для забезпечення підвищеної стійкості проти змін освітленості та геометричних деформацій.

Наслідком успішного узгодження стало формування малощільної хмари точок (Sparse Point Cloud), яка включала приблизно 3,85 мільйона елементів із середнім показником насиченості 15,4 точки на квадратний метр.

Водночас було визначено й отримано значення внутрішніх і зовнішніх характеристик камер, серед яких: фокусна відстань, розташування головної точки й параметри кутової орієнтації.

Через те, що такі характеристики можуть спричиняти формування систематичних похибок, особливо нелінійних викривлень у моделі, постала потреба в їх досконалішому налаштуванні.

Процедура налаштування охоплювала дві чергові стадії.

Спершу було здійснено коригування розрідженого масиву точок — вилучення відхилень, невірних зіставлень та елементів, які не відображали справжніх об’єктів ландшафту.

Потім, для забезпечення географічної прив'язки та повної корекції моделі, було застосовано 19 прив'язувальних точок (GCPs), координати яких були встановлені з максимальною точністю в координатних системах WGS84 та УСК-2000.

Ці візуальні орієнтири використовувалися для деталізації розміщення фотоапаратів та коригування характеристик об’єктивів, досягаючи мінімізації розбіжностей між фактично виміряними та теоретично розрахованими координатами.

Як наслідок, попередня процедура калібрування знімальних приладів більше не вимагалася.

Наступним, третім етапом став процес генерації насиченої хмари просторових точок (Dense Point Cloud).

Цей процес ґрунтувався на вже оптимізованих характеристиках камер і реалізовувався шляхом обрахунку парних карт глибини (Depth Maps) для кожного зафіксованого кадру.

Створення цих карт відбувалося за принципом багатовимірного стереофотограмметричного обчислювального методу (MVS), який у своїй роботі оперує безпосередньо числовими показниками кольору та інтенсивності пікселів, на противагу попередній стадії, де застосовувалися виключно ключові особливості об'єктів.

Застосування такої методології дає можливість досягти надзвичайно високої деталізації відтворення поверхні та точно відобразити навіть найменші топографічні елементи.

У результаті ми отримали густу хмару точок, що налічувала приблизно 1,72 мільярда елементів з орієнтовною густиною 690 точок на квадратний метр.

Після формування цієї хмари, було виконано ручне коригування з метою усунення залишкових небажаних елементів, таких як шуми, артефакти та неправильні відображення, які могли виникнути через специфічні умови освітлення або втручання рослинності.

Ці маніпуляції дозволили підвищити геометричну точність даних перед тим, як перейти до процесу конструювання тривимірної полігональної сітки (Mesh-моделі).

Наступним кроком стала побудова цифрової моделі рельєфу (DSM) та подальше створення ортофотоплану (Orthomosaic).

Густий масив координатних точок було трансформовано в полігональне трикутне покриття (Triangulated Mesh) завдяки застосуванню методу тріангуляції Делоне.

Далі здійснювалася проєкція початкових фотоматеріалів на сформовану площину, що дало змогу створити атлас текстур для моделі.

Це гарантувало бездоганну відповідність кольорової гами та фактури рельєфу.

Як підсумок, було сформовано прив’язану до географічних координат цифрову модель поверхні (ЦМП) та план-ортофотознімок із високим рівнем деталізації простору, які придатні для подальшої обробки геоданих та створення карт річкових уступів (терас).

2.3. Оцінка точності

Перевірка точності створеної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) здійснювалася шляхом зіставлення її показників висот з координатами контрольних точок місцевості (GCP), які були зафіксовані в ході польових робіт.

Після фінішування стадії вдосконалення структури фотограмметричної мережі було проведено дослідження характеру розподілу розбіжностей між змодельованими та фактично виміряними координатами.

Для кожної з контрольних точок були розраховані залишкові розходження та середньоквадратичні відхилення (Root Mean Square Error, RMSE) як в одиницях площини (проектних), так і у пікселях.

Слід зазначити, що ці статистичні дані відображають виключно рівень сумісності внутрішньої фотограмметричної побудови з використаними точками прив'язки, тобто вони ілюструють якість адаптації програмного забезпечення PhotoScan до вхідних даних.

Задля досягнення більш достовірної оцінки рівня точності було застосовано процес зовнішнього контролю: використано перевірочні контрольні пункти, що не були задіяні ані при створенні, ані під час покращення параметрів цифрової моделі рельєфу (ЦМР).

Для кожної такої тестової точки значення висотної позначки з ЦМР встановлювалось через застосування білінійної інтерполяції, яка оперує висотами чотирьох вузлів стандартної сітки, найближчих до точки.

Такий підхід надав можливість усунути різкі зміни і гарантувати м'яке, безперервне наближення до реальної поверхні.

Інтерпольовані значення висот, отримані таким чином, зіставлялися з фактичними виміряними висотами, які були зафіксовані за допомогою RTK-GNSS-обладнання, після чого виконувався розрахунок різниці висот (Δh).

З метою ґрунтовного вивчення зафіксованих розбіжностей було здійснено статистичний аналіз вертикальних відмінностей (символічно позначених як dH).

У процесі обробки визначалися такі ключові метрики:

- Середня величина (Mean dH) — використовувалася задля встановлення величини систематичного зсуву або зміщення в межах розробленої моделі;
- Показник медіани (Median dH) — слугував для ідентифікації характеру розподілу: його симетричності чи наявності асиметрії;
- Відхилення стандартне (SD) — виступало як кількісний індикатор мінливості (варіації) зареєстрованих похибок;
- Похибка середньоквадратична (RMSE) — застосовувалася як інтегрований критерій рівня загальної точності;
- Середня абсолютна розбіжність (Mean Absolute Error, MAE) — розраховувалася з метою оцінки фактичної абсолютної похибки, незважаючи на її спрямованість (знак).

На додаток, було створено гістограму розподілу вертикальних розбіжностей (графік частотності dH), що дало змогу візуально проаналізувати природу й типові особливості відхилень між інформацією з ЦМР і результатами польових вимірювань.

Здобуті дані вказують на те, що абсолютна вертикальна похибка не сягала більшою, ніж кілька сантиметрів, що є свідченням значної метричної точності сформованої цифрової моделі рельєфу та її придатності для проведення геоморфологічного дослідження.

2.4. Картування та аналіз річкових терас

Спільне використання цих двох метрик дає змогу якісно розмежувати порівняно пологі площини терас і більш стрімкі укоси долини.

Як засвідчили попередні наукові роботи, такий метод вирізняється значною достовірністю, якщо порівнювати його з даними, отриманими під час польових робіт із картографування, насамперед у місцевостях із комплексним рельєфом та ізольованими долинами, де різниця між терасовими ярусами та прилеглими схилами є найбільш відчутною.

Потрібні морфометричні величини (перевищення над водним потоком і локальний нахил) були обчислені, спираючись на цифрову поверхневу модель (ЦПМ), яку перед цим було звільнено від рослинності та різноманітних перешкод.

Річкове русло виявили автоматизовано завдяки застосуванню алгоритмів, призначених для дослідження гідрографічної структури, після чого по всій площі здійснювався розрахунок відносних показників висот.

Варто наголосити, що автоматичний процес класифікації, спрямований на ідентифікацію потенційних терас, міг також включити морфологічні об’єкти, які насправді мають штучне, антропогенне походження (зокрема, це можуть бути аграрні тераси чи окремі зони зі штучно вирівняним ландшафтом).

