

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Братівник Антоніна
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
**« Дослідження впливу кількості контрольних точок на точність
позиціонування БПЛА при створенні цифрової карти поверхні у
важкодоступних місцях »**
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

А. Братівник, студентка групи ГЗз-22-1к

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: **к.т.н. доцент Володимир Романюк**
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

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

Братівник Антоніна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Дослідження впливу кількості контрольних точок на точність позиціонування БПЛА при створенні цифрової карти поверхні у важкодоступних місцях »

керівник роботи: к.т.н. доцент Володимир Романюк
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

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

1. Матеріали та методи дослідження
2. Методика проведення робіт
3. Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

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

Студент

_____ **Братівник А.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ **Романюк В.**

Анотація

У цій бакалаврській роботі ми вивчаємо вплив числа контрольних пунктів на точність визначення положення під час створення цифрових карт земної поверхні у складних для доступу областях, зокрема, на торф'яних масивах, із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Проаналізувавши різноманітні методи збору просторових даних за допомогою БПЛА, у дослідженні продемонстровано, як використання контрольних точок здатне підвищити точність позиціонування.

Робота передбачає оцінку впливу змін у кількості контрольних пунктів на продуктивність і точність одержуваних картографічних моделей, а також аналіз ролі контрольних точок у коригуванні даних БПЛА, з акцентом на вплив їхнього розміщення на точність тривимірного моделювання рельєфу місцевості.

Зокрема, метою є встановлення оптимальної кількості контрольних пунктів, необхідної для досягнення максимальної точності картографічної моделі.

Дослідження також охоплює різні варіанти розташування контрольних пунктів на дослідній території та методи коригування даних за допомогою геодезичних приладів.

Ключовим аспектом цього дослідження є виявлення взаємозв'язку між кількістю контрольних пунктів і точністю згенерованої цифрової моделі поверхні важкодоступних територій, а також визначення можливих обмежень, що виникають при скороченні кількості контрольних пунктів.

Abstract

In this bachelor's thesis, we study the influence of the number of control points on the accuracy of determining the position when creating digital maps of the earth's surface in difficult-to-access areas, in particular, on peatlands, using unmanned aerial vehicles (UAVs).

Having analyzed various methods of collecting spatial data using UAVs, the study demonstrates how the use of control points can increase the accuracy of positioning.

The work involves assessing the impact of changes in the number of control points on the performance and accuracy of the resulting cartographic models, as well as analyzing the role of control points in adjusting UAV data, with an emphasis on the impact of their placement on the accuracy of three-dimensional terrain modeling.

In particular, the goal is to establish the optimal number of control points required to achieve maximum accuracy of the cartographic model.

The study also covers various options for the location of control points in the study area and methods for adjusting data using geodetic instruments.

A key aspect of this study is to identify the relationship between the number of control points and the accuracy of the generated digital surface model of hard-to-reach areas, as well as to identify possible limitations that arise when reducing the number of control points.

Зміст

Вступ

1. Матеріали та методи дослідження

- 1.1. Область дослідження
- 1.2. Прилади для виконання робіт
- 1.3. Геореференція
- 1.4. Оцінка точності

2. Методика проведення робіт

- 2.1. Визначення точності цифрових моделей поверхонь з високою роздільною здатністю.
- 2.2. Оцінювання картографічної та гідрологічної моделей поверхні

3. Результати дослідження

- 3.1. Картографічна модель поверхні високої деталізації
- 3.2. Гідрологічні моделі поверхні

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Торфовища по всьому світі відчувають серйозний тиск з боку зміни клімату та антропогенних чинників.

Найбільші небезпеки, що загрожують цим екосистемам, – це дедалі частіші та інтенсивні посухи, підвищена ймовірність лісових пожеж, меліорація земель та видобуток торфу.

Проте, торфовища виконують важливу роль у глобальних та регіональних екосистемних процесах, і їхнє картування є надзвичайно важливим.

Торфовища – це заболочені землі з низьким вмістом мінералів (<35%) та органічними шарами ґрунту завтовшки щонайменше 30 см.

Високий рівень ґрунтових вод створює анаеробні умови, що суттєво уповільнюють процес розкладу органічної речовини.

Ці особливості роблять торфовища одними з найбільших природних сховищ вуглецю на планеті.

Хоча торфовища займають лише 3% площі суші, бореальні та субарктичні регіони містять від 15% до 30% світового запасу ґрунтового вуглецю, відіграючи роль у загальному охолодженні клімату.

Крім того, торфовища мають важливе значення для гідрологічного балансу, регулюючи стік води у водозборах.

Завдяки здатності утримувати значні об'єми води, торфовища ефективно акумулюють поверхневі води, фільтрують наноси та сприяють уповільненню стоку.

В Україні нараховується близько 500 родовищ торфу. Приблизно 81% видобутого торфу використовується для енергетичних потреб, а решта 19% – у сільському господарстві.

Торф застосовують для виробництва біодобрих, торф'яних горщиків для розсади та сумішей для садівництва.

Незначна кількість виробленого реалізується на експорт, переважно як пальне, водночас частково імпортується торф.

В минулому торф був широко застосовуваний на території України, проте його роль знизилася з розвитком нафтогазової індустрії.

Згідно з офіційними оцінками, загальні геологічні резерви мінералу складають 2,04 мільярда тонн, а території, на яких знаходяться торфовища, охоплюють приблизно 1 мільйон гектарів.

Основні обсяги видобутку зосереджені у Волинській, Рівненській та Чернігівській областях, також розробки ведуться у Львівській, Житомирській областях.

