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

Кафедра геодезії та землеустрою

Гаврилюк Ярослав
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Комплексний підхід до аналізу стійкості скельних масивів на основі поєднання геодезичних та дистанційних методів
(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. Кравець Олена Ярославівна
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

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

Рецензент

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

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

м. Івано – Франківськ
2025р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень магістр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____

«____»_____20__року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Гаврилюк Ярослав

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комплексний підхід до аналізу стійкості скельних масивів на основі поєднання геодезичних та дистанційних методів

Керівник роботи к.т.н., доц. Кравець Олена Ярославівна

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

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

2. Строк подання студентом роботи _____

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

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

Огляд методів та характеристики вимірювання

Тестова ділянка дослідження

Детальне кадастрове дослідження

Об'єднання даних

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, 2,3,4	Кравець О.Я.		

7.Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд методів та характеристики вимірювання		
2	Тестова ділянка дослідження		
3	Збір та обробка даних		
4	Об'єднання даних		

Студент _____ Гаврилюк Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Кравець О. Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Метою магістерського дослідження є вивчення міцності гірських порід з використанням всебічного методу, який об'єднує геодезичні виміри та методи спостережень з відстані.

Актуальність контролю за станом обвалів і схилів зростає через ризик зсувів, що створюють загрозу для інфраструктурних об'єктів, транспортних шляхів та житлових зон.

Геодезичні методи гарантують високоточне визначення координат і параметрів зміщення опорних точок, що дає змогу виявляти навіть мінімальні деформації.

Натомість, дистанційні підходи, зокрема лазерне сканування, аерофотозйомка з безпілотників та супутникові дані, дозволяють формувати просторово-часові моделі земної поверхні з високою детальністю та масштабуванням.

Синергія цих методів проявляється у поєднанні локальної точності геодезичних вимірювань із широким охопленням території, забезпеченим дистанційними технологіями.

Практичне значення дослідження полягає у створенні методики, придатної для моніторингу гірських районів, зрізів гірських порід та територій, що піддаються ризику геодинамічних процесів.

Отримані дані суттєво покращують здатність реагувати на природні катастрофи, а також сприяють підтримці техногенної та екологічної безпеки.

Ключові слова: інженерні дослідження, GNSS, TLS, моніторинг, наземний радіолокатор, неоднорідні дані, обвали.

Зміст

Вступ

1. Огляд методів та характеристики вимірювання

2. Тестова ділянка дослідження

3. Збір та обробка даних

3.1 GNSS
3.2 Тахеометр
3.3 Наземне лазерне сканування

3.4 Геосенсорні дослідження

4. Об'єднання даних

4.1 Реєстрація хмар точок

4.2 Картування GB-SAR на даних наземного лазерного сканування

4.3 Поточковий аналіз деформації

4.4 Площинний аналіз деформацій наземного лазерного сканування та GB-SAR

4.5 Наземний радар із синтетичною апертурою

Висновок

Список використаної літератури

Вступ

Світ сьогодення невпинно змінюється, і ці зміни суттєво прискорилися через діяльність людства в останні десятиріччя.

Щоб зменшити небезпеки, що виникають внаслідок цих змін (скажімо, зсуви), необхідно вчасно виявляти їхні ознаки та заздалегідь вживати заходів – від укріплення схилів до потенційної евакуації людей.

Одним з найважливіших способів відстеження таких змін є вимірювання деформацій.

Наразі існує багато різних методів для спостереження за деформаційними процесами.

Вибір конкретного підходу визначається характеристиками об'єкта: його розмірами, формою, з якого матеріалу він зроблений та його здатністю відбивати світло.

Також враховуються передбачувані темпи та розмах деформацій, і рівень небезпеки.

У цьому контексті важливо, чи використовуються контактні або безконтактні методи вимірювання.

Але кожен метод має свої обмеження, тому для досягнення більш точних результатів рекомендується поєднувати декілька технік.

Складність полягає у тому, що інформація, отримана з різних приладів, часто відрізняється, і об'єднання її в єдине ціле є важкою задачею.

У цій магістерській роботі представлено підхід до спостереження за кам'янистим схилом в околицях Дністровського каньйону (Івано-Франківська область).

Для проведення дослідження залучено комплекс геодезичних сенсорів, які забезпечують можливість як точкових, так і площинних вимірювань.

Зокрема, здійснено аналіз даних з GNSS та тахеометрів (підходи точкових вимірювань), а також з наземного лазерного сканування та наземних радіолокаторів (методи площинних вимірювань).

На першій стадії обробка інформації проводилася окремо для кожного методу, після чого здійснено спробу їх об'єднання в єдиний масив даних.

У публікації також проаналізовано складнощі, з якими зіткнулися дослідники в процесі вимірювань в різні часові проміжки, а також проблеми, що виникали на стадії обробки отриманих результатів.

Аналіз зазначених викликів та запропоновані шляхи їх подолання можуть стати корисними під час майбутнього розгортання багатосенсорних систем для моніторингу навколишнього середовища.

Об'єктом дослідження було обрано Дністровський каньйон, який є одним з найбільших каньйонів Європи та України.

Він простягається територією чотирьох областей, починаючи неподалік від села Петрилів.

В ході дослідження було застосовано три ключові методи спостереження: глобальну навігаційну супутникову систему (GNSS), наземне лазерне сканування (TLS) і наземний радіолокатор (GB-SAR).

Вимірювання здійснювались у два часові проміжки: у березні 2020 року та у вересні 2021 року.

Дані, отримані в зазначені часи, були зведені до спільної системи відліку: у 2020 році – з застосуванням GNSS, а в 2021 році – комбіновано, використовуючи GNSS та тахеометр TS.

Зіставлення результатів, зібраних в різні епохи, дозволило здійснити аналіз деформацій, виходячи з передумови про відсутність значних зрушень на місцевості протягом періоду дослідження.

З огляду на те, що проміжок часу між вимірюваннями був незначним, всього один рік, виявити зміни було можливо лише при фіксації суттєвих зсувів або шляхом підвищення точності визначення координат за допомогою GNSS та тахеометрії.

1. Огляд методів та характеристики вимірювання

Моніторинг, як штучних конструкцій (мостів, тунелів, веж), так і природних об'єктів (зсувів, льодовиків, скель), є одним з ключових аспектів інженерної геодезії.

До традиційних приладів спостережень відносять глобальну навігаційну супутникову систему (GNSS) та тахеометричні вимірювання.

Обидва способи надають можливість безпосередньо визначати просторове положення контрольних точок.

Для їхнього використання, зазвичай, потрібно закріпити спеціальні репери безпосередньо на об'єкті, що іноді є складним процесом, а іноді - практично неможливим.

В цілому, геодезичні вимірювання дозволяють реєструвати деформації на поверхні об'єктів.

Для спостережень також широко використовуються геотехнічні пристрої, на кшталт екстензометрів, інклінометрів та їм подібних.

У багатьох проєктах комбінування геодезичних і геотехнічних підходів дозволяє отримати більш повне розуміння стану об'єкта.

Відтак, співпраця геодезистів і геотехніків надзвичайно важлива.

Розвиток комп’ютерних технологій і засобів комунікації посприяв впровадженню безперервних, автоматизованих та водночас економічно вигідних систем моніторингу.

В останні роки дедалі більшої популярності набувають геосенсорні мережі (GSN), побудовані на основі недорогих GNSS-приймачів.

Кожен вузол у цій мережі інтегрує низку сенсорів та обладнання для збирання даних, доповнюючи їх енергетичними блоками й модулями передачі інформації.

Це дозволяє класифікувати вузол як завершену мультисенсорну систему.

Зазвичай, такі мережі встановлюються стаціонарно на час, що передбачений для моніторингу.

Мережі тахеометрів з відбивачами також можна розглядати як один з видів геосенсорних систем.

Крім того, програмне забезпечення з відкритим кодом широко використовується для управління сенсорами та обробки зібраних даних.

Наприклад, JAG3D використовується для конфігурування вимірювань, а OpenADMS – для керування датчиками та обробки отриманої інформації.

Розширення можливостей програмного забезпечення та технічних пристроїв дає змогу використовувати більше сенсорів та отримувати інформацію з більшої кількості джерел.

У той же час автоматизація і постійність вимірювань збільшують об’єм даних не лише за часом, а й за простором.

Це стало реальністю завдяки методам площинних вимірювань, зокрема лазерному скануванню (наземному та аерозйомці), фотограмметрії та радіолокаційним системам (супутниковим і наземним SAR).

