

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Мандибур Андрій
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
**«Аналіз точності цифрових моделей поверхні гірських порід,
отриманих за допомогою фотограмметрії БПЛА»**
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

А. Мандибур, студент групи ГЗ-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: к.т.н. доцент Олена Кравець
(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 та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

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

Мандибур Андрій

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Аналіз точності цифрових моделей поверхні гірських порід, отриманих за допомогою фотограмметрії БПЛА»

керівник роботи: к.т.н. доцент Олена Кравець

(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. Територія дослідження
2. Методи дослідження
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	Територія дослідження		
2	Методи дослідження		
3	Результати дослідження		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

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

Керівник роботи

_____ ***Кравець О.***

Анотація

Метою даної бакалаврської роботи є дослідження можливостей застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у поєднанні з цифровою фотограмметрією для створення великомасштабних 3D-моделей геологічних відслонень гірських порід, зокрема в умовах складного рельєфу та обмеженої доступності, на прикладі Ардівського родовища перліту в Закарпатській області.

Актуальність теми:

Забезпечення точного і детального картографування геологічних відслонень є важливою задачею для геології, геоморфології та ресурсознавства.

Через складні умови рельєфу традиційні методи зйомки часто виявляються малоефективними або небезпечними.

Впровадження БПЛА у геофотограмметричні дослідження відкриває нові можливості для ефективного збору просторової інформації, особливо у важкодоступних районах, зменшуючи витрати часу та ресурсів.

Наукова новизна:

У роботі реалізовано та проаналізовано підхід до отримання детальної 3D-моделі геологічного відслонення шляхом фотограмметричної обробки знімків, отриманих з БПЛА.

Новизна полягає у практичному дослідженні застосування комерційних моделей дронів для геологічної зйомки високих уступів, а також у верифікації точності отриманих результатів на реальному родовищі, що характеризується складною структурою.

Практична цінність:

Результати дослідження можуть бути використані як методичні рекомендації для проведення фотограмметричних зйомок геологічних об'єктів із застосуванням БПЛА.

Створені 3D-моделі дозволяють з високою точністю аналізувати структуру родовища, що є важливим для подальших геологічних, геотехнічних або інженерних досліджень, зокрема у гірничій справі та охороні надр.

Ключові слова:

БПЛА, цифрова фотограмметрія, 3D-моделювання, геологічне відслонення, Ардівське родовище, перліт, Agisoft PhotoScan, великомасштабна зйомка, геологічна структура, картографування.

Abstract

The purpose of this bachelor's thesis is to study the possibilities of using unmanned aerial vehicles (UAVs) in combination with digital photogrammetry to create large-scale 3D models of geological outcrops of rocks, in particular in conditions of complex terrain and limited accessibility, using the example of the Ardiv perlite deposit in the Transcarpathian region.

Relevance of the topic:

Providing accurate and detailed mapping of geological outcrops is an important task for geology, geomorphology and resource science.

Due to complex terrain conditions, traditional surveying methods often turn out to be ineffective or dangerous.

The introduction of UAVs into geophotogrammetric studies opens up new opportunities for effective collection of spatial information, especially in hard-to-reach areas, reducing time and resource consumption.

Scientific novelty:

The paper implements and analyzes an approach to obtaining a detailed 3D model of a geological outcrop by photogrammetric processing of images obtained from UAVs.

The novelty lies in the practical study of the use of commercial drone models for geological surveying of high ledges, as well as in verifying the accuracy of the results obtained on a real deposit, characterized by a complex structure.

Practical value:

The results of the study can be used as methodological recommendations for conducting photogrammetric surveys of geological objects using UAVs.

The created 3D models allow for high-precision analysis of the deposit structure, which is important for further geological, geotechnical or engineering research, in particular in mining and subsoil protection.

Keywords:

UAV, digital photogrammetry, 3D modeling, geological outcrop, Ardiv deposit, perlite, Agisoft PhotoScan, large-scale surveying, geological structure, mapping.

Зміст

Вступ

1. Територія дослідження

2. Методи дослідження

2.1 Фотограмметрія

2.2 Безпілотний літальний апарат

2.3 Обробка даних

3. Результати дослідження

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Цифрові камери є неоціненним помічником для всіх дослідників, які фіксують природні процеси та геологічні утворення.

Вони надають величезну кількість детальної та цінної інформації про геологічні об'єкти, яку можна використовувати для подальшого аналізу, картографування та моделювання геологічного середовища.

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відкрив нові горизонти в геологічній документації, дозволяючи досліджувати раніше недоступні або небезпечні ділянки.

БПЛА здатні оперативно збирати велику кількість знімків з різних ракурсів, що значно полегшує роботу геолога, а також економить час і фінансові ресурси, що витрачаються на польові дослідження.

БПЛА, обладнані цифровими камерами, здатні робити знімки з різних точок огляду.

Завдяки їм можна не лише ефективно картографувати значні території, але й отримувати додаткові дані про важкодоступні геологічні об'єкти, які неможливо отримати традиційними методами польових робіт.

Крім того, безконтактні методи збору даних гарантують безпеку геологів та зменшують ризики, пов'язані з розвідкою у нестабільних або важкодоступних регіонах.

Одним з найефективніших методів документування геологічних формацій є цифрова фотограмметрія.

Цей метод дозволяє отримати точну 3D-модель об'єкта на основі серії фотографій.

У геодезії вона застосовується для документування таких об'єктів, як відслонення та геологічні структури, кар'єри та розрізи, підземні виробки, включаючи шахти та тунелі, печери, розломи, просідання та активні геологічні процеси (зсуви, просідання землі, карстовий рельєф).

Методи фотограмметрії дозволяють з високою точністю вимірювати параметри геологічних об'єктів, такі як висота, довжина, об'єм та просторові співвідношення між різними шарами.

Наше дослідження зосереджено на застосуванні фотограмметрії з використанням БПЛА для реєстрації виходів гірських порід з високою точністю.

Завдяки сучасним технологіям, комерційні БПЛА тепер можуть оснащуватися камерами високої роздільної здатності, які гарантують отримання високоякісних географічно прив'язаних зображень.

Сьогодні основні принципи фотограмметрії ефективно реалізовані в сучасних комп'ютерних алгоритмах, які автоматично перетворюють цифрові зображення в тривимірні моделі.

Цей процес обробки створює хмару точок, що містить мільйони тривимірних координат, і значно підвищує точність та рівень деталізації отриманої моделі.