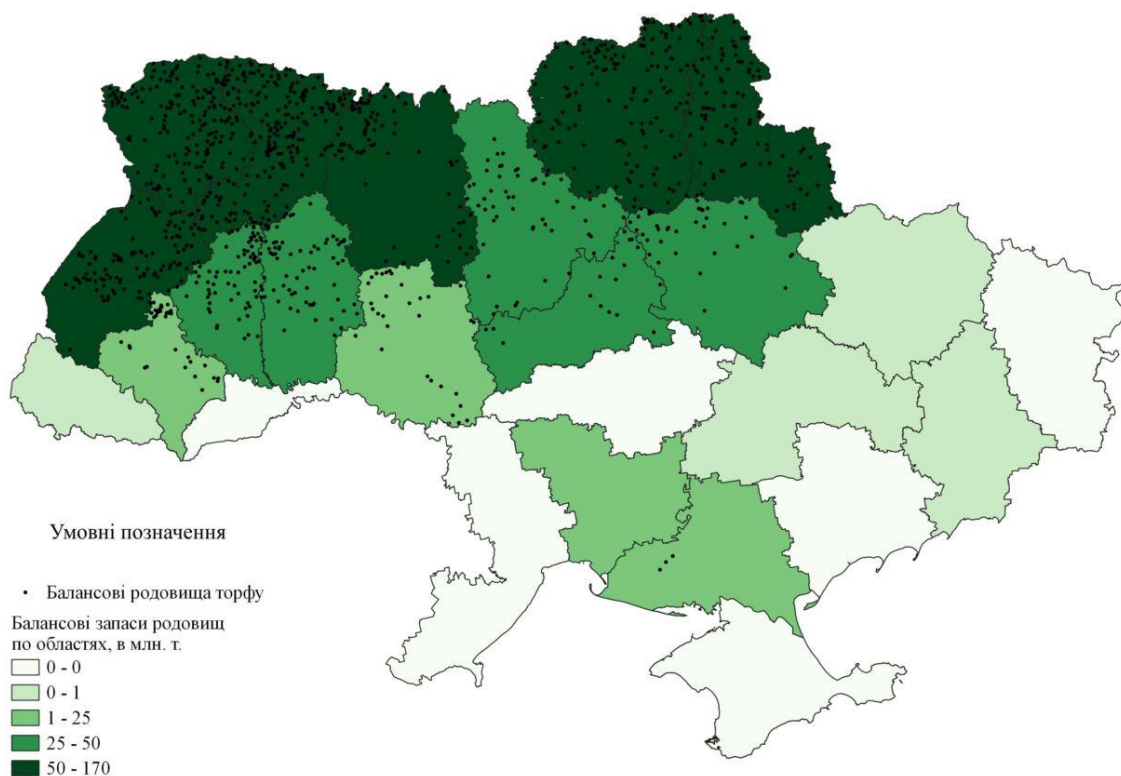


Рисунок 1. Карта торфових родовищ в Україні

Проте, великі обсяги накопиченого торфу являють собою значну екологічну небезпеку через високу пожежонебезпеку.

Торф'яні пожежі – це некеровані процеси повільного тління торфу, що можуть виникати як під впливом природних явищ, так і внаслідок діяльності людини.

Через обмежений доступ кисню торф згорає не повністю, а на швидкість горіння мало впливають зміни вітру або щоденні погодні умови.

Як результат, пожежі на торфовищах можуть тривати тижнями, а в окремих випадках – місяцями.

Для покращення результативності заходів з відновлення торфовищ необхідно краще розуміти, як торфовища реагують на різного роду порушення.

Водночас, сучасні методи фізичного картографування та моніторингу надзвичайно трудомісткі, вимагають значних витрат ресурсів і навіть можуть спричинити додаткові ушкодження торфовищ.

З іншого боку, традиційні методи дистанційного зондування, на кшталт супутникових знімків та аерофотозйомки, виявляються малоефективними для екосистем торфовищ.

Це зумовлено фрагментованістю екосистем та відносно невеликими розмірами окремих ділянок (зазвичай менше 1-2 га).

Крім того, детальна інформація про стан торфовищ вимагає зображень з надзвичайно високою просторовою роздільною здатністю, яку звичайні методи надати не можуть.

Зображення з субдециметровою роздільною здатністю (<10 см/піксель) є необхідними для точного моніторингу змін мікрорельєфу торфовищ, що важливо для аналізу гідрологічних процесів та швидкості торфонакопичення.

Отримання подібних зображень стає можливим завдяки використанню безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Вони забезпечують можливість ведення надзвичайно точного спостереження навіть за найдрібнішими частинами торфовищ.

Компактні БПЛА є ідеальним рішенням для створення карт місцевості розміром до 10 га.

Це дає змогу отримати дуже високу просторову роздільну здатність, що сягає 1-2 см/піксель, особливо на ділянках, де присутні водорості.

Для моніторингу та картографування значних територій, зокрема сотень торфовищ, необхідний відбір показової вибірки ділянок.

Високоякісні знімки з БПЛА містять спектральну інформацію, яка дозволяє глибше вивчити територію, що досліджується.

Детальну цифрову модель поверхні землі можна створити, застосовуючи фотограмметричні алгоритми та методи комп'ютерного зору.

Це дає змогу згенерувати тривимірну хмару точок.

Ці моделі відіграють важливу роль у гідрологічному моделюванні, визначаючи напрямок руху води по поверхні та вказуючи оптимальні місця для проведення відновлювальних робіт, зокрема перекриття дренажних каналів.

Координати визначаються за допомогою бортової глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

Але вони можуть мати похибку у кілька метрів, що не відповідає точності зображень надвисокої роздільної здатності.

Відповідно, цифрові моделі поверхні, створені на основі таких даних без ретельного наземного контролю, страждають від геометричних спотворень, таких як викривлення, нерівності та деформації, що проявляються у вигляді «куполів» та «перегинів».

Щоб уникнути цих похибок, застосовується точніший метод прив'язки, а саме - наземні реперні точки (НРТ).

Спеціальні позначки розташовуються в зоні аерофотозйомки, а їхні координати визначаються за допомогою GNSS (RTK) в режимі реального часу.

Це дозволяє досягти точності приблизно 2 см по горизонталі та 4 см по вертикалі.

У процесі обробки отриманих фотографій ці маркери ідентифікуються вручну.

Це суттєво покращує точність створеної фотограмметричної моделі, наближаючи її до реальної системи координат.

Проте використання наземних опорних точок є досить складним процесом, що потребує значних ресурсів, особливо якщо йдеться про важкодоступні ділянки.

У місцевостях зі складним доступом, як-от торфовища, процес встановлення та демонтажу таких точок може бути пов'язаний з певним ризиком.

Дослідження засвідчили, що зменшення кількості контрольних точок відчутно впливає на точність цифрових моделей поверхні, зокрема, у вертикальному напрямку.

З огляду на це, альтернативні способи підвищення геопросторової точності вимагають пильної уваги та подальшого вивчення.

На точність цифрових моделей поверхні високої роздільної здатності впливає низка чинників, серед яких: фокусна відстань об'єктива камери, висота польоту та якість самого зображення.

Водночас, різноманітність рельєфу та розміри досліджуваної території створюють труднощі для прямого порівняння результатів різних аерофотозйомок.

На думку експертів, на місцевостях з пересіченим рельєфом варто застосовувати мінімум чотири контрольні точки, що дозволяє досягти середньоквадратичної похибки по вертикалі на рівні 0,064 м.

Збільшення кількості контрольних точок веде до незначного зменшення цієї похибки – до 0,059 м.

Дослідження показали, що вертикальна похибка значно зростає, якщо відстань між контрольними точками перевищує 100 м.

Це особливо актуально при висоті польоту в діапазоні від 280 до 330 м над рівнем моря.

У рамках цієї бакалаврської роботи було здійснено картографування торфовища площею близько 1 га.

Метою дослідження було визначення оптимальної кількості контрольних точок, необхідних для побудови високоточної цифрової моделі земної поверхні.

1. Матеріали та методи дослідження

1.1. Область дослідження

Полеві роботи, що склали частину проєкту, розгорнулися у 2021 році, зосереджуючись головним чином на травні та червні місяцях.

В результаті проведених досліджень було картографовано п'ять різноманітних локацій торфовищ, на кожній з яких переважали відмінні умови рельєфу.

Для кожної досліджуваної території була визначена площа близько 1 гектара, при цьому місцезнаходження знаходились на висоті від 180 до 240 метрів над рівнем моря.

Варто відзначити, що всі досліджені ділянки мали характерні топографічні риси та особливості ґрунтового покриву, що вимагало надзвичайної уваги при здійсненні вимірювань і зборі географічної інформації.