Як наслідок, після того, як відбулося початкове виявлення, всі сумнівні локації піддавалися ретельній візуальній інспекції, яка

проводилася як безпосередньо на місцевості, так і з використанням детальних ортофотопланів.

Усі форми, які не були пов'язані з річковими процесами, систематично видалялися з фінального масиву інформації.

Ідентифіковані терасові поверхні були потім розподілені на класи відповідно до їхньої абсолютної та відносної висоти, а саме — залежно від їхнього положення відносно поточного рівня русла водного потоку.

Завдяки цьому стало можливим чітко розмежувати низку терасових горизонтів, кожен з яких слугує індикатором певних, відмінних стадій еволюції річкової долини.

Візуалізація просторових даних та їхнє тематичне картографування виконувалися за допомогою програмного забезпечення ArcGIS 10.2 (розробник: ESRI, Редлендс, Каліфорнія, США).

Це надало інструментарій для комплексного дослідження та одночасного зіставлення висотних показників, крутизни схилів і всіх похідних характеристик земної поверхні.

Було сформовано окремий векторний інформаційний шар для кожного виявленого рівня терас.

Це створило умови для подальшого вивчення їхніх ключових морфометричних параметрів, зокрема: займаної площі, середніх висотних відміток, кута нахилу та експозиції схилів.

Цей підхід, що поєднує морфологічний аналіз із сучасними методиками цифрової обробки рельєфу, гарантував високу точність, об'єктивність та можливість повторного відтворення результатів при визначенні просторових границь річкових терас у межах обраної ділянки долини.

3. Результати

3.1. Цифровий контроль даних із поєднаних знімків

Для створення цифрової моделі для спостереження та формування ортофотоплану було застосовано близько 1100 аерофотознімків.

Ці фотографії були зібрані протягом двох вильотів безпілотного літального апарата.

Цей масив даних опрацьовувався на обчислювальному кластері приблизно 48 годин.

До цього часу увійшла не тільки автоматична обробка зображень, але й час, необхідний для ручного втручання та налаштувань, таких як інтерактивне коректування, редагування хмари точок і тонка настройка параметрів камер.

Коли етапи мозаїки та орторектифікації були завершені, отриманий результат продемонстрував однорідну просторову роздільну здатність на рівні 3,8 см на піксель.

Це дало змогу досягти такого рівня деталізації ландшафту, який є цілком достатнім для проведення морфометричних вимірювань і для зорового розпізнавання найменших форм рельєфу.

Перевірка якості створеного ортофотоплану засвідчила, що місця з'єднання окремих кадрів є практично невидимими, а розподіл кольорів по всій площі зображення залишається рівномірним та збалансованим.

Лише на деяких окраїнних частинах фіксувалися мінімальні пропуски даних, що виникли через недостатнє накладання сусідніх знімків під час аерофотозйомки.

Такі дефекти не позначилися на загальній достовірності створених цифрових моделей у межах ключової ділянки дослідження.

Оскільки зйомку довелося проводити в міжсезоння, коли зелені було обмаль, отриманий цифровий модуль для моніторингу рельєфу забезпечує надзвичайно чітке відтворення дрібних деталей поверхні.

Це обставина створює ідеальні передумови для візуального аналізу та ідентифікації різних геоморфологічних структур.

Як приклад, чітко видно терасові уступи завдяки тому, що нахил різко змінюється: від крутого схилу до майже плоскої поверхні, яка раніше була заплавою.

Також, на ортофотоплані та цифровій моделі чітко вирізняються тераси, створені для сільського господарства, що розташовані на схилах пагорбів.

Їхня симетричність та особливості геометричної форми дозволяють безпомилково відрізнити їх від терас, утворених природним шляхом біля річок.

Це засвідчує високий рівень якості й достовірності одержаних показників, завдяки чому цифровий блок моніторингу стає цілком придатним для наступних етапів морфологічних досліджень, визначення типів терасних поверхонь та створення карт геоморфологічних утворень на обстежуваній ділянці.

3.2. Точність цифрової моделі рельєфу

Підсумки оцінювання точності, що були здобуті через застосування наземних контрольних точок (НКТ), представлені в Таблиці 3а.

Ця таблиця містить статистичні метрики для залишкових відхилень, які були вирахувані після завершальної процедури оптимізації фотограмметричної сітки, зокрема середньоквадратичну помилку (СКВ) як за плановими, так і за висотними координатами.

Відповідно до представлених даних, сукупне середнє значення СКВ зафіксовано на рівні 3,34 см, що демонструє визначну точність просторової прив'язки фотограмметричної моделі до системи координат УСК-2000.

Такий рівень похибки підтверджує вірність обраних налаштувань обробки, оптимальне просторове розташування наземних контрольних точок, а також дієвість їхнього застосування для точного калібрування фотограмметричної мережі.

Досягнутий рівень точності є цілком достатнім для задоволення всіх технічних умов, необхідних для розробки високоточної ортофотокарти та цифрової моделі земної поверхні, призначених для геоморфологічного вивчення.

Цей результат також підтверджує, що застосований підхід до збору даних гарантує постійну та надійну метричну якість вихідної інформації, що робить його придатним для впровадження в аналогічні проекти, спрямовані на дослідження річкових басейнів та їхніх терасних комплексів.

Таблиця 3 Статистика похибок

(а) Похибка контрольних наземних точок				
СКП X (см)	СКП Y (см)	СКП Z (см)	Загальна СКП (см)	Похибка проекції (пікс.)
2.02	2.24	1.44	3.34	0.34
(б) Похибка Z контрольних тестових точок				
Середнє (см)	Медіана (см)	Стандартне відхилення (см)	СКП (см)	Похибка проекції (см)
-1.80	-1.70	3.30	3.10	2.90

Оцінка загальних показників точності, що характеризують якість геоприв'язки, продемонструвала такі результати: середня квадратична похибка (СКП) для координат по осі X зафіксована на рівні 2,02 см, тоді як для осі Y цей показник склав 2,24 см.

Важливо підкреслити, що обидва значення не перевищують величину просторової роздільної здатності вихідних знімків.

Подібні показники є прямим доказом виняткової горизонтальної точності, яку вдалося забезпечити в процесі фотограмметричної обробки та відновлення просторових даних.

На тлі стандартних рівнів похибок, характерних для більшості даних, отриманих методами дистанційного зондування Землі, ці числові значення похибок є відносно незначними.

Цей факт набуває особливої ваги, якщо врахувати великий обсяг та різномасштабність початкових зображень, які були інтегровані для генерації кінцевого ортофотоплану.

Що стосується вертикальної складової, середнє квадратичне відхилення склало лише 1,14 см.

Це переконливо підтверджує високу метрологічну досконалість створеної цифрової моделі рельєфу (ЦМР).

Середня похибка перетворення образів виявилася меншою за 0,4 пікселя, що слугує критично важливим індикатором геометричної коректності процедури юстування фотограмметричного контуру.

Дана метрика ілюструє якість, з якою внутрішні й зовнішні параметри позиціонування знімальних пристроїв вдалося вдосконалити під час фази коригування взаємозв'язків.

Фіксовані показники точності визнаються прийнятними та повністю відповідають запитам, характерним для високоточних геодезичних і картографічних робіт.

Проте слід зазначити, що ці величини відображають виключно внутрішню гармонійність фотограмметричної побудови, а саме — якість калібрування та акуратність відновлення глибинних даних, які є фундаментом для створення щільного масиву координат.