На відміну від точкових підходів, вони надають набагато вищу просторову роздільну здатність та не потребують контакту, що усуває необхідність встановлення контрольних пунктів.

Проте площинні методи мають певні обмеження.

Щоб зіставляти відомості з різних періодів часу, часто потребуємо надійних точок відліку, прив'язаних до певної території.

Окрім цього, сам процес вимірювання площин займає певний час (від лічених секунд і довше), що ускладнює фіксацію миттєвих змін.

З іншого боку, саме ці методи дають можливість створювати детальні робочі креслення, цифрові моделі місцевості та точні тривимірні моделі об'єктів.

Окремі труднощі виникають через те, що результати площинних вимірювань часто важко порівнювати безпосередньо.

Для аналізу деформацій застосовують моделювання хмар точок, яке є простішим у разі об'єктів з чіткою геометричною формою (наприклад, греблі), але складніше для складних природних утворень — скель або зсувів.

Спершу, важливо врахувати, наскільки добре поверхня віддзеркалює сигнал, а також, чи забезпечується пряме бачення.

Радіолокаційні інтерферометри вирізняються тим, що реєструють тільки зміни віддалі вздовж лінії, якою поширюється промінь.

Для перетворення цих даних на тривимірне зображення, необхідно застосувати цифрову модель поверхні.

Попри здатність фіксувати зміни, що вимірюються субміліметрами, значні зсуви спричиняють неоднозначності, які необхідно виправляти.

Це відчутно ускладнює використання методу для спостережень, які проводяться регулярно.

Зазвичай, площинні прилади дорожчі за точкові, тому їх частіше використовують для тимчасових вимірювань або з певною періодичністю.

З плином часу очікується зниження їх вартості, так само, як це відбувалося з іншими технічними рішеннями.

Не зважаючи на виявлені мінуси, площинні способи, завдяки високій здатності до просторового розрізнення, дедалі активніше використовуються у моніторингу, особливо в поєднанні з точковими вимірюваннями.

У цьому дослідженні було здійснено спробу провести всебічний аналіз точкових та площинних підходів до спостережень.

У таблиці 1 подано параметри застосованих у дослідженні наземних геодезичних методів та їх можливості для здійснення моніторингу.

Таблиця 1: Характеристики методів наземних геодезичних вимірювань щодо моніторингу

Метод дослідження	**Тип вимірювання (точкове або площинне)**	**Автоматизація вимірювання**	**Необхідність контрольних точок**	**Точність вимірювання**	**Можливість періодичного аналізу деформацій**
GNSS	точкове	так	так	мм до см	так
Тахеометрія	точкове	так	так	мм до см	так
Наземне лазерне сканування	площинне	так	для порівняння періодів	мм до дм	так
Геосенсорні мережі	площинне	так	для порівняння періодів	мм	ні

У таблиці 1 наведено стислий огляд головних характеристик різних технік вимірювань, а також узагальнені відомості про їхню відповідність для періодичного аналізу деформацій.

Згідно з наведеними даними, геосенсорні мережі не є найкращим варіантом для розв'язання цієї проблеми, бо точність прив'язки до географічних координат у них значно поступається точності самого процесу вимірювання.

З огляду на вищенаведене, використання геосенсорних мереж найбільш доцільне для організації безперервного моніторингу.

2. Тестова ділянка дослідження

Івано-Франківщина обіймає ділянку Дністровського каньйону, починаючи від села Петрилів, зачіпаючи околиці Галича, і далі, рухаючись течією вниз, вздовж правого (південного) берега досягає кордону з Тернопільщиною та Буковиною.

Загальна довжина каньйону наближається до 250 кілометрів, а в деяких місцях глибина сягає двохсот метрів.

Він розтинає Подільську височину, заглиблюючись у відкладення силуру-девону та міоцену, що зумовлює створення стрімких схилів із численними виходами гірських порід.

Предмет нашого розгляду – це відрізок між Петриловом та Незвиськом, що представляє собою своєрідні "верхні ворота" каньйону з особливо крутим правим берегом.

Поблизу Незвиська можна побачити травертинові стіни, які постійно руйнуються: великі шматки скель відриваються та падають у воду, створюючи класичний обвальний режим.

Цей процес стає інтенсивнішим під час весняного водопілля, тому сплави по річці на цій ділянці небезпечні.

Відрізок від Петрилова до Незвиська – це характерний приклад розвитку гравітаційних процесів у каньйоні, де відбуваються як масштабні обвали скель (травертин, вапняк), так і менші зсуви на нижніх терасах.

Для науковців ця територія — ніби "лабораторія", де можна вивчати природні явища, а для людей (туристів, місцевих мешканців) – зона підвищеного ризику.

Саме тут Дністер розрізає товщу Подільської височини, формуючи одні з перших, чітко виражених вертикальних стін каньйону.

Правий берег здіймається вгору на 80–120 метрів від рівня води, здебільшого сформований травертинами та вапняками.

Ці породи розміщуються на нещільних суглинках та мергелях.

Така геологічна структура призводить до утворення скельних виступів та "карнизів".

Під ними накопичуються продукти осипів та зсувів ґрунту.

Основні процеси руйнування на дослідженій ділянці:

1. Зсуви та обвали.

- Відрив і сковзання брил травертину вниз по схилу.
- Утворення ковзних площин у місцях контакту вапняків і суглинків, що сприяє зміщенню блоків.
- Під час повеней частина зруйнованого матеріалу потрапляє прямо у русло, формуючи завали.

2. Підмивання підошви схилу.

- Інтенсивне розмивання основного берега потоком води в місцях вигинів русла.
- Після великих повеней (зокрема у 2008 та 2020 роках) було зафіксовано відновлення обвалів в межах цієї місцевості.
- Вимивання найдрібніших часточок ґрунту з-під великих кам'яних брил, що зменшує їхню стабільність.

3. Зсувні процеси.

- Під скельними уступами розкинулись зони суглинистих терас, де після затяжних дощів можуть виникати невеликі зсуви з валиками зсуву та тріщинами відриву.
- Типовим явищем є сповзання ґрунтових шарів у формі «язиків», що накладаються на нижні частини схилів.

На малюнку 1 продемонстровано територію, яку ми розглядаємо.

Головна мета дослідження полягає у визначенні векторів та сили переміщень у найбільш критичних місцях, що дає змогу виміряти ступінь небезпеки.

Рисунок 1. Область дослідження

Для проведення вивчень на верхівці скелястого масиву було визначено декілька стійких природних точок, що найкраще підходили для розміщення антен GNSS та кутових відбивачів.

Ці ж самі позиції також стали місцем для фіксації призм, які були необхідні для проведення тахеометричних вимірювань.

У нижній частині схилу характер місцевості сприяє облаштуванню спостережних пунктів, з яких відкривається безпосередній огляд на вершину скелі.

Ці пункти були використані для отримання даних методами наземного лазерного сканування, тахеометрії, GNSS та у геосенсорних дослідженнях.

Спостережний пункт під номером 1 було облаштовано приблизно за 750 метрів від об'єкта, а пункт №2 знаходився на відстані близько 125 метрів (див. рис. 2).