Для обробки даних використовується спеціалізоване фотограмметричне програмне забезпечення, наприклад Agisoft Metashape, Pix4D Mapper та RealityCapture.

Основні етапи обробки:

1. Завантаження та попередня обробка зображень - фільтрація та сортування вхідних знімків;
2. Виявлення спільних точок - ідентифікація ключових точок на знімках та порівняння їх між собою;
3. Генерація хмари точок - створення просторових моделей на основі виявлених спільних точок;
4. Генерація 3D-моделей - створення текстурних моделей, що відповідають реальним геологічним об'єктам;
5. Експорт даних - інтеграція отриманих моделей у САПР, ГІС та інші програмні системи для подальшого аналізу.

Оскільки вихідний матеріал представлений цифровим зображенням з кольоровою інформацією, створена на його основі 3D-модель містить кольорові дані (RGB) кожного пікселя, що допомагає реалістично візуалізувати геологічні об'єкти.

Створені 3D-моделі можна імпортувати у спеціалізовані програмні пакети, такі як AutoCAD, ArcGIS, QGIS та MicroStation, для подальшого аналізу та інтеграції з іншими географічними даними.

Вони також можуть бути експортовані в популярні формати 3D-візуалізації, наприклад PDF-документи, для перегляду в Adobe Reader.

Використання 3D-моделювання на основі фотограмметричних даних значно покращує розуміння просторових взаємозв'язків між геологічними об'єктами.

Це дозволяє вирішувати наступні задачі:

- Точне визначення геометричних параметрів геологічних структур
- Моделювання динаміки геологічних процесів (зсуви, ерозія, карстоутворення)
- Інтеграція геологічних карт, геологічних розрізів та інших геологічних даних в єдину систему
- Створення віртуальних 3D-турів для навчальних та дослідницьких цілей.

Крім того, 3D-моделі можуть використовуватися для прогнозування геологічних небезпек, оцінки стійкості схилів та планування інженерних заходів у складних геологічних умовах.

Загалом, поєднання безпілотних технологій та цифрової фотограмметрії відкриває широкі можливості для геологічної документації та аналізу.

БПЛА забезпечують швидке та ефективне отримання високоточних геологічних даних, значно спрощуючи процес моніторингу, моделювання та прогнозування геологічних змін.

Розвиток сучасного фотограмметричного програмного забезпечення дозволив автоматизувати багато етапів обробки, підвищити точність отриманих моделей і полегшити їх інтеграцію в професійні геоінформаційні системи.

Наші результати підтверджують ефективність використання БПЛА для детального документування відслонень гірських порід.

У майбутньому подібні методи можуть бути поширені на інші сфери геологічного аналізу, такі як екологічний моніторинг, оцінка ризиків та інженерно-геологічні дослідження.

1. Територія дослідження

Ардівське родовище перліту розташувалося в Берегівському районі Закарпаття, в 3 км на південний схід від залізничної станції Берегово, біля північної межі міста.

Земельна ділянка під розробку сягає 23,7 га.

Варто відзначити і добру транспортну розв'язку.

Автошлях Ужгород-Рахів знаходиться на відстані близько 40 км на захід від ділянки, забезпечуючи зручний доступ до промислових центрів області.

Геологічна структура Ардівського родовища сформована неогеновими відкладеннями: толтонськими та сарматськими осадово-вулканічними утвореннями.

Вони складають пологі антиклінальні структури, витягнуті в північно-західному напрямку.

Неогенові породи перекриті четвертинними піщано-глинистими відкладеннями, що створило передумови для формування перліту.

Залежно від умов утворення, родовище можна розподілити на ключові зони.

Геологічна складова: ці території – частина великих перлітових родовищ, які виникли внаслідок Альдівського вулканізму.

Виявлені родовища перліту характеризуються оптимальними умовами для кар'єрного видобутку, що дозволяє значно зменшити витрати на видобуток та первинну переробку.

Це робить Ардівське родовище економічно вигідним для промислового освоєння.

Окрім перлітових порід, родовище містить значні запаси глинистих порід у розкривних породах Затишлянського району.

Вони можуть використовуватись як сировина для виготовлення пустотілих блоків, керамічної плитки та інших будівельних матеріалів.

Перспективним об'єктом для промислового використання є Ардівське родовище перліту:

1. Значні запаси високоякісної сировини, яка знаходить застосування у різних галузях (будівництво, виробництво фільтрувальних, ізоляційних матеріалів та ін.);

2. Відповідні гірничо-геологічні умови для відкритого видобутку, що знижує вартість розробки;

3. Можливість переробки сировини у високоякісний кінцевий продукт;

4. Зручне транспортування сировини до збагачувальної фабрики завдяки розвиненій транспортній інфраструктурі;

5. Потенціал комплексного використання ресурсів: окрім перліту є запаси глини, придатної для виготовлення будматеріалів;

6. Можливість використання родовища як бази для збагачувальної фабрики з виробництва високоякісної продукції.

Наступні дослідження зосереджені на деталізації геологічної будови родовища, економічній оцінці його розробки, вивченні можливості застосування передових технологій видобутку та переробки перлітової сировини.

З огляду на ці фактори, Ардівську ділянку родовища рекомендується до розробки, оскільки відкриває перспективи ефективного промислового використання природних ресурсів регіону.



Рисисунок 1. Ардівське родовище перлітів

Перліт – це гірська порода, котра формується внаслідок швидкого охолодження лави з вулканів.

Він належить до різновидів вулканічного скла, відзначаючись значною пористістю та унікальними фізико-хімічними характеристиками.

Перліт є екологічно чистим матеріалом та знайшов широке застосування в багатьох сферах виробництва, насамперед завдяки своїм властивостям: тепло- та звукоізоляції.

Важливою рисою цього матеріалу є його здатність розширюватись під впливом високих температур.

Під час термічної обробки сировина збільшує свій об'єм у 10-20 разів, перетворюючись на легкий пористий матеріал, котрий застосовують у таких областях:

- Будівництво - для виготовлення ізоляційних матеріалів, легкого бетону та штукатурних розчинів.

- Сільське господарство - як ґрунтовий кондиціонер, покращує аерацію ґрунту та утримання вологи.

- Промисловість - у виробництві фільтрувальних матеріалів для харчової та хімічної промисловості.

Перліт видобувають відкритим способом.

Зазвичай, родовища зустрічаються в районах, де колись була вулканічна активність, а сама порода має шарувату чи лінзоподібну структуру, часто перекрита осадовими породами.

