

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Петров Вадим
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
**« Оцінка ефективності використання наземного лазерного
сканування у виявленні та аналізі зсувів »**
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

В. Петров, студент групи ГЗ-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: к.т.н. доцент Ірина Боднарук
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Петров Вадим

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Оцінка ефективності використання наземного лазерного сканування у виявленні та аналізі зсувів»

керівник роботи: к.т.н. доцент Ірина Боднарук

(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. Методика наземного лазерного сканування
3. Результати та інтерпретації

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	Методика наземного лазерного сканування		
3	Результати та інтерпретації		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

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

Керівник роботи

_____ ***Боднарук І.***

Анотація

Метою даної бакалаврської роботи є дослідження ефективності та практичного потенціалу застосування технології наземного лазерного сканування для виявлення, моніторингу та аналізу зсувних процесів.

Особливу увагу зосереджено на оцінці точності, сталості повторних вимірювань та впливу зовнішніх факторів на якість отриманих цифрових моделей місцевості.

Актуальність

Зсуви ґрунту належать до найнебезпечніших геодинамічних явищ, які можуть спричинити серйозні руйнування об'єктів інфраструктури, завдати збитків сільському господарству та створити загрозу для людського життя.

У цьому контексті своєчасне виявлення ознак зсувної активності та прогнозування їх розвитку набуває особливого значення для інженерної геодезії та систем геомоніторингу.

Наземне лазерне сканування, як сучасний метод просторового аналізу, відкриває нові можливості для високоточного і неруйнівного спостереження за небезпечними ділянками рельєфу.

Наукова новизна

Наукова новизна полягає у практичному дослідженні застосування наземного лазерного сканування для створення високоточних цифрових моделей місцевості в умовах зсувної активності.

У роботі проаналізовано вплив технічних характеристик обладнання, погодних умов і складності рельєфу на якість отриманих даних, а також оцінено точність і повторюваність сканувань у динамічних геоумовах.

Практична цінність

Практична цінність роботи полягає у демонстрації ефективності використання наземного лазерного сканування для моніторингу зсувонебезпечних територій.

Отримані результати можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо впровадження скануючих систем у практику інженерного моніторингу, що сприятиме зниженню ризиків, пов'язаних із зсувами, та підвищенню безпеки об'єктів, розташованих у небезпечних зонах.

Ключові слова: зсуви, геомоніторинг, наземне лазерне сканування, цифрова модель місцевості (ЦММ), тривимірні вимірювання, точність сканування, інженерна геодезія.

Abstract

The purpose of this bachelor's thesis is to study the effectiveness and practical potential of using ground laser scanning technology to detect, monitor and analyze landslide processes.

Particular attention is paid to assessing the accuracy, consistency of repeated measurements and the impact of external factors on the quality of the obtained digital terrain models.

Relevance

Landslides are among the most dangerous geodynamic phenomena that can cause serious destruction of infrastructure, damage agriculture and pose a threat to human life.

In this context, timely detection of signs of landslide activity and prediction of their development is of particular importance for engineering geodesy and geomonitoring systems.

Ground laser scanning, as a modern method of spatial analysis, opens up new opportunities for high-precision and non-destructive monitoring of dangerous terrain areas.

Scientific novelty

The scientific novelty consists in a practical study of the use of ground laser scanning to create high-precision digital terrain models in conditions of landslide activity.

The work analyzes the influence of technical characteristics of the equipment, weather conditions and terrain complexity on the quality of the obtained data, and also evaluates the accuracy and repeatability of scans in dynamic geoconditions.

Practical value

The practical value of the work consists in demonstrating the effectiveness of using ground laser scanning to monitor landslide-prone areas.

The results obtained can be used to develop recommendations for the implementation of scanning systems in the practice of engineering monitoring, which will help reduce the risks associated with landslides and increase the safety of objects located in hazardous areas.

Keywords: landslides, geomonitoring, ground laser scanning, digital terrain model (DTM), three-dimensional measurements, scanning accuracy, engineering geodesy.

Зміст

Вступ

1. Територія дослідження

1.1. Опис зсуву

1.2. Геологічний контекст

1.3. Моніторинг зсувів

2. Методика наземного лазерного сканування

2.1. Засади наземного лазерного сканування

2.2. Характеристики Trimble X7 3D

2.3. Реєстрація та географічна прив'язка

2.4. Постобробка та точність наземного сканування

2.5. Характеристика та кількісна оцінка переміщення

3. Результати та інтерпретації

3.1. Віднімання ЦМР

3.2. Вимірювання зміщення на трансектах

3.3. Інтерпретація даних

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Великі зсуви, які нерідко відносять до найважливіших природних небезпек у гірських районах, створюють суттєву загрозу для людей.

Виникнення цих явищ здатне призвести до знищення осель, пошкодження критичних об'єктів інфраструктури, включаючи автомагістралі, залізничні колії, мости, лінії електропередачі та комунікаційні системи.

У певних ситуаціях зсуви також можуть перекривати річкові долини, провокуючи формування тимчасових природних перепон, що збільшує вірогідність руйнівних повеней при їхньому раптовому прориві.

Цей набір загроз робить питання моніторингу зсувних процесів надзвичайно важливим для територій з підвищеною геодинамічною активністю.

Для місцевих спільнот, що мешкають в потенційно небезпечних зонах, створення ефективних систем спостереження за зсувами є одним з ключових пріоритетів.

Безперервне відстеження поведінки схилів, що зазнають нестабільності, дає змогу виявити ознаки активації зсувних процесів на ранніх етапах, заздалегідь сповістити мешканців про ймовірну небезпеку, забезпечити організацію евакуації та вчасно перекрити ключові транспортні артерії, що пролягають через потенційно небезпечні ділянки.

Отже, відстеження зсувів безпосередньо впливає на безпеку життя громадян, стабільність економічної діяльності та збереження критичної інфраструктури.

Системи спостереження за зсувними процесами містять великий спектр методів моніторингу, які, за принципом отримання інформації, можливо умовно розділити на два основні типи:

1. Методи моніторингу, які базуються на точках, передбачають відслідковування зрушень певних, заздалегідь визначених точок на поверхні зсуву.

Вони охоплюють:

- високоточні системи глобального позиціонування (GPS);
- екстензометри, які вимірюють деформації;
- тахеометри, що дають можливість фіксувати переміщення рефлекторів у тривимірному просторі;
- лазерні й радарні далекоміри.

Точкові методи вирізняються високою точністю вимірювань і здатністю надавати надзвичайно докладні дані про переміщення окремих частин схилу.

Разом з тим, їх суттєвим недоліком є обмежене охоплення території: ці методи надають інформацію тільки щодо конкретних точок і не дають можливості оцінити зміни на всій площі зсуву.

2. Наземні та дистанційні методи моніторингу - забезпечують збір просторових даних з обширних ділянок поверхні.

До цих методів належать:

- Фотограмметрія (зокрема, із застосуванням безпілотних літальних апаратів - БПЛА),
- Супутникова радіолокаційна інтерферометрія (InSAR),
- Наземна радіолокаційна інтерферометрія (GB-InSAR),
- Аеролазерне сканування (LiDAR),
- Наземне лазерне сканування (TLS).

Ці розробки дають змогу формувати надзвичайно точні цифрові моделі рельєфу (ЦМР), знаходити переміщення великих масивів землі та досліджувати розвиток зсувних явищ на величезних просторах.

Таким чином, існує можливість використовувати комплексний підхід для визначення стійкості схилів та передбачення ймовірних надзвичайних ситуацій.

Наземне лазерне сканування (TLS) виділяється серед цих методик через здатність генерувати надзвичайно деталізовані, точні й багаторазові зображення поверхні.

TLS дає змогу конструювати тривимірні карти місцевості з неймовірною деталізацією, що є надзвичайно важливим для точного виявлення навіть найменших змін у формі рельєфу, що характерні для початкових фаз розвитку зсувів.

Окрім того, TLS представляє собою неінвазивний спосіб дослідження, що дозволяє проводити багаторазове сканування без будь-якого впливу на структуру схилу.

Однак, TLS також має певні обмеження, серед яких варто відзначити залежність якості зібраних даних від метеорологічних умов (зокрема, дощу, туману, снігу), щільності рослинного покриву, а також складності рельєфу місцевості.

Через такий підхід, у реальних проєктах TLS часто комбінують з додатковими способами спостереження, аби мати більш повне уявлення про перебіг подій.

Комплексний підхід, що поєднує точкові вимірювання та наземний моніторинг, дозволяє успішно відстежувати динаміку зсувів.

Він поєднує високу точність локальних вимірювань з можливістю аналізу просторового розподілу деформацій на всій поверхні об'єкта.

1. Територія дослідження

В межах Горганської частини басейну річки Прут, зсуви трапляються не так часто, якщо порівнювати з рештою території Карпат.

Найбільш активно ці процеси розвинулися між річками Прут та Бистриця Надвірнянська.

На цих територіях ерозія проявила себе з такою силою, що поверхня терас у багатьох місцях була значно пошкоджена або й зовсім зникла.

Особливої уваги заслуговує подія, яка мала місце восени 2018 року: після тривалих і сильних дощів на правому березі Пруту, поблизу гирла річки Малевський, стався потужний зсув, що відбувся дуже швидко (всього за кілька хвилин).

За попередніми підрахунками, об'єм маси ґрунту, що зісковзнула, перевищує десять тисяч кубічних метрів.

Необхідно підкреслити, що схил мав кут нахилу від тридцяти до п'ятдесяти градусів та був покритий лісом.

Деревна рослинність, як правило, виконує функцію зміцнення схилів, стабілізуючи ґрунт.

Проте, у цьому випадку тонкий шар ґрунту, розташований безпосередньо над міцними породами, не витримав маси перезволоженого ґрунту разом з біомасою дерев.

Отже, внаслідок сукупності факторів – надмірної вологості, крутого схилу та геологічної структури – створилися умови для швидкого розвитку зсуву (див. рис. 1).

Такі події вказують на підвищену вразливість територій зі складною геологією та специфічними кліматичними характеристиками до екстремальних погодних явищ, зокрема, сильних дощів, що може призвести до серйозних наслідків як для природи, так і для людської діяльності.



