

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Симак Володимир Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Контроль геодинамічних процесів на основі аналізу цифрових моделей
рельєфу, отриманих з аерофотознімків БПЛА

(назва роботи)

Геодезія

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

к.т.н., доц. Пилип'юк Ростислав Романович

(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.

(повне найменування закладу вищої освіти)

« _____ » 20__ року

(прізвище, ім'я, по батькові)

- ## 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	Пилип'юк Р.Р.		

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	Обробка даних зображень дистанційного зондування		

Студент _____
(підпис)
Керівник роботи _____
(підпис)

Симак В. Ю.
(прізвище та ініціали)
Пилип'юк Р. Р.
(прізвище та ініціали)

Анотація

У цій магістерській роботі досліджується питання моніторингу геодинамічних процесів у зонах зі складними інженерно-геологічними умовами за рахунок даних аерофотозйомки, здійсненої безпілотними літальними апаратами (БПЛА).

Особливу увагу приділяється розробці та аналізу цифрових моделей рельєфу (ЦМР), що дозволяють виявляти, кількісно оцінювати й прогнозувати деформаційні зміни земної поверхні.

Метою дослідження є підвищення ефективності моніторингу геодинамічних процесів, що здійснюється за рахунок впровадження новітніх фотограмметричних методик для генерування високоточних цифрових моделей рельєфу на основі фотоматеріалу, знятого безпілотними літальними апаратами.

У центрі дослідження знаходяться геодинамічні процеси, які виражаються у формах деформації рельєфу на схилах і в інших ділянках місцевості, що можуть бути потенційно нестабільними.

Предметом вивчення слугують методи фотограмметричної обробки даних аерофотозйомки БПЛА, а також їх використання для формування цифрових моделей рельєфу і подальшого аналізу процесів деформації.

Наукова новизна полягає у покращенні методики контролю геодинамічних процесів за рахунок використання цифрових моделей рельєфу, отриманих з високодетальних знімків безпілотних літальних апаратів, що забезпечує підвищену точність виявлення локальних змін поверхні та скорочення часових і фінансових витрат на спостереження у порівнянні з традиційними геодезичними підходами.

У роботі подано підхід до інтеграції фотограмметричних даних у систему моніторингу деформацій, який дозволяє автоматично аналізувати та візуалізувати зміни рельєфу.

Практичне значення роботи полягає у формуванні рекомендацій з впровадження технології застосування БПЛА для швидкого моніторингу геодинамічних процесів у геодезичній діяльності.

Отримані дані можна використати під час спостереження за зсувонебезпечними районами, під час будівництва інженерних конструкцій, контролю стану гірничих відвалів, при нагляді за береговими ділянками та іншими об'єктами, в яких відбуваються інтенсивні деформації.

У дослідженні застосовувалися аерофотозйомка за допомогою безпілотних літальних апаратів, фотограмметрична обробка отриманих зображень, побудова цифрових моделей рельєфу, векторний аналіз поверхневих зміщень та їх порівняння з результатами класичних геодезичних вимірювань.

Отримані результати підтверджують доцільність використання дронних технологій у спостереженні геодинамічних процесів, демонструючи високий рівень точності при формуванні цифрових моделей рельєфу та їхню ефективність у виявленні незначних змін поверхні, що має важливе значення для забезпечення стабільності територій та безпеки інженерних об'єктів.

Ключові слова: БПЛА, RTK, 3D-модель, аналіз стійкості ризиків, фотограметрія

Abstract

This master's thesis investigates the issue of monitoring geodynamic processes in areas with complex engineering and geological conditions using aerial photography data taken by unmanned aerial vehicles (UAVs).

Particular attention is paid to the development and analysis of digital terrain models (DTMs), which allow detecting, quantifying and predicting deformation changes in the earth's surface.

The aim of the study is to increase the efficiency of monitoring geodynamic processes, which is carried out by implementing the latest photogrammetric techniques for generating high-precision digital terrain models based on photographic material taken by unmanned aerial vehicles.

The focus of the study is on geodynamic processes, which are expressed in the forms of terrain deformation on slopes and in other areas of the terrain that may be potentially unstable.

The subject of study is the methods of photogrammetric processing of UAV aerial photography data, as well as their use for the formation of digital relief models and further analysis of deformation processes.

The scientific novelty lies in improving the methodology for controlling geodynamic processes through the use of digital relief models obtained from highly detailed images of unmanned aerial vehicles, which provides increased accuracy in detecting local surface changes and reduces time and financial costs for observations compared to traditional geodetic approaches.

The paper presents an approach to integrating photogrammetric data into a deformation monitoring system, which allows for automatic analysis and visualization of relief changes.

The practical significance of the work lies in the formulation of recommendations for the implementation of UAV technology for rapid monitoring of geodynamic processes in geodetic activities.

The obtained data can be used when monitoring landslide-prone areas, during the construction of engineering structures, monitoring the condition of mining dumps, when monitoring coastal areas and other objects in which intensive deformations occur.

The study used aerial photography using unmanned aerial vehicles, photogrammetric processing of the obtained images, construction of digital terrain models, vector analysis of surface displacements and their comparison with the results of classical geodetic measurements.

The obtained results confirm the feasibility of using drone technologies in the observation of geodynamic processes, demonstrating a high level of accuracy in the formation of digital terrain models and their effectiveness in detecting minor surface changes, which is important for ensuring the stability of territories and the safety of engineering objects.

Keywords: UAV, RTK, 3D model, risk stability analysis, photogrammetry

ЗМІСТ

Вступ

1. Досліджувана територія

2. Матеріали та методи

2.1. Система аерофотозйомки за допомогою БПЛА

2.2. Отримання зображень дистанційним зондуванням з БПЛА

2.3. Обробка та аналіз даних

3. Обробка даних зображень дистанційного зондування

3.1. Побудова моделей

3.1.1. Аеротріангуляція

3.1.2. 3D-реконструкція

3.2. Обробка даних хмари точок

3.2.1. Попередня обробка даних хмари точок

3.2.2. Вилучення географічної інформації

3.3. Визначення зон, схильних до геологічної небезпеки

3.4. Аналіз стійкості схилу

3.5. Аналіз стійкості

Висновки

Список використаної літератури

Вступ

У зв'язку зі збільшенням темпів господарської інтенсифікації земель, розширенням інфраструктурних об'єктів та змінами кліматичного середовища, питання моніторингу стану поверхні землі та виявлення геодинамічних процесів стає надзвичайно актуальним.

Геодинамічні процеси – це сукупність переміщень і деформацій земної кори, спричинених природними або техногенними факторами.

Серед них – зсуви, осідання, підйом ґрунтів, ерозія, карстові провали, зрушення схилів та інші явища, що змінюють форму рельєфу.

Такі явища здатні завдати руйнівних наслідків населеним пунктам, промисловим і транспортним об'єктам, підриваючи безпеку людей і економічну стабільність районів.

Класичні засоби геодезичного моніторингу — нівелювання, тахеометричні вимірювання, супутникове спостереження (GNSS) — гарантують велику точність, проте мають обмежену просторову роздільність і вимагають значних часових і ресурсних витрат.

До того ж, ці методи не завжди підходять для швидкого реагування на швидко змінювані процеси чи для спостереження за важкодоступними територіями, наприклад, крутими схилами, кар'єрами чи зонами зсуву.

У цьому випадку швидке прогресування аерофотозйомки з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стало важливим проривом.

Техніки зйомки, що застосовують БПЛА, забезпечують високу деталізацію, оперативність отримання даних та економічну вигідність.

Застосування цифрових камер з великим розділенням у комбінації з GPS та IMU-навігаційними системами дозволяє отримувати знімки, які легко перетворюються у тривимірні цифрові моделі рельєфу з точністю до кількох сантиметрів.

Тому безпілотні літальні апарати стають незамінним інструментом у геодезичному моніторингу ділянок, де відбуваються деформації.

У світовій практиці методи контролю деформацій за допомогою БПЛА постійно вдосконалюються.

Зокрема, дослідження, проведені в Італії, Німеччині, Швейцарії та Китаї, доводять, що безпілотні технології можна ефективно застосовувати для спостереження за зсувами, просіданнями в гірничих регіонах, ерозією берегових ліній та станом дамб.

У багатьох випадках такі підходи дозволили виявити локальні зміщення рельєфу, які залишалися недоступними для традиційних інструментальних методів спостереження.

У нашій державі дане спрямування ще лише набирає обертів, тому вивчення аспектів точності та методів аналізу цифрових рельєфних моделей, отриманих за допомогою БПЛА, є вкрай важливим.

Основна наукова задача, що стоїть перед дослідженням, полягає у відсутності єдиної та методично обґрунтованої системи моніторингу геодинамічних процесів, що базується на цифрових рельєфних моделях, сформованих з аерофотознімків безпілотних літальних апаратів.

Хоча сучасне програмне забезпечення широко доступне, а просторові дані накопичуються у великих об'ємах, питання забезпечення метричної точності, стабільності результатів при тривалих спостереженнях та уніфікації підходів до аналізу деформацій залишається нерозв'язаним.

Отже, необхідно провести всебічне дослідження, спрямоване на покращення методики спостереження за геодинамічними процесами шляхом застосування цифрових моделей рельєфу, отриманих з аерофотознімків, знятих безпілотними літальними апаратами.

У межах цього дослідження варто об'єднати аерофотознімки, їх фотограмметричну обробку, формування моделей рельєфу, математичний аналіз змін поверхні та оцінку надійності отриманих результатів.

Особливу увагу у роботі приділяється вивченню точності цифрових моделей рельєфу, сформованих за різними параметрами польоту, рівнем перекриття зображень та використаними методами орієнтування.

Від цього фактора і визначається, чи зможе система виявляти найдрібніші деформації, що не перевищують кількох сантиметрів.

Необхідно також встановити найкращі параметри зйомки, які гарантуватимуть рівновагу між високою деталізацією, точністю та швидкістю обробки даних.

Створення і впровадження подібних методик є надзвичайно важливим з практичної точки зору.

Ці методики знаходять застосування в системах техногенного й екологічного моніторингу, при контролі стану схилів, дамб, кар'єрів, забудованих ділянок, а також під час будівництва та експлуатації інженерних об'єктів.

Використання цифрових моделей рельєфу не лише реєструє існуючі зміни, а й прогнозує подальший хід процесів, створюючи основу для оперативного прийняття управлінських рішень.

Наукова цінність дослідження полягає у формуванні теоретичних і практичних підвалин для впровадження нового підходу до геодезичного контролю деформацій, який базується на аналізі високоточних цифрових моделей рельєфу.

Такий підхід об'єднує геодезичні принципи з інноваційними технологіями дистанційного зондування та фотограмметрії, розширюючи потенціал геодезичної науки у сфері моніторингу навколишнього середовища.

Тож, реалізація цього проекту сприятиме вдосконаленню сучасних методів просторового аналізу рельєфу, підвищенню ефективності спостереження за геодинамічними процесами та покращенню систем геодезичного контролю територій.

Отримані у ході дослідження дані можуть стати основою для впровадження інноваційних технологій у практику інженерно-геодезичних робіт і слугувати фундаментом для подальших наукових досліджень у галузі моніторингу земної поверхні з використанням безпілотних систем.