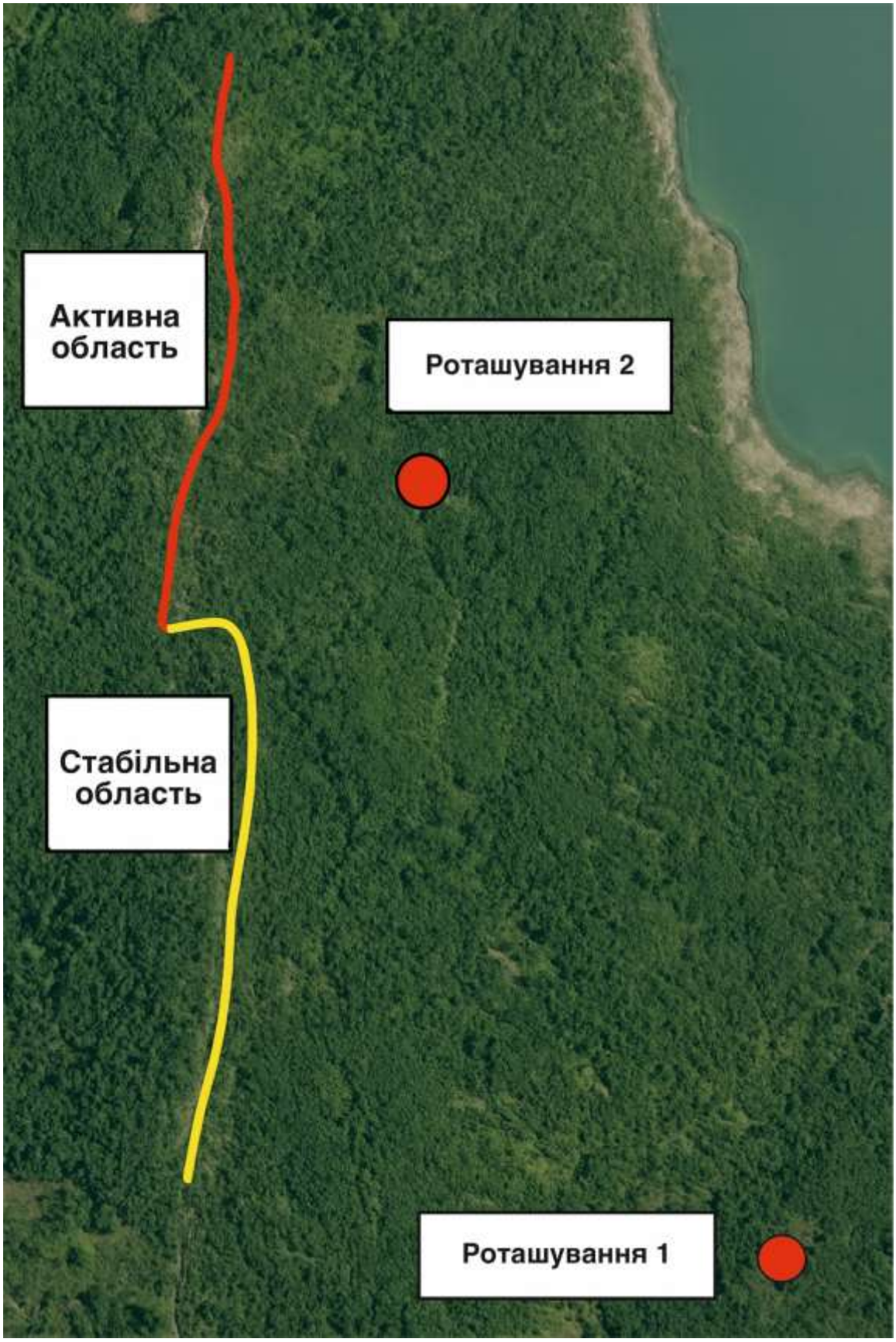


Рисунок 2. Місця вимірювань та сейсмічні зони

Не всі методи вимірювання були використані на обох етапах дослідження.

У таблиці 2 представлено список лише тих підходів, які були використані під час кампаній 2020 та 2021 років.

Дані, отримані за допомогою цих методів, в подальшому є основою для поєднання геодезичних спостережень, як в межах однієї сесії, так і між різними сесіями.

Варто зазначити, що не всі залучені датчики безпосередньо впливають на подальший аналіз деформацій.

Таблиця 2 Огляд використаних методів в обидва періоди спостереження

Періоди спостередження	**GNSS**	**Наземне лазерне сканування**	**Тахеометрія**	**Геосенсорні дослідження**
Березень 2020	X	X		X
Вересень 2021	X	X	X	X

Такий розвиток подій зустрічається в багатьох завданнях моніторингу.

Під час спостережень часто виникає потреба у використанні додаткових способів вимірювання, адже поглиблений аналіз геометрії та факторів деформації висуває нові вимоги до досліджень.

З цією метою можливе включення сучасних технологій.

В таблиці 2 представлено візуалізацію таких змін: у 2020 році моніторинг здійснювався з використанням GNSS, наземного лазерного сканування та геосенсорних спостережень, в той час як у 2021 році до переліку додалися тахеометричні вимірювання

Специфіка геосенсорних досліджень полягає у потребі врахування двох тимчасових періодів, для яких потрібна прив'язка отриманої інформації.

Ускладнення спричинені відмінностями у підборі опорних точок в різних часових інтервалах.

Завдання геоприв'язки (реєстрації) набуває критичного значення під час роботи з різнорідними наборами даних, адже виявлення ідентичних контрольних точок у різних масивах є ключовим елементом.

З метою систематизації застосованих методів у дослідженні, їх стислий опис вміщено в таблиці 3.

Таблиця 3 Огляд застосованих методів вимірювання в роботі

Тип методів вимірювання	**Тип приладу**	**Точність**	**Просторова роздільна здатність**	**Система координат**
Точкове				
GNSS	2020 Leica 1200 2021 Leica GM30	горизонтальна: 5мм+0.5ppm, вертикальна 10мм+0.5ppm(Leica 1200) горизонтальна: 8мм+1ppm, вертикальна 15мм+1ppm(Leica GM30)	-	Локальна для базової лінії
Тахеометр	Leica TM30	0.15 для горизонтальних кутів	-	Локальна

		0.3 для вертикальних кутів 0.6мм+1ppm для відстаней		
Площинні				
Лазерний сканер	Leica P50	120-270м (розташування2): 1.2мм+10ppm 570-1000м (розташування1): 3мм+10ppm для відстані; 2.4 для кутів	22см (розташування1) 2.2 (розташування2)	Локальна
Геосенсорні дослідження	IBIS-L	Субміліметрове значення для зміщень	Роздільна здатність по дальності: 0.5м; Роздільна здатність по перехресній дальності 4.4	Локальна 2D

У наступних частинах буде подано докладний аналіз способів збирання, обробки й об'єднання інформації.

Але спочатку треба розглянути базові підходи до взаємодії даних всередині певного проміжку часу, а також можливості їхнього поєднання між різними часовими відрізками.

Оскільки кампанія 2021 року включає в себе всі задіяні датчики (дивіться таблицю 2), саме вона обрана за зразок для інтеграції точкових і площинних підходів у рамках одного етапу.

Виключенням є лише геосенсорні дані, котрі неможливо безпосередньо об'єднати в єдину координатну систему.

Зокрема, спостереження GNSS здійснювались на двох контрольних пунктах, що розміщені в області активних процесів, і на одній референсній точці в місцевості 1 (дивіться малюнок 2).

Ті самі точки вимірювалися за допомогою тахеометра.

До того ж, відбивачі, закріплені з використанням лазерного сканера, теж визначалися тахеометрично та об'єднувалися в єдину мережу, що дозволило сформувати масив хмар точок.

Об'єднання даних, зібраних за два різних періоди, виявилося складним через певні обставини.

GNSS-виміри використовувалися для обчислення базисних ліній, однак абсолютні координати були недоступні.

Відтак, у мережі гібридного типу, зведеній 2021 року, використовували тахеометрію, інтегруючи інформацію виключно через розбіжності в координатах, тобто базисні лінії.

У 2020 році створення тахеометричної мережі не проводилося, що ускладнило безпосереднє співставлення лазерних сканів, зібраних у обидва періоди.

Частково розв'язати проблему вдалося, застосувавши стійкі фрагменти в областях 1 та 2, а також на відносно стабільному фрагменті скелястого масиву.

Застосовуючи алгоритм ICP, що мінімізує розбіжність між двома хмарами точок, дані лазерного сканування 2020 року інтегрували в систему координат, визначену в 2021 році.

3. Збір та обробка даних

3.1 GNSS

Для гарантування точності вимірювань під час дослідження було розгорнуто одну референсну станцію GNSS, яку встановили в стабільному місці.

Антену фіксували на штативі.

Опорні станції, розміщені у 2020 та 2021 роках, знаходились поряд, хоча їхні координати не були ідентичними.

У зоні активних зрушень поблизу краю скелі було встановлено дві рухомі станції GNSS (M1 та M2), розташовані у відкритому просторі без перешкод.

Це дозволило визначити величини двох ключових ліній: від базової станції до точки M1 та від базової станції до точки M2.

Спостереження проводилися протягом двох годин у кожному з двох років, з періодичністю фіксації даних 1 Гц.

У 2020 році використовувався приймач Leica 1200, що працював лише з GPS, а у 2021 – Leica GM30, з підтримкою GPS, ГЛОНАСС та BeiDou.

Заміна устаткування була необхідна через відсутність приймача Leica 1200 у 2021 році.

Параметри порівняльної точності цих двох систем представлені в таблиці 3.

Для базових ліній, довжиною близько 0,7 км, розрахункова точність складала приблизно 5-9 мм у планових координатах та 10-16 мм по висоті.