Рисунок 1 Зсув на території дослідження

У річкових долинах часто можна спостерігати взаємодію обвалів-осипів з явищами зсувів.

Ці природні процеси, що проявляються у вигляді незначних обвалів, осипів та зсувів, суттєво впливають на стійкість інфраструктурних об'єктів, зокрема, транспортних артерій різного призначення: залізничних колій, автомобільних шляхів та ґрунтових доріг.

Більше того, вони здатні створювати ризик для будівель та споруд, особливо там, де спостерігається інтенсивна геодинамічна активність, зокрема на схилах.

Протікання схилових процесів безпосередньо обумовлені кутом нахилу схилу.

Перш за все, зсуви ґрунту найчастіше даються ознаки на схилах, чие крутості більше ніж $35\text{--}50^\circ$.

Осипи, як правило, утворюються на схилах, котрі мають кут нахилу від 20 до 60 градусів, а зсуви здатні виникати на схилах з кутом нахилу від $5\text{--}8^\circ$ до 50° . [4]

Однак, найбільша вірогідність появи зсувів відмічається на схилах, що мають крутизну від 8 до 30 градусів, де умови для інтенсифікації цих природних явищ найбільш сприятливі.

Зсуви, зокрема, в передгірських областях досліджуваного регіону, вважаються звичайним явищем.

Вони здатні з'являтися як окремі зсуви або як тривалі зсувні масиви.

Ці процеси найчастіше пов'язані зі схилами різного походження, враховуючи як природні, так і антропогенні впливи, які стають каталізаторами їхнього активного прояву.[5]

Крім того, їх часто спостерігаємо на уступах середніх та високих надзаплавних терас, де характер рельєфу сприяє накопиченню значної кількості води, що підвищує ризик виникнення зсувів.

Зсуви можуть призводити до серйозних трансформацій ландшафту, знищувати інфраструктуру та створювати небезпеку для життя та здоров'я людей.

Відтак, критичним є швидке виявлення подібних явищ та застосування ефективних методів моніторингу задля прогнозування їхнього подальшого поширення.

1.1. Опис зсуву

Зсув, що виник неподалік від витоку річки Малевської, охопив схил, що звернений на північний схід.

Висота зони зсуву коливається між 300 м та 870 м над морем, а площа, яка зазнала впливу зсуву, складає близько 7 гектарів.

Характер кута нахилу схилу тут зазнав значних змін: на висотах від 330 м до 850 м над рівнем моря кут нахилу варіюється в діапазоні 40°–50°.

Разом з цим спостерігається зменшення крутості на ділянці від 850 м до 870 м над рівнем моря, де кут нахилу зменшується до 20°.

Ці деталі рельєфу суттєво корегують перебіг зсувних явищ.

На верхів'ї гори спостерігається виділення, яке формує уступ до 30 м у висоту і тягнеться на кількасот метрів.

Цей уступ – наслідок зміщення вниз південної частини пагорба, що свідчить про активність зсувного процесу (рис. 2).

Щоб повністю охарактеризувати зсув, потрібно акцентувати увагу на двох основних компонентах цього геодинамічного явища:

1. Коридор руйнування, епіцентр зміщення, де вирує пересування ґрунту, що знищує все на своєму шляху;
2. Верхня частина схилу, котра поволі ковзає донизу, відчуваючи тиск геодинамічних сил, які активізують зсувні процеси на різному рівні.

Межі зсуву визначені природними позначками:

на сході — велика зсувна зона, що поглинає великі простори,

на півночі — дугоподібний уступ, створений внаслідок сповзання маси ґрунту,

на південному краю зсуву — стійка територія, розміщена на висоті біля 600 метрів над рівнем моря.

На заході фіксується згасання руху схилу, що вказує на поступове припинення зсувного процесу в даній місцевості.

Цей зсув — дивовижний приклад взаємодії складної геологічної структури схилів з кліматичними умовами, що може спровокувати значні зміни в ландшафті, які створюють серйозні загрози для природи та інфраструктури.[4], [6]

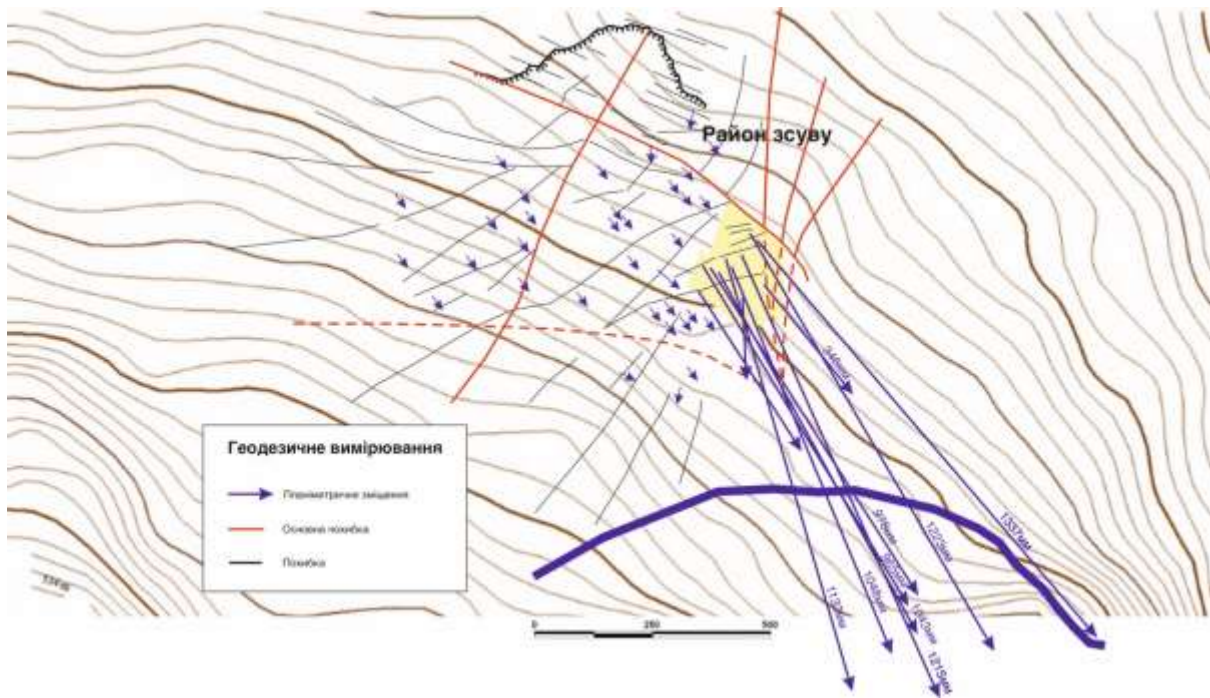


Рисунок 2. Локалізація зсуву.

На рисунку 2 показано планіметричні зрушення, виміряні за допомогою традиційних геодезичних методів.

Для полегшення сприйняття, ці зміщення виділено синім кольором.

Геологічні розломи, що є ключовими елементами цього процесу, відображені чорним та червоним кольорами для чіткої ідентифікації.

Активну зону зсуву, де спостерігається найбільша динаміка переміщення маси, підкреслено яскраво-жовтим кольором, що полегшує визначення областей з найбільшими змінами рельєфу.

1.2. Геологічний контекст

Зсувний процес відбувається на периферії зовнішньої структури, здебільшого складеної гірськими породами, що формують нестабільний схил.

Ці породи є елементами прадавньої осадової формації, в основі якої лежать пісковики.

Зсувна зона ідентифікується наявністю численних тріщин на поверхні ґрунту, що є ключовим параметром при аналізі цього явища.

На рисунку 1 показано візуальне представлення цих тріщин, які виглядають як розрізи в товщі гірських порід.[4]

Розрізи виникають як уступи, що спрямовані вгору, і поєднуються з проваллями, які виникають у напрямку зсуву.

Процес деформації порід характеризується як комплексне, великомасштабне глибинне перетворення.

Він виявляється у перекиданні та опусканні вертикальних пластів гірських порід, розсічених численними розломами.

Ділянка схилу, де постійно виникають значні тріщини, є особливо активною, що вказує на інтенсивність зсувних процесів.

У верхній частині цієї зони також зафіксовані численні вирви, сформовані внаслідок подальших деформацій та рухів земної кори, пов'язаних з розширенням тріщин та зсувними явищами.[4]

1.3. Моніторинг зсувів

Від 1985 року геодезисти залучали різноманітні методи для вимірювання зміщень під час польових робіт.

Серед них – дотові екстензометричні бази, автоматичні екстензометричні датчики, геодезичні відбивачі та інші прогресивні рішення.

Разом з тим, як показують попередні дослідження, для створення карт зсувів по всій південній частині схилу застосовувалися геодезичні дані.

В їх числі були координатні виміри опорних точок, що давало змогу оцінити розміри та характеристики зсувних процесів.

Згідно з отриманими вимірюваннями, зміщення на території зсуву направлені на північний схід.

Кут нахилу варіюється від 10° до 20° на початкових етапах і досягає 45° в активній зоні зсуву.

Швидкість переміщення в цій зоні коливається від 15 см/рік до приблизно 25 см/рік, що підкреслює значну динамічність процесів.

Попри використання різних систем моніторингу зсуву, жодна з них не забезпечила безперервної просторової картини зсуву в повному обсязі, особливо в так званому "коридорі зсуву", де геодинамічні процеси проявляються найбільш інтенсивно.

Це вказує на необхідність застосування більш точних та ефективних методів для вивчення рухів на подібних територіях.

Наше бакалаврське дослідження зосереджено на оцінці ефективності технології наземного лазерного сканування (TLS) для вивчення руху зсуву та її здатності надавати високоточні вимірювання зміщень.[4], [7]

Використання TLS дозволяє створювати детальні 3D-моделі зон зсуву та визначати зміщення з високою точністю, що критично важливо для вдосконалення моніторингу та прогнозування зсувних процесів.

2. Методика наземного лазерного сканування

2.1. Засади наземного лазерного сканування

Застосування методики вимірювання часу, необхідного лазерному променю для подолання відстані (time-of-flight), дозволяє наземному лазерному скануванню генерувати тривимірні моделі у вигляді хмар точок.