Отже, вони не дають уявлення про фактичну просторову розбіжність цифрової моделі поверхні, виражену в глобальній системі координат.

Для забезпечення максимально неупередженої оцінки точності вертикального виміру Цифрової Моделі Рельєфу (ЦМР) ми застосували автономну мережу контрольних пунктів.

Ці пункти залишалися поза процесом генерації самої моделі.

Зіставлення значень висот, отриманих безпосередньо з ЦМР, із тими, що були здобуті через польові вимірювання за технологією RTK-GNSS, дозволило визначити варіації висот (які позначені як dH).

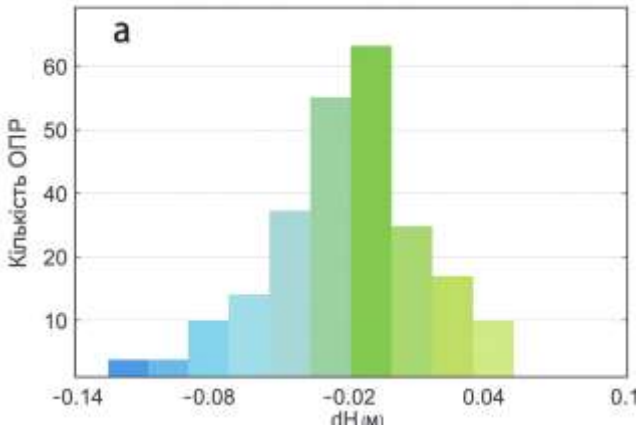
Їхні ключові статистичні характеристики представлені в таблиці 3б.

Виявлені відхилення по суті є результатом обчислення різниці між висотними показниками, отриманими від моделі рельєфу, та фактичними (еталонними) вимірами, отриманими за допомогою RTK-GPS.

Графічне відображення розподілу значень різниці висот (dH), показане на ілюстрації 6а, візуально демонструє тенденцію, близьку до нормального закону розподілу.

Цей факт є вагомим підтвердженням відсутності будь-яких ознак систематичних похибок або зміщень у наборі даних, що, своєю чергою, підкреслює високу надійність та стійкість розробленої моделі рельєфу.

Цей висновок підтверджує: обраний метод фотограмметричної обробки працює ефективно, гарантуючи високу точність отриманих цифрових моделей, необхідних для поглибленого морфологічного дослідження річкових терас.



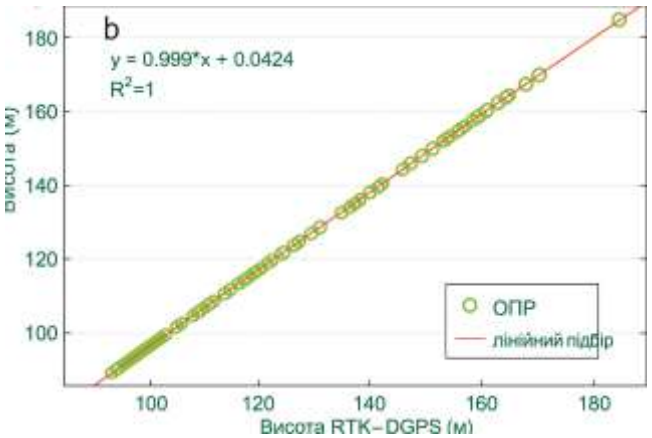


Рисунок 6. Точність ЦМР на основі контрольних точок.

Додатні величини у показниках розбіжності висот (ЗВ) вказують на ситуацію, коли позначки висоти точок, відображені на цифровій моделі рельєфу (ЦМР), є більшими за відповідні показники, зафіксовані за допомогою RTK-GPS вимірювань.

Натомість, від'ємні значення свідчать про те, що модель рельєфу відображає поверхню дещо нижче її фактичного положення.

Огляд гістограми, що ілюструє розподіл ЗВ, дав підстави стверджувати про винятково високий рівень точності створеної ЦМР.

Переважна кількість контрольних точок групується навколо середнього показника похибки, що дорівнює –1,8 см, тоді як медіанне значення зафіксовано на рівні –1,7 см (згідно з табл. 3б).

Це підтверджує присутність невеликого систематичного відхилення у бік заниження моделі порівняно з реальною топографією місцевості. Однак, таке зміщення не вважається критичним і не чинить негативного впливу на результати подальшого морфологічного аналізу.

Показники похибки проекції та середньоквадратичного відхилення (СКВ), які дорівнювали, відповідно, 2,9 см та 3,1 см, стали чітким доказом високого рівня точності, з якою було виконано відтворення топографічного контуру долини.

Це також підтверджує, що розроблена модель відмінно узгоджується із фактично зафіксованими вимірами.

Ці результати фактично прирівнюються до стандартів високоточної картографічної роботи.

Зазвичай такого рівня деталізації та надійності вдається досягти лише завдяки застосуванню вузькоспеціалізованих геодезичних методів або через використання наземних систем лазерного сканування (LiDAR).

Поглиблене статистичне дослідження додатково виявило, що 58,7% всіх зафіксованих різниць у висотах (dH) лежали у діапазоні ±3 см.

Більша частина, а саме 90,3%, вклалася у рамки відхилення ±6 см, тоді як 98,5% показників не перевищили інтервал у ±9 см.

Поза межами цього інтервалу залишилося лише 1,5% точок, при цьому найбільше зафіксоване відхилення сягнуло показника у –12,4 см.

Подібний кількісний розподіл переконливо демонструє виняткову стабільність і загальну рівномірність моделі, повністю виключаючи ймовірність існування значних локалізованих помилок.

На зображенні 4b показано зіставлення висот наземних опорних (контрольних) пунктів, які були розраховані (оцінені) за допомогою цифрової моделі рельєфу (ЦМР), та їхніх дійсних (фактичних) координат, отриманих через RTK-GPS вимірювання.

Графічне відображення явно демонструє прямий лінійний зв'язок між обома групами даних, який підтверджується коефіцієнтом детермінації R^2, що дорівнює 1,00.

Цей показник вказує на відсутність будь-яких системних похибок або значних нехарактерних відхилень (викидів), а також підтверджує тісний рівень узгодженості між висотами, визначеними моделлю, та висотами, що були виміряні.

Отримані дані однозначно засвідчують, що розроблена ЦМР володіє винятковою геометричною достовірністю та може слугувати

надійною базою для виконання подальшого морфологічного дослідження, створення мап річкових терас та побудови геоморфологічних перетинів (профілів) в межах досліджуваної долини.

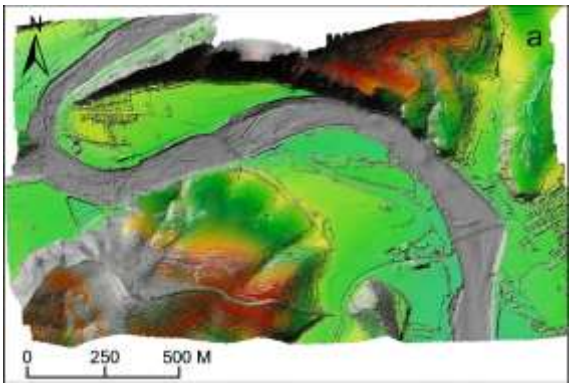
3.3. Річкові тераси

Слідом за впровадженням розробленого методу автоматизованої ідентифікації річкових терас на базі створеної цифрової моделі рельєфу (ЦМР), дослідники отримали деталізовану мапу потенційних ділянок терас (Potential Terrace Areas, PTA).