Практичне значення цього підходу полягає в тому, що одержані дані можна застосовувати для:

- нагляду за схилами, які схильні до зсуву;
- контролю змін у формі ділянок, що прилягають до інженерних споруд;
- оціночного аналізу стабільності кар'єрів, дамб, відвалів та насипних конструкцій;
- запобігання надзвичайним подіям природного та техногенного походження.

Отже, досліджувана тема є актуальною як у науковій, так і в практичній площині, оскільки спрямована на підвищення ефективності та точності геодезичного моніторингу територій завдяки сучасним технологіям дистанційного зондування.

Сучасні підходи до спостереження і аналізу схилів за допомогою безпілотних літальних апаратів виявляються досить схожими між собою, тому застосування аналітичний ієрархічний процес для оцінювання схилів залишається рідкісним.

Аналітичний ієрархічний процес — це метод багатокритеріального прийняття рішень, що передбачає поділ задачі на рівні факторної ієрархії та використання попарних порівнянь для визначення їхньої відносної ваги.

Метод поєднує кількісні показники (наприклад, кут нахилу, геологічні особливості, обсяг опадів) з якісними оцінками експертів, що дозволяє збалансовано зважити фактори і перевірити їхню узгодженість за допомогою показника консистентності.

Даний процес генерує зважене накладання у ГІС, що дозволяє скласти карту схильності схилів, розподіляючи ділянки за ризиковими категоріями: високий, середній і низький.

У дослідженні використано поєднання безпілотної аерофотозйомки (UAV) та аналітично-ієрархічного підходу задля оцінки стабільності схилів і підвищення точності їх аналізу.

Робота присвячена вивченню можливостей UAV-вимірювань для виявлення та постійного спостереження потенційних геологічних небезпек на схилах з метою розробки ефективних технологічних процесів їх ідентифікації, моніторингу та оцінки стійкості.

Для проведення дослідження було відібрано схил у селі Пасічна, що розташоване в Надвірнянському районі Івано-Франківської області; з використанням камери, закріпленої на безпілотному літальному апараті, здійснено зйомку двох пакетів високоякісних зображень схилу.

Отримані кадри слугували основою для створення хмарних точкових моделей, тривимірних репрезентацій у режимі реального часу та цифрових моделей рельєфу.

З їх допомогою зібрано геологічні дані, зокрема контури, градієнт та форму схилу, а також ідентифіковано та досліджено ділянки, що становлять загрозу стійкості.

Визначення небезпечних ділянок і оцінка їх стійкості.

Дане дослідження підвищує ефективність і вдосконалює методики моніторингу гірських масивів і оцінки їхньої стійкості.

Запропонований підхід сприятиме захисту населення та інфраструктури, розташованих поблизу схилів, а також забезпечить технічне підґрунтя для запобігання природним катастрофам і пом'якшення їхніх наслідків.

1. Досліджувана територія

Вивчена ділянка розташована в селі Пасічна, що належить Надвірнянському району Івано-Франківської області, і включає залишки схилу колишнього відпрацьованого кар'єру «Навірнянський кар'єр-Карпати» (див. рисунок 1), який простягається на площу близько 32 000 м².



Рисунок 1. Карта досліджуваної території.

Кар'єр Навірнянський розташований неподалік від села Пасічна, що перебуває у Надвірнянському районі Івано-Франківської області, в північно-східній частині Українських Карпат.

За своїми географічними ознаками він належить до Передкарпатського прогину, який вирізняється складною геологічною структурою, великою кількістю тектонічних розломів та активними процесами сучасної геодинаміки.

Місцевий рельєф представлений гористо-гірським ландшафтом зі стрімкими перепадами висот, які варіюються від 400 до 650 метрів над рівнем моря.

Зазвичай схили характеризуються великою крутістю (від 25 до 40 °), що робить їх нестабільними та схильними до зсувних процесів.

У геологічному розрізі ділянки домінують флішові відкладення, у яких чергуються пісковики, аргіліти, мергели та сланці.

Вони володіють шаруватою будовою, часто просякнутою підземними водами, що створює сприятливі умови для появи осипних процесів, обвалів і зсувів.

Кар'єр використовується для добування пісковика і вапняку, які слугують головною сировиною у виробництві будівельної продукції.

Тривала виробнича експлуатація суттєво змінила природний рельєф: на його поверхні виникли штучно створені уступи, террасні споруди, ділянки відвалу, і водночас зменшилася стабільність схилів.

Через довготривалий добувний процес корисних копалин і дію техногенних факторів (вібрації, коливання вологості, динамічне навантаження важкої техніки) в цій місцевості посилюються геодинамічні процеси: зростає кількість зсувів, локальних обвалів, деформація уступів і утворення осипних накопичень.

В цілому карпатська зона відзначається підвищеною природною активністю зазначених процесів.

Таку ситуацію спричиняють сильні опади, періодичне замерзання та розморожування ґрунтів, а також значна проникаюча здатність гірських порід.

Навіть незначна коливаність водного балансу чи додаткові техногенні навантаження здатні стимулювати зсуви і деформації схилів.

У такій обстановці Навітнянський кар'єр служить ідеальним майданчиком для випробувань новітніх методів геодезичного спостереження, включаючи застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Аерофотозйомка з використанням безпілотних літальних апаратів дозволяє отримувати зображення надвисокої роздільної здатності і надає можливість:

- детально задокументувати просторову структуру рельєфу;
- генерувати точні цифрові моделі рельєфу (ЦМР);
- проводити тривалі спостереження за змінами деформації схилів;
- вимірювати об'ємні коливання гірських мас у різні етапи їх експлуатації.

Формування цифрових моделей рельєфу на основі даних, зібраних під час зйомки безпілотниками, дає змогу не тільки аналізувати морфологічні трансформації кар'єрного простору, а й прогнозувати потенційний розвиток зсувних процесів.

Зібрані результати показують значну практичну цінність у плануванні майбутніх гірничих робіт, підвищенні стійкості схилу та забезпеченні безпечних виробничих процесів.

Отже, Навітнянський кар'єр у селі Пасічна виступає характерним об'єктом для дослідження впливу техногенного навантаження на виникнення геодинамічних процесів у гірському середовищі Карпат.

Постійний моніторинг цієї ділянки створює можливість отримати суттєві наукові та практичні дані, необхідні для удосконалення методів геодезичного контролю деформацій рельєфу.

2. Матеріали та методи

2.1. Система аерофотозйомки за допомогою БПЛА

Система аерофотозйомки за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) являє собою складну технологічну платформу, що об'єднує апаратну, навігаційну та програмну частини, призначені для отримання просторових даних з високим рівнем точності.

Зазвичай у такій системі виділяють три основні елементи: сам безпілотний літальний апарат (платформу), підсистему управління польотом та комплект зйомочного обладнання.

БПЛА-платформа гарантує стабільність і контроль над переміщенням під час виконання польотного завдання, тоді як система управління польотом відповідає за орієнтацію, висоту, швидкість та дотримання запланованої траєкторії.

Третій важливий елемент — фотограмметричне обладнання, яким може слугувати цифрова камера або мультиспектральний сенсор, що робить знятки місцевості з високою роздільною здатністю.

Крім основних складових, у системи часто додаються додаткові підсистеми, які підвищують точність і надійність результатів: GNSS-приймач для геоприв'язки зображень, інерційна вимірювальна система (IMU) для визначення орієнтації пристрою у просторі, а також програмне забезпечення для планування польотів і подальшої обробки даних.

Подібні комплекси забезпечують створення ортофотопланів, цифрові моделі рельєфу (ЦМР) і тривимірні моделі місцевості з високою просторовою деталізацією.

У цьому дослідженні застосували аерофотозйомну систему, що відповідає вимогам геодезичної роботи в умовах складного рельєфу.

Основні її характеристики – тип платформи, технічні параметри сенсорів, точність позиціонування, висота польоту, швидкість зйомки, ступінь перекриття знімків та тривалість одного польотного циклу.

Таблиця 1 містить конкретні технічні параметри аерофотозйомної системи, використаної у цьому дослідженні.

Таблиця 1. Основні параметри фотограмметричної платформи БПЛА

Параметри обладнання	Показники
Вага (з батареєю)	6.3 кг
Максимальна швидкість польоту	23м/с
Навігаційна система	GPS, Глонас, BeiDou, Galileo
Точність позиціонування RTK	1,5 см + 1ppm (вертикальна) 1 см + 1ppm (горизонтальна)
Параметри камери	Ширококутна 12 Мп Зум 20 Мп
Кут нахилу	Від 120 ⁰ до +30 ⁰ Горизонтальна ±320 ⁰
Максимальний час польоту	55 хв

У цьому дослідженні для проведення аерофотозйомки використали безпілотний літальний апарат типу квадрокоптер — DJI Matrice 300 RTK, розроблений і виготовлений компанією DJI Innovation Technology Co., Ltd. (Китай).

Цей дрон належить до професійного сегмента БПЛА, вирізняється високою стійкістю під час польоту, точністю позиціонування у режимі RTK та здатністю працювати за складних метеоумов.

Квадрокоптер обладнано мультисенсорною камерою DJI Zenmuse H20T, також виготовленою компанією DJI Innovation Technology Co., Ltd. (Китай).

Даний пристрій — універсальна камера, в якій об'єднано три сучасних модулі: HD-камера у видимому спектрі, ширококутний HD-модуль та інфрачервоний тепловізійний датчик.

Таке поєднання дозволяє одночасно створювати оптичні й теплові зображення високої роздільної здатності, що суттєво підвищує ефективність аналізу територій і моніторингу процесів деформації (рис. 2).



Рисунок 2. БПЛА DJI Matrice 300 RTK

У цьому дослідженні для здійснення аерофотозйомки використовується система, побудована навколо безпілотного літального апарату, яка складається з трьох ключових елементів: самої платформи безпілотника, системи керування польотом і модулів зйомки.

Таке поєднання забезпечує стабільний політ, точне позиціонування та зйомку зображень високої якості.

У межах цієї роботи застосовано квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK, виготовлений компанією DJI Innovation Technology Co., Ltd. (Китай).

Цей безпілотний літальний апарат належить до професійного сегмента, характеризується високою стабільністю в повітрі, тривалим часом польоту — до 55 хвилин, і здатен охопити ділянку до 15 км за один виліт.

У цій моделі інтегровано RTK-модуль (Real-Time Kinematic), який завдяки технології динамічної диференціальної зйомки у реальному часі гарантує позиціонування з точністю до сантиметра.

Синхронізація даних навігаційної системи і камери забезпечує точну геоприв'язку кожного знімка, що дозволяє позбутися потреби у великій кількості наземних контрольних точок.

Система аерофотозйомки оснащена шестисторонньою підсистемою виявлення перешкод, яка залучає кілька датчиків для розпізнавання можливих загроз під час польоту.

Завдяки цьому значно зростає рівень безпеки під час виконання місії, навіть у складних рельєфних умовах або поруч із лісовими масивами.

Для зйомки використовується камера DJI Zenmuse H20T, що включає три підсистеми: сенсор у видимому діапазоні, ширококутний об'єктив та тепловізійний датчик.