Цей підхід демонструє потенціал у дослідженні складних, як за топографією, так і за станом, територій.

Завдяки використанню обертового дзеркала лазерний промінь сканує значну зону видимості, взаємодіючи з різними об'єктами.

Визначення просторових координат точки відбиття здійснюється на основі кутів, під якими випромінювався промінь, а також часу, який лазерний імпульс витратив на подолання шляху туди й назад.

Лазерні імпульси реєструють відбиття не тільки від об'єктів рельєфу, але й від рослинності та будь-яких непрозорих перепон, що зустрічаються на шляху лазера.

Тому, для створення інформативної топографічної карти необхідно виконувати обробку "сирих" даних.[4]

Просторова роздільна здатність отриманих даних визначається передусім кутовою роздільною здатністю випромінювання імпульсу та відстанню між лазерним сканером і об'єктами, які скануються.

Одним із недоліків даної методики є утворення "тіньових зон" - областей, де відсутня інформація, через те, що лазерний імпульс блокується будь-яким об'єктом.

Для зменшення негативного впливу цього недоліку і досягнення максимальної точності необхідно проводити сканування з кількох позицій.

Ключовим етапом є об'єднання отриманих з різних точок сканування хмар точок, а також перетворення отриманої відносної хмари точок в абсолютні просторові координати.

Через високу щільність хмар точок (в нашому випадку - до 5000 точок на квадратний метр) стає можливим створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) з високою роздільною здатністю.

Це дозволяє виконувати точний аналіз та моделювання геодинамічних процесів, таких як зсуви.

2.2. Характеристики Trimble X7 3D

Для здобуття хмари точок у нашому дослідженні використано лазерний сканер Trimble X7 3D (див. рис. 3).

Це передовий пристрій, що є одним із найсучасніших інструментів для збирання надзвичайно точних даних.

Сканер дозволяє створювати детальні тривимірні моделі об'єктів та поверхонь.



Рисунок 3 Лазерний сканер Trimble X7 3D

Цей сканер, Trimble X7 3D, вирізняється надзвичайно вузьким кутом розходження променя – лише 0,25 мрад, що забезпечує надзвичайну точність вимірювань.

Прилад має вражаючий діапазон: від 0° до 80° по вертикалі та від 0° до 360° по горизонталі, а також може виконувати до 8000 вимірів точок за секунду.

Дистанція вимірювання може сягати 800 метрів до цілі, яка має коефіцієнт відбиття 80%.

Це робить сканер оптимальним для різних об'єктів та умов роботи.

Для управління, візуалізації та подальшої роботи з тривимірними даними використовується програмне забезпечення Trimble Perspective.

Програма надає можливість налаштовувати сенсор, збирати, обробляти та зберігати отримані дані.

Це значно спрощує процес лазерного сканування та формування точних тривимірних моделей.

2.3. Реєстрація та географічна прив'язка

Для отримання вичерпних даних про зсув провели сім серій замірювань протягом шести місяців (див. рисунок 4).

Кожна серія спостережень дозволяла виявляти зміни у формі схилу та розпізнавати перші ознаки руху ґрунту.

Моніторинг виконувався за допомогою високоточного геодезичного обладнання, яке забезпечувало можливість визначати точні координати в різні проміжки часу.

В результаті цих замірювань були зафіксовані просторові та часові зміни, що дозволило встановити швидкість і напрям зміщень на схилі, де існує небезпека зсуву.

Крім того, було вивчено вплив різних погодних умов, таких як кількість опадів та зміни температури, на процес зсуву.

Ці відомості лягли в основу для створення моделі пересування ґрунту, яка дозволяє передбачати майбутні трансформації та формулювати дії задля уникнення шкідливих результатів зсувних явищ.[4]

Здійснене вивчення дозволяє не тільки визначити розміри й силу зсувів, але й виявити чинники, що найбільше впливають на активність цих процесів.

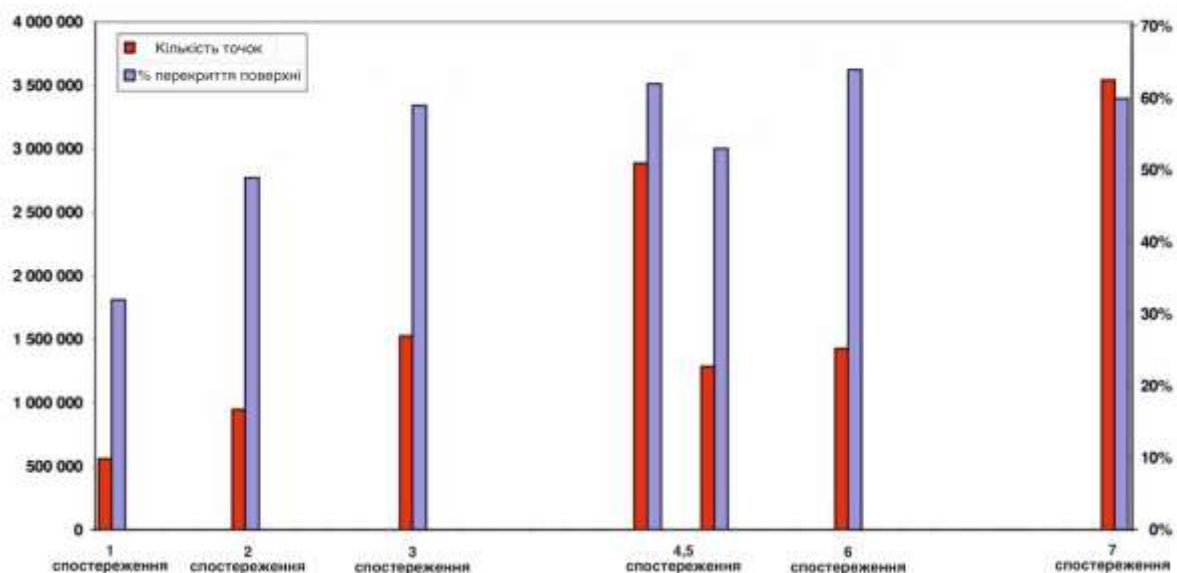


Рисунок 4. Серії вимірювань

У разі зрушення, положення сканування з протилежного боку від зміщення втрачало можливість збору даних.

Дистанція до цієї території перевищувала максимальний радіус дії наземного лазерного сканера.

Це обмеження в отриманні даних ставило під сумнів точність інформації, яку необхідно було зібрати з усіх точок спостереження.

Як альтернативне рішення, було вирішено розташувати чотири станції спостереження вздовж краю обриву та на самому місці зсуву (див. Рис. 5).[4]

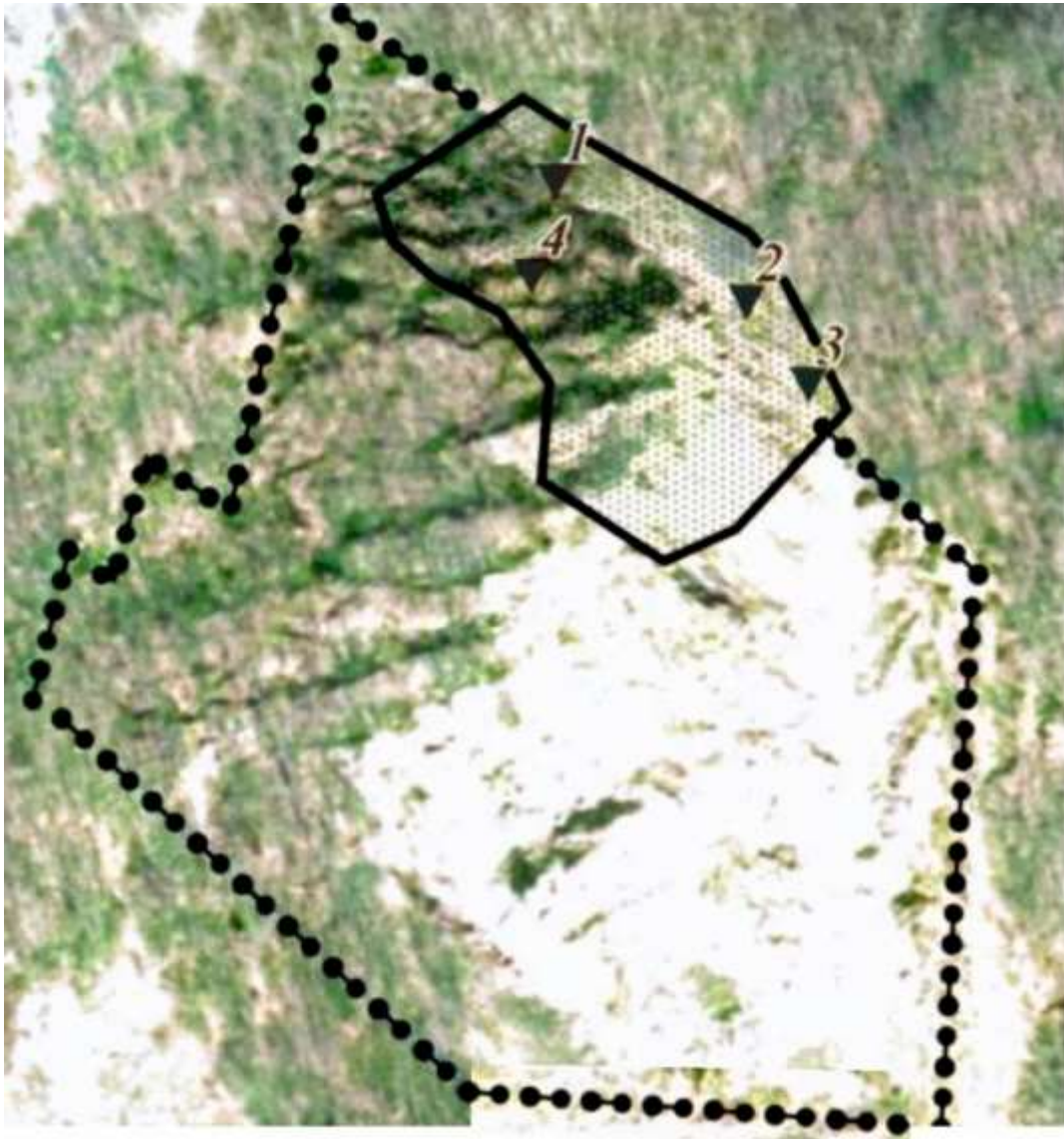


Рисунок 5. Локалізація точок сканування

Це дало можливість частково нівелювати затінену ділянку, що з'являлася внаслідок відбиття лазерних імпульсів від перешкод, значно збільшуючи зону огляду.