Після видобутку сирий перліт відправляють на гірничо-збагачувальні комбінати, де його дроблять, промивають та піддають подальшій термічній обробці з метою отримання керамзиту.

Детальний аналіз геологічної будови родовища є надзвичайно важливим для ефективного видобутку та раціонального використання сировини.

Це дозволить визначити оптимальні ділянки для відкритих гірничих робіт, а саме:

- Оцінити якісні характеристики та обсяги перлітової сировини.

- Прогнозувати можливі техногенні ризики та геологічні ускладнення в процесі розробки.

- Розробити стратегії для мінімізації втрат корисних копалин під час видобутку.

Ардіфське родовище перліту виділяється як одне з найбільш перспективних для промислового освоєння, завдяки великій кількості

виходів порід на захід від кар'єрних стволів, що забезпечують легкий доступ до високоякісної сировини (рис. 2).[4]



Рисунок 2. Відслонення гірських порід

Майбутні дослідження зосереджені на покращенні технологій вилучення, застосуванні передових технік геологічного моделювання та оптимізації процесу обробки перлинної сировини.

Це сприятиме найбільш раціональному використанню природних багатств та мінімізує негативний вплив видобутку на навколишнє середовище.

На окремих секціях родовища спостерігається чітке геологічне структурування, що дозволяє ретельно дослідити стратиграфічні особливості та породивий склад.

Саме ця ділянка була обрана як експериментальний майданчик для вивчення застосування фотограмметрії безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для фіксації виходів гірських порід.

Проведені дослідження дозволили оцінити точність та ефективність використання цього методу для створення детальних 3D-моделей та цифрових карт геологічних відслонень.

2. Методи дослідження

2.1 Фотограмметрія

Фотограмметрія як метод вивчення застосовується вже понад півтори сотні років, з часу появи фотографії.

Відтоді вона пройшла шлях еволюції, починаючи з аналогових технологій та переходячи до сучасних цифрових методів.

Останніми роками відбувся відчутний прогрес, зумовлений, зокрема, значними покращеннями сенсорних технологій, програмного забезпечення для обробки даних та методик їхнього збору.

Поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) сприяло активному їхньому застосуванню у різних наукових напрямках, таких як геодезія, геологія та картографія.

БПЛА стали ефективною заміною традиційним платформам, зокрема пілотованим літакам та супутниковим системам, забезпечуючи отримання високоточних даних.[4]

Обробка зображень з використанням спеціалізованого програмного забезпечення також зазнала значних змін.

Цифрові знімки з БПЛА можуть опрацьовуватись як за традиційними методиками фотограмметрії, так і за допомогою новітніх алгоритмів Structure from Motion (SfM).

Даний метод ґрунтується на принципах стереофотограмметрії, проте дозволяє будувати 3D-моделі на основі великої кількості знімків, що накладаються один на один.

Якість кінцевого продукту суттєво залежить від характеристик цифрової камери та її оптики.

Щоб мінімізувати оптичні спотворення, використовується процедура калібрування камери.

Цю процедуру можна виконати у лабораторних умовах або ж автоматично під час опрацювання знімків, використовуючи такі програми, як Agisoft Lens, PhotoModeler Scanner або Agisoft PhotoScan, через вагові обмеження БПЛА, фотограмметричні зйомки реалізуються безпосередньо на БПЛА чи дронах.[4]

Для фотограмметричних зйомок зазвичай потрібна компактна або непрофесійна цифрова камера, інтегрована безпосередньо в БПЛА або дрон.

Щоб підвищити точність результатів зйомки, під час опрацювання зображень застосовуються наземні опорні точки (НОТ), координати яких встановлюються геодезичними методами.

Нещодавно на ринку з'явилися недорогі БПЛА, оснащені модулями Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) та інерціальними вимірювальними модулями (IMU) для визначення позиції камери під час зйомки.[4]

Ці дані зберігаються у метаданих кожного зображення, що суттєво спрощує подальшу обробку.

Основний результат опрацювання аерофотознімків у спеціалізованому програмному забезпеченні – це цифрова модель рельєфу (ЦМР), яку можна використовувати для геологічного аналізу, планування ландшафту та містобудування.

2.2 Безпілотний літальний апарат

Сучасні безпілотники (БПЛА) – це технологічний прорив, що відкриває нові горизонти для картографування та геологічних розвідок.

Завдяки своїм скромним розмірам, автономності та здатності працювати у складних умовах, вони здобули широке застосування в геодезії, археології, екології та інших наукових дисциплінах.

Технічний прогрес дав можливість обладнати БПЛА найновішими навігаційними системами, як-от GNSS (Глобальна навігаційна супутникова система) та IMU (Інерціальний вимірювальний блок), які дозволяють літальному апарату точно орієнтуватися у просторі та фіксувати зображення у визначених точках.

Завдяки автоматизованим програмам польоту, БПЛА можуть переміщатися за заздалегідь заданими маршрутами, виконуючи поставлені завдання без безперервного контролю оператора.

Це збільшує продуктивність і точність збору інформації, а також мінімізує вплив людського фактору.

Використання аерофотограмметрії в геології із застосуванням БПЛА – важливий напрямок досліджень.

Дрони використовуються для фіксації геологічних оголень, визначення структурних особливостей гірських порід і створення тривимірних моделей об'єктів місцевості, що значно спрощує аналіз геологічних процесів.[4]

Сучасні дрони, обладнані високоточними камерами та лідарними датчиками, надають дуже деталізовані дані.

Лідарна технологія дозволяє проникнення крізь рослинність, що є критичним при картографуванні важкодоступних регіонів.

Однією з ключових переваг використання БПЛА в фотограмметрії є наявність оперативних даних, які можна швидко обробити та використовувати в процесах прийняття рішень.

Це робить БПЛА незамінними для моніторингу змін ландшафту, оцінки зсувних ризиків, аналізу стану кар'єрів та інших геологічних процесів.

Програмне забезпечення для управління БПЛА спрощує робочий процес та робить їх використання економічнішим.

Це сприяє широкому впровадженню безпілотних технологій у наукові дослідження та комерційні проекти.



Рисунок 3. БПЛА Phantom 2 Vision

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) — незамінний елемент збору геопросторових даних в геодезичних та геологічних вивченнях.

У цьому процесі планування польоту відіграє ключову роль, як і власне політ БПЛА.