Рисунок 2. Територія дослідження

1.2. Прилади для виконання робіт

Для здійснення поставленої мети було використано безпілотний літальний апарат DJI Phantom 4 Pro.

За його допомогою було проведено картографування усіх п'яти ділянок, які знаходились в межах досліджуваної території (див. Рис. 3).

Використання дрона з камерою 20-мегапікселів, здатною записувати відео у 4К роздільності, гарантувало високу якість зображень.

Це дозволило створити деталізовану цифрову модель рельєфу місцевості, а також провести аналіз мікротопографічних особливостей.

Процес картографування здійснювався з різної висоти.

Такий підхід забезпечив оптимальний кут огляду для кожної конкретної ділянки, яка підлягала дослідженню.



Рисунок 3 БПЛА DJI Phantom 4 Pro

DJI Phantom оснащений CMOS камерою з активним піксельним сенсором, встановленим на карданному підвісі для стабілізації під час польоту.

Ця камера здатна робити 20-мегапіксельні знімки зі швидкістю один раз на дві секунди.

Це дозволяє БПЛА забезпечувати високу деталізацію зображень, необхідну для точного картографування та цифрового моделювання.

Для навігації DJI Phantom оснащений приймачем глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS), який дозволяє автопілоту літати згідно з попередньо визначеним планом польоту і географічними мітками зображень по мірі їх отримання. GNSS дозволяє визначити точне положення кожного зображення, що є важливим для цифрового моделювання.

Точність прив'язки при створенні моделі поверхні землі.

Чотири кутові опорні точки для кожної ділянки зйомки були позначені і збережені в програмному забезпеченні Ground Station Pro (GS Pro).

Це уточнило межі польоту і дозволило програмному забезпеченню згенерувати серію маршрутних точок для автоматичного розрахунку оптимальної схеми польоту.

Ці точки забезпечили покриття території з необхідними параметрами перекриття, важливими для точного отримання зображень.

Під час польоту було виконано двоетапне дослідження: дві сітки пролітали на однаковій висоті над землею (Рис. 3а,b), а потім ці сітки були об'єднані, щоб сформувати подвійну сітку (Рис. 3с).[4]

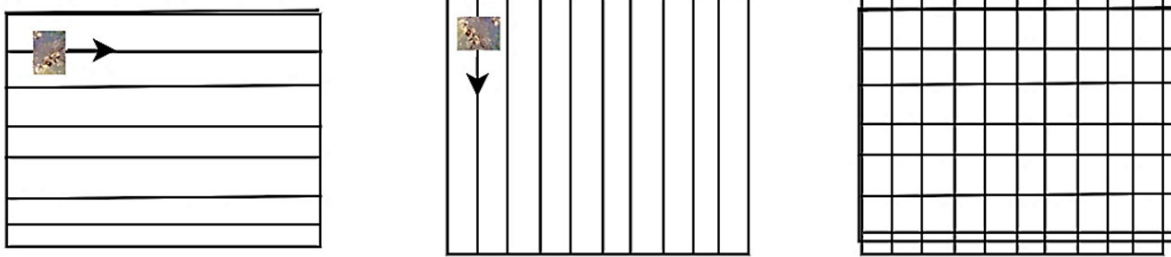


Рисунок 3. Схеми польоту, що використані в дослідженні

(a) одинарна сітка (сітка 1); (b) друга одинарна сітка (сітка 2); (c) подвійна сітка, що поєднує моделі a та b.

Висота польоту варіюється від місця до місця залежно від просторового покриття, але зазвичай починається від 30 м над рівнем землі.

Картографування 3D-структур за допомогою зображень надвисокої роздільної здатності вимагає високого рівня перекриття (>70%).

У цьому дослідженні фронтальний знімок перекривається на 80%, а бічний - на 75%, що забезпечує високоточні дані для створення ортофотопланів і цифрових моделей поверхні.

Деталі польоту для кожного маршруту в різних точках наведені в Таблиці 1.

Також включена інформація про відстань до наземного зразка (GSD) і діапазон висот.

Оскільки мокриці розвиваються переважно на рівнинній місцевості, вплив GSD є менш важливим у цьому дослідженні.

Основний перепад висот зумовлений уступами скель на межах досліджуваних ділянок, що може вплинути на точність моделювання.[4]

Таблиця 1 Польові дані для кожного маршруту польоту, кількість фотографій, GSD та висота.

Показники	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 4	Ділянка 5	
Площа ділянки (м.кв.)	10,280	7044	3805	5250	4928	
Висота знімання (м)	1258–1266	1202–1206	1206–1222	1177–1201	1119–1141	
Висота польоту БПЛА (м)	40	30	30	30	30	
Кількість зображень:	Сітка 1	364	243	140	274	134
	Сітка 2	357	271	160	292	169
	Подвійна сітка	721	514	300	566	303
	Ортофото	2	1	1	1	2
	ЦМП	3	2	2	2	3

1.3. Геореференція

Маркери, використані в цьому дослідженні як опорні точки, - це ламінований папір формату А3 з чорною крапкою, що вказує на центр.

Маркери були закріплені металевими кілочками.

Чотири контрольні точки були розміщені в чотирьох кутах кожної ділянки, а решта маркерів (12-16) були випадковим чином розміщені по всій досліджуваній території, на однаковій відстані в межах прямокутника, утвореного чотирма кутовими точками.

Для розміщення маркерів не використовувався спеціальний метод, а процес ґрунтувався на багаторічному досвіді розміщення наземних контрольних точок на місцевості.

Цей метод забезпечив достатню точність для фотограмметричного аналізу та цифрового моделювання поверхні.

Розміщення маркерів і контрольних точок було важливим кроком для забезпечення високого рівня геометричної точності при створенні ортофотопланів і моделей (Рис. 4).[4]