Застосування цього методу сприяло отриманню більш чіткого уявлення про переміщення ґрунту та забезпечило вищу точність вимірювань.

Окрім того, застосування сканування з різноманітних кутів дало можливість звести до мінімуму негативні наслідки "мертвих зон", котрі утворюються специфікою ландшафту, та створити детальнішу тривимірну модель території.

Це надзвичайно важливо для ретельного аналізу трансформацій зсувів та прогнозування їхньої подальшої динаміки.

Відстань виявлення наземного лазерного сканера обмежена вісімдесятьма метрами, що становить собою значну проблему для проведення вимірювань, особливо в умовах складної місцевості.

Задля досягнення найвищої точності та повного охоплення досліджуваної зони було визначено чотири пункти сканування, розташовані вздовж краю уступу та безпосередньо на площі зсуву (див. Рис. 5).[4]

Завдяки обраній конфігурації, було досягнуто взаємодії між множиною хмар даних, що дало змогу усунути недоліки та заповнити відсутню інформацію, котра могла виникнути через заблоковані області.

Стратегічне значення мала позиція сканування на вершині зсуву (позначено як точка 2 на малюнку 5), адже саме вона дала змогу оглянути всю площину з повітря.

Таке розміщення забезпечує максимально повний огляд та реєстрацію будь-яких трансформацій у досліджуваній зоні.

Дані з інших точок сканування, на жаль, не були суцільними через формування тіньових зон, що утворилися через особливості рельєфу, оскільки лазерний промінь надходив на поверхню під дуже гострим кутом.

Для чіткішої реєстрації та злиття даних з різних сканувальних місць застосовано світловідбивні мішені.[7]

Їх розміщено довкола, але за межами зони дії лазерного променя.

Ці мішені вимірювали, використовуючи загальноприйняті геодезичні прийоми, серед них – тахеометр.

Визначені положення світловідбивних точок дозволяють точно з'єднати інформацію між окремими хмарами точок, котрі було отримано з кожного місця сканування.

Для здійснення реєстрації хмар точок було застосовано загальноприйнятий алгоритм Iterative Closest Point (ICP).[4]

Це один із базових підходів в обробці даних, отриманих з наземного лазерного сканування.

Але в контексті нашого дослідження, де спостерігалися суттєві зміни поверхні між різними серіями сканувань, алгоритм ICP не зміг забезпечити потрібний рівень точності.

Поверхні, з яких збиралися дані, мали великі відмінності, що ускладнювало узгодження хмар точок і, як наслідок, знижувало надійність процесу реєстрації даних.[6]

З огляду на це, стає зрозумілим, що потрібні додаткові або альтернативні методи для більш коректного поєднання даних, отриманих з різних точок сканування.

2.4. Постобробка та точність наземного сканування

Окрім пропусків, спричинених затіненням, щільність точок хмар розподіляється нерівномірно.

Це обумовлено відмінностями у відстанях до об'єктів, а також кутами, під якими лазерний промінь впливає на поверхню, що відбиває.

Залежно від кута, під яким лазерний промінь потрапляє на об'єкт, дальності до нього та особливостей поверхні, деякі ділянки показують високу густину точок, в той час як інші мають значно менше точок на одиницю площі.

Цей фактор вимагає ретельної обробки даних після сканування, аби досягти найвищої якості кінцевого результату.

Для практичного вжитку, перед тим як зводити цифрові моделі рельєфу (ЦМР), було здійснено постобробку хмар точок з використанням алгоритмів Trimble Perspective.

Ця обробка дозволила відсіяти лише ті лазерні імпульси, які зазнали зворотного розсіювання, що сприяє якнайкращому відтворенню поверхні та топографічних особливостей досліджуваної території.

Відтак, з загального масиву лазерних імпульсів виокремлено саме ті, що безпосередньо вказували на зміни рельєфу, що є надзвичайно важливим для точності подальших досліджень.

Для обчислення густини хмар точок застосовано метод, що полягає у підрахунку кількості точок, котрі потрапляють на кожний піксель.

Цей процес реалізовано за допомогою спеціальних кодів, розроблених для опрацювання даних лазерного сканування.

Оскільки густина хмар точок не є константою і змінюється в залежності від розташування сканування, цей підхід дає можливість мати більш конкретне розуміння розподілу точок на поверхні.[4]

Це особливо важливо, коли мова йде про розробку цифрових моделей з найвищою якістю.

Для обчислення матриці вимірів було використано білінійну інтерполяцію.

Цей метод дозволяє досягти рівномірного розподілу значень між точками, що позитивно впливає на точність відображення рельєфу на цифровій моделі.

Білінійна інтерполяція добре зберігає високу точність вимірювань навіть за змінної щільності точок.

Остання може бути наслідком дистанції та кута падіння лазерного променя.

З огляду на те, що параметри швидкості сканування та величини зрушень точок, між послідовними замірами, уже були встановлені стандартними методами топографії, виникає перспектива отримання значної кількості інформації між двома скануваннями.

Це відкриває можливості для створення деталізованих моделей з мінімальним ризиком втрати точності.

Ця обставина підкреслює необхідність використання багатьох пунктів спостережень, з подальшим об'єднанням здобутих даних. Такий підхід є ключем до уникнення пропусків в інформації, представленій у вигляді хмар точок.

З огляду на вищевикладене, стає очевидним, що досягнута точність наземного лазерного сканування буде достатньою для надійного виявлення будь-яких змін в топографічних характеристиках протягом визначеного часового проміжку.[6]

Відтак, подальший аналіз точності даних, отриманих лазером, не здійснювався, враховуючи, що показники вимірювань вже відповідали встановленим вимогам до точності для запланованих досліджень.

Заявлена точність однієї точки для лазерного сканера Trimble X7 складає 5 мм на дистанції 50 метрів.

Це свідчить про те, що при скануванні на відстані до 50 метрів, передбачається досягнення точності вимірювань в межах кількох міліметрів, що вважається надзвичайно високим показником для завдань з геодезії та картографії.

Водночас, зі збільшенням дистанції спостерігається незначне зниження точності.

Наприклад, для максимальної відстані у рамках даного дослідження – 80 метрів, зафіксовано похибку на рівні ± 15 мм у трьох вимірах.[4]

Це необхідно брати до уваги під час аналізу даних, адже на значних відстанях точність вимірювань може падати.

Завдяки цьому тесту можна оцінити точність порівняння точок перекриття, здобутих з різних позицій сканування.

Такий підхід забезпечує перевірку стабільності даних, отриманих з різних точок огляду, що є критичним для гарантування цілісності й точності побудованих цифрових моделей.

Необхідно підкреслити, що точність набору даних, зібраних за допомогою наземного лазерного сканування, та точність віднімання цифрових моделей рельєфу (ЦМР) можуть варіюватися через низку факторів, які вимагають пильної уваги:

1. Інтерполювання в процесі растеризації: У ході формування цифрових моделей рельєфу використовувалося інтерполювання інформації, здобутої шляхом лазерного сканування. Хоча цей етап є ключовим для перетворення точок у растровий вигляд, він здатний знижувати якість даних. Інтерполяція часто стає причиною зникнення незначних деталей, що негативно впливає на фінальну точність, особливо у місцевостях з великою щільністю точок або відчутними змінами висот.

2. Верифікація топографічної точності на стабільних зонах: Для порівняння та аналізу похибок ЦМР було використано стабільні площини, які виступали контрольними точками. У нашому аналізі, така ділянка розміщувалась на стійкому східному схилі зсуву, що посприяло зменшенню погрешностей і забезпечило більш достовірні результати при зіставленні з цифровою моделлю. Це дає можливість оцінити точність сканування в реальних умовах та виявити можливі недоліки в реєстрації чи точності на різних етапах дослідження.

Оцінка точності субтракції ЦМР на усталеному східному краї зсуву, представленому на рисунку 6, критична для визначення лімітів точності та

оцінки дієвості застосування наземного лазерного сканування в зазначених умовах.

Оскільки ця територія вільна від деформацій чи змін, спричинених зсувами, вона функціонує як надійний орієнтир для співставлення та верифікації отриманих результатів.