План польоту передбачає визначення маршруту, висоти, кількості фотографій, їх накладання, тривалості зйомки та інших факторів, враховуючи освітлення та погодні умови.[6]

Після завершення польоту БПЛА та отримання необхідної інформації, наступний крок — це обробка зображень.

Створення ортофотоплану передбачає обробку географічно скоригованих зображень території, для точного визначення координат об'єктів на місцевості.

Під час робіт на ділянці Ардіф, для фіксації геологічних відслонень, застосовувався безпілотний літальний апарат (БПЛА) Phantom 2 Vision.

Вибір БПЛА був зумовлений його компактністю, помірною вартістю та можливістю отримання якісних фото з висоти, що дає змогу отримувати точні дані у важкодоступних місцях.[4]

Технічні характеристики БПЛА Phantom 2 Vision наведені в Таблиці 1:

Таблиця 1. Вибрані технічні параметри БПЛА DJI Phantom Vision 2.

Характеристики DJI Phantom Vision	
Особливості	Камера FC200
<ul style="list-style-type: none">• Час польоту – до 50 хвилин.• Телеметрія у реальному часі. Дальність прийому відеосигналу 700 м-коду.• Політ по точках, "Утримання позиції", "Повернення додому".• Ергономічний рюкзак для комфортного транспортування та зберігання.• Дальність польоту до 1 км.	<ul style="list-style-type: none">• Робоча температура: 0°C - 40°C• Розмір матриці: 1/2.3" 14Мп• Роздільна здатність: 4384×3288• HD запис: 1080p30 & 720p• FOV: 110 ° / 85 °

Одним із ключових викликів, з якими стикаються камери на безпілотах (БПЛА), є зниження чіткості зображення, зумовлене оптичними властивостями об'єктива.

Окреме занепокоєння викликає "ефект риб'ячого ока", коли краї знімків значно викривлюються, приводячи до виникнення вигинів, нерівностей та серйозних деформацій.

Цей феномен виникає як результат обмежених можливостей ширококутних об'єктивів. Незважаючи на те, що ширококутні об'єктиви можуть покривати значну площу, в кутах кадру з'являються спотворення.

Для усунення цих спотворень використовується спеціалізоване програмне забезпечення для обробки знімків.

Серед найпоширеніших інструментів виділяється Adobe Photoshop, який надає можливість корекції спотворень, викликаних об'єктивом.[4]

За допомогою таких інструментів можна виправляти викривлення ліній та досягати більшої геометричної точності зображення.

Програмне забезпечення для корекції спотворень автоматично визначає тип спотворення і виправляє його на основі вбудованого профілю об'єктива, або користувач може самостійно налаштовувати параметри для певного зображення.

Після корекції "риб'ячого ока" отримане зображення набуває геометричної точності, що є критично важливим для подальшої обробки на програмних платформах для фотограмметрії, наприклад, Agisoft PhotoScan та Pix4D.

2.3 Обробка даних

Робочий процес картографування за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) поділяє спільні риси з аерофотознімальними

системами, але має власну специфіку, зумовлену використанням безпілотних технологій.

Процес картографування містить кілька ключових фаз:

1. Підготовчий етап – на цьому етапі визначаються завдання картографування, відбувається збір даних про місцевість, що підлягає картографуванню, та виконуються необхідні попередні роботи, зокрема вибір обладнання, калібрування камери та розробка плану польоту.

2. План польоту – критичний етап для визначення траєкторії польоту БПЛА та забезпечення отримання потрібних даних. Це охоплює вибір висоти польоту, кутів нахилу камери та областей, де потрібні високоточні дані. Також визначаються частота зйомки та перекриття зображень для створення точної 3D-моделі.

3. Автономний політ – після планування, БПЛА виконує автономний політ, роблячи знімки відповідно до заздалегідь розробленого маршруту.

4. Контроль якості даних – після завершення польоту. Тут відбувається перевірка зон з відсутніми знімками або знімками низької якості, що може вимагати додаткових зйомок для повного покриття необхідної території.

5. Обробка даних – після збору всіх знімків, вони опрацьовуються спеціалізованим програмним забезпеченням для створення ортофотопланів, моделей рельєфу та 3D-зображень. Обробка включає вирівнювання зображень, виправлення спотворень, стереоскопічну обробку для формування 3D-моделі та додавання географічних даних.

Кінцеві продукти картографування БПЛА:

- Модель рельєфу – що містить інформацію про поверхню місцевості.
- Ортофотографічні знімки – знімки з урахуванням всіх спотворень, що мають точні географічні координати.

- 3D-модель – фотореалістичне зображення об'єкта або місцевості, яке надає детальну інформацію про рельєф та геометрію об'єкта.

Загальний робочий процес збору та обробки даних БПЛА, який було використано у дослідженні, проілюстровано на рисунку 4.[4]



Рисунок 4. Робочий процес для збору та обробки даних БПЛА

Випробування проводилися на західному боці території родовища, де фотограмметричне знімання здійснювалося дроном (БПЛА) DJI Phantom Vision.

Апарат був обладнаний камерою FC200, яка мала роздільну здатність 14 мегапікселів.

Технічні характеристики камери представлені в таблиці 1.

Для дослідження було виконано п'ять польотних маршрутів на висоті 35 метрів над середнім рівнем місцевості.

Роздільна здатність отриманих зображень на цій висоті становила 0,01 м/піксель, що забезпечувало необхідний рівень деталізації для проведення геологічного картування.

Загалом було отримано 58 фотографій.

Для просторової прив'язки та корекції зображень використовувалися координати опорних точок (GCP), що дало змогу створити високоточні ортофотоплани та 3D-моделі.