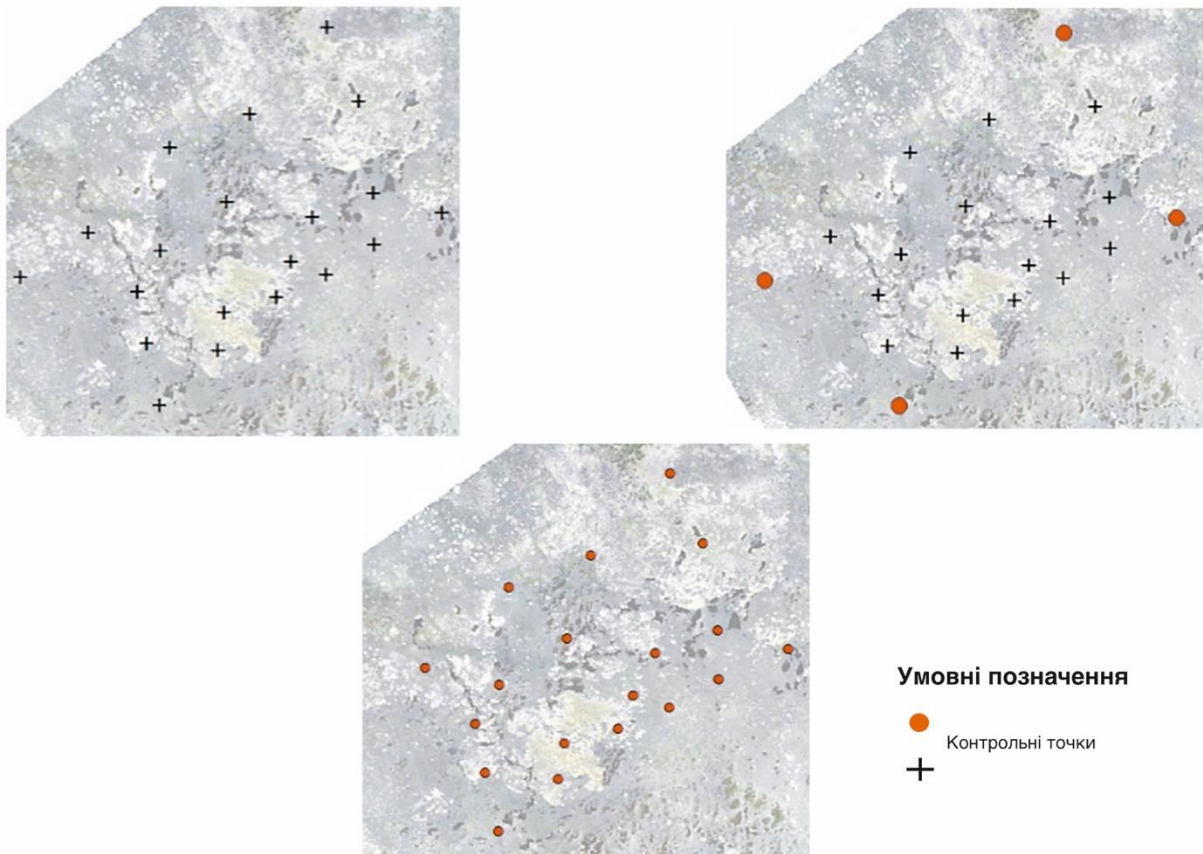


Рисунок 4. Три сценарії проведення дослідження

На цьому рисунку також показано розподіл контрольних точок на місцевості.

Тривимірні геометричні положення контрольних точок були виміряні в режимі реального часу за допомогою двочастотної GNSS системи Leica 1200 DGPS з точністю 2-4 см по горизонталі і 4-8 см по вертикалі (рис. 5).

Ці точні вимірювання забезпечили точну географічну прив'язку знімків БПЛА, значно зменшили геометричні спотворення та забезпечили високу точність при створенні цифрових моделей поверхні та ортофотопланів.



Рисунок 5 GNSS система Leica 1200

У цьому дослідженні оператор розмістив приймальну антену на маркері і використовував штатив, щоб утримувати антену в горизонтальному положенні, отримуючи поправки від стаціонарних станцій в радіусі 16,2 км.

Для обробки фотографій і 3D-модельовання використовували версію 1.4.1 програмного забезпечення для фотограмметрії Agisoft Photoscan Professional.[4,6]

Photoscan використовує найсучасніші алгоритми реконструкції руху та багаторакурсної стереоскопії для обробки зображень надвисокої

роздільної здатності та створення ортофотопланів і цифрових моделей поверхні з високою роздільною здатністю.

У цьому процесі GPS-координати з камери використовуються для визначення 3D-позиції кожної ключової точки, створюючи таким чином розріджену хмару точок місцевості.

Початкове вирівнювання зображень було виконано з низькою точністю, щоб розмістити їх у приблизному положенні, що полегшило ідентифікацію ключових точок.

Потім була застосована ручна прив'язка до місцевості для оптимізації параметрів калібрування камери шляхом встановлення опорних точок на декількох знімках.

Всі зображення були повторно відкалібровані з використанням високоточних налаштувань.

На другому етапі дослідження було здійснено пошук додаткових точок і згущення хмари точок.

Для ущільнення хмари точок було використано налаштування високої якості у програмі Photoscan, а для фільтрації аномалій було застосовано глибинну фільтрацію, що дозволило отримати більш гладку і достовірну поверхню відкритого поля.[5]

Було розроблено три сценарії опрацювання даних.

В одному з них для створення цифрових моделей поверхні з високою роздільною здатністю та ортофотографій використовувалися лише приблизні GPS-дані (геотеги) розташування камер; у другому сценарії для прив'язки моделі до місцевості використовувалися лише чотири контрольні точки, розташовані по кутах досліджуваної території.

Ці точки були використані для прив'язки до місцевості і допомогли побудувати базову модель, але точність цієї моделі є низькою, оскільки було використано лише обмежену кількість контрольних точок; третій

сценарій має найвищу точність, оскільки для прив'язки до місцевості були використані всі контрольні точки на досліджуваній території.

Він має найвищу точність.

Це пояснюється тим, що кожна контрольна точка допомагає зменшити спотворення і підвищити точність географічної прив'язки моделі.

Цифрові моделі поверхні з високою роздільною здатністю, які не звірені з точними даними про місцезнаходження, можуть містити спотворення, які зазвичай виправляються за допомогою точних контрольних точок.

Модель на основі всіх наземних контрольних точок була використана як еталонний сценарій, оскільки вона забезпечує найвищу точність і надійність серед усіх цифрових моделей поверхні з високою роздільною здатністю.

1.4. Оцінка точності

Для оцінки точної відповідності цифрових моделей рельєфу (ЦМР) високої деталізації було застосовано два способи.

У першому способі за точку відліку бралася вертикальна похибка кожної ЦМР високої роздільної здатності, порівнюючись з опорною точкою.

З програмного забезпечення Photoscan експортувалися ЦМР високої точності та ортофотоплани різних знімальних ситуацій для кожного сегменту території.

Ортофотоплани застосовувались для візуальної перевірки розташування маркерів наземних контрольних пунктів.

В першому сценарії, для обчислення середньоквадратичної похибки та середнього квадратичного відхилення абсолютної похибки, застосовувались всі опорні та наземні контрольні точки.

У другому випадку застосовувалися всі базові та наземні контрольні позиції, за винятком кутових.

Хоча це і не є абсолютно точним визначенням точності, такий метод дає змогу визначити залишкові похибки процесу підгонки моделі хмари точок до контрольних позицій.

Попри це, отримані дані необхідні для порівняння продуктивності різних сценаріїв.

Вони також надають уявлення про внутрішню точність цифрової моделі поверхні з високою деталізацією, створеної на основі наземних контрольних точок, які використані як еталонний сценарій.

Інший спосіб оцінки точності полягає в аналізі штучних нахилів, які можуть бути присутніми в цифрових моделях рельєфу, де контроль виконаний з помилками.

Оскільки всі контрольні точки слугують для верифікації фотограмметричної моделі, цифрову модель місцевості з високою роздільною здатністю для кожного варіанту зіставляють з еталонним значенням, яке скориговане з урахуванням впливу ухилів.

Аналіз ухилів починається з перенесення плоских координат наземних контрольних точок з першого сценарію до тих самих позицій, що й опорні контрольні точки, за допомогою поліноміального перетворення з передискретизацією за методом найближчого сусіда.