Натомість, дійсні величини значною мірою залежать від того, чи є перешкоди навколо місця, де розташовано антену.

У подальших дослідженнях деформацій, бралися до уваги лише результати з приймачів Leica.

Це обумовлено тим, що через відсутність калібрувальних файлів для антен, неможливо правильно порівняти ці дані з вимірами, отриманими від інших, зокрема дешевших, приймачів.

Для більшості геодезичних антен GNSS існують калібрувальні файли, які використовувалися під час обробки інформації.

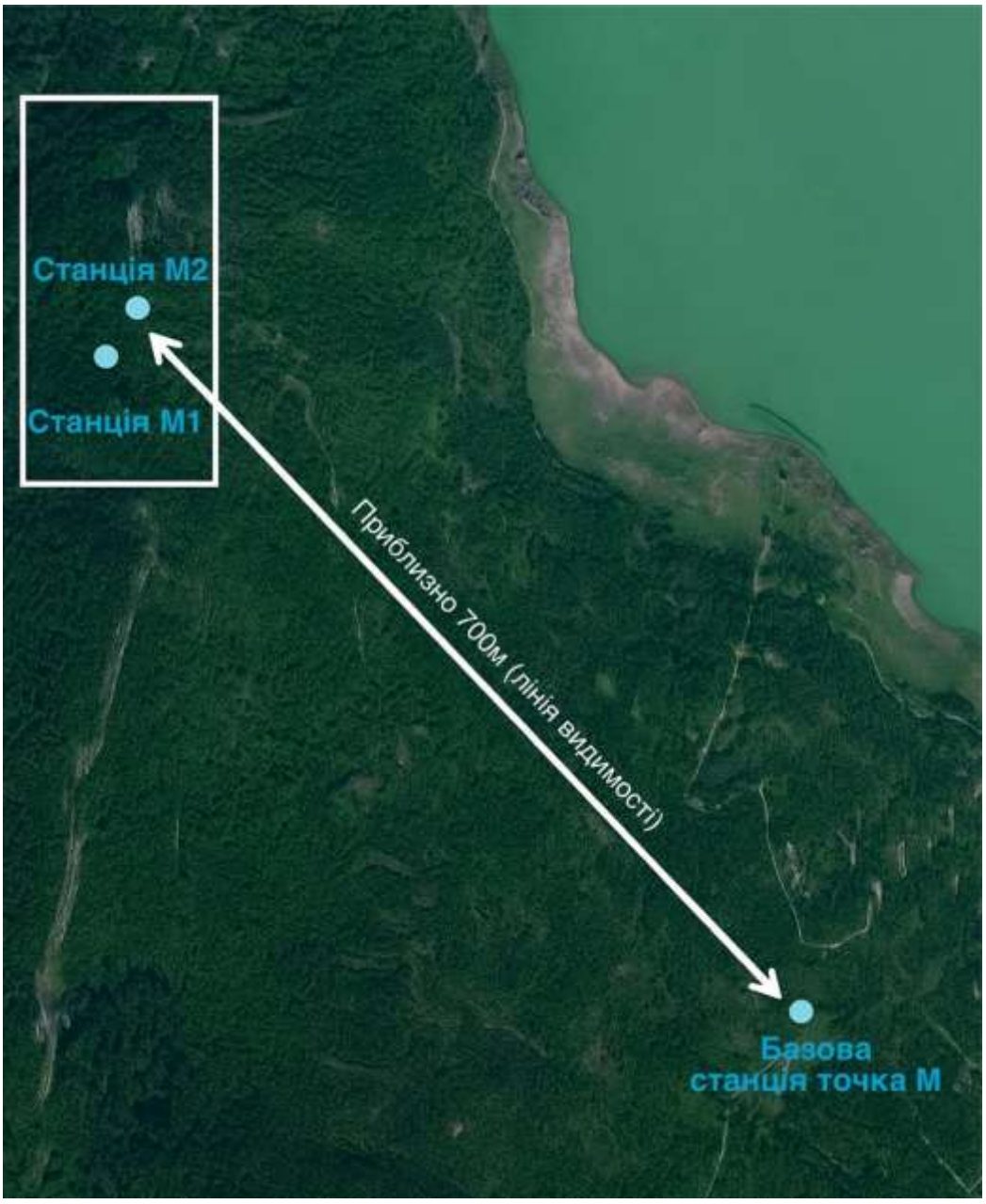


Рисунок 3: Огляд двох базових ліній

Таблиця 4 Базові лінії GNSS двох періодів

Періоди	**2020**				**2021**			
Базова лінія	dE(мм)	dN(мм)	dh(мм)	ds(мм)	dE(мм)	dN(мм)	dh(мм)	ds(мм)
M-M1	-521.4432	412.2145	202.8745	705.3214	-521.4422	412.2549	202.8721	705.3474
M-M2	-534.6543	400.0234	210.2365	701.3267	-534.6597	400.0798	210.3395	701.3327

Таблиця 5 Стандартне відхилення базової лінії GNSS для двох періодів

Періоди	**2020**				**2021**			
Стандартні відхилення	sdE(мм)	sdN(мм)	sdh(мм)	sds(мм)	sdE(мм)	sdN(мм)	sdh(мм)	sds(мм)
M-M1	3.7	3.5	12.4	13.6	4.2	3.1	13.7	14.4
M-M2	3.2	4.9	11.4	12.1	2.3	2.9	10.6	11.1

Всі дані спостережень GNSS було оброблено із застосуванням спеціалізованого ПЗ для обчислення базових ліній.

Відповідно до попередніх вказівок, опорні станції у 2020 та 2021 роках були розміщені в різних місцях.

З огляду на це, кожну станцію індивідуально прив’язали до найближчих постійних пунктів.

У таблицях 4 та 5 представлено базові лінії з відповідними стандартними відхиленнями як для висотної складової, так і для загального просторового положення в обидва періоди вимірювань.

Розбіжності між базовими лініями, отриманими у двох різних періодах, виражено в міліметрах та сантиметрах.

Отримані у 2021 році стандартні відхилення, представлені у таблиці 5, дозволяють стверджувати про їхню відповідність реальним умовам вимірювань та високу вірогідність.

Водночас, зважаючи на цю точність, неможливо з упевненістю зафіксувати очікувані горизонтальні деформації, що складають приблизно

4,2 мм на рік протягом одного річного циклу, особливо якщо порівнювати зі стабільною вертикальною складовою.

Це вказує на необхідність тривалішого періоду спостережень для проведення аналізу змін, використовуючи дані GNSS та порівнюючи їх між різними епохами.

Враховуючи припущення про нормальний розподіл похибок, може знадобитися щонайменше три роки спостережень для виявлення горизонтальних зміщень у північно-східному напрямку.

3.2 Тахеометр

Тахеометр – один з основних приладів у сучасній геодезичній справі.

Завдяки поєднанню функцій вимірювання кутів та відстаней, він працює як багатосенсорна система, яку активно використовують у будівництві та для задач моніторингу.

На дослідженій території тахеометричну мережу було створено з використанням високоточних відбивачів Leica TM30 та Leica GPR121.

Її метою було інтегрування даних від різних сенсорів в єдину систему.

Водночас необхідність фіксації чи центрування приладу над певними реперами була відсутня.

До мережі було залучено:

- три GNSS-точки,
- чотири відбивачі для наземного лазерного сканування,
- дві станції TLS,
- шість цілей, розміщених в межах GB-SAR,
- три пункти тахеометричних станцій.

Для більшої впевненості у точності вимірювань, за потреби, здійснювалися додаткові спостереження у двох різних площинах з використанням декількох тахеометричних станцій.

Розташування пунктів мережі в просторі та їх прив’язка до конкретного обладнання відображено на малюнку 4 (ліворуч).