Отримані знімки та контрольні точки дозволили створити деталізовану фотограмметричну документацію геологічних відслонень, що є важливим компонентом геологічної зйомки та картографування.[4]

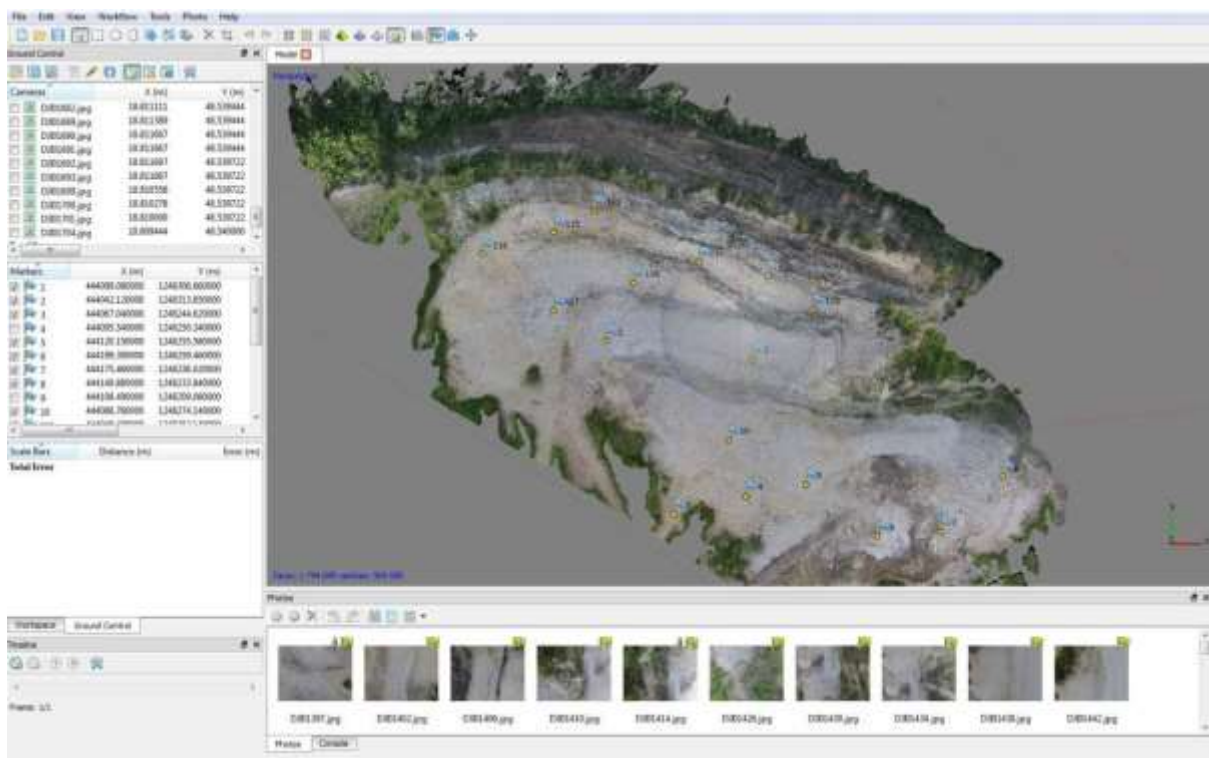


Рисунок 5. Обробка зображення в програмному забезпеченні Agisoft PhotoScan

На представленому зображенні візуалізовано результати обробки даних у вигляді текстурованої хмари точок.

Для опрацювання застосовано систему координат УСК-2000 та систему висот Балтійського моря, що є складовою національної геодезичної референтної системи України.

Обробка знімків відбувалась методом Structure from Motion, реалізованим у програмному забезпеченні AGISOFT PhotoScan.[4]

Даний метод дозволяє формувати високоточні 3D-моделі на основі серії знімків з перекриттями, навіть якщо ці знімки зняті з різних точок зору.

На основі фотограмметричних даних було здійснено точну реконструкцію геологічної структури конкретної ділянки родовища.

Створено цифрову модель рельєфу (ЦМР) місцевості, що включає значні виходи гірських порід, а також фотоплан стін ділянки.

Отримані результати будуть використовуватися для поглибленого аналізу геологічної структури ділянки та прогнозування геологічних явищ і процесів, пов'язаних з видобуванням корисних копалин, зокрема, ерозії та зсувів.

Фотоплани є надзвичайно важливими, оскільки вони формують фундаментальну схематичну основу для подальшого детального вивчення геологічної структури.[4],[6]

На фотопланах чітко відображені такі важливі елементи, як розломи, шари гірських порід, різноманітні прошарки та інші структурні особливості, що дає можливість точно інтерпретувати геологічну будову родовища.

Програма збору даних також забезпечила платформу для додавання інформації на геологічну карту.

Це є ключовим етапом у розробці цифрової моделі для практичних цілей, наприклад, для обліку запасів корисних копалин і планування майбутньої виробничої діяльності.

Вивчені геологічні структури стали основою для вибору найбільш ефективних методів видобутку та створення технічної документації для подальшої експлуатації сировини.

Тривимірна модель може бути використана для більш точного прогнозування розподілу ресурсів на ділянці та потенційного виявлення найбільш перспективних зон для розробки.

Інтеграція цих моделей у геоінформаційну систему (ГІС) дозволяє безперервно відстежувати зміни в структурі гірських порід, що критично важливо для оперативного реагування на потенційні ризики в процесі видобутку корисних копалин.

3. Результати дослідження

Результатом опрацювання даних є хмара точок — тривимірний образ поверхні (рис. 5).

Завдяки цьому можлива візуалізація геометричної будови об'єкта та розпізнавання подробиць, які складно помітити на звичайних фотографіях чи двовимірних зображеннях.

По завершенню формування, дані хмари точок можна перенести в текстовий файл ASCII і зберегти у відповідному форматі для подальшого опрацювання.

Інформація про координати точок разом з реальними кольорами пікселів колірної моделі RGB теж експортуються, зберігаючи не тільки геометричну складову, а й колірну інформацію аерофотознімка.

Отже, можливо створити достовірну та фотореалістичну модель кожної точки в хмарі, враховуючи не лише координати, а й кольори, тим самим покращуючи інформативність моделі.

Після обробки хмари точок з використанням програмного забезпечення САД, була отримана точна цифрова модель рельєфу (ЦМР), яка точно відображає форму об'єкта.

Крім того, був сформований план кам'яної стіни (рис. 6).[4]

Це надзвичайно важливий інструмент для фіксації геологічних особливостей та подальшого аналізу структури родовища.

Фотографічні планіметричні зображення допомагають визначити конкретні геологічні структури, такі як тріщини та виходи порід, а також інші значущі особливості, що впливають на визначення стратегії видобутку.