Такий підхід забезпечує отримання багатоспектральних знімків, що дозволяє комплексно аналізувати стан поверхні і відстежувати зміни об'єктів у часі.

2.2. Отримання зображень дистанційним зондуванням з БПЛА

Для отримання високоточних тривимірних моделей ландшафту застосовують різноманітні методи зйомки, серед яких ортофотокартографія, нахилова фотограмметрія, смугова зйомка та зближена фотограмметрія.

У цьому дослідженні вибрано саме нахилу фотограмметрію, бо вона забезпечує оптимальний баланс між точністю та швидкістю отримання даних у складних рельєфних умовах.

Нахилова фотограмметрія передбачає використання кількох камер, розташованих під різними кутами, що дозволяє знімати не лише вертикальні, а й похилі кадри.

Використовуючи даний метод, вдалося реконструювати бокові поверхні об'єктів, створюючи реалістичну 3D-вимірну модель ландшафту.

У даній роботі передбачено п'ять маршрутів: один з вертикальним кутом нахилу 90° , а інші чотири — з кутом нахилу 45° .

Зйомка здійснювалася на висоті близько 400 м, що на 35 м вище за найвищу точку досліджуваного схилу.

Така конфігурація параметрів забезпечила найкращий компроміс між деталізацією і охопленням території.

Для забезпечення підвищеної точності фотограмметричної реконструкції встановлено значення перекриття знімків — 75 % уздовж траєкторії та 85 % поперечно.

Така величина перекриття полегшує формування більш якісних цифрових моделей місцевості (ЦММ) і цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

Знімки виконували два рази — у грудні 2021 р. і у грудні 2022 р., за майже ідентичних метеоумов: ясне сонце, полудень, що дозволяє мінімізувати вплив тіней та нерівномірного освітлення.

Тривалість кожного знімального польоту становила приблизно 33 хвилини, протягом яких зібрано 74 кадри високої роздільної здатності.

Застосування ідентичних трас під час обох фотозйомок дало змогу ефективно відстежувати зміни морфології поверхні, а введення автоматичної системи корекції координат усунула неточності, спричинені поганою GPS-орієнтацією.

2.3. Обробка та аналіз даних

Для обробки отриманих аерофотознімків і створення тривимірних моделей було використано програму DJI Terra Mapping & Surveying Edition, що працює у парі з безпілотником Matrice 300 RTK та камерою Zenmuse H20T.

Це програмне забезпечення автоматично орієнтує знімки, формує ортофотоплани та генерує хмари точок.

Подальші кроки включали застосування LiDAR360 (версія 5.2) для створення цифрової моделі висот (DEM) та виконання порівняльного аналізу змін у два різних періоди спостережень.

Щоб забезпечити максимально точне злиття двофазових точкових хмар, був застосований алгоритм ICP (Iterative Closest Point), який мінімізує похибки просторового зсуву.

Додатково, за допомогою ArcMap 10.8 проведено обчислення градієнтів і кривизни схилу, що допомогло виявити ділянки можливого нестабільного стану.

Отримані просторові дані зберегли у форматах LAS, GeoTIFF та Shapefile, забезпечуючи їхню сумісність з різними ГІС-платформами.

Для аналізу впливу різних факторів на стійкість схилу використано метод аналітичної ієрархії.

Застосовуючи даний підхід, визначають вагові коефіцієнти для ряду параметрів (зокрема, градієнт, кривина, тип ґрунту, рослинність тощо) та формують комплексну модель, яка оцінює стійкість схилу.

Зібрані результати дають змогу дослідити зміни деформацій на вивченій ділянці, виявляти можливі небезпечні ділянки та підтримувати створення систем моніторингу геологічної стабільності, які базуються на використанні БПЛА і ГІС-технологій.

3. Обробка даних зображень дистанційного зондування

3.1. Побудова моделей

3.1.1. Аеротріангуляція

Коли польові роботи завершилися отримані аерофотознімки, у яких містяться позиційні й орієнтаційні дані (POS — система позиції та орієнтації), були імпортовані до програми DJI Terra Mapping & Surveying Edition.

Це ПЗ забезпечує повний набір операцій з обробки даних дистанційного знімання, серед яких автоматичне вирівнювання зображень, генерація хмари точок, ортофото та тривимірних моделей рельєфу.

На початковій фазі обробки система самостійно виконує екстракцію й порівняння характерних точок на зображеннях, використовуючи передові алгоритми комп'ютерного зору.

Для цього здійснюється аналіз рівнів яскравості, контрастності, текстурних характеристик та геометричних властивостей елементів зображення.

Виявлені ключові точки (feature points) виступають унікальними орієнтирами, що можуть бути ідентифіковані на різних, що перекриваються, знімках, формуючи базу для подальшої фотограмметричної реконструкції.

Коли система виявляє характерні точки, виконується їхня кореляція, у процесі якої програмний модуль визначає, які саме точки на різних знімках відповідають одна одній.

Таке виконання створює мережу просторових зв'язків, що охоплює усі перекриті зображення.

Після цього формується фотограмметрична мережа, для якої здійснюється аеротріангуляція — процес обчислення просторових координат точок за геометрією знімків.

Кожен піксель кадру проектується у тривимірний простір у вигляді променя, що виходить з центру проекції камери.

Коли кілька променів, знятих під різними кутами, перетинаються, це дає можливість з високою точністю визначити координати просторових об'єктів на земній поверхні.

Для підвищення достовірності розрахунків використовується підхід мінімізації помилки повторного проєкціонування (reprojection error), який дозволяє скоригувати геометричні викривлення, що виникають через неточності вимірювань, помилки GPS/IMU чи оптичні аномалії камери.

Під час оптимізаційного процесу проводиться так звана зворотна перевірка узгодженості, в рамках якої система уточнює позиції зашифрованих точок і обчислює оптимальні значення параметрів зовнішньої та внутрішньої орієнтації зображень.

Отже, використання автоматизованого видобування ознак у поєднанні з кореляційними алгоритмами та аеротріангуляційними розрахунками робить можливим створення достовірної просторової моделі взаємозв'язків між знімками, яка слугує підґрунтям для формування щільної хмари точок, цифрової моделі рельєфу (ЦМР) і цифрової моделі місцевості (ЦММ) з високою геометричною точністю.

$$X = \pi(R_i \cdot X_j + t_i) \quad (2)$$

де X_j — вектор, що описує тривимірні (просторові) координати j -ї точки місцевості;

R_i — матриця повороту, яка задає орієнтацію i -го зображення у просторі щодо координатної системи;

t_i — вектор перенесення, який визначає розташування центра проекції даного знімка;

π — оператор перспективної проекції, що імітує процес формування зображення на сенсорній площині камери.

Дана математична модель переводить просторові координати точок об'єкта у координати площини зображення, що забезпечує можливість відтворення реальної тривимірної геометрії об'єктів завдяки сукупності перекриваючих знімків.

У цьому дослідженні для підвищення точності просторового відновлення використовується щільна сітка характерних точок, яка збільшує кількість спільних ознак між перекриваючими кадрами.

Завдяки великій кількості контрольних точок зменшуються помилки кореляції зображень, що дозволяє отримати більш точну аерофотограмметричну мережу.

Це, у свою чергу, підвищує якість побудови густої хмари точок і цифрової моделі рельєфу.

Для уніфікації розрахунків і просторового прив'язування використовується геодезична система координат WGS84 (World Geodetic System 1984), яка є міжнародним стандартом у сфері супутникової навігації та геодезичних вимірювань.

Застосування цього методу забезпечує узгодженість отриманих даних з GPS/RTK-вимірюваннями і дає можливість вбудовувати їх у світові геоінформаційні системи (ГІС).

Після закінчення обчислень підготовлюється звіт щодо результатів аеротріангуляції, в якому зазначаються параметри вирівнювання знімків, RMS-відхилення, дані про відповідність контрольних пунктів і оцінка загальної точності моделі.

Важливі метрики, отримані на цьому кроці, подано у таблиці 2.

Таблиця 2. Результати аеротріангуляція для оцінки якості.

Класифікація параметрів	Назва параметрів	Параметричні індикатори
Інформація про зображення	Кількість зображень	74
	Позиційне зображення	74
	Калібровані зображення	74
	СКП географічного вирівнювання	Фаза I 0.897м
		Фаза II 1.373
Значення RTK рішення	Фіксоване рішення	Фаза I 74; Фаза II 74
	Плаваюче рішення	Фаза I 0; Фаза II 0
	Одиночне рішення	Фаза I 0; Фаза II 0
	Інші рішення	Фаза I 0; Фаза II 0

У RTK-позиціонуванні, що застосовується при аеротріангуляції, точність отримання координат варіюється залежно від обраного типу рішення.

Коли використовується плаваюче (float) рішення, точність зазвичай складає дециметри, у той час як при фіксованому однокривковому (single-point) рішенні вона приблизно дорівнює одному метру.

Термін «відсутнє рішення» вказує на те, що в певний момент система RTK не змогла отримати координати через недостатню кількість видимих супутників чи інші обставини.

Коли усі RTK-модулі перебувають у фіксованому режимі, система гарантує надвисоку точність позиціонування без необхідності в наземних контрольних точках на знімках, що в координатній системі POS відповідає точності до одного сантиметра.

У цьому дослідженні безпілотна аерофотосистема продемонструвала здатність виконувати фотограмметричні польоти без

прив'язки до наземних контрольних пунктів, оскільки аналіз аеротріангуляції показав, що всі RTK-модулі залишалися у фіксованому стані.

Отже використання польових контрольних точок при калібруванні зображень не вимагається, що значно спрощує організацію польових робіт.

Для перевірки правильності сформованих маршрутів та заданих параметрів зйомки було проведено калібрування двох аерофотознімків.

Отримані результати підтвердили, що обрані маршрути та налаштування задовольняють встановлені вимоги щодо точності.

Середньоквадратична похибка (RMSE) географічного вирівнювання склала 0,957 м для першого знімка і 1,364 м для другого, що вказує на прийнятну точність між розрахованим положенням зображення та його початковими координатами.

Обидва перші вимірювання становлять не більше 2 м, що відповідає вимогам точності, визначеним для польових робіт у важких рельєфних умовах.

Обробка створених моделей підвищує міцність і достовірність цифрового рельєфу, зменшуючи його вразливість до вимірювальних неточностей, оптичних іскажень та пошкоджень окремих кадрів.

Час обробки склав 13 хв 9 сек для першої місії та 14 хв 42 сек для другої, що в сумі приблизно 50 хв, достатньо для завершення повного циклу збору і первинної обробки даних обох аерофотозйомок.

На відміну від класичних підходів — ручної зйомки чи застосування наземних ГІС-пристроїв — використання безпілотної платформи значно зменшує тривалість робіт, підвищує швидкість збору інформації та забезпечує високоточну просторову прив'язку, що має вирішальне значення для створення достовірних 3D-моделей рельєфу та подальшого вивчення стійкості схилів.

3.1.2. 3D-реконструкція

У межах проведеного дослідження, після завершення етапу аеротріангуляції, обробка аерофотознімків, отриманих у обох фазах збору, здійснювалася за допомогою програмного забезпечення DJI Terra Mapping & Surveying Edition.