Ця мапа являє собою графічне відображення усіх площинних морфологічних складових, котрі задовольняють критерії терасних утворень. До них віднесено, зокрема, низькоамплітудні, відносно вирівняні поверхні, що локалізуються в безпосередній близькості до сучасного річкового потоку.

Завдяки карті потенційних терас вдалося здійснити візуалізацію просторового розташування терасних рівнів у розрізі досліджуваної річкової долини, а також встановити характер їхньої кореляції з поточною гідрографічною системою.

Як демонструє Рисунок 7а, ідентифіковані площі формують виразну багатоярусну конфігурацію, що є відображенням різних фаз заглиблення русла та накопичення алювіальних мас.



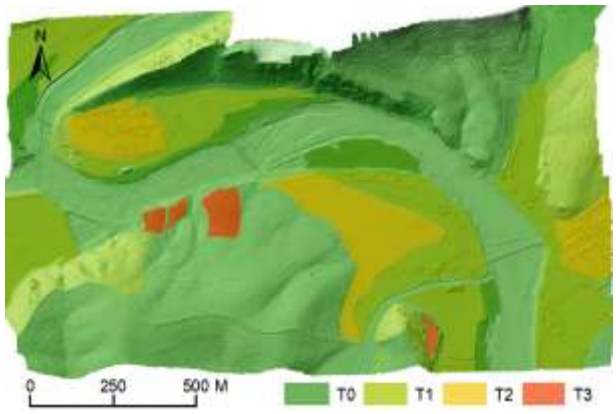


Рисунок 7. Розподіл потенційних річкових терас

Розподіл ймовірних терасних сегментів у просторі, який було автоматично ідентифіковано через опрацювання цифрової моделі рельєфу (ЦМР), демонструє високу кореляцію з фактичною протяжністю терас, встановлених шляхом візуального вивчення затіненої версії цієї ж цифрової моделі.

Подібна узгодженість є вагомим доказом ефективності застосованої методології та підтверджує її здатність точно моделювати морфологічні особливості долинного комплексу.

З метою забезпечення більшої достовірності отриманих даних, було здійснено натурну верифікацію визначених терасних поверхонь.

Під час безпосередніх польових робіт, значна частина попередньо виявлених ділянок терас отримали підтвердження через фіксацію природних накопичувальних поверхонь, для яких характерні типові риси сплощених форм рельєфу або наявність специфічних алювіальних наносів річкового походження.

Водночас, в процесі інспектування було з'ясовано, що певна кількість ідентифікованих площ не є природними терасами, а утворилася внаслідок людського впливу — зокрема, сільськогосподарського уступування.

Зазначені зони були вилучені з подальшого дослідження, що дало змогу створити скориговану схему річкових терас, яку можна побачити на малюнку 7б.

Згідно з висотним розташуванням їхніх поверхонь, усі річкові тераси було типологізовано за чотирма основними рівнями:

- Т0 – терасові утворення, що знаходились орієнтовно на 5 метрів вище нинішнього рівня річища,
- Т1 – терасові форми, що лежали на позначках 7–8 метрів,
- Т2 – терасові яруси, зафіксовані на висоті 9–12 метрів,
- Т3 – найбільш давні тераси, піднесені на 29–34 метри відносно поточного дзеркала води.

Кожна з цих висотних сходинок є маркером окремої геологічної фази: врізання русла та накопичення алювію, що відбувалися як наслідок циклічної трансформації гідрологічних характеристик і тектонічної активності в річковій долині.

Характеристика морфологічних ярусів річкових терас

Ярус Т0 є найнижчим і розміщується безпосередньо біля сучасного річища — його висота становить близько 5 метрів над рівнем повеневого водопілля.

Ця тераса тягнеться паралельно руслу і має ледве помітний спад у напрямку, куди рухається водний потік.

Проведений огляд місцевості засвідчив, що даний терасовий рівень формують порівняно новочасні алювіальні нашарування, які переважно сформовані великими, обкатаними фрагментами розміром від гальки до масивних валунів, що знаходяться в обволіканні піщано-гравійної основи (мал. 8а).

Площина Т0 має виражену рівнинну будову і в деяких ділянках фіксуються ознаки регулярного підтоплення під час високої води, що

свідчить про її недавнє формування та тісну кореляцію з поточною динамікою річкового русла.

Рисунок 8. Польова верифікація потенційних терасових ділянок

Аналіз матеріалу, що осів у заплаві, вказує на приналежність зон, позначених як Т0, до діючої річкової заплавної системи.

Ці височинні сегменти заплави зазнають регулярного затоплення під час підвищення рівня води, що не дозволяє віднести їх до категорії класичних річкових терас.

Їхня поверхня демонструє свіжі сліди накопичення осаду, спричиненого, головним чином, останніми процесами динаміки потоку в річищі.

Найбільш чисельними у вивченій місцевості є річкові тераси рівня Т1.

Вони розташовуються на відмітках 7–8 метрів вище лінії теперішнього берега річки і утворюють вузькі, паралельні руслу прошарки або сходинки, що тягнуться вздовж річкового потоку.

Зазвичай, такі тераси формуються на плоских ділянках всередині вигинів річкових меандрів, де протягом періодів відносно спокійної фази водного режиму відбувалося активне нагромадження наносів.

На сьогоднішній день більшість площ T1 активно трансформовані — вони слугують як рілля для агрокультур чи місця прокладання доріг, що, звісно, вплинуло на їх початкові природні обриси.

Тераси, що належать до рівня T2, можна виявити практично вздовж усієї долини, що підлягає дослідженню.

Відносно теперішнього водного дзеркала річки вони здіймаються на 9–12 метрів, а їх структура типово витягнута у формі довгих сходинок, які пролягають паралельно основному річищу (див. ілюстрацію 7б).

Цей терасовий горизонт є найширшим за загальною площею серед усіх визначених, що вказує на надзвичайно тривалий проміжок часу зі стійкими гідравлічними умовами, необхідними для його повноцінного розвитку.

Земна поверхня терасового плато складається з конгломератів гравію та піщаних фракцій, на які нашарувався алювіальний (річковий) суглинок.

Переважну частину територій, які відносяться до рівня T2, на сьогодні освоєно під посівні площі, що є наслідком їхньої рівнинної топографії.

На певних ділянках тераси, що відповідають цьому рівню, можна спостерігати виходи на поверхню середніх та значних за розміром валунів.

Вони виявляються або на терасових обривах (див. мал. 8б), або ж на горизонтальних терасових щаблях (див. мал. 8в).

Ці морфологічні прояви свідчать про дуже потужну кінетичну енергію водних течій, які були активними у період створення цієї тераси, а також про те, наскільки інтенсивною була роль потоку річки у процесі переміщення цих крупних уламкових мас.

Найвищий рівень серед усіх займає тераса Т3.

Вона є типовою корінною (несправжньою) пластовою терасою.

Її абсолютна висотна позначка коливається в межах 29–34 метри, якщо вимірювати від теперішнього водного горизонту річки (див. мал. 8д).

Цей ландшафт – нерівний і вельми порізаний, оскільки протягом тривалого часу на нього значно впливала ерозія.

Подекуди материнська порода виходить на поверхню в ярах та промоїнах, які утворилися через розмивання ґрунту.

Це свідчить про значний вік цієї території, а також про її стійкість протягом різних стадій формування самої долини.

Залишки тераси Т3 інтегровані в сучасну топографію і використовуються для ведення сільського господарства, причому ці поля розміщені на різних абсолютних висотах.