Подібне перетворення не потрібно для цифрової моделі поверхні, створеної за другим сценарієм, оскільки наземні контрольні точки у чотирьох кутах вже гарантовано мають ті самі положення на площині, що й опорні точки.

Після завершення вирівнювання контрольні точки першого та другого сценаріїв вилучаються з цифрової моделі рельєфу високої роздільної здатності для побудови карти різниць.[4]

На основі зібраної інформації можна обчислити ухил місцевості, щоб встановити максимальний кут нахилу цифрової моделі рельєфу високої чіткості для кожного окремого випадку.

Дослідження точності цифрових моделей поверхні з високою роздільною здатністю дозволяє не тільки оцінити якість отриманих моделей, а й виявити можливі помилки та неточності в процесі обробки даних.

Це має особливе значення при визначенні надійності цифрових моделей, що використовуються в картографії та геодезичних вимірюваннях на практиці.

Зіставляючи вертикальні похибки, можна зробити висновки про ступінь точності кожного сценарію та вплив різних методів прив'язки на остаточні результати.

Виявлення штучних зміщень, у свою чергу, може вказувати на спотворення в моделі, що виникли через недосконалі контрольні точки, або ж помилки в їхньому позиціонуванні.

Для детальнішого розбору кожного окремого випадку доцільно також провести співставлення з результатами інших досліджень, здійснених за аналогічних обставин.

Це дозволить виявити, які саме аспекти, зокрема, висота польоту безпілотної літака, щільність контрольних точок та перекриття знімків, мають найбільший вплив на точність отриманої моделі.

Підсумки цих порівнянь закладають основу для вдосконалення процесів збирання та обробки даних.

Це особливо актуально для забезпечення високої точності картографічних робіт у специфічних сферах, скажімо, під час картування

торфовищ, де навіть незначні відхилення в сантиметровому діапазоні мають значення.

Щоб забезпечити надійність інформації та стабільну точність цифрових моделей земної поверхні, критично важливо безперервно удосконалювати методи збору та аналізу геопросторових даних, беручи до уваги численні чинники, що впливають на точність.

Такий підхід є фундаментальним для прогресу сучасних методів картографії та геодезії.

2. Методика проведення робіт

2.1. Визначення точності цифрових моделей поверхонь з високою роздільною здатністю.

Для аналізу точності моделі та виявлення можливих невідповідностей було виконано зіставлення абсолютних значень та штучних градієнтів для кожного з досліджуваних випадків.

Підсумки цих зіставлень містяться в Таблиці 2.[4]

Таблиця 2 Аналіз абсолютної точності

Ділянка дослідження	Показники	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
Ділянка 1	Середньо квадратична похибка (м)	0.58	0.28	0.03
	Абсолютна похибка (м)	0.42	0.32	0.02
	Максимальний нахил (град)	1.49	1.50	0.00
Ділянка 2	Середньо квадратична похибка (м)	0.83	1.20	0.03
	Абсолютна похибка (м)	0.33	0.45	0.02
	Максимальний нахил (град)	1.25	1.25	0.00
Ділянка 3	Середньо квадратична похибка (м)	0.19	0.73	0.09
	Абсолютна похибка (м)	0.07	0.35	0.04
	Максимальний нахил (град)	1.10	1.10	0.00
Ділянка 4	Середньо квадратична похибка (м)	0.03	0.21	0.02
	Абсолютна похибка (м)	0.02	0.14	0.01
	Максимальний нахил (град)	0.05	0.35	0.00
Ділянка 5	Середньо квадратична похибка (м)	0.02	0.31	0.02
	Абсолютна похибка (м)	0.01	0.19	0.01
	Максимальний нахил (град)	0.04	0.75	0.00

Результати засвідчують, що ділянки 4 та 5 демонструють найбільшу та найстабільнішу точність, як для аналізу вертикальних відхилень.

У першому та другому сценаріях вертикальна похибка майже ідентична, не перевищуючи 0,05 градуси; водночас спостерігається незначний штучний градієнт, що вказує на помірний рівень точності.

Проте на інших областях, зокрема на ділянках 1, 2 та 3, похибка цифрової моделі у вертикальній площині значно збільшилася.

Такий результат може бути спричинений надмірним рівнем шуму в хмарі точок, що використовується для побудови цифрової моделі, який перешкоджає точному визначенню максимального кута нахилу.

Це підкреслює важливість забезпечення надійної прив'язки до місцевості та використання точних контрольних точок, з метою уникнення спотворень, викликаних низькою якістю даних.

Додатково, при порівнянні сценарію 1 зі сценарієм 3, спостерігається значне покращення точності вертикальної похибки та зменшення впливу нахилу на всіх ділянках.

Це підтверджує ключову роль збільшення кількості контрольних точок для прив'язки до місцевості, демонструючи, що третій сценарій є більш надійним.

У другому сценарії, на жаль, нахил перевищив показник в 1 градус на конкретних територіях 1, 2 та 3.[4]

Це дає підстави вважати, що обробка отриманих даних саме з цих зон є менш ретельною.

Щоправда, ми спробували експериментувати: використовували знімки, зроблені з різних висот під час польотів, та ще й на різних досліджуваних площах.

Але, як виявилось, такий підхід не надав суттєвого поліпшення у точності цифрової моделі.

Окрім того, це значно збільшило термін опрацювання даних.

Звідси можемо зробити висновок: збільшення висоти польоту не завжди гарантує більшу точність.

Особливо це стосується випадків, коли вже є належна географічна прив'язка.

Отже, третій сценарій показав себе як найоптимальніший та найточніший варіант формування цифрових моделей поверхні

Землі, що мають високу роздільну здатність.

Він демонструє високу точність без помітного викривлення рельєфу.

2.2. Оцінювання картографічної та гідрологічної моделей поверхні

Застосування еталонної цифрової моделі, прив'язаної до конкретної території, виявило локальні відхилення та впливи, спричинені різноманітними налаштуваннями під час збору та подальшої обробки даних.

Зокрема, вплив нестабільності під час польоту безпілотної та коливань температурно-вологісного режиму, які впливають на точність географічного позиціонування.

Окрім того, було встановлено межі точності, які будуть застосовуватися під час створення цифрових моделей та ортофотопланів.

На рисунку 6 представлено два фінальні результати процесу картографічного моделювання на основі ортофотопланів та цифрової моделі рельєфу високої роздільної здатності для досліджуваної ділянки порівняно з еталонною цифровою моделлю рельєфу з аналогічною високою роздільною здатністю.[4,5]

Ортофотознімки демонструють географічну коректність, де кожен піксель чітко співвідноситься з конкретною фізичною точкою на місцевості.

Цифрова модель поверхні — це візуалізація даних про висоту, що дає змогу побудувати деталізовану тривимірну модель, яка точно передає найдрібніші варіації земної поверхні.