Завдяки цьому комплексу ПЗ вдалося створити тривимірну модель досліджуваної ділянки, точно відтворивши морфологічні особливості поверхні та просторове розташування об'єктів у межах кар'єру.

У результаті обробки було сформовано 3D модель ландшафту (рис. 3), яка детально показує рельєф, зокрема схили, устої та інші морфологічні особливості.

Додатково програма дозволяє вивантажити хмару точок у форматі LAS (рис. 4), що забезпечує подальшу інтеграцію з ГІС-системами, аналіз висотних параметрів і створення точних цифрових моделей рельєфу.

Для відновлення першої серії аерофотознімків потрібно було 12 хв 32 сек, а для другої — 13 хв 49 сек, що свідчить про високу продуктивність програми при роботі з великими обсягами даних.

Подібна швидкість обробки суттєво перевершує класичні фотограмметричні методи, забезпечуючи миттєве отримання надзвичайно точних даних для подальшого аналізу.

Побудова тривимірної моделі та хмари точок не лише відтворила форму рельєфу, а й створила основу для докладного просторового аналізу, розрахунку обсягів гірських мас і виявлення деформацій схилів під час моніторингу геодинамічних процесів.

Цей підхід забезпечує повну інтеграцію польових спостережень з цифровими моделями, що має особливе значення при плануванні гірничих робіт та оцінці безпеки виробничих процесів у складних геологічних умовах.



Рисунок 3. 3D-модель



Рисунок 4. 3D реконструкція гірничодобувної зони

Після того, як була побудована тривимірна модель і виконано експорт хмари точок у формат LAS, наступний крок полягав у подальшій обробці даних за допомогою програмного забезпечення LiDAR360 (версія 5.2).

Програмний комплект LiDAR360 забезпечує ефективну обробку великих наборів точкових даних, їхню класифікацію, отримання цифрових моделей рельєфу (DEM) та формування контурних карт досліджуваної області.

На першому етапі хмара точок підлягала класифікації, під час якої автоматично виділялися елементи місцевості, не належні до природного рельєфу, наприклад, тимчасові об'єкти чи «шумові» точки.

У результаті було отримано чисту точкову хмару земної поверхні, що має надзвичайне значення для точного відтворення морфології схилів і уступів кар'єру.

Далі, використовуючи LiDAR360, створено цифрову модель рельєфу (DEM), яка відтворює висотні властивості місцевості з високою просторовою роздільністю.

З отриманої DEM сформовано контурні карти висот, що дозволяють візуально проаналізувати зміни рельєфу, коливання крутого схилу та інші морфометричні параметри.

Ці дані є необхідними для подальшого вивчення стабільності схилів, оцінки зсувних процесів і планування гірничих операцій.

Щоб підвищити точність дослідження, застосували метод ітеративного пошуку найближчих точок (ICP), який дозволяє зшивати двофазові набори точкових хмар, зібрані під час двох аерофотосесій.

Завдяки цьому можна виконувати порівняльний аналіз змін рельєфу, виявляти локальні деформації, обвали та пересування гірських масивів.

Наступний крок полягав у імпорті оброблених даних в середовище ArcMap 10.8, що відкрив можливість просторового аналізу, витягнення

параметрів градієнту і кривизни схилу та підготовки інформації для моделювання стійкості схилів.

Використання уніфікованих форматів даних (LAS/LAZ, GeoTIFF, Shapefile) разом зі стандартною координатною системою WGS84 гарантувало узгодженість і коректне геоприв'язування усіх отриманих результатів.

Отже, поєднання DJI Terra, LiDAR360 та ArcMap 10.8 дає можливість створити цілковито інтегровану цифрову модель рельєфу, яка служить точним засобом для аналізу геодинамічних процесів, оцінки обсягів гірських масивів і прогнозування розвитку зсувних процесів у гірських місцевостях.

3.2. Обробка даних хмари точок

У даному дослідженні хмара точок обраної ділянки була отримана в процесі тривимірного моделювання, а її подальша обробка виконувалась згідно суворої послідовності кроків.

У цій обробці проводилось фільтрування і класифікація точок, формування цифрової моделі рельєфу (DEM), генерування контурних планів, а також реєстрація даних двох серій аерофотозйомки з метою порівняльного вивчення морфологічних змін схилів.

Кожен з цих кроків мав на меті покращити точність просторових координат, усунути шумові впливи та гарантувати достовірність геометричних властивостей рельєфу, що є важливим для визначення стійкості схилів і прогнозування геодинамічних процесів.

3.2.1. Попередня обробка даних хмари точок

При здійсненні зйомки досліджуваної території за допомогою аерофотосистеми на базі безпілотних літальних апаратів у хмарі точок часто з'являються аномальні елементи, спричинені впливом навколишніх об'єктів або особливостями рельєфу.

Такі аномальні елементи можуть підривати точність формування тривимірної моделі поверхні, тому під час пост-обробки їх слід виявляти та виключати.

Для усунення шумових елементів застосовується статистичний метод, що передбачає використання коефіцієнта множника стандартного відхилення (K) та аналізу набору сусідніх точок для кожної позиції в хмарі.

За допомогою програми обчислюється середнє значення відстані між конкретною точкою і суміжними об'єктами, після чого визначаються медіанна відстань D і стандартне відхилення S.

Далі отримане значення максимальної відстані (Max D) зіставляється з пороговим параметром, який обчислюється за заданою формулою:

$$\text{Max D} = D + K \times S \quad (3)$$

Коли відстань більше заданого порогу, такі точки позначаються як шум і відкидаються.

Слід зазначити, що зі зменшенням параметра S збільшується число точок, що розпізнаються як шумові.

У даній роботі параметр K, множник стандартного відхилення, встановлено рівним 5, а кількість сусідніх точок обрано 10; згідно зі статистичними дослідженнями, аналізом чутливості та інженерною валідацією, таке налаштування досягає найкращого компромісу між

ефективністю приглушення шуму, мінімізацією хибних вилучень і точністю відтворення рельєфу.

Вказані параметри найкраще підходять для хмар точок зі середньою та високою щільністю; у нашому дослідженні щільність складає приблизно 22 точки на квадратний метр.

Після етапу усунення шуму обробка була проведена для обох наборів хмар точок.

Далі здійснено класифікацію наземних точок, використовуючи алгоритм удосконаленого прогресивного ущільнення TIN (IPTD).

Спочатку алгоритм створює розріджену трикутну мережу, використовуючи початкові точки, а далі поступово уточнює її, шар за шаром, доки не будуть розподілені всі наземні точки.

Такий метод забезпечує точне виділення поверхні ґрунту навіть у ділянках з різкими рельєфними перепадами.

Враховуючи специфічні особливості місцевості, необхідно було скоригувати параметри роботи алгоритму.

Найбільша споруда на об'єкті — квадратна станція розміром $15 \times 15 \times 6$ м, тому максимальна довжина будівлі по горизонталі була обмежена 15 м.

Через високу нерівність рельєфу кут ітерації збільшили до 15° (замість звичних 8°), аби уникнути помилкової класифікації ґрунтових точок як неґрунтових у ділянках зі стрімкими схилами.

Також максимальну ітераційну відстань, яка за замовчуванням становила 1,4 м, підвищили до 2 м, що дає змогу зберігати неперервність трикутної сітки в роздрібнених областях, наприклад на крутих схилах чи скелях, і забезпечує ефективне з'єднання сусідніх наземних точок без втрати точності.

Параметри алгоритму встановили однаковими для обох етапів обробки хмари точок.

На рисунку 5 продемонстровано результати розподілу точок, що належать до земної поверхні, та точок, розташованих над нею: наземні позначені оранжевим кольором, а білим – ці, що не входять до ґрунтового шару.

Така класифікація дозволяє створити чітку і деталізовану модель рельєфу, придатну для побудови цифрової моделі рельєфу, аналізу крутизни схилів і оцінки потенційних геодинамічних ризиків.



Рисунок 5. Класифікація наземних точок у моделях хмар точок

3.2.2. Вилучення географічної інформації

Для побудови цифрової моделі рельєфу (DEM) досліджуваної ділянки було використано програму LiDAR360, яка забезпечує ефективну

обробку густих хмар точок і створення точних растрових моделей топографії.

Під час формування DEM у raster-сітці розмір пікселя по осям X і Y (XSize, YSize) залишився на типовому значенні 0,5 м, що гарантує необхідний рівень деталізації для подальшого вивчення морфології поверхні.

Значення буферного радіуса залишалось на типовому показнику 5, що забезпечує включення сусідніх пунктів у процес інтерполяції висот.

Для створення рельєфної моделі використано інтерполяцію за принципом інверсного зважування дистанції (IDW, Inverse Distance Weighting); цей підхід не вимагає заздалегідь задавати функцію просторової варіації і дає можливість швидко розраховувати висоти, спираючись на ближчі точки LiDAR-хмари.

У порівнянні з техніками згладжування і фільтрації, які потребують тонкого підбору параметрів і передбачають плавний рельєф, IDW демонструє вищу стійкість до локальних аномалій — наприклад, кромок будівель, крони дерев чи інші відхилення, які іноді з'являються в точковій хмарі.

У даному дослідженні значення пікселя растру визначалося через зважене середнє сусідніх точок, причому вага кожної з них залежала від відстані до центру клітини.

Для ваги обрано стандартне значення 2, яке гарантує оптимальне співвідношення між гладкістю моделі та збереженням дрібних рельєфних особливостей, наприклад схилів пагорбів, обривів і інших морфологічних елементів ландшафту.

Щоб підвищити точність інтерполяції, застосували режим пошуку з варіативним радіусом: радіус встановлено 5 м, а кількість точок, що беруться для розрахунку середнього, – 12.

Використання даного підходу дозволяє сформувати безперервну цифрову модель рельєфу, при цьому знижуючи ймовірність утворення порожнин та спотворень у ділянках з різкими змінами висот.

У підсумку після виконаних операцій отримано цифрову модель рельєфу у форматі TIF (рис. 6), готову до експорту та подальшого застосування в геопросторовому аналізі, розрахунках об'ємів гірських масивів, оцінці крутизни схилів і визначенні потенційних геодинамічних ризиків.