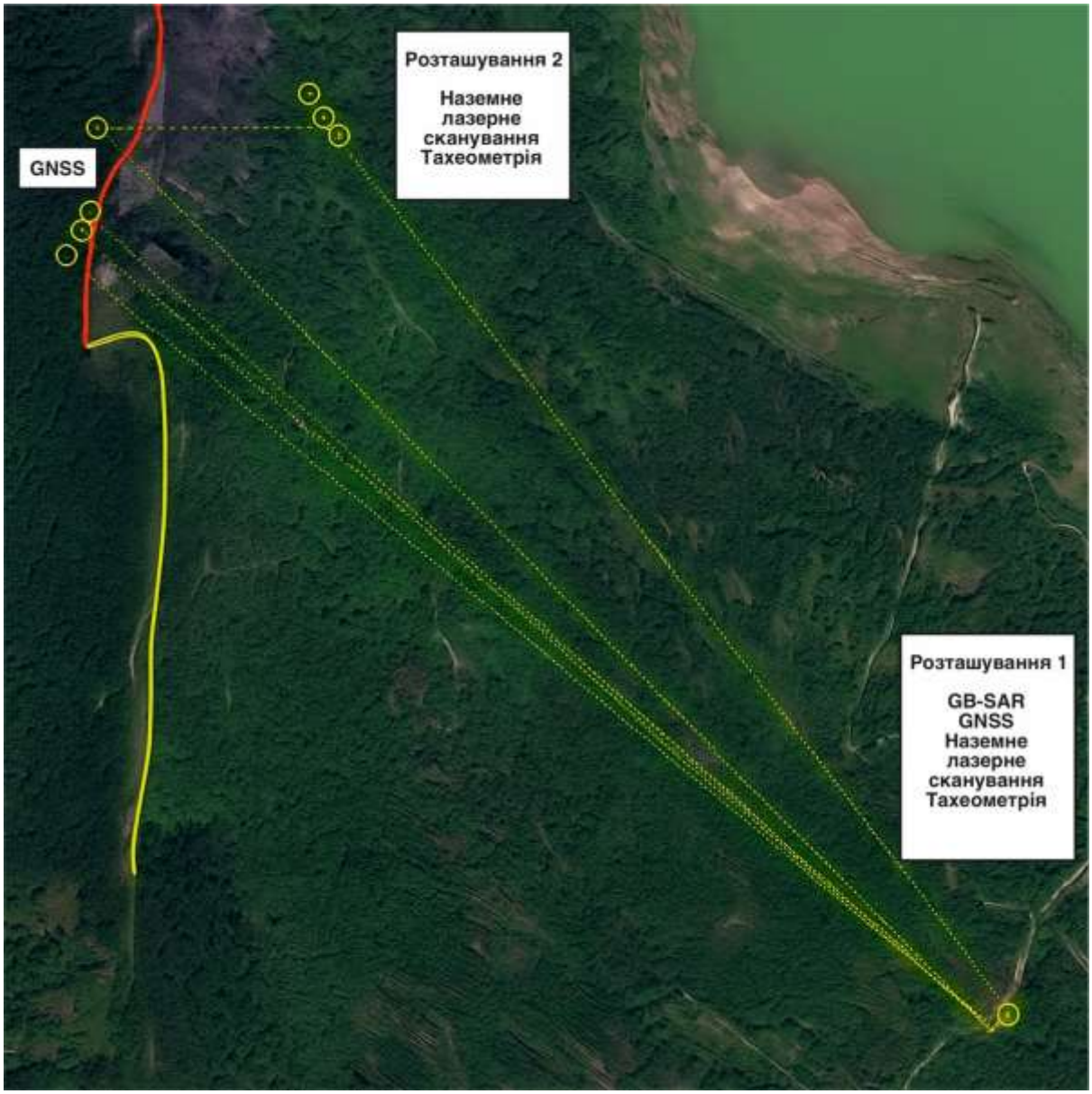


Рисунок 4. Мережа тахеометрії та датчики, що використовуються в кожному місці

Усі вимірювання були здійснені дев'ятого вересня дві тисячі двадцять першого року, в умовах, коли атмосферні параметри майже не змінювалися.

Метеорологічні відомості записувалися з використанням станцій, розташованих у пункті 1, між двома локаціями спостережень і на околиці скелястого масиву.

В період проведення польових досліджень температура варіювалася від 26 до 28 градусів Цельсія, відносна вологість повітря була в межах 65–70 відсотків, а атмосферний тиск коливався від 972 до 974 гектопаскалів.

Враховуючи незначні коливання цих параметрів та відносно короткий часовий інтервал між серіями вимірювань, було прийнято рішення, що поправка на відстань залишається стабільною для обох досліджуваних ділянок.

В окремих ситуаціях використовувалося взаємне спостереження, що надавало змогу одразу замінити відбивач тахеометра, коли здійснювалося центрування на трегері (наприклад, коли поєднували наземну лазерну сканувальну станцію та тахеометричну точку).

Однак, ця опція була доступною не завжди, зважаючи на технічні обмеження.

До того ж, певні цілі TLS визначалися й без використання відбивачів.

Для інтеграції даних GB-SAR під час постобробки виконувались додаткові вимірювання за аналогічною методикою — без відбивача, але на дистанціях 717 м та 746 м.

Ці дистанції майже сягали максимальної дальності роботи приладу в наявних умовах, проте, після кількох спроб, їх вдалося зафіксувати без помилок.

Завершальним етапом робіт було зрівнювання мережі способом найменших квадратів, ґрунтуючись на даних GNSS-векторів та тахеометричних вимірювань, використовуючи програмний продукт з

відкритим кодом JAG3D. В результаті було створено локальну опорну мережу, графічне представлення якої показано на рисунку 5.

Для оцінки якості сформованої мережі використовували інформацію з головної діагоналі коваріаційної матриці.

Зокрема, корінь квадратний із її сліду становив 49 мм, а стандартні просторові відхилення пунктів змінювалися в діапазоні від 1,0 до 15,9 мм.

Горизонтальна точність визначення координат була в межах від 1,5 до 19,3 мм.

Цей рівень точності вважається задовільним, враховуючи розміри мережі та умови, в яких проводилися спостереження.

Коефіцієнт взаємозв'язку між ступенями вільності та кількістю вимірювань дорівнював B = 0,58, відповідно до виразу:

$B = f/n$, де $f = n - u + d$, $n = 86$, $u = 39$, $d = 3$.

Одержаний показник притаманний завданням обробки наземних даних.

Згадані 3D-розбіжності узгоджуються з результатами GNSS-вимірювань та вказують на те, що для достовірного виявлення очікуваних деформацій потрібен часовий проміжок спостережень від 3 до 5 років.

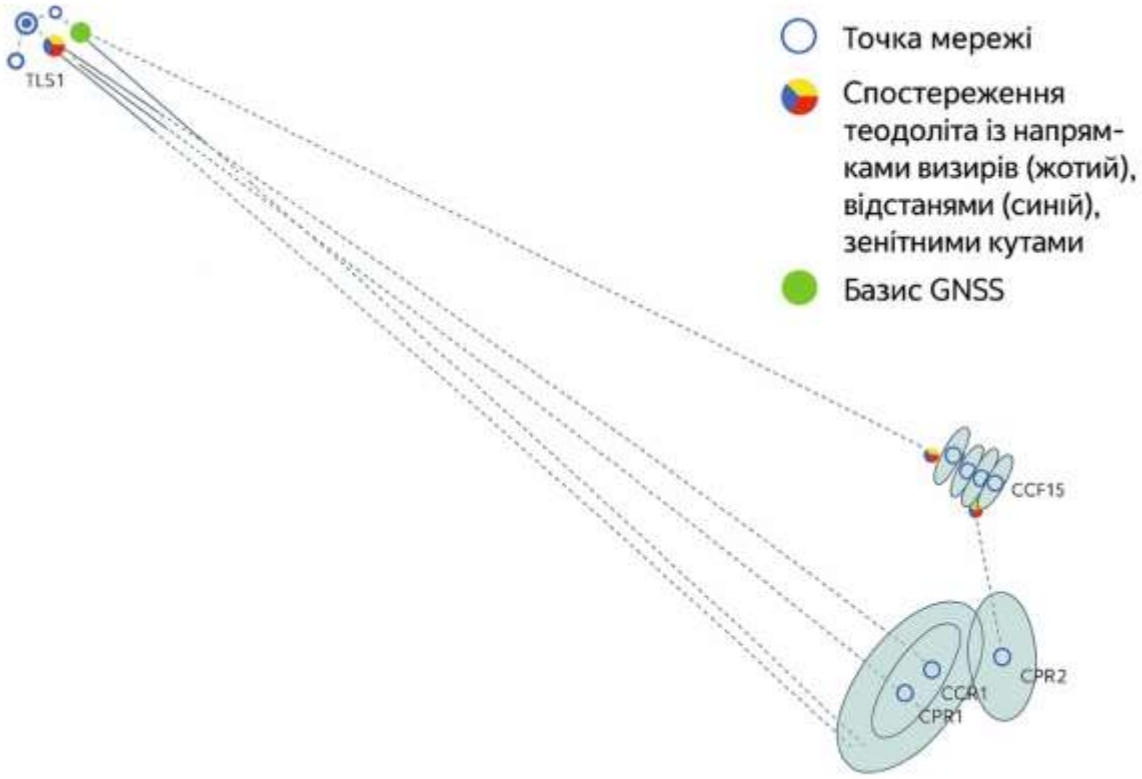


Рисунок 5: Ескіз мережі з розподілом точок

3.3 Наземне лазерне сканування

Тривалі дослідження із використанням наземного лазерного сканування за останні роки здобули статус ключової методики у вивченні скельних масивів та моніторингу зсувних процесів.