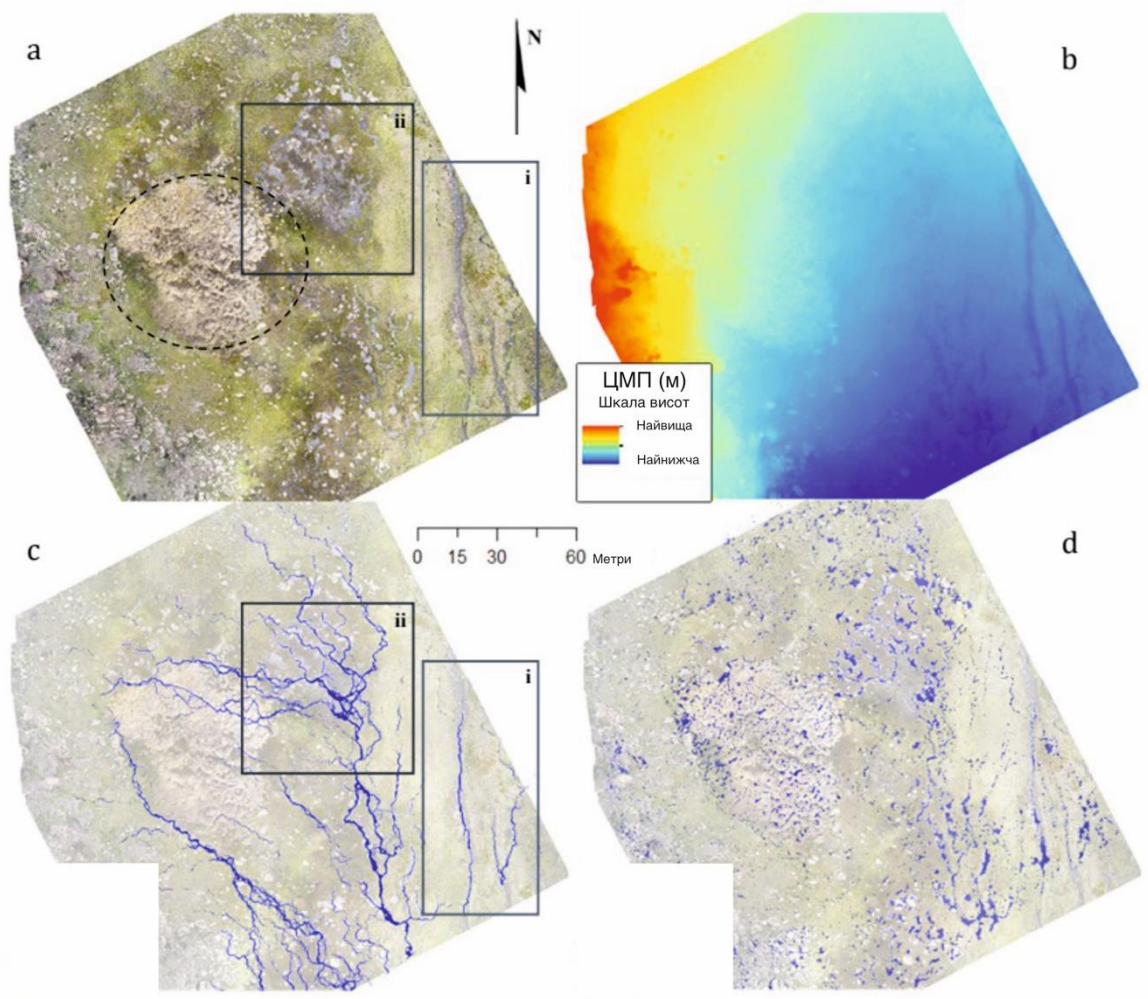


Рисунок 6. Ортофотоплани та цифрові моделі рельєфу з високою роздільною здатністю.

а) Штрихпунктирне коло окреслює локацію торфовища.

б) Високодеталізовані цифрові моделі рельєфу, призначені для базових умов.

- c) Моделі накопичення стоку, розроблені на основі цифрових моделей поверхні з високою роздільною здатністю.
- d) Топографічна карта індексів вологості, створена на основі високоточних цифрових моделей земної поверхні.

Моделювання кумулятивного стоку та топографічні індекси вологості є ключовими методами для вивчення гідрологічних процесів і визначення зон підвищеного вологовмісту на певній місцевості.

Результати аналізу з використанням цих моделей не лише продемонстрували вплив природного рельєфу на переміщення води, але й дали змогу виділити місця можливого скупчення води, що має вирішальне значення для управління водними ресурсами та моніторингу екосистем.

Для досліджуваних торфовищ моделі накопичення стоку дозволяють простежити, як вода переміщається територією та як природний стік впливає на формування ділянок з високою водонасиченістю.

Однак, ці моделі не дозволяють детально дослідити, як різні ландшафтні фактори, наприклад, наявність природних схилів та поглинаюча здатність торфовища, впливають на водний режим ділянки.

Кarti топографічного індексу вологості слугують важливим інструментом для планування та оцінки ймовірних змін в екосистемах, оскільки вони точно вказують на місця концентрації вологи та напрямок її стоку.

Непридатні ділянки, де формуються струмки в зонах з високою вологістю, можуть свідчити про сприятливі умови для розвитку водних об'єктів та рослинності, які потребують подальшого вивчення.

На топографічній карті індексу вологості, вологі ділянки загалом відповідають розташуванню водних об'єктів, зафіксованих на ортофотопланах (рис. 7).[4]

Отже, наявний взаємозв'язок вказує на значну вірність створеної моделі зволоження, бо області з високим вмістом води, що нанесені на карту, цілком відповідають дійсним водозбірним басейнам.

Подібне співставлення має велике значення для подальших досліджень локальних екологічних параметрів, зокрема, під час оцінки впливу води на рослинність та водні запаси.

Крім того, складені карти знаходять практичне застосування у процесі планування природоохоронних заходів, оскільки вони дозволяють точно визначити критичні ділянки, що потребують захисту водних ресурсів, а також сприяють глибшому розумінню гідрологічних процесів в межах досліджуваної території.