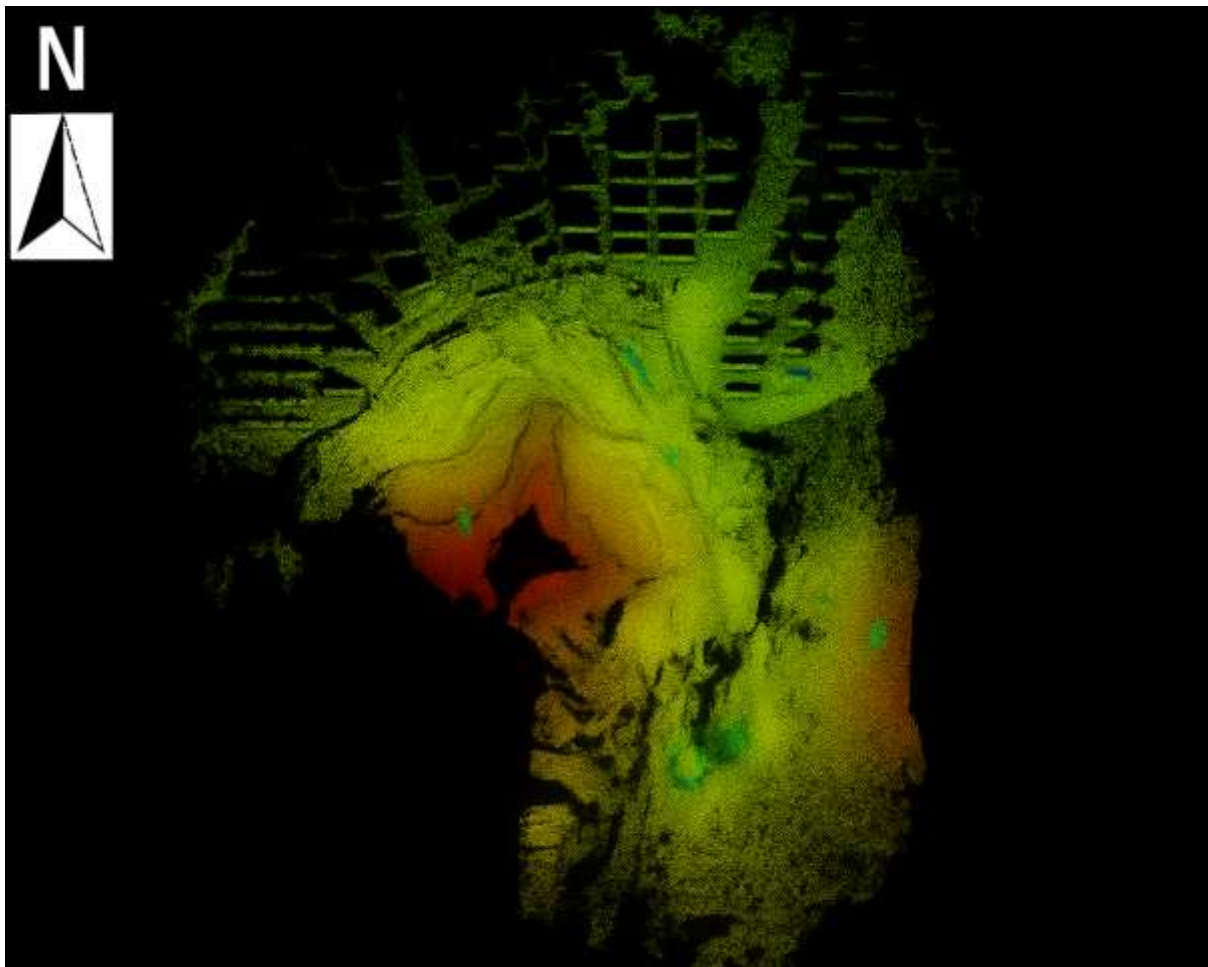


Рисунок 6. Цифрова модель рельєфу

3.3 Визначення зон, схильних до геологічної небезпеки

Контурний план, сформований на основі цифрової моделі рельєфу (Рисунок 7), яскраво ілюструє хвилясту морфологію поверхні досліджуваної території.

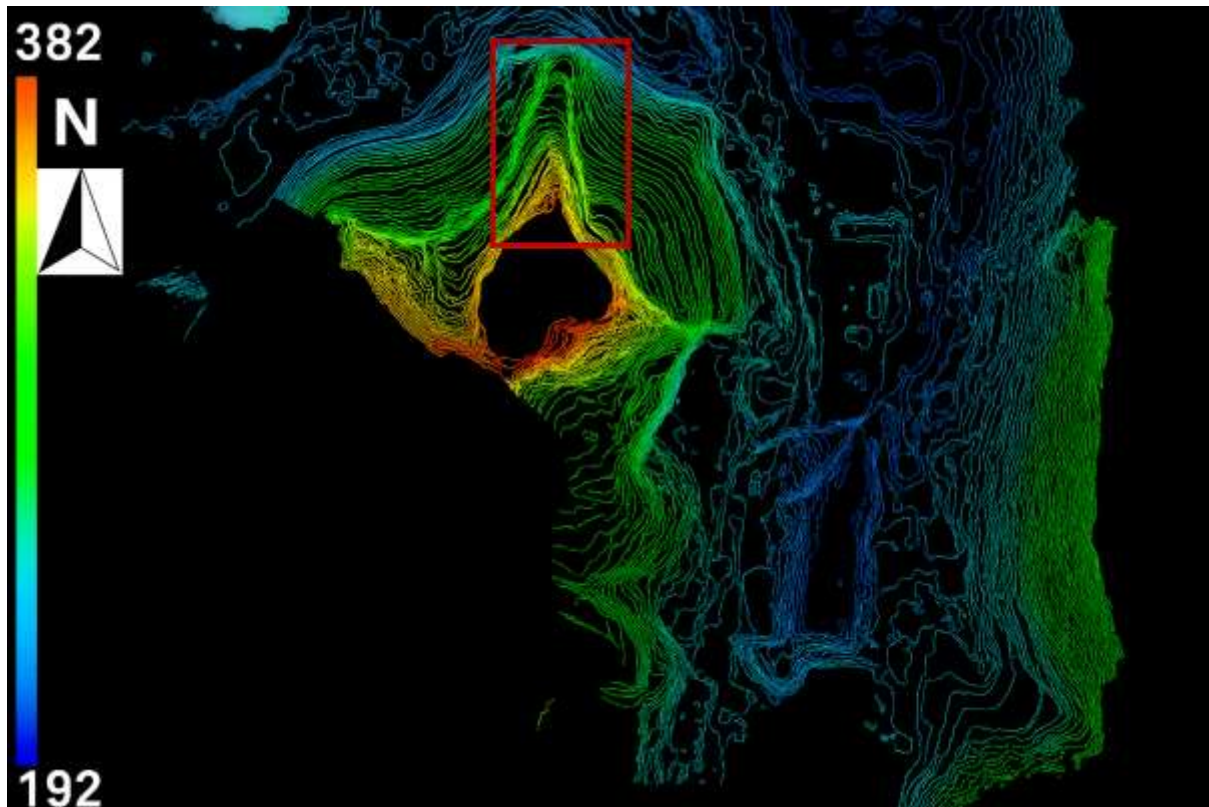


Рисунок 7. Контурна карта

Зображення демонструє помітні варіації висот у вивченій ділянці, які коливаються від 192 м до 383 м, а також безліч різких схилів і скелястих утворень, притаманних територіям з підвищеною геодинамічною активністю.

Порівняння контурних карт, складених у два різні часові моменти, дозволяє виявити зміни рельєфу.

Зокрема, у ділянці, обведеної червоною рамкою, спостерігається більш інтенсивне накладання контурів, що вказує на зміну крутизни схилів.

З огляду на те, що параметри польоту і налаштування аерофотозйомки залишилися незмінними в обох серіях зображень, можна обґрунтовано стверджувати, що на даній частині території мають місце реальні морфологічні зміни, ймовірно, пов'язані з трансформацією форми гірського схилу.

Такі спостереження демонструють дієвість аерофотозйомки як засобу динамічного спостереження за рельєфом і виявлення ділянок з підвищеним ризиком геодинамічних процесів, що становить цінний практичний інструмент при плануванні робіт у гірських зонах та оцінці небезпеки зсувів і обвалів.

Зіставлення хмар точок, підготовлених з обох етапів аерофотозйомки, виконано в одній координатній системі задля точного порівняння рельєфу та змін у формі схилів.

Для цього скористалися алгоритмом ітеративного найкращого збігу (ICP, Iterative Closest Point), де хмара точок першого етапу слугувала базовою моделлю, а хмара другого етапу була приведена у відповідність до неї.

Алгоритм ICP працює, поступово зменшуючи відстані між парними точками двох точкових хмар, шляхом послідовної оптимізації матриці перетворення, яка складається з обертальних і трансляційних складових.

Вирівнювання тривало до того моменту, коли досягнуто встановлену межу середньоквадратичної похибки (RMSE) — $1 \cdot 10^{-4}$, що забезпечує високий рівень точності узгодження моделей.

RMSE безпосередньо характеризує точність вирівнювання і використовується як головний параметр для зупинки подальших ітерацій.

Як лише різниця RMSE між двома послідовними ітераціями падає під встановлений поріг, алгоритм трактує це як досягнення збіжності і припиняє процес вирівнювання.

Для підвищення надійності результатів обрано 50 000 точкових прикладів, які використовуються при обчисленні співставлень між хмарами.

Після успішного узгодження двох фаз хмар точок для виявлення змін у рельєфі застосовується плагін аналізу змін у програмному забезпеченні LiDAR360.

За допомогою цього модуля можна порівнювати хмарні моделі точок, виявляючи розбіжності між двома етапами аерофотозйомки і визначаючи ділянки можливих деформацій схилів.

Для аналізу були задані такі параметри: розмір ребра сітки – 2 м, вертикальний допуск – 0,5 дм та величина зміни, задана рівною нулю.

Завдяки таким встановленням вийшла диференціальна модель хмару точок досліджуваної ділянки, яка чітко ілюструє локальні варіації рельєфу у двох часових інтервалах (Рис. 8).

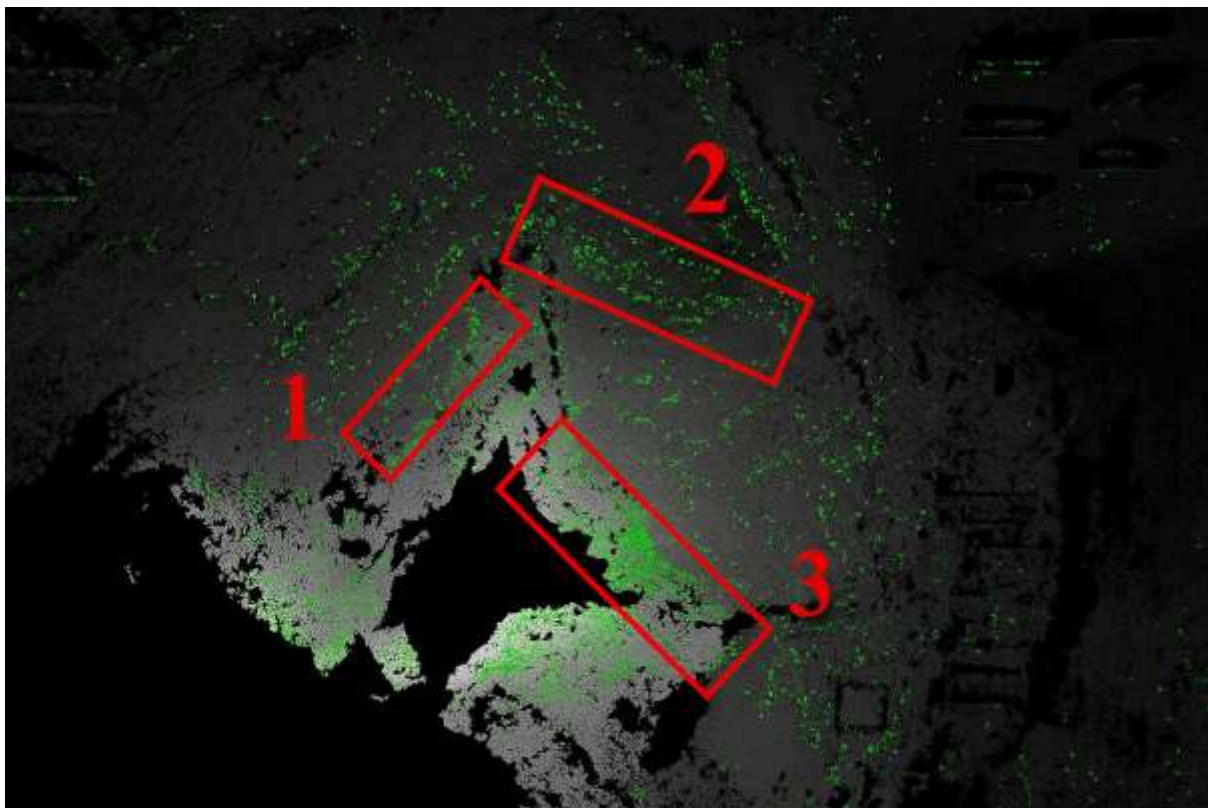


Рисунок 8. Модель різниці хмар точок

Завершення даного кроку дає можливість кількісно виміряти морфологічні зміни схилів, виявити ділянки з підвищеною геодинамічною активністю та сформувані дані для майбутнього дослідження стабільності схилів і прогнозування зсувів.