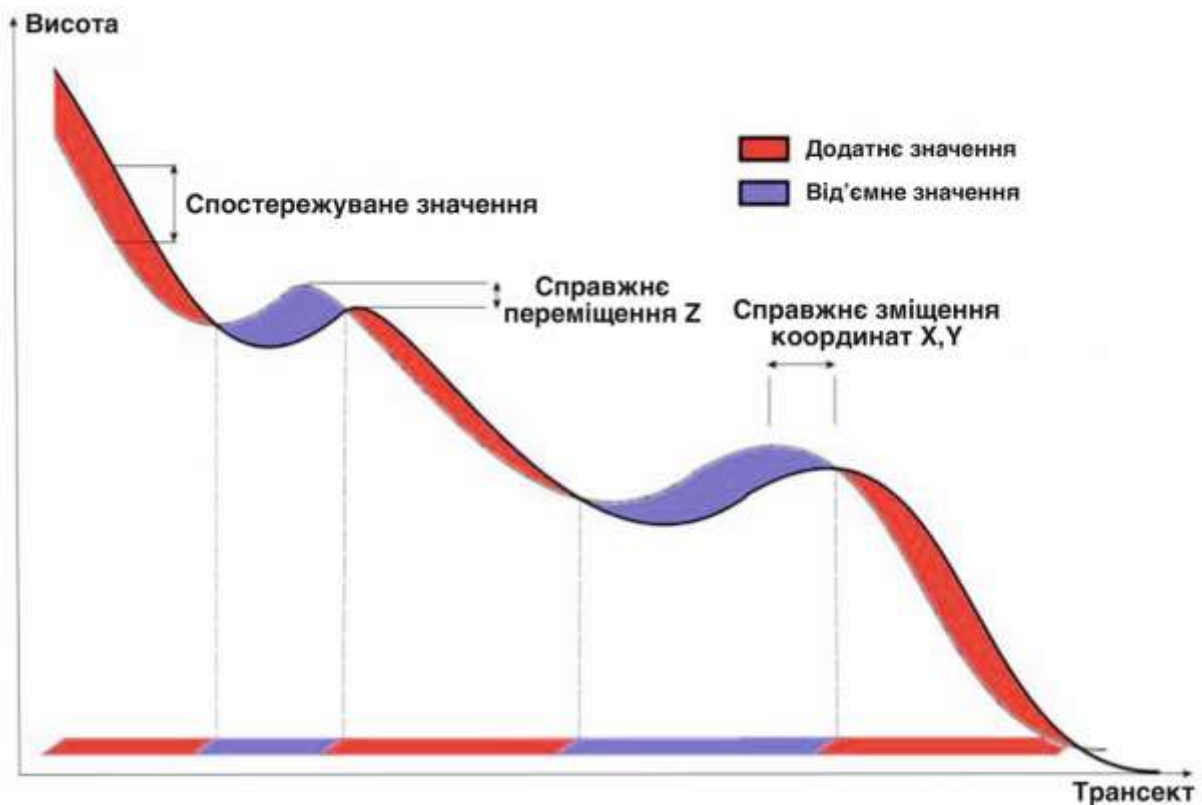


Рисунок 6. Відмінності між реальними та спостережуваними зміщеннями

Звісно, обробка даних супроводжується серйозними перешкодами, зумовленими рослинним покривом місцевості.

Безпосередньо на роботу алгоритму фільтрації у програмному забезпеченні Trimble Perspective впливає висота трави. Саме від неї залежить, як дані інтерпретуються, та що класифікується як елемент топографії.[4]

Це породжує певні труднощі, адже трава, у залежності від своєї висоти, може бути розцінена і як частина рельєфу, і як перешкода для точних вимірювань.

Відтак, точність отримання цифрової моделі рельєфу (ЦМР) з урахуванням вищезгаданих чинників оцінюється у 250 мм, що є істотним відхиленням для низки детальних застосувань, зокрема, моніторингу змін земної поверхні чи розробки високоточних карт.

Щоб встановити фактичну вірогідність розпізнавання об'єктів, було проведено дослідження на вертикальному зрізі східного краю зсуву, де місцевість лишалася без рослинності.

Такий підхід надає змогу глибше досліджувати й вираховувати точність у тривимірному вимірі — за координатами X , Y та Z — у зменшеному масштабі.

Відсутність трав'яного покриву на зазначеній ділянці сприяє кращій видимості рельєфу, що дає можливість оцінити точність розпізнавання об'єктів із мінімальними похибками.

В умовах, які склалися на цій території, точність вимірювань визначається в межах 30 мм для кожної з осей — X , Y та Z . [4]

Це дозволяє з великою точністю фіксувати зміни у топографії та відслідковувати переміщення у межах конкретної області.

Разом з тим слід усвідомлювати, що ступінь точності змінюватиметься, якщо аналіз проводити на територіях, покритих скелями або трав'янистою рослинністю.

Зокрема, на трав'янистих ділянках, де лазерний промінь зазнає відбиття від трави, точність може помітно знизитися.

Трава може приховувати частину інформації або ж спотворювати дані через відсутність чіткої межі між поверхнею землі та об'єктами.

Таким чином, для досягнення кращого розпізнавання об'єктів на різних типах покриття місцевості, необхідно враховувати особливості

кожної ділянки та відповідно налаштовувати фільтрацію й інтерпретацію даних у програмному забезпеченні, щоб забезпечити отримання коректних результатів.

2.5. Характеристика та кількісна оцінка переміщення

Ці масиви точок можуть бути проаналізовані різними способами для виявлення змін у топографії.

Один із методів – це пряме порівняння «точка-точка», що передбачає ретельне зіставлення окремих точок між різними наборами даних.

Такий підхід дає змогу точно виміряти зміщення координат, а також виявити рухи та деформації на поверхні.

Інший метод заснований на порівнянні цифрових моделей рельєфу (ЦМР), що забезпечує загальне розуміння змін рельєфу в цілому між різними періодами збору даних.

Додатково, можна застосувати кількісний аналіз зміщень, використовуючи розпізнавання об'єктів під час вивчення трансектів.

Такий підхід дає змогу детально вивчати трансформації на конкретних ділянках місцевості, визначаючи переміщення об'єктів у кожній точці перетину трансекти.

В умовах нашого зсуву наявні деякі ускладнення, пов'язані з оклюзіями, що унеможливають проведення 3D-аналізу.[4]

Оклюзії виникають, коли об'єкти чи особливості ландшафту частково перекривають лазерний промінь, у результаті чого збирання інформації з певних зон стає неможливим.

З огляду на це обмеження, що виключає 3D-аналіз, ми звернулися до зіставлення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та аналізу трансектів.

Для кожного етапу збору інформації формуються ЦМР із розміром пікселя 20 сантиметрів.

Це дає змогу досягти високої деталізації, але наявність затінь ускладнює безпосереднє зіставлення цифрових моделей рельєфу (ЦМР), отриманих в різні проміжки часу.

ЦМР можуть складатися з існуючих, а також з інтерпольованих даних, що ускладнює розуміння кінцевих показників.

Для розв'язання цієї проблеми використовуються маски, які вказують на те, чи є дані правдивими.

Маска забезпечує наявність як мінімум однієї існуючої точки для кожної клітинки ЦМР, таким чином мінімізуючи вплив зон тіні.

Тіньові зони, де збір даних не відбувся через перешкоди, виключаються з подальших обчислень.[4]

Даний метод суттєво ускладнює аналіз отриманих результатів, оскільки він не дозволяє безперервно візуалізувати зміни на всій досліджуваній площі.

Отже, для того щоб мати точну інформацію про зміни в рельєфі, необхідно враховувати ці обмеження та застосовувати додаткові способи фільтрування та обробки даних, аби скорегувати отримані дані для отримання максимально точних та перевірених результатів.

3. Результати та інтерпретації

3.1. Віднімання ЦМР

Віднімання ЦМР дає можливість з високою точністю визначити різницю у висоті рельєфу, що є надзвичайно важливим під час дослідження трансформацій схилів під впливом зсувів.

При здійсненні такого аналізу, від'ємні значення Z-координат свідчать про те, що гірські породи змістилися вниз.

Це, фактично, вказує на осідання або зміщення матеріалу на певних відрізках місцевості.

Таке може бути результатом активних рухів у межах схилу, які є наслідком суттєвої деформації поверхні через зсув.

З іншого боку, додатні значення Z-координат вказують на переміщення, що включає в себе опускання разом із горизонтальним зсувом матеріалу схилу.[4]

Це свідчить про те, що у визначених зонах відбувається прогресія зсуву, в рамках якої гірські породи зміщуються вперед та донизу завдяки поєднанню вертикальних та горизонтальних рухів.

На додаток, шляхом віднімання цифрових моделей рельєфу (ЦМР) стає можливим отримання більш детального та кількісного уявлення про переміщення на різних стадіях зсуву.

Це надзвичайно корисно для моніторингу змін у рельєфі, що розвиваються з часом.

З його допомогою можливо з високою точністю оцінити величину зсуву різних ділянок схилу та виявити зони, що піддаються найбільшим деформаціям (див. рис. 7).

Підсумовуючи, метод віднімання ЦМР виступає потужним інструментом для кількісного вимірювання переміщень та для ідентифікації зон активних змін на схилах. Це сприяє точному прогнозуванню поведінки

зсувів та розробці стратегій їх запобігання або мінімізації їх руйнівного впливу.[4]

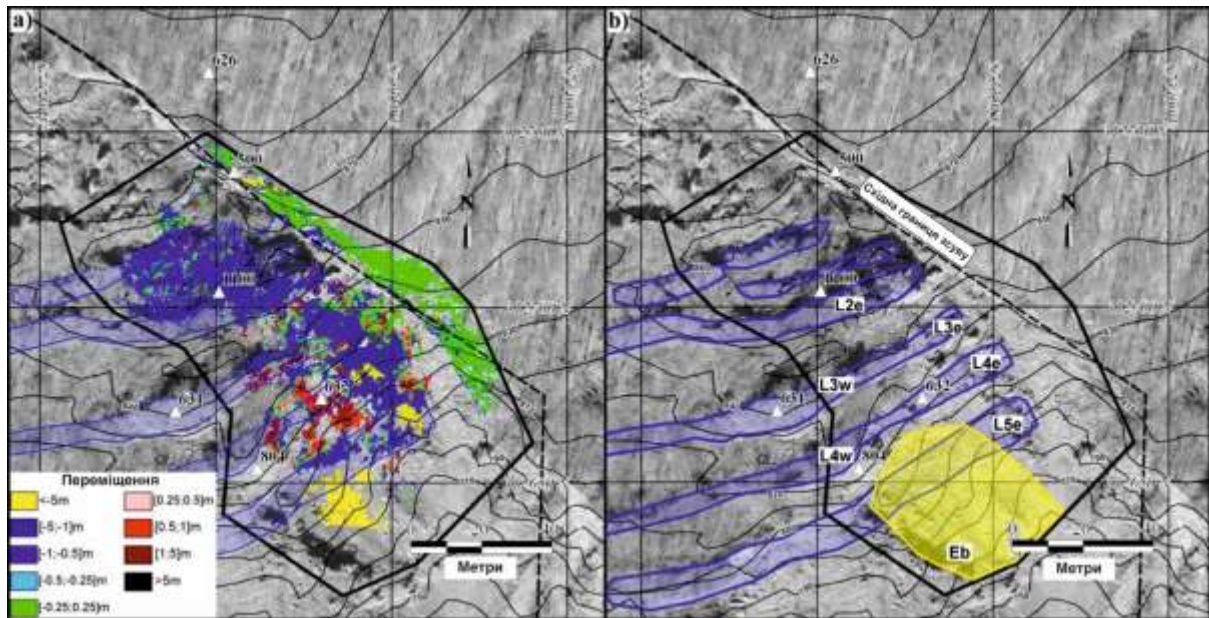


Рисунок 7 Варіації переміщення нанесені на орто зображення.