Основною перевагою такого методу є отримання даних з високим ступенем деталізації на великих територіях.

Особливо, для скельних виступів було встановлено, що створені хмари точок з великою точністю відтворюють реальну морфологію поверхні, при цьому точність залежить від обраної щільності сканування.

Відстань між точками, або роздільна здатність хмари, визначається параметрами лазерного променя та розташуванням пристрою щодо об'єкта в просторі.

Водночас лишаються певні технічні питання, котрі досі вивчаються.

Серед важливих невирішених аспектів – створення ефективної методики аналізу деформацій на основі хмар точок.

Це вимагає як удосконалення алгоритмів моделювання, так і поглибленого вивчення статистичних методів обробки даних.

Попри це, метод TLS вирізняється від інших технік унікальним рівнем деталізації простору.

Враховуючи, що відстані сканування в таких дослідженнях можуть досягати майже кілометра, практичне використання можливе виключно з імпульсними сканерами.

З огляду на зазначені вище вимоги, було вирішено зупинити свій вибір на моделі Leica P50, яка відноситься до сканерів панорамного типу з дзеркалом, котре має кут нахилу 45°.

Функціонування пристрою базується на методі визначення часу прольоту світлового імпульсу, реалізованого за допомогою передової технології Waveform Digitising (WDF).

Сканер надає можливість збирати дані в одному з двох доступних режимів, вибір котрих залежить від робочого діапазону дистанцій та використовує випромінювання, представлене двома різними довжинами хвиль.

Для вимірювань на відстані 120–270 м використовується інфрачервоне світло з довжиною хвилі 1550 нм, котре забезпечує точність 1,2 мм + 10 ppm, натомість для великих дистанцій (до 570–1000 м) застосовується видиме світло 658 нм з точністю 3 мм + 10 ppm.

У будь-якій ситуації точність вимірювання кутів становить 2,4 мг/км, як для горизонтальних, так і для вертикальних кутів.

Сканування здійснювали у природному середовищі, застосовуючи два положення, де місце розташування сканера відповідало розміщенню тахеометра.

Необхідно враховувати, що висота оптичної осі лазерного сканера (250 мм) є вищою за висоту оптичної осі тахеометра (196 мм), що зумовлює потребу у корекції під час організації мережі вимірювань.

У пункті 1, розташованому орієнтовно за 700 метрів від краю обриву, було застосовано крок розбиття 3,1 мм на кожні 10 метрів (відповідає кутовому кроку 20 мг).

Це забезпечило середню відстань між точками на скелі близько 22 см при середній дистанції у 715 метрів.

Досліджену ділянку визначали як активну зону обриву, разом із прилеглою, стабільною місцевістю (дивіться малюнок 2).

Додатково, здійснили сканування стабільних об'єктів поблизу пункту 1: фундаменту, бетонних площин та споруд, що розташовані неподалік.

З позиції 2 середня дистанція до скелястого масиву складала приблизно 135 метрів.

Це дало змогу задіяти режим до 270 метрів із збільшеною роздільною здатністю, водночас зменшивши час на сканування.

В конкретному випадку, налаштована роздільна здатність дорівнювала 1,6 мм на кожні 10 метрів (кутовий крок 10 мгон).

Завдяки цьому було забезпечено середню відстань між точками на поверхні скелі близько 2,2 мм.

Отже, якість сканування з другої позиції перевищувала показник з першої позиції у 10 разів.

Для візуалізації охоплення простору, яке формують хмари точок з обох локацій (умовно названих "довгою" та "короткою"), використовується рис. 6, де ці дані представлені у різних кольорах.

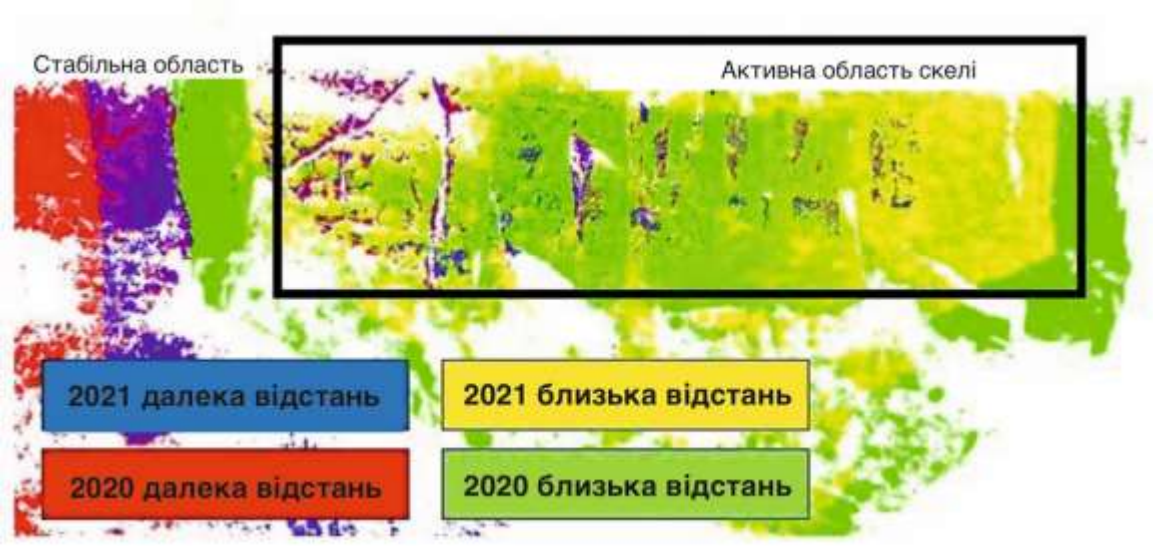


Рисунок 6. Хмари точок з обох місць розташування, забарвлені відповідно до їхнього положення та епохи

3.4 Геосенсорні дослідження

Протягом двадцяти років ефективність геосенсорних технологій для моніторингу підтверджено численними науковими дослідженнями.

Метод GB-SAR відноситься до активних методів дистанційного зондування.

Завдяки цьому його можна використовувати без безпосереднього контакту з досліджуваною ділянкою та незалежно від наявності сонячного світла.

В основі цієї техніки – аналіз інтерферометричної фази.

Тобто, вивчається різниця фаз між отриманими зображеннями, що дає змогу виявляти зміни відстані, а відтак – деформації в кожному пікселі двовимірного зображення.

Точність таких вимірювань може досягати субміліметрового діапазону.

Водночас, найбільший спектр визначеності зсуву чітко обмежений чвертю хвилі.

Якщо зсув між двома зображеннями перевищує вказану величину, виникає проблема фазової невизначеності.

З нею потрібно рахуватися, залучаючи додаткові дані щодо реальних розмірів зсувів.

Аби уникнути такого ускладнення, GB-SAR здебільшого функціонує в режимі безперервного спостереження протягом кількох діб.

Це гарантує невеликі зсуви між наступними вимірюваннями.

В такому випадку фазові стрибки просто розпізнаються та коригуються.

До того ж, GB-SAR може бути застосовано для регулярного спостереження за штучними конструкціями, оскільки когерентність сигналу на таких об'єктах демонструє стабільність.

Обмеженням цього методу є те, що виявлене зміщення вказує лише на проекцію руху вздовж лінії візування, не визначаючи ані напрямок, ані повну величину руху.

Відтак, для встановлення реальних параметрів переміщення необхідна додаткова інформація, неточності в якій можуть значно впливати на кінцеві результати.

Ще однією складністю є інтерпретація: приміром, пікселі здатні включати внесок від різноманітних точок об'єкта на різних висотах, але на аналогічних відстанях.

У даному дослідженні залучили пристрій GB-SAR IBIS-L, який встановили орієнтовно за 700 метрів від досліджуваної території.

Специфіка місцевості та обмежений огляд не дозволили розмістити обладнання ближче.

Юстування траєкторії здійснювали з використанням інклінометра, а кут нахилу антени закріпили на відмітці 10 градусів.