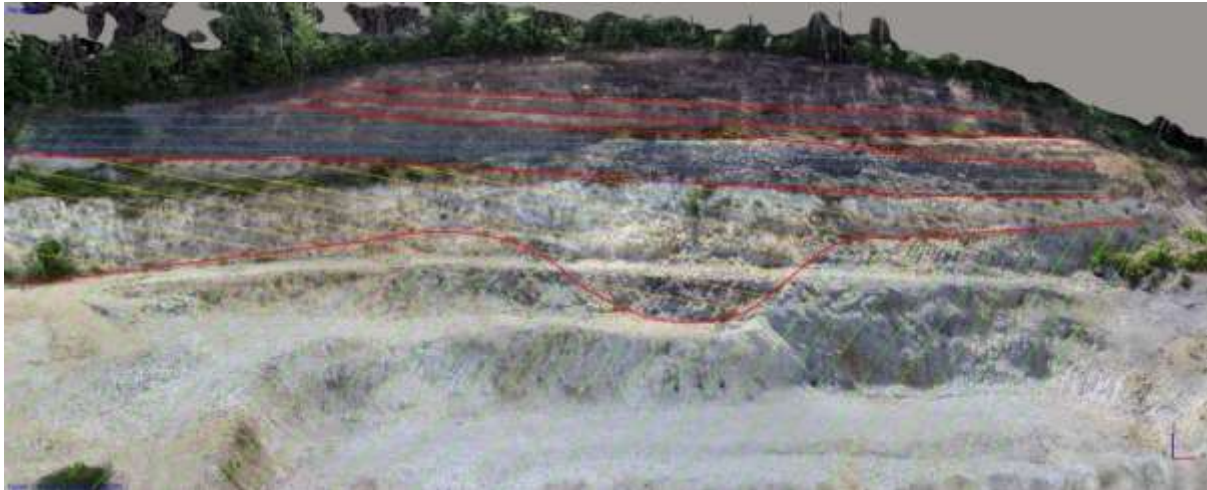


Рис. 6. Інтерпретація геологічної будови на основі фотоплану.

Ці висновки закладають фундамент для наступних геологічних розвідок, оскільки забезпечують надзвичайно точні та зрозумілі відомості, спрощуючи процес прийняття рішень під час безпосередніх експедиційних робіт.

Сформовані фотоплани виступили як графічна основа для виявлення геологічних утворень, що спостерігаються на аерофотознімках.

Це не тільки сприяло наочному представленню геологічних об'єктів, а й полегшило їх точне розпізнавання та проведення аналізу.

Геологічні межі, такі як контури виходів порід на поверхню та інші ключові об'єкти, були нанесені поверх цієї фотокарти (Див. Рис. 6), та могли бути зіставлені з даними, отриманими шляхом безпосередніх вимірювань у природних умовах.[4]

Один з ключових завдань цього дослідження полягав у демонстрації потенціалу використання фотограмметричних даних для створення моделі геологічної структури.

Висока точність та ступінь деталізації, властиві фотограмметрії, сприяли більш адекватному відображенню структури родовища, а також дозволили глибше зрозуміти розподіл корисних копалин.

Опрацювання зібраних даних за допомогою програмного забезпечення Agisoft PhotoScan дозволило отримати дані у вигляді хмари точок, що були імпортовані у САПР MicroStation CAD (Рисунок 7).

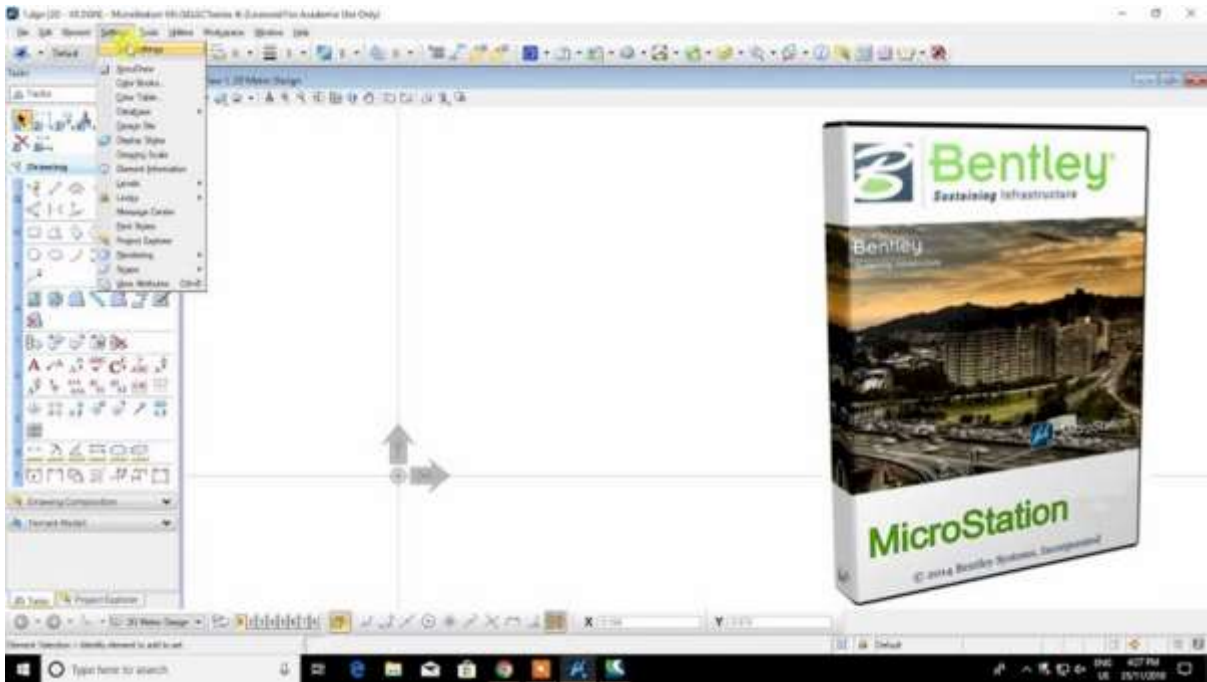


Рисунок 7 Система автоматизованого проектування MicroStation

Цей масив точок став базою для наступних етапів геологічного розвідування й картографії, що з максимальною точністю передає геометричні риси місцевості та дозволяє проаналізувати структуру досліджуваної території.

Застосування новітніх фотограмметричних методик, таких як Structure from Motion та тривимірне моделювання, суттєво покращило точність та візуальну інформативність геологічних досліджень, даючи змогу сформулювати ключові висновки стосовно геологічної будови ділянки та запропонувати ефективні стратегії подальшого розвитку.

MicroStation - потужна платформа для проектування, що об'єднує тривимірні моделі та двовимірні креслення для створення комплексної документації.