Порівнюючи хмари точок Фази II із референтною хмарою Фази I, зміни висот рельєфу візуалізувалися зеленою кольоровою шкалою, що чітко показує відмінності між двома часовими інтервалами.

Вивчення отриманих моделей дало змогу виявити три області на досліджуваній ділянці, де зафіксовано найсильніші зміни висот, позначені червоними рамками на ілюстрації.

Вказані ділянки мають підвищену вразливість до геологічних небезпек, зокрема до зсувів ґрунту та обвалів скельних утворень, що робить їх особливо важливими для постійного спостереження і управління ризиками.

Визначення цих зон становить необхідний етап у підготовці заходів щодо зміцнення схилів та забезпечення безпеки території, особливо коли маємо справу з інтенсивним техногенним тиском і природною нестабільністю гористого рельєфу.

Використання комплексного аналізу тривимірних моделей, контурних карт і диференціальної моделі хмари точок (рис. 9) забезпечило точне визначення розташування цих потенційно небезпечних ділянок.

Застосування такого підходу дозволяє отримати кількісні та графічні докази змін рельєфу, які слугують базою для формування планів моніторингу та своєчасного реагування на можливі геодинамічні процеси.

Висновки даного етапу наголошують на необхідності інтеграції різноманітних джерел просторових даних з метою виявлення ділянок підвищеного ризику та визначення пріоритетних напрямків спостереження й захисних заходів.



Рисунок 9. Карта розподілу небезпечних зон

Враховуючи результати польових вимірювань і ретельний аналіз аерофотозйомок, у плані реконструкції Зони 2 передбачено прокладення транспортної смуги.

Дослідження показали, що зміни висотності на цьому відрізку викликані накопиченням ґрунту з обох сторін траси, що, в свою чергу, зменшує ймовірність виникнення геологічних загроз у зазначеній ділянці.

У зоні 1, спираючись на контурні карти та польові дослідження, переважають багатоступеневі скельні структури, а гірські схили піддаються інтенсивному вивітрюванню й розпаду порід.

Тут вже зафіксовано малі обвали скельних масивів, і застосування важкої техніки під час реалізації проєкту відновлення посилює дрібномасштабні зсуви й обвали.

Таке становище підвищує небезпеку стабільності схилів і створює додаткові ризики для безпеки робіт на місцевості.

У ділянці 3 тривалий час діє важка техніка, а також повторювані цикли замерзання-відтавання і вивітрювання, які спричинили розпад гірських порід і утворення різких схилів.

Тут фіксуються незначні зсуви, які підвищують схильність місцевості до геологічних коливань і становлять можливу небезпеку для дорожнього руху в нижній частині схилу.

Отже, необхідно сконцентрувати увагу на зонах 1 і 3, оскільки вони характеризуються підвищеною нестійкістю.

Щоб гарантувати їхню безпеку, слід організувати тривале й динамічне спостереження, виконати всебічний аналіз ризиків і змоделювати геодинамічні процеси, що забезпечить запобігання катастрофічним наслідкам і зменшить соціальні та економічні збитки.

3.4 Аналіз стійкості схилу

Для отримання даних про нахили обох етапів цифрової моделі рельєфу використано інструмент Spatial Analyst → Surface → Slope у середовищі ArcMap 10.8.

Зібрані значення було згруповано в дев'ять категорій, причому кут нахилу кожної групи зазначено у градусах.

Такий підхід дозволяє виявити ділянки з різною крутизною, що безпосередньо впливає на стабільність схилів і можливу загрозу зсувів і обвалів.

Для підвищення точності аналізу брали до уваги як місцеві коливання рельєфу, так і просторові взаємозв'язки між суміжними елементами поверхні.

Таке підходження забезпечує більш деталізовану та об'єктивну оцінку геодинамічної стабільності розглянутої ділянки.

За результатами класифікації схилів встановлено, що значна частина схилів у вивчених ділянках має нахил понад 25° – 30° , що вказує на підвищений ризик активізації зсувних і обвальних процесів, особливо при техногенних навантаженнях та опадах.

Найбільш небезпечні ділянки збігаються з районами, де виявлено фрагментацію порід і дрібномасштабні обвали, що підкреслює потребу в подальшому спостереженні та заходах стабілізації.

Крім того, класифікація схилів дає можливість планувати заходи з управління ризиками, включаючи укріплення вразливих ділянок, контроль водних стоків і обмеження доступу важкої техніки до нестійких частин схилу.

Такий підхід забезпечує всебічну оцінку території і дозволяє приймати науково обґрунтовані рішення щодо безпеки та ефективності відновних робіт.

Після цього були створені карти схилів для обох фаз (Рисунок 10).

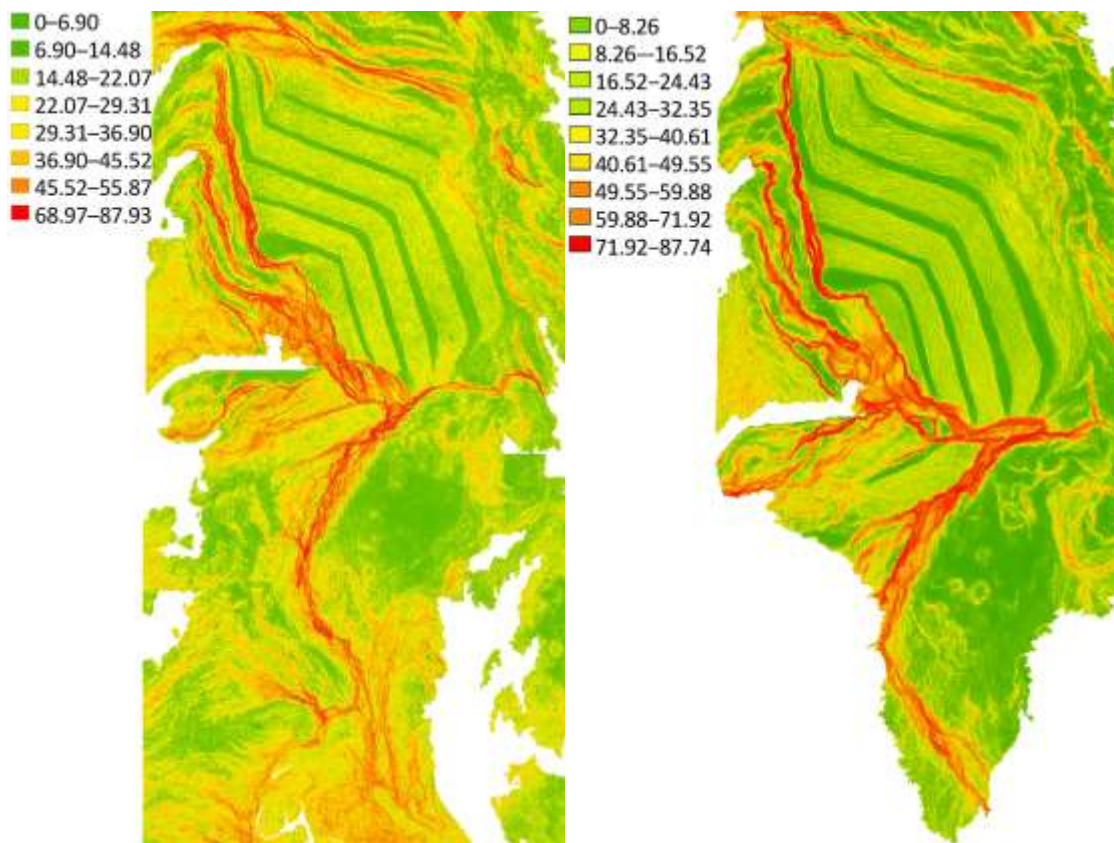


Рисунок 10. Карта схилів: (а) Карта схилів Фази I; (б) Карта схилів Фази II

У першій фазі максимальний кут нахилу на розглянутій ділянці становить $87,93^\circ$, у другій фазі він трохи знижується — $87,74^\circ$.

Різниця у куті схилу між цими фазами практично незначна, що вказує на досить стабільний рельєф упродовж досліджуваного періоду.

Рельєф ділянки має високу крутизну, зокрема у Зонах 1 і 3, де значна частина схилів має кут більше 50° .

За результатами аналізу, геологічна активність залежить від крутизни схилу: притягання ґрунту можливо при куті більшому за 20° , кам'яні зсуви — при куті понад 30° , а кам'яні лавини виникають, коли кут перевищує 45° .

Таким чином можна стверджувати, що досліджувана місцевість знаходиться в умовах підвищеної нестабільності, з великою ймовірністю

виникнення зсувних процесів і кам'яних обвалів, які становлять головні геологічні ризики.

У межах досліджуваної області схили, як правило, розподіляються на три базові типи: випуклі, прямі та увігнуті.

Кількісний аналіз кривизни схилів здійснюється за допомогою алгоритму, який підганяє локальну поверхню розміром 3×3 пікселі під поліноміальне рівняння другого ступеня.

Таке підходження дає змогу виявляти не лише загальні контури схилів, а й локальні варіації кривизни, які мають важливе значення для прогнозування потенційно небезпечних ділянок і планування заходів зі стабілізації.

Алгоритм, що використовується для розрахунку кривизни, передбачає апроксимацію поверхні, що охоплює ділянку 3×3 , за допомогою поліноміального рівняння другого степеня, як показано:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Cx + Hy + I \quad (4)$$

У рівнянні, що використовується для обчислення кривизни Z , висоту задає топографічна функція поверхні, тоді як координати x і y відповідають за просторове розташування.

Значення коефіцієнтів A – I отримуються з даних про висоти в області, що охоплює 3×3 пікселі, з урахуванням їх розмірів і просторового розподілу.