Як наслідок, сформувалися ступінчасті антропогенні тераси, що частково повторюють конфігурацію природних схилів.

Отже, морфологічні дослідження вказують на те, що тераси Т1–Т3 є відображенням послідовного заглиблення річкового русла, викликаного циклічною зміною фаз тектонічного підняття, коливанням базового рівня ерозії та кліматичними змінами, що обумовлювали розвиток долини протягом усього голоцену.

3.4 Картографування складних рельєфів на відносно великих просторових ділянках

Створення мап значної території зі складним і сильно розчленованим рельєфом є технічно непростим викликом, що вимагає уважного вибору апаратури, налаштувань польоту і програмного забезпечення.

Головною проблемою тут є мала тривалість роботи акумуляторів безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а також дефіцит відповідних майданчиків для їхнього підняття у повітря та приземлення, що істотно ускладнює проведення знімальних робіт у гірській місцевості або там, де багато обривів.

Незважаючи на те, що БПЛА літакового типу можуть перебувати в повітрі значно довше, забезпечуючи охоплення великих земельних площ, їхнє використання в умовах важкого рельєфу є обмеженим через потребу у великих і рівних відрізках землі для здійснення зльоту та посадки.

У більшості гірських улоговин або на ділянках, що нагадують каньйони, такі можливості здебільшого недоступні.

На противагу цьому, перевага безпілотників мультироторного типу полягає у їхній здатності до вертикальних зльотів та приземлень, що критично важливо для роботи в умовах обмеженого місця або у важкопрохідних локаціях.

Головним мінусом таких пристроїв залишається їхня невелика тривалість перебування в повітрі, що обмежує розмір території, яку можна відсканувати за одну місію.

Для зйомки річкової ділянки, що охоплює близько 1,9 км², вибір зупинився на дроні DJI Phantom 4 Pro завдяки його збалансованим характеристикам: маневреності, високій точності визначення координат та достатній автономності польоту.

Хоча площин покриття виходила за межі типових можливостей цього БПЛА, виконання проєкту стало можливим завдяки багаторазовій зміні батарей та застосуванню просунутого інструментарію для підготовки польотних завдань — спеціалізованої програми Map Pilot для DJI.

Цей софт надає не лише можливість розробки маршрутів польоту, але й має вбудовану функцію для автоматизованого менеджменту декількох батарей.

Під час виконання польотного завдання, безпілотник самостійно повертався на місце старту, якщо рівень заряду акумулятора падав до мінімально допустимої позначки.

Після заміни елемента живлення, дрон продовжував рух з того самого пункту, звідки було припинено політ, завершуючи попередньо визначену місію.

Така методика значно збільшила радіус дії та забезпечила ефективне виконання мапування важких чи віддалених територій, де використання дронів з фіксованим крилом або класичні геодезичні техніки були б або недоцільними, або несли б ризики.

Іншим викликом, що виникає при зйомці місцевості зі складним рельєфом, є необхідність гарантування адекватного перекриття між кадрами.

Внаслідок суттєвих перепадів рельєфу земної поверхні відбувається зміна фактичної висоти польоту над ґрунтом, що створює труднощі для збереження стандартизованого показника перекриття знімків.

Загальновизнано, що ступінь перекриття відіграє ключову роль у процесі формування високоякісних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та ортофотопланів, прямо впливаючи на надійність процедури фототріангуляції, а також на коректність відновлення просторової 3D-моделі території.

Наукові дані демонструють, що збільшення показника перекриття аерофотознімків позитивно позначається на підвищенні точності ЦМР, що пояснюється зростанням числа відповідних точок та більш точним визначенням параметрів зовнішнього орієнтування.

Задля гарантування стабільної якості фінального продукту у межах цього проєкту було організовано два окремі сегменти для аерофотозйомки, спрямовані за віссю схід–захід, що відповідає основному напрямку складності рельєфу у цій долині.

Цей підхід дозволив мінімізувати відмінності у висотах між різними траєкторіями польоту, тим самим забезпечивши більш однорідне перекриття по усій площі зйомки.

Для ще більш детального відображення складних ландшафтів, у майбутньому доцільно застосовувати збільшену кількість картографічних сегментів, що дозволить ефективніше знижувати перепади висот під час польоту над землею.

У межах цієї наукової роботи значення перекриття були задані наступним чином: 70% для бокових зон та 80% для зон просування, що визнано ідеальним для застосування методології "Structure from Motion" (SfM).

Ці встановлені показники забезпечили необхідну геометричну надійність фотограмметричних масивів, що сприятливо вплинуло на якість і точність розроблених цифрових моделей.

Варто зазначити, що завдяки продуманому плануванню траєкторій та грамотному вибору всіх первинних показників, вдалося досягти необхідного рівня покриття знімками на всій тестовій ділянці, як це відображено у візуалізації 9.

Здобуті висновки ясно демонструють, що застосування гвинтокрилих БПЛА у сполученні з розумним програмним забезпеченням для планування залишається дієвим і надійним засобом для розробки високодеталізованих цифрових моделей простору, навіть за умов непростого ландшафту.

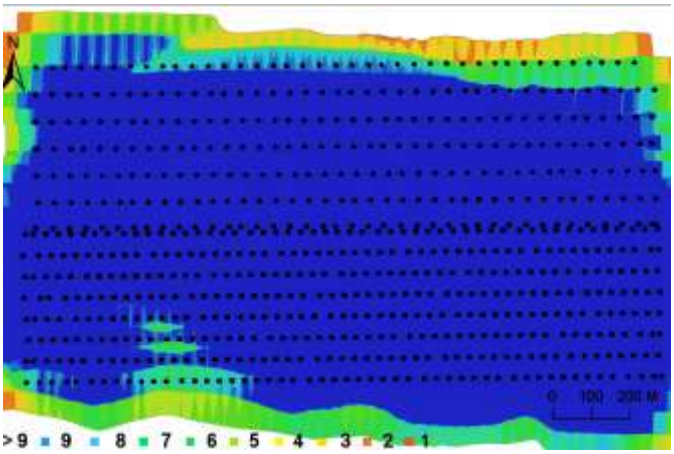


Рисунок 9. Розташування камер і перекриття знімків.

Як видно на діаграмі 9, у представленій легенді відображена кількість перетинаючихся фотографій, що припадають на кожну конкретну територіальну ділянку.

Незважаючи на відчутні перепади рельєфу, вдалося забезпечити вкрай високий рівень накладання – мінімум дев’ять знімків на одиницю площі охопили майже всю дослідницьку зону.

Цей факт є прямим доказом відмінної надійності заздалегідь спланованої траєкторії польоту, а також коректності обраних для місії налаштувань.

Винятком стала лише нижня ліва частина досліджуваної території, де дві металеві конструкції веж заввишки приблизно 40 метрів, розташовані на найвищій точці пагорба, спричинили ефект екранування (оклюзії) та, як наслідок, призвели до неоднорідності або часткового пропуску збігів між сусідніми зображеннями.

У контексті актуальних фотограмметричних обстежень помітно зростає використання прогресивного програмного забезпечення для планування польотів.

Воно надає можливість безпілотним літальним апаратам (БПЛА) самостійно зберігати незмінну висоту над ландшафтом завдяки інтеграції інформації з числових моделей рельєфу (ЦМР).

Зазначені алгоритми використовують дані про висоти, отримані, зокрема, з моделі SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), що характеризується просторовим кроком у 30 метрів.

Це уможливлює функцію динамічного коригування польоту відповідно до змін рельєфу.