Ідентичні схеми вимірювань були використані протягом двох періодів спостережень: у 2020 та 2021 роках.

У ході кампанії, що тривала понад дві доби (зокрема, близько 50 годин у 2020 році), знімки реєструвались приблизно кожні 6 хвилин.

Найбільша відстань, з якої можна було проводити спостереження, досягала 1000 метрів.

Однак було помічено відмінність у здатності розрізнення залежно від відстані: у 2020 році показник склав 0,5025 м, а у 2021 – 0,4999 м, що спричинило невелике зміщення пікселів в робочій зоні (~700 м).

Для збільшення точності аналізу використовувалися лише безперервні серії зображень, без пропусків, отримані в умовах, коли атмосфера була відносно спокійною.

В результаті, для подальшої роботи було відібрано 89 знімків (2020) та 103 (2021)

Подальша обробка передбачала розрахунок фазових та амплітудних показників для кожного пікселя.

Щоб не витрачати зайвий час, у аналіз включили інформацію тільки з гірського масиву і прилеглих до нього територій на віддалі від 600 до 900 метрів.

Інші території, де переважала рослинність, виключили з розгляду через низьку якість сигналу.

У межах визначеної області зафіксували стрибки фази між послідовними замірами.

Далі, для кожної епохи, обрахували фазову когерентність та визначили середню величину когерентності (див. Рис. 7).

Отримані результати показали схожу динаміку в обох періодах дослідження: рівень когерентності у гірському масиві був помітно вищим, ніж на прилеглих до нього територіях.

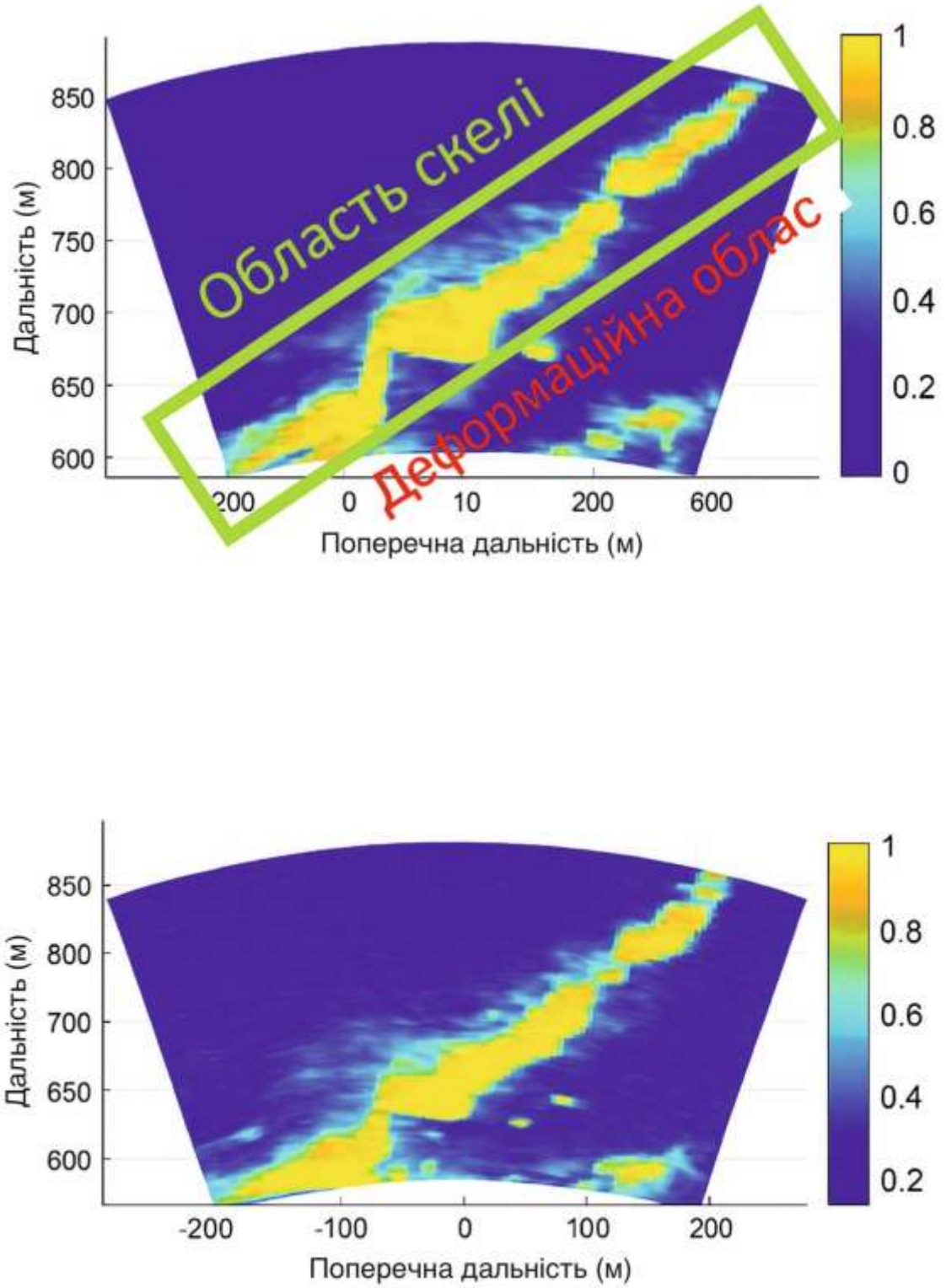


Рисунок 7: Узгодженість у 2021 році (зверху) та у 2021 році (знизу)

На основі середніх показників когерентності було виокремлено п'ять пікселів з найбільшою стійкістю, котрі далі використовували як наземні контрольні точки (GCP).

З їх допомогою провели оцінку атмосферної фази та здійснили корекцію отриманих даних.

Після корекції для кожного пікселя були обчислені часові ряди зміщень.

Для цього було проаналізовано інтерферометричну фазу, тобто різницю фазових значень між зображеннями, які йдуть одне за одним у часі, в кожній серії спостережень.

На рисунку 8 подано приклади часових рядів для чотирьох пікселів, що знаходяться у зоні деформацій, для обох періодів вимірювань.

Отримані графіки не показують ані значних викривлень, ані помітних трендів.

Відтак, вивчену зону можна визначити як стабільну протягом усього періоду вимірювань в кожній серії спостережень.

На додаток, важливо зауважити, що результати GB-SAR добре корелюють з даними інших способів спостереження, засвідчуючи відсутність активних деформацій на досліджуваній території.

Це вказує на значний потенціал методу для тривалого моніторингу, навіть з огляду на обмеження, зумовлені інтерпретацією фазових зрушень та впливом атмосферних факторів.

Насамкінець, було обчислено середні значення амплітуди і фази для кожного пікселя.

Окрім того, у межах гірської області було визначено стандартне відхилення фази.

Пікселі, розташовані за межами цієї області, де якість сигналу була низькою через наявність рослинності або інших перешкод, не враховувалися при цьому обчисленні.