На опуклих схилах виникає більша інерційна сила, яка збільшує ризик зсувів під дією зовнішніх факторів, наприклад інтенсивних опадів, вітру чи сейсмічних коливань.

Навпаки, увігнуті схили сприяють скручуванню потоків поверхневих вод і ослабленню стійкості ґрунтових мас, що може призвести до локальних обвалів.

Зазвичай прямі схили володіють порівняно високою стабільністю.

На підставі розрахунків кривизни цифрової моделі рельєфу значення розподілили наступним чином: позитивні — для випуклих схилів, негативні — для увігнутих, нульові — для прямих.

Виходячи з цих даних, було складено кривинні карти для обох фаз досліджуваної території (рисунок 11).

Порівнювальне дослідження карт кривизни двох етапів виявило, що загальна конфігурація рельєфу збереглася схожою, проте на окремих ділянках (зокрема в ділянках 1 і 3) відзначаються незначні трансформації: зростання кількості випуклих ділянок та місцеве поглиблення впадинних схилів.

Це вказує на раннє посилення геодинамічних процесів, зокрема зсувів та локальних обвалів.

Статистичний розгляд продемонстрував, що у фазі I близько 38 % простору має нестабільні схили (випуклі та впадинні), а у фазі II цей параметр піднявся до 41 %, що свідчить про поступове зростання ризику виникнення геологічних загроз.

Найбільшу небезпеку представляють ділянки з кутовим підйомом схилу понад 30° , де спостерігається найвища щільність нестабільних форм рельєфу.

Отже, дані порівняльного аналізу кривизни підкреслюють потребу у тривалому динамічному спостереженні та посиленій роботі з управлінням ризиками на ділянках 1 і 3.

Найсерйозніші ризикові умови виникають під час інтенсивних опадів та циклів замерзання-відтавання, що можуть призвести до масштабних зсувів і обвалів, загрожуючи як безпеці гірничих робіт, так і інфраструктурі внизу схилу.

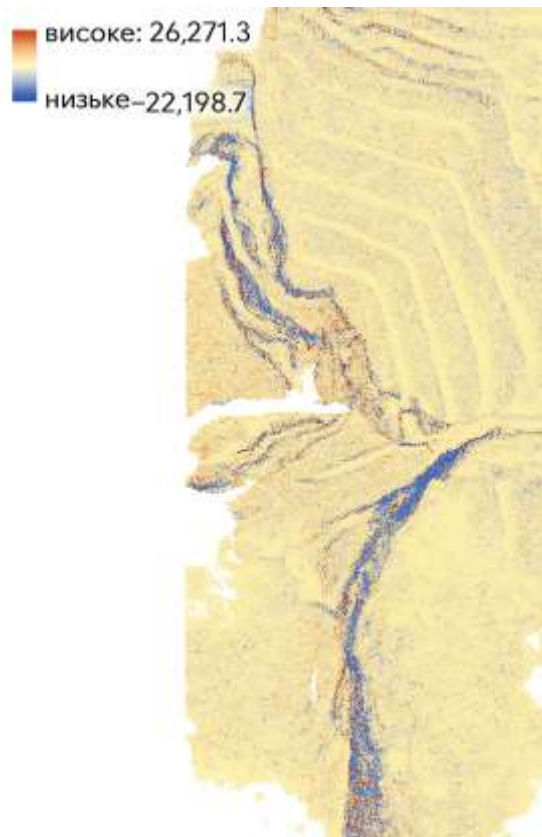


Рисунок 11. Діаграма кривизни

3.5 Аналіз стійкості

У нашій роботі, під час розгляду стабільності схилових систем, використовується метод аналітичного ієрархічного процесу (АНР), який дає можливість розрахувати вагові коефіцієнти для всіх чинників, що впливають на стійкість схилу.

Аналітичний ієрархічний процес – це потужний багатокритерний інструмент прийняття рішень, який забезпечує систематичну оцінку і структурування різноманітних елементів складних процесів.

Цей метод особливо ефективний, коли необхідно поєднати кількісні й якісні дані, що охоплюють різні аспекти досліджуваного явища.

Його активно застосовують у багатьох сферах — від інженерного менеджменту та планування міської й промислової інфраструктури до

екологічних досліджень, геодезії та управління ризиками природного і техногенного характеру.

Головна перевага аналітичного ієрархічного методу — можливість інтегрувати експертні судження з об'єктивними даними в систематизовану ієрархію критеріїв, що дозволяє ефективно гармонізувати безліч суперечливих інтересів і факторів.

Кожному фактору присвоюється оцінка його внеску у загальну стабільність схилу, після чого обчислюється ваговий коефіцієнт, що показує його значимість у загальній моделі ризику.

У даному дослідженні застосовано аналітично-ієрархічну методологію створення моделі оцінки небезпеки схилів, що дозволяє не лише класифікувати простір за рівнями ризику, а й визначити пріоритетні ділянки для спостереження та профілактичних заходів.

Такий метод гарантує отримання збалансованої та аргументованої оцінки стабільності схилу, беручи до уваги як геотехнічні, так і природні фактори, які можуть ініціювати зсуви та обвали.

Оцінкова модель небезпеки, створена за аналітично-ієрархічним підходом, володіє ієрархічною будовою: на найвищому рівні репрезентується загальний ризик схилу, на проміжному – групи факторів (геометричні параметри, геологічна будова, гідрологічні умови, антропогенне навантаження), а нижчий рівень складається з окремих критеріїв і підкритеріїв, які деталізують вплив кожного параметра на стійкість схилу.

$$D_L = \sum_{i=1}^n W_i \cdot I_i \quad (5)$$

У даній моделі, яка застосовується для аналізу стабільності схилу, параметр DL (Displacement Level) функціонує як індекс небезпеки схилу,

W_i — ваговий коефіцієнт відповідного дискримінантного фактора, а I_i — показник його впливу на загальну стійкість.

1. На підставі польових спостережень і аналізу даних, зібраних іншими авторами, сформовано трирівневу ієрархічну систему індексів для оцінки стабільності схилу:
2. Цільовий (основний) рівень (A) — загальна оцінка ризику схилу для конкретної ділянки.
3. Рівень індексу класу (B) — групи факторів, що визначають стійкість схилу.
4. Рівень базового індексу (C) — окремі показники або критерії, які впливають на кожну факторну групу.

На стійкість схилу впливають різноманітні фактори, які поділяються на внутрішні й зовнішні.

- Серед внутрішніх факторів – геологічні умови (B1) і топографія разом із геоморфологією (B2).
- Зовнішні фактори включають тригерні елементи (B3) та антропогенну діяльність (B4), що визначають чотири ключові категорії оцінкових показників.

У уточненні геологічних умов (B1) виділяються додаткові характеристики:

C1 — тип геотехнічного тіла;

C2 — поверхнева щільність структури;

C3 — рівень вивітрювання гірських порід.

У розрізі топографії й геоморфології (B2) розглядаються:

C4 — градієнт нахилу;

C5 — орієнтація схилу;

C6 — вигин схилу;

C7 — тип і густина рослинного покриву.

Тригерні фактори (B3) включають:

C8 — середньорічна кількість опадів;

C9 — вплив підземних вод на стабільність схилу.

Діяльність людини (B4) охоплює:

C11 — антропогенні порушення (наприклад, будівництво, обробіток ґрунту);

C12 — пошкодження рослинного покриву, що знижує природну стійкість схилу.

Щоб визначити важливість кожного фактора, застосували порівняльну шкалу від 1 до 9, яка дає чітке розрізнення рівня їхнього впливу, уникаючи зайвої деталізації, і одночасно зберігає високу інформативність.

За результатами досліджень, використання шкали 1–9 забезпечує більш точну відповідність між результатами аналітичного процесу та даними, отриманими іншими методами оцінки схилів.

Отримані значення були об'єднані за допомогою геометричного середнього, що дозволяє сформувати матрицю показників оцінки першого рівня.

У цій матриці подано агреговані вагові коефіцієнти та індекси впливу всіх ключових і другорядних факторів, що слугує базою для створення моделі оцінки ризику схилу (Таблиця 3).

Таблиця 3. Матриця показників для оцінювання першого рівня

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W _B
B ₁	1	3	5	7	0.513
B ₂	1/3	1	3	5	0.289
B ₃	1/5	1/3	1	3	0.135
B ₄	1/7	1/5	1/3	1	0.054

Для створеної матриці отримано найбільше власне значення $\lambda_{\max} = 4,218$.

Виходячи з цього, обчислено індекс узгодженості (CI) — 0,073, а індекс випадкової узгодженості (RI) для даного розміру матриці дорівнює 0,89.

Коефіцієнт узгодженості (CR) склав 0,082, що нижче порогу 0,1.

Наведені висновки вказують на значну консистентність підходу до оцінки стабільності схилів і демонструють, що складання матриці і розрахунок вагових коефіцієнтів факторів підкріплені статистичною обґрунтованістю.

Таке становить гарантію надійності й достовірності моделі, яка використовується для аналізу можливих геологічних небезпек.

В результаті етапних обчислень були встановлені вагові значення додаткових параметрів, що об'єднують як якісні, так і кількісні ознаки, які впливають на стабільність схилу.

Таблиця 4 містить результати розрахунків і перевірку їхньої узгодженості, доводячи, що визначені вагові коефіцієнти точно відображають реальний вплив кожного фактора на загальну небезпеку схилу й відповідають вимогам логічної та статистичної сумісності.

Таблиця 4. Ваги показників вторинної оцінки

В	С□	С□	С□	С□	С□	С□	С□	С□	С□	С□□	С□□
W□	0.277	0.152	0.084	0.163	0.056	0.029	0.050	0.019	0.039	0.077	0.036

Завдяки зазначеним параметрам дана модель підходить для практичної і комплексної оцінки стійкості схилів, що дозволяє не лише виявляти небезпечні ділянки, а й визначати пріоритети у роботі з моніторингом та управлінням ризиками на геологічно нестабільних територіях.

Для обчислення коефіцієнтів небезпеки кожного індикатора на всіх рівнях ієрархії стійкості схилу застосовано метод зрівнювання, який мінімізує вплив суб'єктивних та довільних експертних оцінок.

Відповідно до встановленої шкали:

- для індикаторів, які перебувають під високою небезпекою, надається оцінка 1,
- при середній небезпеці — показник 0,724,
- при низькій небезпеці — показник 0,341.

Цей підхід забезпечує уніфіковану та порівняльну оцінку всіх вторинних індикаторів, що дозволяє інтегрувати їх у загальну модель оцінки стійкості схилу.

У Таблиці 5 наведено класифікацію всіх допоміжних показників разом із їхніми кількісними оцінками, що служать базою для розрахунку інтегрованого індексу небезпеки схилу (DL).

Такий підхід дозволяє ідентифікувати пріоритетні ризикові ділянки та ефективно планувати заходи з моніторингу і стабілізації схилів.