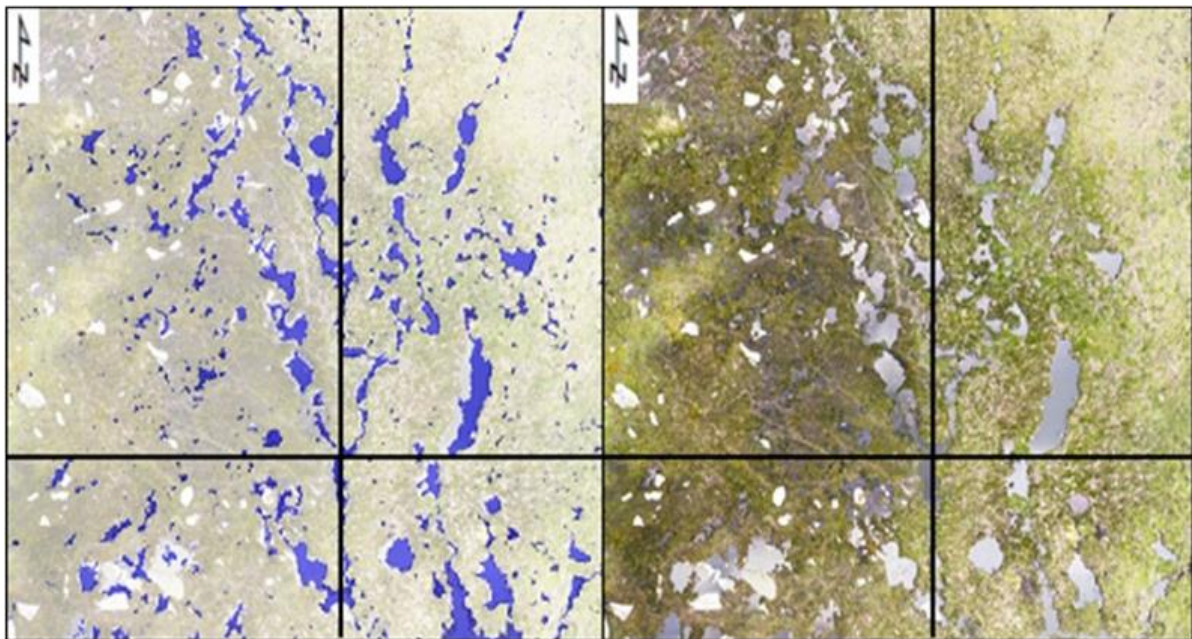


Рисунок 7. Карта індексу вологості

На лівому зображенні рисунку 7 представлена збільшена деталізація південно-східної частини місцевості, сфотографована з наземної точки огляду, тоді як на правому зображенні розміщено ортофотоплан тієї ж території.

У той же час, водно-болотний комплекс, що розташований у північно-східній частині регіону, відображений на карті не так точно, як його фактичний стан.

На карті кількість водно-болотних угідь є меншою порівняно з даними, зібраними в ході польових досліджень (Рис. 7).[4,6]

Окрім того, виявилось, що між певними водно-болотними зонами є ще менші за розміром території з болотними угіддями, що залишилися непоміченими під час обстеження місцевості.

Для розробки гідрологічної моделі, спочатку було сформовано базовий сценарій, після чого, використовуючи цифрові моделі земної поверхні з високим розрізненням, було проведено моделювання по сценаріям 1 та 2, тримаючись тих самих показників висоти.

Ці модельовані сценарії фактично не продемонстрували суттєвих відмінностей від базового сценарію, демонструючи максимальні штучні ухили в 0,050 та 0,350 відповідно (інформація міститься в Таблиці 2).

Візуально, між результатами базової моделі та отриманими результатами за сценаріями 1 та 2 не було помітно вагомих розбіжностей.

Хоча і спостерігалися певні відхилення у траєкторіях потоків на картах акумуляції стоку, основні напрями руху води були аналогічні для усіх трьох сценаріїв.[4]

Тим не менш, оцінювання точності цифрової моделі рельєфу виявило в обох розглянутих сценаріях більш виражені штучні схили, аніж у третьому сценарії, що підкреслює необхідність більш точного налаштування задля досягнення вищої точності моделювання.

3. Результати дослідження

3.1. Картографічна модель поверхні високої деталізації

На основі зображень високої чіткості розроблено цифрові моделі земної поверхні з високою роздільною здатністю для різноманітних географічних умов, при цьому було проаналізовано п'ять різних дослідних зон.

В цілому, величини вертикальних похибок для різних сценаріїв, обчислені з використанням PhotoScan, демонструють відповідність з результатами інших досліджень, в яких застосовувались наземні контрольні точки на цифрових моделях земної поверхні з високою роздільною здатністю, отриманих з аналогічних зображень.

Ці відхилення коливаються в межах приблизно 0-5 см.

У Сценарії 1 похибки для ділянок 1 та 2 були аналогічні результатам Сценарію 3, однак для інших ділянок похибки зросли до показника 10 см.

Ключовою відмінністю Сценарію 1 є візуалізація куполоподібного ефекту на цифровій моделі рельєфу ділянки 1.

Такий ефект може бути обґрунтований природним куполоподібним рельєфом ділянки 1, з найвищою точкою у центрі, що може пояснювати подібні результати на цій конкретній ділянці.

Як вже було зазначено раніше, похибка для чотирьох наземних контрольних пунктів не перевищувала 10 см.

Проте, у попередньому дослідженні з використанням чотирьох кутових контрольних пунктів середнє відхилення становило 0,31 м, що є значно більшим, ніж середній показник 0,02 м, отриманий при застосуванні 15 контрольних точок на аналогічній території.[4]

З цього випливає, що точність географічного положення дуже залежить від проміжку між контрольними пунктами.

Збільшення відстані між цими пунктами веде до зростання похибки прив'язки та зниження повторюваності результатів.

Це акцентує важливість коректного відбору та розташування контрольних точок, що критично для досягнення більшої точності географічної прив'язки та створення точних моделей.

Крім того, наскільки коректно оцінюється точність контрольних пунктів, чи то недооцінка, чи переоцінка, є настільки ж важливим, як і правильне їх розміщення на місцевості для досягнення точності геоприв'язки.

Пересічений рельєф вимагає збільшення щільності контрольних точок, тому при їх розташуванні необхідно враховувати особливості місцевості.

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) високої роздільної здатності для ділянок 1 та 2 характеризуються майже квадратною формою, на відміну від інших, котрі мають витягнуту прямокутну форму.

Додатково, ділянки 3 та 4 оточені стрімкими схилами та вкриті сосновими лісами, хоча частково видимі на знімках високої роздільної здатності.

Ці фактори могли вплинути на збільшення вертикальної мінливості ЦМР високої роздільної здатності, ускладнюючи процес картографування цих ділянок.

Звідси витікає необхідність використання наземних контрольних точок для створення точних ЦМР високої роздільної здатності.

Застосування лише чотирьох наземних контрольних точок дало задовільні результати на деяких ділянках, але, як свідчить таблиця 2, цей метод не є стабільним у всіх випадках, і на нього не варто цілком покладатися.[4]

В рамках дослідження був випробуваний також альтернативний підхід, котрий виключає використання наземних контрольних пунктів.

На одному з об'єктів було здійснено збір знімків під час двох окремих сесій спостереження, що відбувалися в різних умовах освітлення – протягом світлового дня та в вечірній час.

Знімки, отримані вдень, містили в собі опорні точки, які були оброблені та вирівняні з еталонною камерою, використовуючи програмне забезпечення Photoscan, з метою створення ортофотоплану та цифрової моделі поверхні з високою деталізацією.

Наступним кроком було імпортування вечірніх зображень до Photoscan та їх вирівнювання з вже обробленими денними знімками.

Після цього, денне зображення відключали, а для генерації ортофотоплану та цифрової моделі поверхні використовували правильно вирівняний вечірній знімок.

Основною задачею цього методу була перевірка вечірніх знімків на відповідність денним.

Успішний результат свідчив би про можливість автоматизованого порівняння подальших знімків з початковим набором даних без необхідності додаткової верифікації, за умови коректної перевірки початкової моделі рельєфу.

Для реалізації такого підходу необхідна наявність на зображенні достатньої кількості сталих об'єктів, що зберігають свою константність з часом, для можливості співставлення характерних рис між двома наборами даних.

Цей підхід виглядав перспективним, бо торф'яні ґрунти багаті на стійкі характеристики, що залишаються стабільними протягом незначного часового відтинку.

Проте, спроби вирівнювати нові фотографії з існуючими контрольованими моделями не дали очікуваного ефекту.