Такий підхід є особливо вигідним при картографуванні гірських регіонів або територій зі значними перепадами висот (наприклад, каньйонів), де застосування єдиної, фіксованої висоти курсу зазвичай викликає нестабільність показників перекриття знімків.

Для наступних проєктів доцільно передбачити обов'язкове впровадження даної функції.

Її використання гарантуватиме рівномірність просторової деталізації всіх отриманих зображень та сприятиме подальшому покращенню точності побудованих цифрових моделей.

Ще одним ключовим моментом є розміщення та точні вимірювання наземних контрольних пунктів (GCP), що традиційно вважається найбільш ресурсоємною фазою при створенні карт на значних площах з неоднорідним ландшафтом.

У межах цієї роботи, встановлення та геодезичні виміри для 19 таких пунктів зайняли приблизно половину робочої зміни, не включаючи часу, потрібного для їхнього наступного розпізнавання на кожному аерофотознімку.

Сучасні інновації у фотограмметричній галузі включають застосування технології прямого геоприв’язування (Direct Georeferencing), яка забезпечує можливість інтегрувати дані координат з систем GPS/IMU безпосередньо у процедуру генерації ортофотоплану.

Завдяки цьому методу відпадає необхідність у закладці наземних контрольних пунктів, що значно прискорює польові операції та підвищує загальну економічну і часову ефективність всього процесу знімання.

Відтак, задля наступних ініціатив з просторового моделювання варто віддавати перевагу методові безпосереднього георефернсування, зокрема на територіях зі значними перепадами висот чи утрудненим доступом.

Стосовно потреби в комп'ютерних потужностях, тривалість опрацювання аерофотограмметричних матеріалів має пряму залежність від загальної кількості знімків та бажаного ступеня деталізації, що задається при моделюванні.

Для забезпечення високої швидкості роботи з об'ємними масивами інформації доцільним є використання розподілених кластерів або високопродуктивних робочих станцій, обладнаних багатопотоковими центральними процесорами та відеокартами (GPU), здатними до паралельних обчислень.

Впровадження цієї стратегії значно мінімізує час, необхідний для виконання розрахунків, та значно покращує ефективність створення високоточної хмари точок.

Загалом, результати цієї наукової праці підтвердили, що запропонований алгоритм дій — розпочинаючи з підготовки польотного завдання і завершуючи формуванням ортофотоплану та цифрової моделі поверхні — демонструє свою ефективність, стійкість та цілковиту придатність для топографічного відображення територій зі складним рельєфом.

Накопичений практичний досвід, а також сформовані рекомендації, можуть слугувати основою для покращення технологій аерофотозйомки з використанням БПЛА у важкодоступних чи віддалених зонах, що забезпечить швидке, високоточне та економічно вигідне проведення геоморфологічних та земельно-кадастрових робіт.

3.5 Оцінка точності цифрової моделі рельєфу та чинників, що на неї впливають

Методика відображення особливостей ландшафту критично залежить від насиченості цифрової моделі земної поверхні (ЦМП), яка, своєю чергою, напряму зумовлена якістю первинних даних та характеристиками фотограмметричного процесу відновлення.

Внаслідок прецизійного проектування знімальних завдань, використання відкаліброваних аеродинамічних налаштувань та скрупульозної постобробки візуального матеріалу, був отриманий густий масив точок.

Середній показник його насиченості становив близько 690 точок на квадратний метр, що стало фундаментом для отримання високоточної цифрової моделі рельєфу.

Отримана густота є майже ідентичною результатам, які отримуються за допомогою наземних лазерних сканерів (НЛС), де звичайні показники щільності досягають приблизно 760 точок/м².

Водночас, ця щільність значно переважає показники типових аеролідарних систем, які зазвичай забезпечують середню насиченість лише на рівні 30–40 точок/м².

Ця щільність хмари точок уможливила побудову цифрової поверхні з надзвичайно високою просторовою роздільністю, яка становить 3,8 см.

Це ставить зібрані дані майже на один рівень із результатами високоточного наземного сканування.

Варто підкреслити, що фактична роздільна здатність цифрової моделі рельєфу (ЦМР) безпосередньо корелює з концентрацією точок у хмарі, натомість роздільна здатність ортофотоплану цілковито залежить від якості вихідних фотографічних матеріалів.

Одержана величина 3,8 см на піксель, імовірно, частково є наслідком інтерполяційних процесів, які застосовуються в програмному забезпеченні PhotoScan, оскільки вихідні фото мали власну роздільність 3,54 та 4,43 см на піксель відповідно.

Для того, щоб морфологія рельєфу була адекватно відображена, просторова роздільність сформованої цифрової моделі повинна гармоніювати з масштабом досліджуваних нерівностей поверхні.

У межах цього дослідження встановлено, що надзвичайно висока просторова роздільна здатність моделі виявилася зайвою для ідентифікації значних за розміром терасних площин. Проте, вона надала унікальний шанс для глибокого вивчення мікрорельєфних утворень малих масштабів.

З метою вдосконалення наступних етапів аналізу, вважається доцільним проведення повторного семплінгу (дискретизації) цифрової моделі рельєфу (ЦМР), що дасть змогу узгодити її параметри зі специфічними вимогами морфометричного аналізу.

Отримана середньоквадратична похибка за вертикаллю (RMSE) сягнула позначки у 3,1 см, що є винятково високою точністю для топографічних робіт, виконаних за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Цей рівень точності перевершує показники аерофотограмметричного лідарного сканування (де RMSE зазвичай становить близько 15 см) та навіть наземного лазерного сканування (TLS-методи, де точність становить приблизно 5 см).

При цьому загальні кошти, витрачені на проведення цієї фотограмметричної зйомки, були істотно меншими, що наочно демонструє високу економічну вигоду даного підходу.

Вертикальна точність, досягнута в межах цього дослідження, є співставною з результатами, отриманими в інших наукових працях, які проводились за аналогічних геоморфологічних умов.

Виняткова якість сформованої цифрової моделі зумовлена низкою ключових аспектів:

1. Виваженим розташуванням наземних контрольних точок (GCP), які забезпечили рівномірне покриття всієї площі дослідження;
2. Оптимальним вибором часу для зйомки: роботи проводилися в міжсезонний період, коли рослинний покрив був мінімальним, що значно знизило ризик оклюзії;
3. Значним перекриттям між кадрами (70% у поперечному напрямку та 80% у поздовжньому), що сприяло більш точному визначенню позицій камер та підвищило загальну стійкість блоку аерофотознімків.

Загалом, ми застосували 19 точок контролю на місцевості (ТКМ), розташувавши їх рівномірно по всій площі долини.

Для визначених контрольних точок середнє відхилення у процесі багатопроменевої тріангуляції становило біля 0,34 пікселя. Це вказує на те, що калібрування моделі виконано якісно та забезпечує необхідний рівень щільності.

Згідно з висновками попередніх наукових робіт, збільшення кількості ТКМ сприяє покращенню точності побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР) лише до певної межі. Після досягнення цього порогу, подальше включення додаткових точок не забезпечує значного приросту точності. У нашому конкретному випадку обрана щільність розташування була оптимальною.

Іще одним критичним елементом, що впливає на кінцеву точність створення цифрової моделі, є наявність шару рослинності.

Зелений покрив може маскувати реальний рельєф поверхні ґрунту, що призводить до викривлення даних оптичного спостереження і, як результат, зменшує достовірність визначення вертикальних координат.