Відняті знімки ЦМР, накладені на орто-зображення (Рис. 7(a)), дають змогу розгледіти відмінності у рельєфі та полегшують розпізнавання різних зон у межах зсуву (Рис. 7(b)).

Це допомагає виділити найбільш рухливі ділянки, що зазнають деформацій, та потребують посиленої уваги при спостереженні.

Перша активна зона зсуву, відмічена жовтим на Рис. 7(b), зазнала помітних змін поверхні.

Внаслідок первинних зсувних явищ було забрано близько 1 метра верхніх шарів.

Ці зсуви свідчать про початковий етап активного зміщення, коли ділянки місцевості швидко змінюють висоту та об'єм порід.

Впродовж наступних півроку північна частина цієї зони продовжувала опускатися зі швидкістю 10-12 см на місяць, що підтверджує інтенсивність руху та поступове заглиблення матеріалів в даній області.[4]

Імовірно за все, цей процес виникає через особливості ковзаючих шарів ґрунту.

Вони утворені з податливих матеріалів, розташованих між міцнішими та монолітними гірськими породами, в яких майже відсутні тріщини.

Ці матеріали мають помітну чутливість і легко змінюють форму під впливом змін у навантаженні або коливань рівня води.

Східний край зсуву, де спостерігаються найбільші просідання, досягає приблизно 15 метрів у зоні L4e, тоді як у зонах L3e та L5e – лише 5 метрів.[4]

Протягом періоду досліджень ці зони зсуву осіли майже вдвічі, що свідчить про прискорення процесів на цих територіях.

Західні частини зсуву, позначені зонами L3w, L4w та L5w, також зазнають схожих змін, викликаних зсувними явищами, із відчутним опусканням поверхні.

Як видно з Рис. 8, ці ділянки схилу зазнали значних деформацій, що може бути наслідком переміщення мас матеріалу, де переважають горизонтальні компоненти ковзання.[4]



Рисунок 8. Фотографія структури зсуву

Аналіз отриманих відомостей дозволяє не тільки розширити розуміння характеру зсувів, а й з більшою точністю передбачати їхню еволюцію.

Створення подібних моделей має вирішальне значення для оцінювання загроз та розробки стратегій стабілізації зсувних процесів у досліджуваному регіоні.

Це дає змогу виявити найбільш критичні зони та реалізувати профілактичні заходи з метою мінімізації можливих негативних ефектів.[6]

Проте слід вказати, що один з основних недоліків такого підходу полягає в тому, що метод віднімання матриць, незважаючи на свою корисність, не гарантує повної характеристики переміщень, особливо коли матриця висот неповна через затінення або інші перешкоди, що обмежують роботу сканера.

Це ускладнює ведення докладного контролю за всіма змінами у зонах зсувів.

З іншого боку, використання двовимірної техніки розрізів дозволяє досягти кращих результатів у вимірюванні фактичних зсувів в активних зсувних ділянках.

Завдяки цьому підходу, можна з більшою точністю визначати зміщення в певних місцях, оскільки він допомагає уникнути проблем з накладенням, водночас зберігаючи високу точність показників.

Результати порівняння цифрових моделей рельєфу за період спостереження, які ілюструють зміни на різних етапах зсувних процесів, представлені на Рис. 9.[4]

Ці дані дають чітке розуміння перебігу подій та підкреслюють важливість регулярного моніторингу для своєчасного реагування на зміни умов.

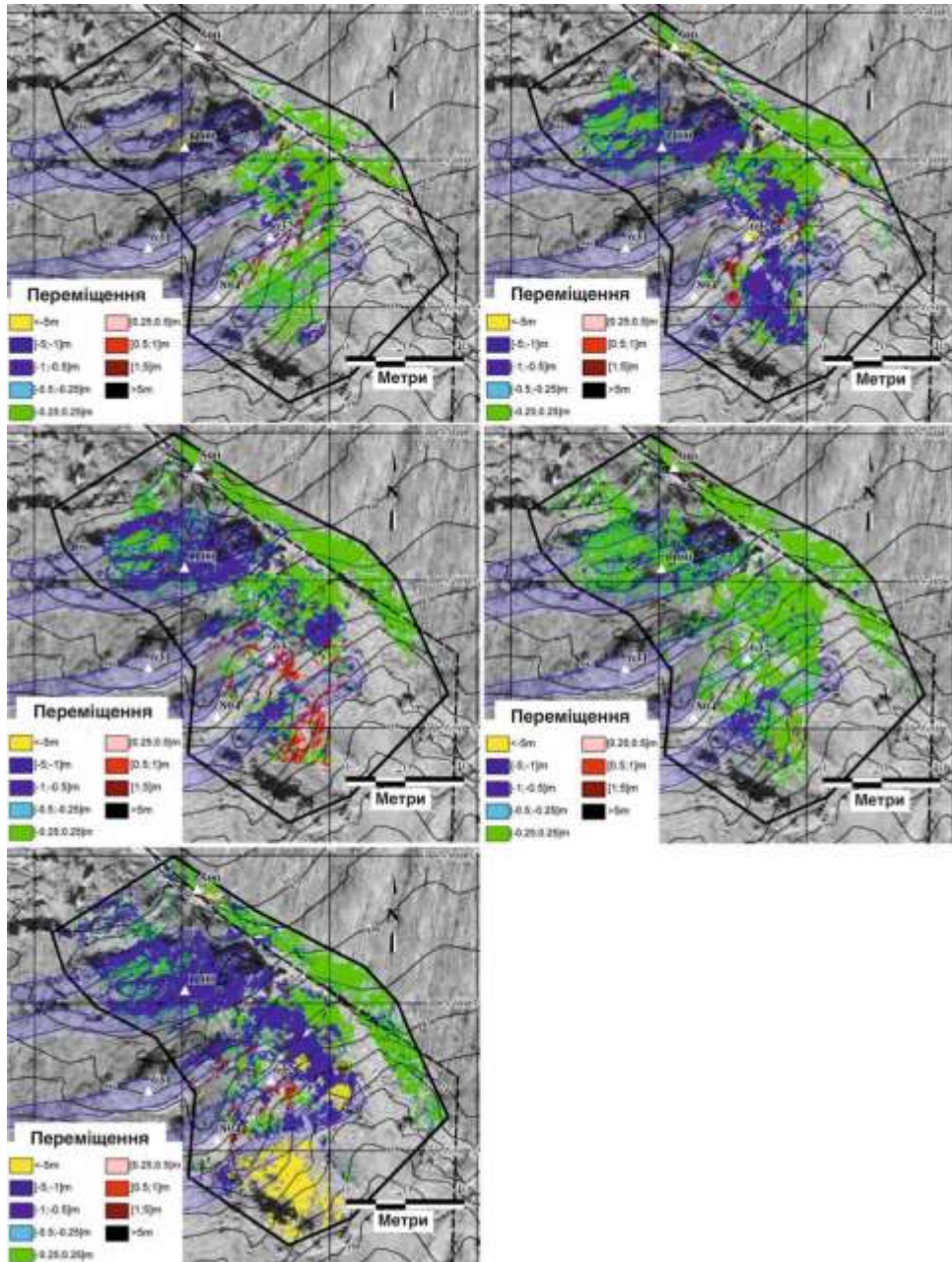


Рисунок 9. Віднімання ЦМР

3.2. Вимірювання зміщення на трансектах

Хмари точок, згенеровані лазерним скануванням, демонструють високу щільність (мінімум одна точка на 10 см), що надає можливість формувати та опрацьовувати трансекти без застосування інтерполяції, незалежно від наявності оклюзій, які можуть перешкоджати повноцінному відбору даних по всій протяжності профілю.

Ця властивість є ключовою, адже забезпечує можливість аналізувати дані у реальному вимірі та гарантувати високу точність вимірювань, навіть в умовах наявності часткових перешкод.

Після того, як хмари точок прив'язуються до географічних координат, що дає можливість синхронізувати інформацію з реальним просторовим оточенням, стає реальним формування трансект у різноманітних напрямках.

Такий підхід дозволяє з високою точністю визначати зміщення у різних точках досліджуваної території.

Напрямок аналізу було підібрано так, щоб він відповідав головному вектору зміщення (див. Рис. 10).[4]

Це гарантує найвищу точність у вимірюванні переміщень і відкриває перспективу вивчення динаміки зсувних процесів з урахуванням ключової траєкторії руху.

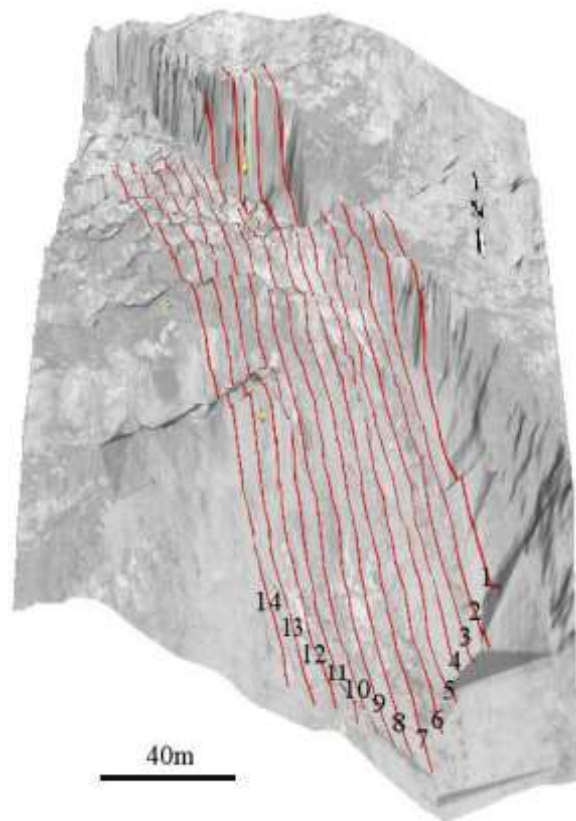


Рисунок 10. Локалізація трансект, реалізованих у даних TLS

У профільних даних застосовуються виключно точки, розташовані на відстані плюс-мінус 10 см від трансектних ліній.