Основні можливості MicroStation:

- Проектування з використанням BIM-моделей для створення креслень, моделей, графіків та візуалізацій. Автоматизація документообігу.
- Реалістичне моделювання завдяки інтеграції зображень, хмар точок, ГІС-даних і зовнішніх джерел інформації.
- Вбудована географічна прив'язка дозволяє працювати у точних географічних та геометричних умовах.
- Параметричне тривимірне моделювання забезпечує врахування обмежень і вимог під час проектування.
- Гіпермоделювання інтегрує детальну документацію та 3D-моделі для візуального розуміння проекту.

Однією з ключових переваг MicroStation є підтримка різноманітних форматів файлів, зокрема DGN та DWG, що вирішує проблеми сумісності даних.

Це сприяє ефективному обміну даними між різними програмними забезпеченнями.

Це робить систему надзвичайно гнучкою для проектування в різних секторах промисловості.

Також слід відзначити високу точність, забезпечену механізмом моделювання твердотільної геометрії Parasolid, що гарантує найкраще тривимірне моделювання.

Крім цього, MicroStation надає широкі можливості спільної роботи над проєктами, включаючи підтримку кількох моделей в одному проєкті та можливість зв'язування зовнішніх файлів.

Це дозволяє кільком членам команди одночасно працювати над проєктом, забезпечуючи зручний обмін інформацією та узгодженість даних.

MicroStation був використаний для створення тривимірної моделі частини Ардівської ділянки, що включає 14 геологічних розрізів та карти геологічної поверхні.[4]

На базі цієї моделі можна додати дані хмари точок для формування точної та інформативної моделі для подальших геологічних та інженерних досліджень (Рис. 8).

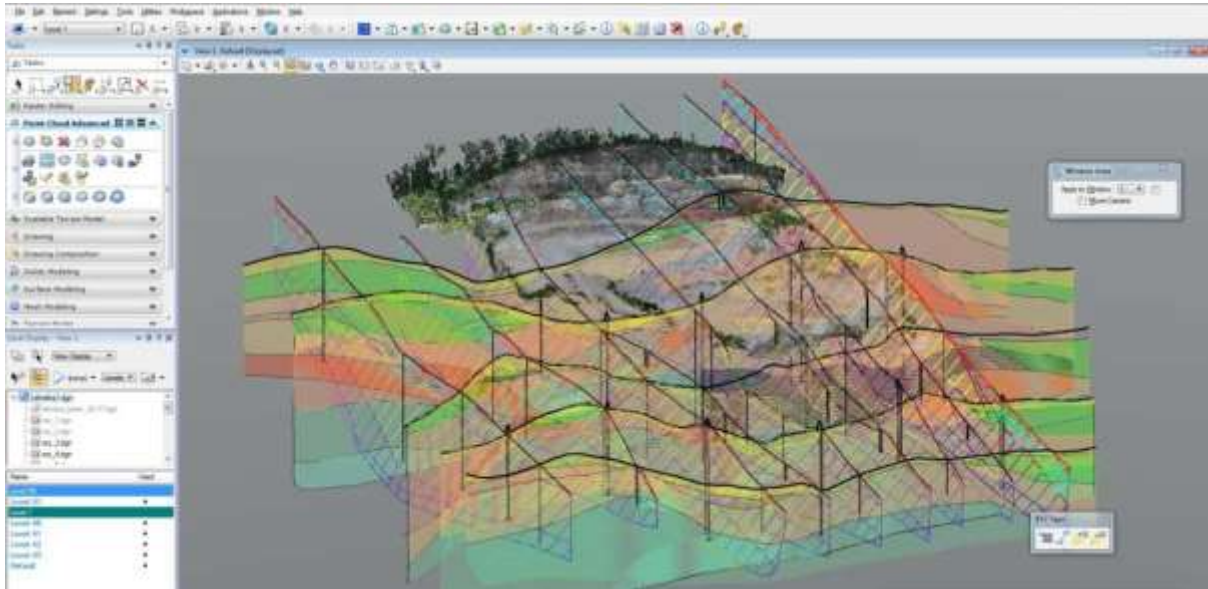


Рисунок 8. Порівняння хмари точок, обробленої в програмному забезпеченні САПР.

Об'єднання двох типів представлення даних – тривимірної моделі конкретної ділянки родовища та текстурної хмари точок – відкриває можливості для ретельного оцінювання точності та відповідної якості створеної моделі.

Хмари точок, сформовані на основі аерофотознімків, що несуть у собі текстурну інформацію (RGB-моделі), формують детальну, рельєфну поверхню, що дає змогу більш наочно відобразити геологічну будову нафтоносного району.[4]

Застосовуючи цей підхід, хмара точок стає інструментом для створення розрізів геологічних шарів покладу (див. Рис. 8), забезпечуючи високу візуалізацію та детальний аналіз геологічних властивостей родовища.

Відповідність історичних гіпотез стосовно геологічної структури з фактичними даними, зібраними на місцевості (Див. Рисунок 9).

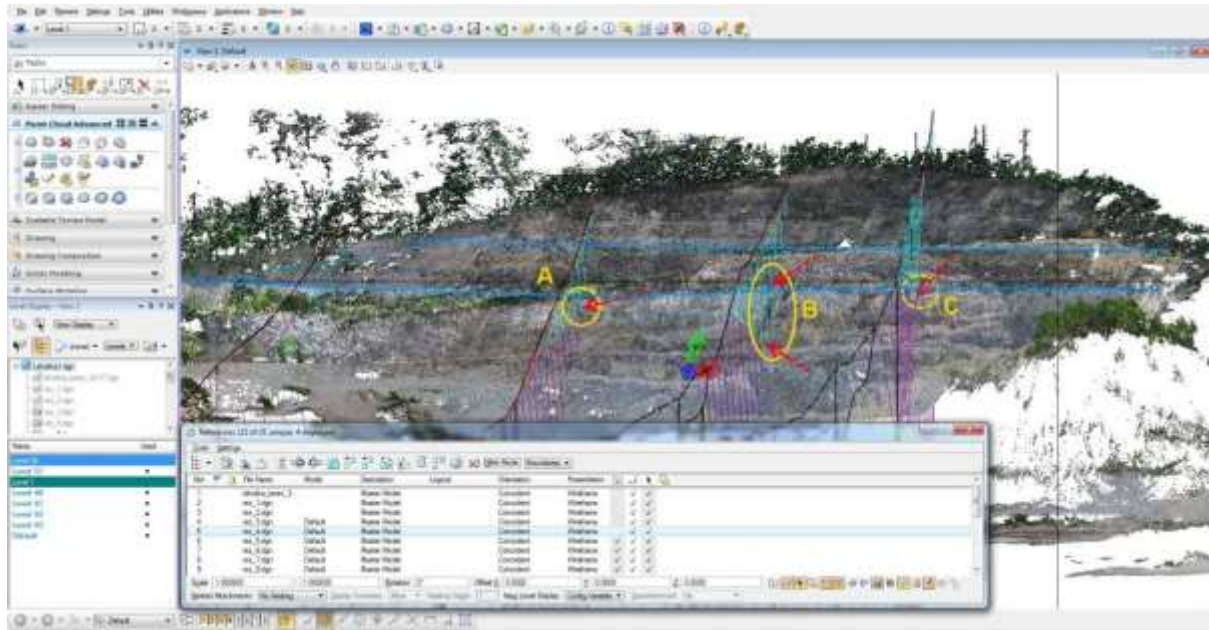


Рис. 9. Співвідношення моделей геологічної будови родовища корисних копалин.