У представленому масиві інформ-даних, локалізовані неточності найчіткіше давалися взнаки в зонах, де домінувала трав’яниста або ж деревна флора.

Цей факт додатково обґрунтовує мудрість проведення повітряних зйомок у фазі відсутності листя, коли рівень візуалізації земної поверхні сягає свого максимуму.

Окремо слід виділити, що ключовим винуватцем помилок у цьому дослідженні, найімовірніше, є показник точності, притаманний системі RTK-GPS (що становить приблизно ±2 см щодо вертикальної осі), тому що сукупна похибка у 3,1 см лише незначно перевищує вказане значення.

Таким чином, досягнутий рівень акуратності розцінюється як межовий для тієї методології, що була обрана.

Підсумовуючи, здобуті підсумки однозначно засвідчують: фотограмметрична техніка "Структура з Руху" (SfM), яка базується на зображеннях, отриманих з безпілотних літальних апаратів, є перевіреним, украй точним і фінансово виправданим засобом для формування цифрових моделей місцевості, навіть коли йдеться про непрості гірські ландшафти.

Окрім цього, довготривалий відеозапис з безпілотника може бути використаний для відстеження змін у динаміці ландшафту, фіксування ерозійних явищ, зсувних рухів чи накопичувальних трансформацій, що створює підґрунтя для вивчення процесів формування рельєфу в долинах такої морфології.

3.6 Виявлення рівнів річкових терас і оцінка методології

Згідно з отриманими даними інспектування, на вивченій ділянці зафіксовано наявність трьох ярусів річкових терас, що демонструють досить якісну неперервність розташування по всій довжині річкового профілю.

Їхні абсолютні відмітки над сучасною водною поверхнею річки варіюються в межах близько 3–5 метрів, 12 метрів та 21–25 метрів.

Подібна будова рельєфу є свідченням багаторазового заглиблення річища, яке відбувалося внаслідок чергування кліматичних та геологічних (тектонічних) змін у різні часи історії Землі.

Метод створення карт, який був застосований у цьому дослідженні та базувався на фотограмметричному підході "Structure from Motion" (SfM), має значні переваги проти стандартних підходів.

Особливо, якщо зіставити з традиційним мапуванням у полі, цифрова методика аналізу з високою деталізацією дає шанс виявляти терасні утворення, які є ледь помітними чи частково змитими ерозією.

Такі об'єкти легко можуть бути проігноровані під час обстежень на місці через обмеженість оглядовості рельєфу.

На противагу автоматизованим методикам ідентифікації терас, які часто використовують менш точні цифрові моделі рельєфу, використання технології "Структура з руху" (SfM) гарантує значно кращу вертикальну точність.

Це, своєю чергою, дозволяє тонше розрізняти висотні показники терасних сходинок.

Завдяки такій точності, стає можливим більш коректно оцінювати відносні переміщення земної поверхні та реконструювати послідовність етапів, в які річка прорізала своє русло.

Ці отримані дані слугують основою для визначення віку річкових відкладень алювію методом оптично стимульованої люмінесценції.

Цей підхід забезпечує критично важливу інформацію про темп денудації та швидкість пониження дна річкової долини протягом різних геологічних періодів.

Але фотограмметричний підхід все-таки не в змозі цілковито замінити дослідження, проведені безпосередньо в полі, адже він не завжди

дозволяє безпомилково ідентифікувати природні терасові утворення та відрізнити їх від форм, створених людиною (як-от об'єкти аграрного сектора).

З огляду на це найефективнішим є комбінований метод, що поєднує можливості автоматизованого картографування з цифровими технологіями та обов'язкову польову перевірку отриманих даних, що забезпечує найвищий рівень точності кінцевих результатів.

Ще однією вагомою перевагою методу "Структура з руху" (SfM) є здатність будувати високодеталізовані об'ємні моделі рельєфу, які візуалізують морфологічні особливості ландшафту з максимальною наочністю.

Як ілюстрацію, на малюнку 10 представлено приклад 3D-відтворення досліджуваної долинної ділянки, де можна без труднощів розпізнати виразні рівні річкових терас.

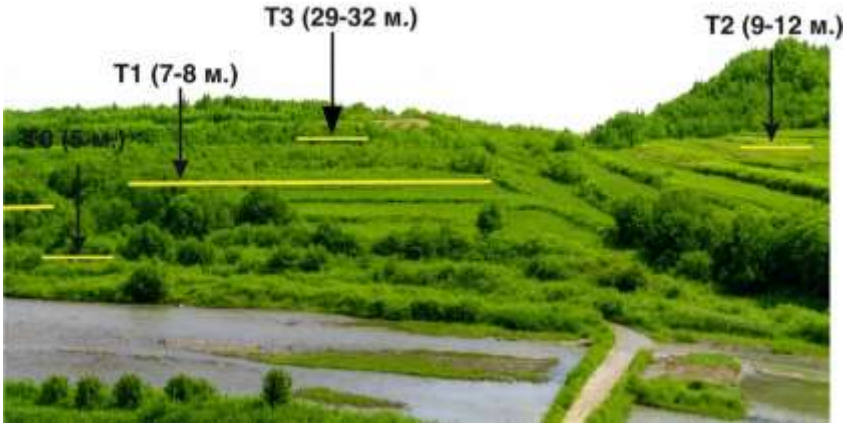


Рисунок 10. 3D-зображення досліджуваної території, що ілюструє річкові тераси різних рівнів

Аналіз побудованої 3D-моделі демонструє, що річка Дністер (для нашого дослідження — річка Даші) неодноразово здійснювала інтенсивне врізання у власно створені алювіальні шари, призводячи до утворення декількох чітко виражених рівнів.

Хронологія формування цих терас легко визначається їхнім просторовим розміщенням: що ближче певна тераса знаходиться до поточного русла, то менший її геологічний вік.

Отже, проведене наукове вивчення однозначно підтвердило: метод фотограмметрії SfM у комбінації з обов'язковою перевіркою зібраних польових даних є надзвичайно надійним, високоточним та ефективним практичним рішенням для успішного картування річкових терас у регіонах зі складною геоморфологічною структурою.

Здобуті висновки придатні для подальших студій у сфері палеогеоморфології, а також дозволяють оцінити мінливість розвитку річкових мереж у межах Поділля.

У числовому вираженні показники, що містяться у круглих дужках, ілюструють висотні відмітки рівнів терас, відносно сьогоднішньої межі максимального заповнення русла.

Це ранжування дає можливість відстежити морфологічну черговість формування долини та визначити ключові фази її поглиблення.

Створення повністю автономних методик для автоматичного виділення морфологічних особливостей з цифрових моделей рельєфу (ЦМР), що мають високу деталізацію, є одним із найважливіших завдань сьогоденної геоморфології та геоінформатики.

Це дозволить суттєво мінімізувати необхідність у затратних і складних польових вимірюваннях, гарантуючи при цьому відмінну точність та можливість багаторазового повторення отриманих даних.

Технологія фотограмметрії «Структура з руху» (Structure from Motion, SfM), використана у даному магістерському дослідженні та заснована на знімках, зроблених безпілотним літальним апаратом (БПЛА), у поєднанні з автоматизованим методом ідентифікації річкових терас, є значущим кроком вперед у розробці подібних автоматизованих методик.

З одного боку, підхід SfM засвідчив свою високу результативність у формуванні деталізованих цифрових моделей рельєфу на малих територіях, навіть у регіонах з непростим ландшафтом.