Зміна положення трансект (див. Рис. 11) демонструє, що вся зона зсуву переміщується і не містить стабільних ділянок, а лише такі, що прилягають до східних кордонів.[4]

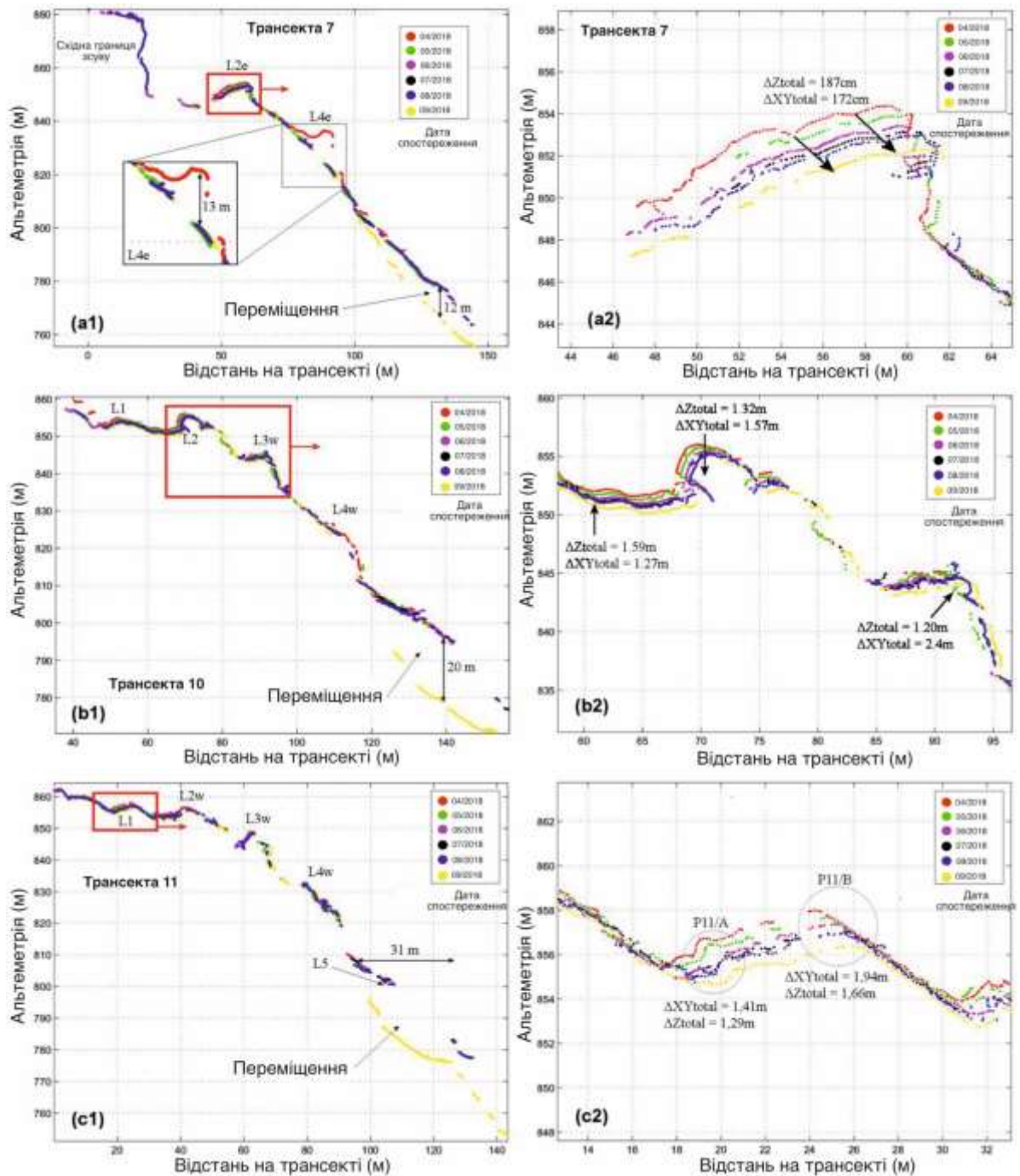


Рисунок 11. Рух зсуву в різний період

Навіть якщо перекриття ускладнюють точне визначення об'єму, геометричні властивості дозволяють здійснити орієнтовні розрахунки.

Приміром, для області з висотою 13 м та шириною близько 10 м, об'єм зсуву складає приблизно 1250 м³ (Рис. 11(a1)).

Далі: для обвалу, що трапився у вересні 2018 року (Рис. 11(a1,b1,c1)), було проведено обчислення об'єму, використовуючи формулу усіченої піраміди.

Її висота – 15 м, основа має розміри 75 × 50 м, а верхня площа – 40 × 40 м.

Розрахований об'єм обвалу у цьому випадку оцінюється приблизно у 2000 м³. [4]

Аналіз даних за період квітень – червень 2018 року виявляє: всі різноманітні структури, розташовані в зоні зсуву, демонструють переміщення з різними швидкісними параметрами.

Водночас, усі вони асоціюються з загальною зоною зсуву, де спостерігаються провали, що розповсюджуються всією площиною.

Отже, структура L2 презентує різноманітні показники швидкості, залежні від конкретного обраного трансекту.

У східній частині трансекту №7 (Мал. 11(a2)) спостерігається сумарне зрушення на 2,54 м (осідання на 187 см та горизонтальний зсув на 172 см) з чітко видимим кутом нахилу 47°.

У західній частині, на трансекті №10 (Мал. 11(b2)), та сама структура має менш крутий кут нахилу – 40°, з сумарним переміщенням 2,05 м (осідання на 132 см та горизонтальне переміщення на 157 см).

Зони деформації, що розмежовують структури зсуву, демонструють більшу схильність до осідання, аніж самі структури. [4]

Зрушення в ділянках між L1 та L2 становить 159 см, в порівнянні з 132 см на вершині структури L2 (Мал. 11(b2)).

Структура L3w показує більш виражений горизонтальний зсув – 2,4 м на тлі осідання 1,2 м (Мал. 11(b2)).

Її сумарне зміщення протягом періоду спостережень, від квітня до червня 2018 року, дорівнює 2,68 метри.

Водночас структура L1 демонструє різницю у переміщеннях між північною та південною частинами.

Зрушення у південній частині (P11_A на рис. 11(c2)) переважають аналогічні показники північної частини (P11_V на рис. 11(c2)) на 30%.

Зважаючи на рух L1, могло б скластися враження, що маса рухалася вниз схилом, зберігаючи постійний уявний кут нахилу в 40°. [4]

Однак, попри це, геологічні дані, здобуті в процесі досліджень, не підтверджують наявності площини ковзання.

Ділянки, що обмежені структурами зсуву, імовірно, адаптуються до безперервного зміщення через поєднання осідання та горизонтального зсуву.

Оскільки всі дані, отримані за допомогою наземного лазерного сканування, були зняті з значним перекриттям зони зсуву, величини зміщень у зоні зсуву за час спостереження відображені в таблиці 1.

Таблиця 1. Зміщення зони зсуву протягом періоду спостереження

Дата спостереження	δXY	δZ	Кут ковзання зсуву	Амплітуда (см)
04.2018	32	-22	31 ⁰	41
05.2018	41	-22	22 ⁰	49
06.2018	17	-25.4	42 ⁰	31
07.2018	9	-10.8	37 ⁰	13
08.2018	27	-38.7	46 ⁰	46
09.2018	121	-122	40 ⁰	175

З аналізу представленої таблиці впливає інформація про значущі трансформації в амплітуді зсувних рухів протягом усього часового проміжку спостережень.

Зокрема, зафіксовано тенденцію до зменшення швидкості зсуву: з показників у 10-12 см на місяць, які були зареєстровані між квітнем 2018 року та червнем 2018 року, до 6-7 см на місяць у період між червнем 2018 року та вереснем 2018 року.[5]

Це дозволяє констатувати уповільнення інтенсивності зсувного процесу.

Вищезгадані зміни також підтверджуються результатами геодезичних вимірювань, представлених у таблиці 2.

Таблиця 2. Моніторинг геодезичних вимірювань

Ціль моніторингу	δx_{yz} (см)	δx_{yz} (см/місяць)	Напрямок	Кут ковзання зсуву
1	123	9.4	150 ⁰	29 ⁰
2	109	8.7	151 ⁰	31 ⁰
3	75	6.4	150 ⁰	29 ⁰

Вони демонструють тренд уповільнення швидкості зсування протягом визначеного періоду, що може вказувати на початкову стабілізацію стану або перехід зсуву до менш активної фази.

Такі зміни є вкрай важливими для подальшого моніторингу та визначення стійкості зсувних процесів, оскільки зменшення амплітуди руху може свідчити як про зниження небезпеки, так і про зміну механізмів, які впливають на переміщення масиву в зоні зсуву.

Зміни кутів ковзання зсувів, як представлено в таблиці 1, також виступають важливим показником динаміки зсуву.

У проміжку від квітня до червня 2018 року кути ковзання тримались на рівні приблизно 30° , а після квітня 2018 року відбулося їх зростання до показників від 31° до 46° .

Це може вказувати на трансформації у зсувних процесах, зокрема через збільшення чи зміну інтенсивності руху, що супроводжуються коригуванням кута ковзання.

Розбіжність між геодезичними замірами та інформацією з наземного лазерного сканування, що сягає близько 10° , виглядає значущою та вимагає детального розгляду.[4]

Ця різниця зумовлена кількома чинниками, зокрема, відмінностями у методології опрацювання даних.

Вимірювання, здійснені на основі хмар точок, отриманих з наземного лазерного сканування, базуються на розпізнаванні форми, що може призводити до погрешностей в інтерпретації під час визначення координат точок з урахуванням геометрії об'єкта.