Інтегровані дані сприяють уточненій оцінці геологічних процесів, допомагають знаходити поклади корисних копалин та ефективно планувати геологічну розвідку і розробку родовищ.

Поєднання 3D-моделей з текстурованими хмарами точок використовує сильні сторони цифрових моделей та реалістичних аерофотознімків, значно підвищуючи точність геологічних досліджень.

Це забезпечує глибше розуміння геологічної структури родовища корисних копалин, критичне для планування видобутку та подальшої переробки сировини.

Окрім геодезичних і фотограмметричних даних, для створення таких моделей необхідна висока точність GPS-координат.[4]

GPS-координати визначають точне положення кожної точки на місцевості; використання таких технологій, як GNSS RTK, гарантує високу точність та деталізацію створених моделей, а також дозволяє враховувати геологічні особливості.

Ці інтегровані 3D-моделі важливі не лише для аналізу поточного стану родовища, але й для прогнозування змін у геологічній структурі в майбутньому.

Дані хмар точок можна використовувати у поєднанні з геологічними розрізами для виявлення структурних змін, які не видно на перший погляд, та створення детальної геологічної документації.

Ці методи мінімізують імовірність помилок, властивих традиційному картографуванню та польовим вимірюванням.

Вони також економлять час, кошти та підвищують ефективність польових робіт.

Подальший аналіз та порівняння традиційних та фотограмметричних моделей виявляє відмінності в геологічних структурах та підвищує точність майбутніх геологічних досліджень.

Оскільки сучасні технології дозволяють зібрати значно більший обсяг даних, ніж раніше, фотограмметрія відкриває нові можливості для створення точніших моделей порівняно з традиційними методами картографування.

Варто зазначити, що, незважаючи на більшу точність фотограмметричних моделей, геологічні карти і розрізи, отримані в минулому, можуть не завжди збігатися з новими даними через використання застарілих методів збору інформації та обмеження точності картографування.[4]

Тому порівняння двох моделей, отриманих різними способами, є ключовим кроком у визначенні точності та надійності геологічної інформації.

Однією з основних функцій фотограмметричних методів є створення цифрових моделей поверхні з високою роздільною здатністю, які дозволяють геологам проводити точніші вимірювання в районах, де фізичний доступ для спостережень обмежений або відсутній.

Це надає інформацію, недоступну раніше для точних вимірювань, та зменшує час і зусилля, витрачені на польові дослідження.

Всі ці переваги особливо актуальні у великих геологічних формаціях, як-от осадові породи, де застосування традиційних методів обмежене.

Це також важливо для планування гірничих та інших геологічних робіт, оскільки дозволяє більш детально оцінити геологічну структуру родовища, що може збільшити ефективність та знизити ризики.

Ще важливіше, інтеграція різноманітних даних, таких як геодезичні точки, фотограмметричні зображення, текстуровані хмари точок та цифрові моделі поверхні, дозволяє створювати комплексні та точні геологічні моделі.

Висновок

Застосування фотограмметрії та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) являє собою справжню революцію в геологічних розвідках, особливо при зйомці важкодоступних або великих за розміром геологічних об'єктів, таких як природні або штучні виходи гірських порід.

Такі способи дозволяють суттєво покращити точність та результативність збору інформації, що є вкрай важливим для подальшого аналізу геологічних структур.

Шляхом обробки фотограмметричних матеріалів за допомогою програмного забезпечення Agisoft PhotoScan було сформовано фотокарти виходів гірських порід, текстуровані хмари точок і цифрові моделі рельєфу, які лягли в основу перевірки та уточнення наявних геологічних моделей.

Геологи отримали можливість зіставити попередні дані з новою фотограмметричною інформацією, оцінити вірогідність попередніх геологічних припущень та глибше розібратися в будові родовища.

Це відіграє важливу роль у більш точному визначенні геологічної структури, плануванні видобутку та документуванні геологічних перетворень.

Порівняння геологічних структур із різноманітних джерел даних може значно покращити розуміння геологічних умов на певній ділянці та оцінити ступінь вірогідності моделей.

Використання недорогих БПЛА та камер для збору точних геологічних та геодезичних даних значно розширило горизонти досліджень, які раніше обмежувалися віддаленими і важкодоступними регіонами.

Методи аерофотограмметрії, що використовуються спільно з БПЛА, продемонстрували та підтвердили високу якість та детальність отриманих моделей.

Завдяки передовим математичним принципам цифрової фотограмметрії та спеціалізованому програмному забезпеченню моделі досягають необхідної точності і є надзвичайно корисними для геологічних досліджень та документації складних геологічних утворень.

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. Blistan, Peter & Kovanič, Ľudovít & Zelizňaková, Vladislava & Palková, Jana. (2016). Using UAV photogrammetry to document rock outcrops. *Acta Montanistica Slovaca*. 21. 154-161.

5. Пуканська, К., Бартош, К. та Сабова, Я.: Порівняння результатів дослідження кар'єру Спішське Томашовце за допомогою фотограмметрії та наземного лазерного сканування. У: *Inžynieria Mineralna*. Том 33, № 1 (2014), с. 47-54.

6. Шахбазі, М., Сон, Г., Тео, Ж. та Менар, П.: Розробка та оцінка системи БПЛА-фотограмметрії для точного 3D-моделювання навколишнього середовища; *Sensors* (Швейцарія), том 15, 2015, випуск 11, сторінки 27493-27524.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**«Аналіз точності цифрових моделей поверхні гірських порід,
отриманих за допомогою фотограмметрії БПЛА»**

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)