Ортофотознімки, згенеровані таким чином, демонстрували точність в межах одного-двох пікселів, але точність цифрових моделей рельєфу високої деталізації викликала питання.

Виражені штучні градієнти (>10) спостерігалися на цифрових моделях з високою роздільною здатністю, що свідчило про недоліки використаних методів формування цих моделей, які потребують корегування контрольними точками для забезпечення точності картографування.

В контексті даного дослідження, зосередженого на створенні точних цифрових моделей поверхні для потреб моделювання, цей метод виявився недостатнім без застосування додаткових методів географічного прив'язування.

Отже, майбутні завдання мають бути спрямовані на віднаходження результативних методів просторової прив'язки ділянок, що потребують тривалого спостереження.

Напрями майбутніх розвідок охоплюють використання стабільних об'єктів, які залишаються незмінними з плином часу, зокрема, спорудження довготривалих сховищ, які слугуватимуть як постійні репери.

Це надасть можливість застосування RTK GNSS для визначення координат з високою точністю.

Проте, такий спосіб передбачає масштабну польову роботу з розташування маркерів на нових територіях та їхнього вимірювання за допомогою RTK GNSS, що вимагає значних витрат.

Крім того, сучасні прилади RTK GNSS та кінематичні рішення для постобробки (РПК) демонструють зростаючу доступність та економічну вигідність для геотегування зображень високої деталізації.[4]

Водночас, поки невідомо, чи зможуть ці технології забезпечити високу абсолютну точність та повторюваність вимірювань.

Також залишається невизначеність, чи стануть вони надійним інструментом для створення деталізованих цифрових моделей рельєфу, зокрема, для специфічних територій, таких як торфовища.

3.2. Гідрологічні моделі поверхні

Результати гідрологічного моделювання продемонстрували загалом позитивну візуалізацію накопичення стоку на торф'яниках.

Топографія досліджуваної місцевості визначається розрідженим рослинним покривом, і для отримання точних результатів моделювання необхідне ретельне врахування вертикальних неточностей.

Варто підкреслити, що величини похибок пов'язані з параметрами геометрії обладнання та, відповідно, мають просторову варіабельність.

Аналіз точності виявив незначні відмінності у вертикальних похибках між різними секціями та варіантами моделювання, водночас інші параметри залишалися фіксованими, оскільки основною задачею дослідження було зіставлення ефективності цифрових моделей рельєфу з високою деталізацією для різних сценаріїв.

Отримані дані з досліджуваних територій свідчать, що формування надійних гідрологічних карт стає неможливим, якщо цифрова модель рельєфу містить надмірну кількість штучних схилів.

Утім, модель, збудована без прив'язки до даних наземного контролю, показала незначну різницю порівняно з еталонною, бо значення штучних ухилів було меншим за природні коливання висот на досліджуваній місцевості.

Враховуючи залежність вхідних даних гідрологічної моделі від розміру одного пікселя (10 см), цифрові моделі з більшою площею можуть показувати збільшення об'єму води, що впливає на напрямок потоку.

Це дослідження пропонує найкращий спосіб створення точних гідрологічних моделей торфовищ.

Цей метод тепер може бути застосований для картування та моніторингу гідрології торфовищ в межах програм відновлення.

Дані з високою деталізацією є критичними для виявлення змін мікрорельєфу на пошкоджених болотах та моделювання потенційних ділянок для відновлення.

Гідрологічне моделювання можна вдосконалити шляхом додавання змінних, що впливають на рослинність, таких як інфільтрація води.

Проте, оскільки ділянки, вивчені в цьому дослідженні, були переважно сухими, було складно врахувати цей фактор.

Окрім того, ключовим для картування торфовищ є застосування спектральних показників з мультиспектральних знімків високої роздільної здатності для оцінки різноманітних умов місцевості, що буде розглянуто у майбутніх польових дослідженнях.

Висновки

Метою нашої бакалаврської роботи було вивчення впливу кількості контрольних пунктів на точність визначення положення БПЛА при створенні цифрових карт рельєфу у важкодоступних місцях, оцінюючи результативність різних методів геоприв'язки.

Завдання було реалізоване шляхом розробки трьох різних сценаріїв для п'яти дослідних майданчиків.

Найменші вертикальні похибки спостерігалися на ділянках 1 та 2, з похибками близько 0,03 м у сценаріях 1 та 3, а також менше 0,5 м у сценарії 2.

На цих ділянках були виявлені артефакти у вигляді штучних нахилів на цифровій моделі рельєфу.

Цифрова модель, створена без використання наземного контролю, демонструвала суттєве зростання штучних нахилів до 0,80 м на обох ділянках.

На ділянках 3, 4 та 5 вертикальні похибки були значно більші для сценарію 1, часто перевищуючи 10 см.

Для сценарію 2 нахил в цілому перевищував 1° .

Крім того, оцінка нахилу виявила куполоподібну форму для сценарію 1 на ділянках 1 та 2.

Ділянки 3 та 4 відрізнялися від ділянки 5 за формою (квадрат проти витягнутого прямокутника) та топографічною складністю, а перші три ділянки показали більшу варіативність вертикальної осі цифрової моделі через наявність дерев та водно-болотних угідь.

Після оцінки точності була розроблена гідрологічна модель поверхні, використовуючи базовий сценарій, що включає всі наземні контрольні точки (16-20 точок), та додатковий сценарій.

Застосування рівномірно розміщених контрольних пунктів має першорядне значення при розбудові високоякісної топографії на основі знімків зроблених за допомогою БПЛА надвисокої роздільності.

Проте, на місцевостях, де ґрунт зазнав суттєвої деградації та пріоритетним є мінімізація подальшої шкоди, може вистачити щонайменше чотири контрольні точки, розташовані по краях ділянки, з можливістю додавання ще однієї в центрі.

Наполегливо рекомендується використовувати наземні контрольні пункти, оскільки цифрові моделі, побудовані без застосування наземних методів контролю, показали недостатню надійність для подальшого застосування в гідрологічному моделюванні.

Потрібні додаткові дослідження для з'ясування можливості використання альтернативних методів з метою спрощення точної географічної прив'язки зображень надвисокої роздільності.

Список використаних джерел

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

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

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

4. De Roos, S.; Turner, D.; Lucieer, A.; Bowman, D.M.J.S. Using Digital Surface Models from UAS Imagery of Fire Damaged *Sphagnum* Peatlands for Monitoring and Hydrological Restoration. *Drones* **2018**, *2*, 45. <https://doi.org/10.3390/drones2040045>

5. Вінам, Дж.; Хоуп, Г.; Гуд, Р.; Райт, Г. Експериментальні випробування методів відновлення рослинності після пожежі на торфовищах національних парків ANU Press 2010; Том 32, с. 364–379.

6. Оцінка екологічного впливу комплексу лісових пожеж і 2016 року; Звіт про охорону природи № 17/5; Департамент первинних галузей промисловості, парків, водних ресурсів та навколишнього середовища: 2017; с. 142.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Дослідження впливу кількості контрольних точок на точність позиціонування БПЛА при створенні цифрової карти поверхні у важкодоступних місцях ».

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)