Відтак, це здатне створювати невеликі розбіжності між результатами, здобутими різними методами.

Розпізнавання форми враховує додаткові параметри, такі як інтерполяція даних, точність отримання точок та способи обробки, які можуть впливати на точність вимірювань.

На противагу цьому, геодезичні вимірювання забезпечують вищу точність у визначенні кутів і відстаней, оскільки вони ґрунтуються на прямому вимірюванні фізичних характеристик об'єкта.

3.3. Інтерпретація даних

Попередні студії, що спиралися на традиційні топографічні заміри та морфологічні відомості, допомогли сформувати загальне уявлення про розвиток зсувних конструкцій.

Проте, подібні підходи не могли дати достатньо чіткої та точної картини змін, що відбуваються під час зсуву.

Вони обмежували можливості дослідження незначних, але значущих особливостей, як-от тріщини чи незначні деформації всередині структури.

Завдяки застосуванню наземного лазерного сканування, стало можливим детальніше описати еволюцію кожної зсувної структури у часі.

Лазерне сканування відкриває перспективу отримання надзвичайно точних даних про зміщення площин, що дозволяє спостерігати зміни в окремих будівлях на ще детальнішому рівні.

У процесі польових досліджень було зафіксовано певні аномалії та тріщини, які виникали між різними структурами зсуву, хоча їхнє чітке виявлення у даних наземного лазерного сканування виявилось проблематичним.

Це пов'язано з постійними перетвореннями порід навколо таких аномалій, що утруднює точну фіксацію подібних змін.

Зважаючи на потенційну важливість таких аномалій для глибшого розуміння механізмів зсуву, їх необхідно включати в аналіз, навіть якщо вони не завжди чітко відображені у даних лазерного сканування.[4]

Зазвичай ці аномалії виглядають як заглиблення між різними структурами зсуву, що можна помітити на відповідних зображеннях (рис. 12).

Це підкреслює необхідність застосування комплексного підходу, що інтегрує дані лазерного сканування з традиційними методами, для забезпечення найповнішого розуміння процесів зсуву.

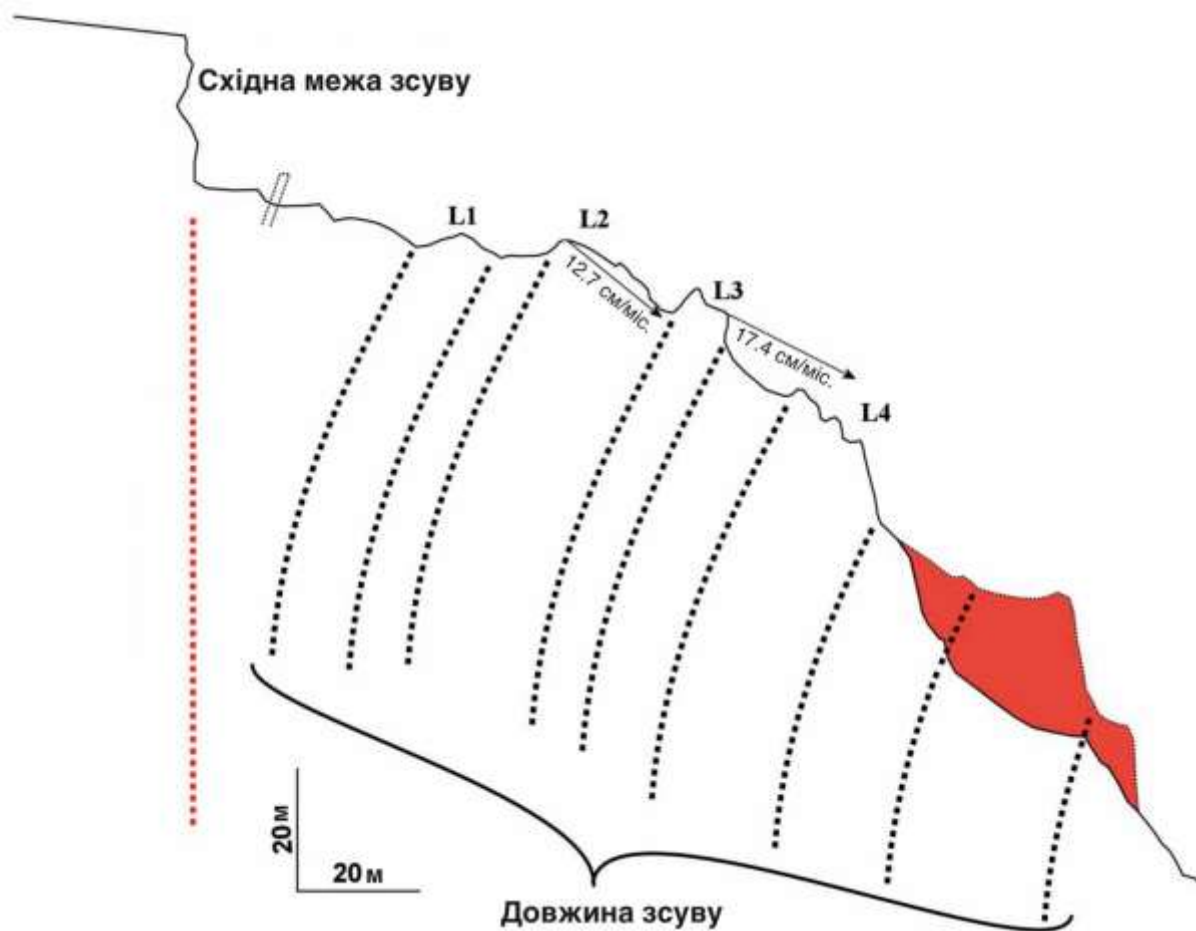


Рисунок 12. Інтерпретація даних, отриманих з даних наземного лазерного сканування.

Зміщення у вересні 2018 року, виділене червоним на графіку, визначає епіцентр активності, де зсувні процеси мали найбільшу інтенсивність.

Водночас, слід підкреслити, що найвагоміші зрушення фіксувалися на північних та північно-західних теренах, що залишилися за межами території, охопленої наземним лазерним скануванням.

Цей факт натякає на неповний обхват зсувних масивів, що створює певні обмеження для точного відстеження змін на цих ділянках.

Більшість отриманих з наземного лазерного сканування даних стосуються внутрішніх областей зсуву, де переміщення проявляються як комбінація осідань, поступальних і обертальних зміщень.[5]

Вся ділянка зсуву ковзає вниз, прямуючи на північний схід, що фактично перпендикулярно до загальної орієнтації зсувної структури.

Ці зміщення можуть бути результатом внутрішніх геологічних явищ, які відбуваються в межах самої зони зсуву, а не впливу зовнішніх чинників.

Існуючі моделі можуть служити основою для концептуального розуміння механізму зсуву.

Зокрема, аналіз поверхневих переміщень та геологічних особливостей дозволяє формувати припущення про кут нахилу зсувних структур.[7]

У разі відсутності чітких даних про кут падіння, можна припустити, що зсувні структури мають північний контур, що змінюється з глибиною, що є типовим для багатьох процесів зсуву.

Такий механізм дає змогу пояснити спостережувані зсуви, які відбуваються без зовнішніх впливів, тільки завдяки власним геологічним особливостям місцевості.

Висновки

Наші дослідження представлені в даній бакалаврській роботі показують, що поєднання наземного лазерного сканування та створення цифрової моделі місцевості (ЦММ) – дієвий спосіб виявлення зсувних ділянок, які перебувають у русі, із точністю до 250 мм.

Однак цей метод має певні обмеження, зокрема, він дає змогу оцінювати тільки зміни висоти, що може бути недостатнім для всебічного аналізу всіх переміщень в зоні зсуву.

Задля глибшої оцінки та кількісного визначення зсувів, ви використовуєте розпізнавання об'єктів на основі 2D-трансектів, що забезпечує точність в межах ± 30 мм у кожному напрямку.

Це доповнює дані лазерного сканування і дає змогу точно визначити зсуви в декількох вимірах.

Проте, труднощі, пов'язані із затіненням та хаотичними ділянками, є суттєвим обмеженням для повного просторового аналізу, адже не всі ділянки покриваються хмарами точок, які можуть зазнавати впливу рослинності та інших перешкод.

Використання аеролазерного сканування з БПЛА може бути рішенням цієї проблеми, оскільки воно здатне забезпечити краще покриття на важкодоступних територіях, хоча і з дещо меншою точністю та роздільною здатністю.

Результати аналізу 2D-трансектів, отриманих за допомогою наземного лазерного сканування, підтверджують попередні моделі та вказують на те, що обертання зсувних структур може бути одним із факторів, що пояснюють спостережувані зсуви.

Але для глибшого розуміння механізмів нестабільності необхідно провести додаткові дослідження, особливо на більшій глибині.

Це підкреслює необхідність комплексного підходу до моніторингу зсувів, який передбачає використання різних методів сканування та аналізу задля досягнення максимальної точності та повноти охоплення.

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. Kasperski, J.; Delacourt, C.; Allemand, P.; Potherat, P.; Jaud, M.; Varrel, E. Application of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) to the Study of the Séchilienne Landslide (Isère, France). *Remote Sens.* **2010**, *2*, 2785-2802. <https://doi.org/10.3390/rs122785>

5. Оппікофер, Т.; Джабойєдофф, М.; Кеузен, Х.-Р. Обвал на східному схилі Ейгера у Швейцарських Альпах. *Nature Geosci.* 2008, *1*, 531–535.

6. Оппікофер, Т.; Джабойєдофф, М.; Блікра, Л.; Деррон, М.-Х.; Метцер, Р. Характеристика та моніторинг зсуву скель Акнес за допомогою наземного лазерного сканування. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2009, *9*, 1003–1019.

7. Теза, Г.; Гальгаро, А.; Залтрон, Н.; Женевоюа, Р. Наземний лазерний сканер для виявлення полів зсувів: новий підхід. *Int. J. Remote Sens.* 2007, *28*, 3425–3446.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**« Оцінка ефективності використання наземного лазерного сканування
у виявленні та аналізі зсувів »**

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)