З іншого боку, алгоритм розмежування терас, створений у межах цієї праці, надає можливість статистично обґрунтовувати граничні значення для ідентифікації терасових поверхонь, що відчутно знижує суб’єктивність оцінок та вплив людського фактора на етапі аналізу.

У світовій практиці паралельно з підвищенням деталізації цифрових моделей рельєфу (ЦМР) дедалі популярнішим стає об'єктно-орієнтований аналіз зображень (ООАЗ, або Object-Based Image Analysis, OBIA).

Цей метод надає можливість автоматично ідентифікувати різні форми рельєфу, ґрунтуючись не виключно на окремих пікселях, а на морфологічних об'єктах, що розглядаються як цілісні просторові елементи.

Завдяки цьому стає можливим створення геоморфологічно осмислених карт, які набагато точніше відображають бачення спеціалістів щодо просторового розташування та організації форм земної поверхні.

Отже, інтеграція підходів Структура з Руху (Structure-from-Motion, SfM), методів статистичного порогового аналізу та об'єктно-орієнтованої класифікації закладає фундамент для подальшого вдосконалення процесів автоматизованого картографування річкових терас.

З часом, ці методики мають потенціал перетворитися на фундамент для розробки потужних інтелектуальних систем, які зможуть аналізувати поверхню землі.

Вони будуть здатні миттєво ідентифікувати геоморфологічні утворення, використовуючи інформацію, отриману з безпілотних апаратів, супутників чи шляхом лазерного сканування.

Висновки

У межах магістерської роботи проведено аналіз результативності використання доступної технології фотограмметрії «Структура з руху» (Structure from Motion, SfM), що ґрунтується на обробці знімків, отриманих за допомогою безпілотного авіаційного комплексу (БАК), для створення карт річкових терас у місцевостях із непростими геоморфологічними особливостями.

З метою проведення зйомки ділянки зі значною топографічною різноманітністю було впроваджено специфічну методику отримання зображень.

Вона включала поділ загальної території на менші картографічні сегменти, забезпечення належного рівня перекриття між суміжними кадрами, а також застосування кількох джерел живлення (акумуляторів) за допомогою функціоналу інтелектуального планування польотних завдань.

Польові роботи та об’єкт вивчення зосередилися на території долини річки Дністер, розташованої в Івано-Франківській області, загальна площа якої становить близько 1,9 квадратних кілометрів.

Завдяки двом авіаційним рейсам було зібрано 1100 геоприв'язаних фотографій, які стали основою для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) з деталізацією 3,8 см на піксель.

Для оцінки достовірності цієї моделі застосували 196 окремих контрольних пунктів, координати яких були встановлені за технологією RTK-GPS.

Отримані дані засвідчили, що середньоквадратичне відхилення (RMSE) склало 3,1 см, а середня величина похибки — 2,9 см.

Це є надійним підтвердженням високих показників геометричної точності створеної моделі.

Аналіз отриманої цифрової моделі поверхні (ЦПМ) дозволив ідентифікувати високо розташовану заплаву, а також три яруси річкових терас, що розмістилися на відмітках орієнтовно 5,0 м (T0), 7–8 м (T1), 9–12 м (T2) та 29–34 м (T3) відносно поточної висоти русла річки.

Виїзні перевірки на місцевості засвідчили, що переважна частина ідентифікованих висот відповідає природним утворенням терасових систем, цим самим підтверджуючи точність застосованого підходу.

Здобуті дані переконливо демонструють, що метод фотограмметрії SfM, реалізований за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), спроможний забезпечувати цифрові моделі рельєфу (ЦМР) із сантиметровою точністю навіть за вкрай несприятливих топографічних обставин.

Це робить його повноцінною і вигідною заміною значно дорожчим технологіям лазерного сканування (LiDAR, TLS).

Створена модель поверхні землі слугує надійним інструментом для оперативного, високоточного та економічно вигідного картографування ділянок річкових терас і може бути ефективно задіяна у майбутніх геоморфологічних, гідрологічних, а також кадастрових проєктах.

Представлений у дослідженні механізм збору та подальшої обробки інформації чітко засвідчив свою продуктивність, і його можна сміливо радити для впровадження на територіях, що є віддаленими або мають ускладнений доступ, де застосування класичних знімальних методологій є фінансово недоцільним.

До того ж, технологічний підхід SfM, що ґрунтується на використанні безпілотних літальних апаратів, вирізняється вагомим переліком позитивних якостей — незначною вартістю реалізації, високим рівнем продуктивності, вражаючою точністю по вертикалі та суттєвою деталізацією просторових даних, що робить його перспективною сферою для розвитку в контексті сучасної геодезії та геоморфологічних досліджень.

Список використаних джерел

1. Баран П.І. Інженерна геодезія — Київ: Віпол, 2012

2.Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. – Львів, 2008.

3.Волосецький Б.І. Інженерна геодезія. – Львів, 2003.

4.Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – К.: ГКНТА, 1999.

5.Тартачинський Р.М., Дейнека Ю.П., Смірнова О.М. Практикум з інженерної геодезії – Львів, 2001.

6. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України "Інструкція з топографічної зйомки в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500", - Київ, 2001 рік.

7. Проф. Могильний С.Г. і д.т.н. Войтенко С.П. “Геодезія” (частина перша). Чернігів 2002р.

8. Hui, Li & Chen, Lin & Wang, Zhaoyang & Yu, Zhongdi. (2019). Mapping of River Terraces with Low-Cost UAS Based Structure-from-Motion

Photogrammetry in a Complex Terrain Setting. Remote Sensing. 11. 464. 10.3390/rs11040464.

9. Clubb, F.J.; Mudd, S.M.; Milodowski, D.T.; Valters, D.A.; Slater, L.J.; Hurst, M.D.; Limaye, A.B. Геоморфометричне розмежування заплав та терас з об'єктивно визначених топографічних порогів. Earth Surf. Dyn. Discuss. 2017, 5, 369–385.

10. Li, H.; Zhao, J.Y. Оцінка нещодавно опублікованої всесвітньої DEM AW3D30 над типовими формами рельєфу Китаю з використанням двох глобальних DEM та даних ICESat/GLAS. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2018, 11, 4430–4440.

11. Wilson, J.P. Цифрове моделювання рельєфу. Geomorphology 2012, 137, 107–121.

Ульман, С. Інтерпретація структури з руху. Proc. R. Soc. B Biol. 1979, 203, 405–426.

Сміт, М.; Каррівік, Дж.; Квінсі, Д. Структура з рухової фотограмметрії у фізичній географії.Prog. Phys. Geog. 2016, 40, 247–275.

14. Джавернік, Л.; Брасінгтон, Дж.; Карузо, Б. Моделювання топографії мілководних розгалужених річок за допомогою фотограмметрії структури з руху. Geomorphology 2014, 213, 166–182.

15. Джеймс, М.Р.; Робсон, С. Проста реконструкція 3D-поверхонь та топографії за допомогою камери: Точність та застосування в геологічних науках. J. Geophys. Res. Earth 2012, 117, F03017.

16. Небікер, С.; Аннен, А.; Шеррер, М.; Ош, Д. Легкий багатоспектральний датчик для мікро БПЛА – Можливості для дистанційного зондування з повітря дуже високої роздільної здатності. ISPRS Arch. 2008, 37, 1193–1199.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи:

«Оцінка ефективності доступних фотограмметричних технологій на основі безпілотних літальних апаратів для картографування»

Обсяг пояснювальної записки: 73 аркушів.

24.12.25 рік _____

(дата) **(підпис студента)**