Таблиця 5. Класифікація та оцінювання показників вторинної оцінки

Показник оцінки	Класифікація індикаторів та кількісні бали Сі	1	0,618	0,382
С1: Тип гірських порід та ґрунту	Рихлий нашарований шар (геологія)	✓	Напівтверда порода	Суцільна скеля
С2: Щільність структурної площини	Низька щільність	✓	Середня щільність	Низька щільність
С3: Ступінь вивітрювання	Сильне вивітрювання: індекс > 0,6	✓	Середнє вивітрювання: $0,2 < \text{індекс} \leq 0,6$	Незначне вивітрювання: індекс $\leq 0,2$

Показник оцінки	Класифікація індикаторів та кількісні бали Сі	1	0,618	0,382
С4: Градієнт схилу	Круті схили: > 30°	✓	Середній градієнт: 15–30°	Пологі схили: < 15°
С5: Експозиція схилу	У напрямку схилу	✓	Транверсальний схил	Зворотний схил
С6: Кривизна	Опуклий схил	✓	Прямий схил	Ввігнутий схил
С7: Покриття рослинністю	Низьке покриття: < 30%	✓	Середнє покриття: 30–70%	Високе покриття: > 70%
С8: Середньорічна кількість опадів	Високі опади: > 800 мм/рік	✓	Середні опади: 400–800 мм/рік	Низькі опади: < 400 мм/рік
С9: Вплив ґрунтових вод	Тривале насичення: рівень ґрунтових вод < 3 м	✓	Сезонний вплив: $3 \leq \text{рівень води} \leq 5$ м	Відсутність ґрунтових вод: > 5 м
С10: Сейсмічна інтенсивність	Висока (> VII)	✓	Середня (VII–VI)	Низька (< VI)
С11: Антропогенні впливи	Масове викопування: > 30% площі	✓	Часткове викопування: 10–30% площі	Незаймано: < 10% площі
С12: Стан пошкодження рослинності	Сильне пошкодження: < 30% відновлення	✓	Середнє пошкодження: 30–60% відновлення	Незначне пошкодження: > 60% відновлення

За даними наукових публікацій і геологічних звітів, виявлено, що розглянута ділянка має суттєве розповсюдження міцних корінних порід.

Тут поверхневі структури характеризуються низькою щільністю, рівень вивітрювання оцінюється як середній, а середньорічні опади коливаються в межах 400–800 мм.

Сейсмічність даної території досягає 7 балів за міжнародною шкалою, а підземні води розташовані на глибині понад 5 м.

Аналізуючи створену модель рельєфу, виявлено, що домінують круті схили з кутом нахилу понад 30°, спостерігається велика кількість бокових розломів, а характерними особливостями рельєфу є увігнуті форми.

Польові спостереження показують, що площа рослинного покриву становить не більше 30 %, і цю ділянку експлуатується як кар'єр для видобутку корисних копалин.

Внаслідок будівництва доріг у безпосередній близькості даної ділянки, частка оброблених ділянок збільшилася до понад 30 %, при цьому рівень погіршення рослинності класифікується як середній.

Згідно з таблицею 6, значення вторинного оцінкового індексу схилу (C_i) і комплексного індексу ($C_i \cdot W_{C_i}$) обчислюються і уточнюються за допомогою формули (3).

Таблиця 6. Результати розрахунків оцінки ризику схилів

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C_i	0.277	0.152	0.084	0.163	0.056	0.029	0.050	0.019	0.039	0.077	0.036
W_{C_i}	0.382	0.382	0.618	1	0.618	0.382	1	0.618	0.382	0.618	1
$C_i \cdot W_{C_i}$	0.106	0.058	0.052	0.163	0.035	0.011	0.050	0.012	0.015	0.048	0.036
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

На підставі отриманих даних моделювання й обчислень встановлено, що індекс небезпеки схилу становить $R = 0,596$.

Таке значення вказує на помірно високий ризик виникнення зсувних процесів у вивченій ділянці.

Згідно з обраною методикою оцінки стабільності, схили розподіляються на чотири класи в залежності від величини індексу R:

I рівень — стан стабільності ($0 \leq R < 0,25$), під час якого фактично не спостерігаються процеси деформації;

II рівень — переважно стабільний стан ($0,25 \leq R < 0,5$), що проявляється незначними локальними переміщеннями;

III рівень — стан нестійкості ($0,5 \leq R < 0,75$), який супроводжується реальним ризиком виникнення зсувів;

IV рівень — стан нестабільності ($0,75 \leq R < 1$), що характеризується активними деформаціями та високою ймовірністю руйнування схилу.

На підставі отриманих даних, розглянутий схил слід віднести до об'єктів III категорії, які відзначаються підвищеною нестабільністю.

Тому можна зробити висновок, що геологічні та гідрологічні характеристики цієї території сприяють розвитку деформацій, особливо коли до них додаються додаткові навантаження — дощові осадки, сейсмічна активність або антропогенний фактор.

Враховуючи вищеперелічені дані, дану ділянку необхідно регулярно моніторити щодо стабільності схилів.

Рациональним є впровадження інженерних та запобіжних заходів, зокрема підвищення міцності верхнього шару ґрунту, будівництво дренажних мереж для відводу дощової і талої води, а також контроль над надмірними навантаженнями на верхню частину схилу.

Застосування зазначених методів сприятиме зниженню ризику зсувів і підвищенню стабільності ділянки, що особливо актуально у місцевостях, де проходять автодороги, комунікаційні лінії або розташовані житлові будинки.

Отже, своєчасна реакція та превентивні дії проти зсувних процесів становлять вирішальний фактор забезпечення екологічної та технологічної безпеки регіону.

Висновки

Використання нахильної фотограмметрії з залученням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволило отримати високоточні та деталізовані знімки схилів за різними часовими періодами.

На їх основі сформовано тривимірні реалістичні моделі ландшафту, хмари точок і цифрові моделі рельєфу (ЦМР).

Отримані результати дали змогу виявити потенційно небезпечні ділянки схилів і провести комплексний аналіз їх стабільності.

Висновки, що впливають із проведеного дослідження:

1) Корисність використання безпілотних літальних апаратів у спостереженні за геологічними процесами.

Техніки дистанційного дослідження за допомогою БПЛА довели свою дієвість як інструмент для виявлення, створення карт і моніторингу геологічних ризиків на схилах.

БПЛА, оснащені високоякісними багатфункційними камерами, забезпечують отримання зображень з надвисокою просторовою деталізацією.

Для обробки цих даних застосовуються передові програмні засоби геодезії та картографії, які дозволяють формувати високоточні тривимірні моделі рельєфу.

Використання безпілотних літальних апаратів суттєво підвищує продуктивність польових робіт, скорочує час збору інформації та розширює можливості моніторингу у порівнянні з традиційними наземними методами спостереження за геологічними процесами.

1) Ідентифікація ризикованих ділянок за допомогою цифрових моделей.

Використовуючи цифрову модель рельєфу, хмару точок і тривимірну фотограмметричну модель, ми швидко виявили зони, що мають потенційні геологічні ризики.

Аналізуючи контурні лінії, диференціальні моделі та порівнюючи їх з результатами польових спостережень, було визначено дві ділянки, схильні до зсувних процесів і ерозії ґрунту.

Використовуючи даний підхід, можна оперативно визначити ступінь небезпеки та встановити межі ризикових ділянок.

2. Оцінка стабільності схилів за рахунок цифрових моделей.

Завдяки виготовленим цифровим моделям рельєфу стало можливим розрахувати параметри градієнта схилу та його морфологічні характеристики у небезпечних зонах.

Максимальний градієнт у зонах 1 і 3 приблизно 37° , причому в окремих ділянках значення піднімається вище 43° .

Рельєф проявляє чергування випуклих та увігнутих форм, що підвищує його морфологічну складність і збільшує шанс на появу зсувів.

Для кількісного визначення стійкості використали метод аналітичного ієрархічного процесу (АНП) у поєднанні з розрахунком коефіцієнта ризику, що дозволило визначити рівень стійкості кожної небезпечної ділянки.

Виходячи з виконаного аналізу, досягнуто висновку про потребу у безперервному моніторингу цих схилів, бо вони представляють посилений ризик для транспортної мережі та сусідніх населених пунктів.

Запропонована методика є легкою у використанні, практичною та економічно обґрунтованою, що робить її дієвим інструментом протидії геологічним загрозам.

3. Практичне значення та потенційні напрямки використання.

Створений підхід створює великий простір для застосування у моніторингу зміни схилів, оцінці інженерно-геологічної стійкості та виявленні можливих небезпечних геологічних процесів.

Застосування безпілотних дронів разом із фотограмметричними методами забезпечує надточність зібраної інформації, скорочує обсяг польових зусиль і підвищує рівень безпеки як людей, так і інженерних об'єктів.

Отримані дані доводять, що такий підхід володіє суттєвим практичним значенням і може слугувати фундаментом для створення систем раннього попередження про геологічні небезпеки.

Список використаної літератури

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). Чернівці 2002р.
8. Li, Nan & Qiu, Huanxiang & Zhai, Hu & Chen, Yuhui & Wang, Jipeng. (2025). Monitoring and Analysis of Slope Geological Hazards Based on UAV Images. Applied Sciences. 15. 5482. 10.3390/app15105482.
9. Цю, Х.; Чжай, Х.; Ван, Дж.; Ге, С.; Ву, Л. Геологічне дослідження та оцінка ризиків на основі фотограмметрії БПЛА. Науково-технічна інженерія. 2024, 24, 7905–7912.
10. Золкеплі, М.Ф.; Ішак, М.Ф.; Таліб, З.А. Безпілотний літальний апарат (БПЛА) для картографування схилів та визначення потенційної небезпеки для схилів. Міжнародний журнал інтегральної інженерії. 2022, 14, 232–239.
11. Чжан, З.Л.; Ян, Х.Л. Уніфіковане рішення для коефіцієнтів запасу міцності для тривимірних складних схилів з урахуванням локальної та глобальної нестійкості. Обчисл. Геотехнологія. 2023, 155, 0266–0352
12. Керн, А.; Фанта-Єнде, П.; Гліра, П.; Брукмюллер, Ф.; Зульцбахнер, К. Точне рішення для картографування в режимі реального

часу за допомогою БПЛА для створення ортофотопластів та моделей поверхні. Міжнародна архітектурна конференція. Дистанційне зондування. Історико-геологічні науки. 2021, 43, 165–171.

13. Ружич, І.; Бенац, К.; Йованчевич, С.Д.; Радишич, М. Застосування БПЛА для аналізу геологічної небезпеки на острові Крк, Хорватія, Дистанційне зондування. 2021, 13, 1790.

14. Джеймс, М.Р.; Робсон, С. Проста реконструкція 3D-поверхонь та топографії за допомогою камери: точність та застосування в геології. J. Geophys. Res. Earth Surf. 2012, 117, 17.

15. Ендрю, А.М. Геометрія з кількома видами в комп'ютерному зорі. Kybernetes 2001, 30, 1333–1341.

16. Піз, Р.А. Геостатистика для вчених-екологів. J. R. Stat. Soc. Ser. A-Stat. Soc. 2009, 172, 700.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи:

**«Контроль геодинамічних процесів на основі аналізу
цифрових моделей рельєфу, отриманих з
аерофотознімків БПЛА»**

Обсяг пояснювальної записки: 60 аркушів.

24.12.25 рік

(дата)

**_____
(підпис студента)**