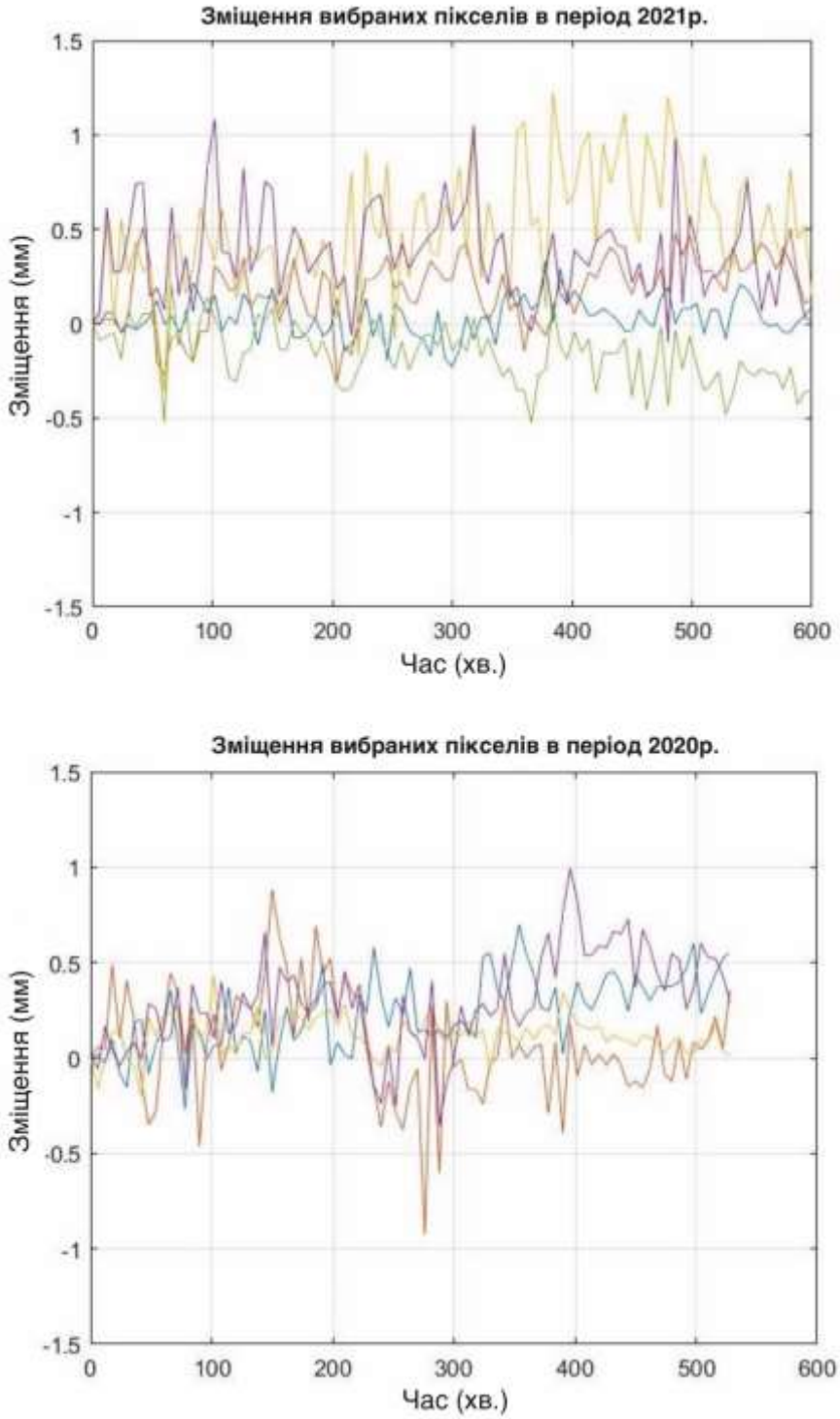


Рисунок 8: Часовий ряд зміщення для вибраних пікселів у 2021 році (зверху) та у 2020 році (знизу)

Отримані результати відображено на рисунку 9, що наочно демонструє просторовий розподіл надійності даних.

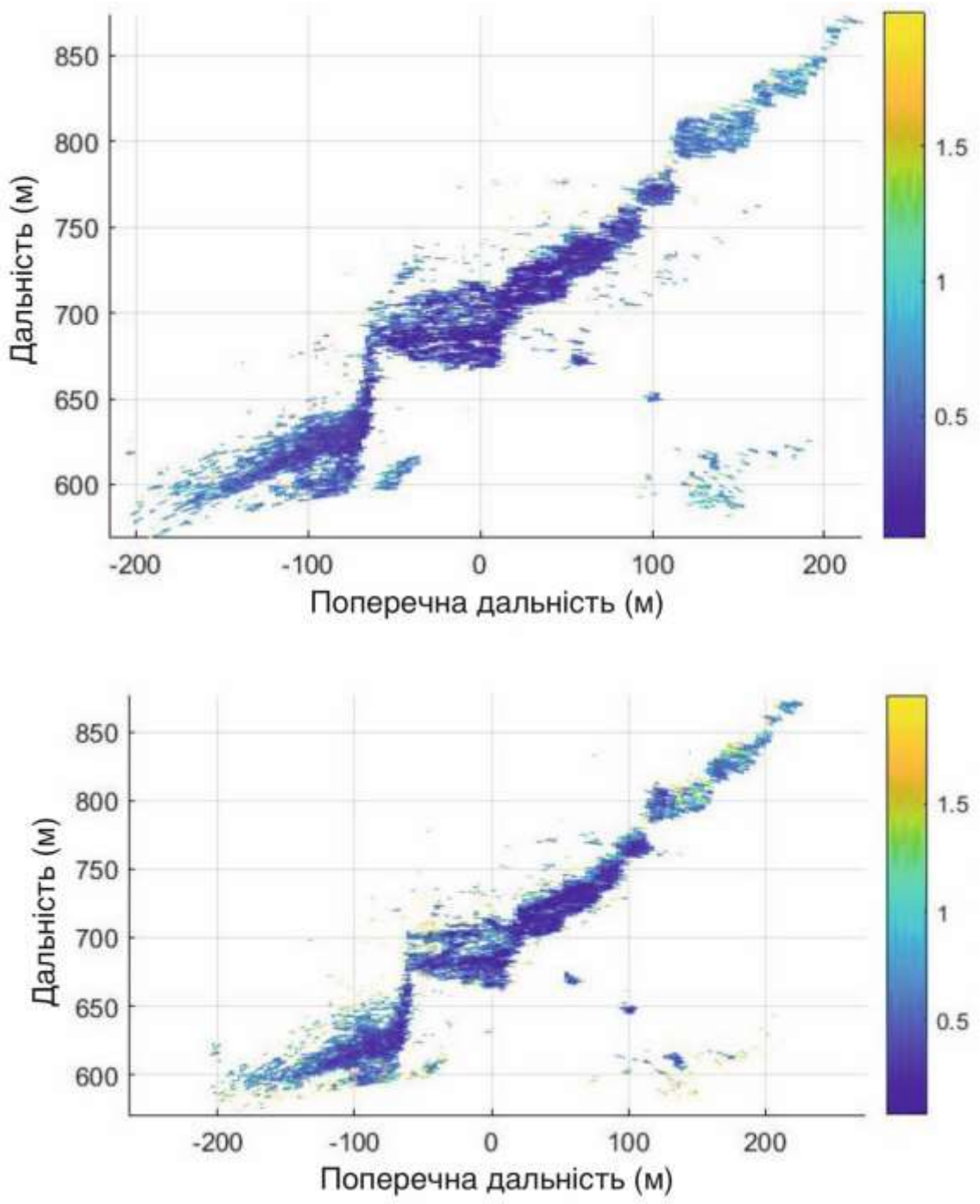


Рисунок 9: Стандартне відхилення фази у 2021 році (зверху) та у 2020 році (знизу)

Значення стандартного відхилення важко переоцінити в процесі постобробки даних, оскільки саме воно визначає, які пікселі вважати стабільними та придатними для подальшого опрацювання.

Порогом для фазового стандарту було встановлено < 0,4 радіани, що відповідає усталеній практиці у сучасних інтерферометричних дослідженнях для виділення стабільних розсіювачів, що називаються persistent scatterers.

Іншими словами, тільки ті пікселі, в яких стандартне відхилення не перевищує встановлену межу, можуть забезпечити високу когерентність у часових рядах, що, у свою чергу, сприяє отриманню точних оцінок зміщень.

Цей метод має вирішальне значення для уникнення впливу ділянок, спотворених шумом, які можуть викликати артефакти або навіть призвести до хибного тлумачення даних про деформацію.

Відсіювання пікселів, які виявляють нестабільність, значно покращує вірогідність отриманих результатів та зменшує вплив сторонніх чинників, зокрема змін рослинності, погодних умов або несподіваних атмосферних коливань.

Слід наголосити, що виявлення надійних пікселів, базуючись на стандартному відхиленні фази, має тісний зв'язок з попереднім визначенням наземних контрольних точок (GCP).

У випадку використання GCP для атмосферної корекції та стабілізації часових рядів, подальший відбір стабільних розсіювачів стає ключовим етапом для високоточної інтерферометричної обробки усієї досліджуваної області.

Таким чином, обидва ці процеси взаємодіють та утворюють надійну методологічну основу для інтерпретації деформаційних процесів.

У результаті використання критерію фазової відповідності, визначеного як < 0,4 радіана, дозволяє сформувати високоякісний набір даних, що буде використаний для заключного етапу аналізу.

Такий підхід не тільки пришвидшує обчислення, але й забезпечує, що отримані дані моніторингу будуть грунтуватися виключно на найбільш достовірних та стабільних вимірюваннях.

4. Об'єднання даних

4.1 Реєстрація хмар точок

Під терміном «реєстрація» у геодезії, зазвичай, ховається сукупність способів та маніпуляцій, що мають на меті узгодити результати вимірювань, отримані в локальних системах координат, з єдиною, спільною системою координат.

У даному контексті, цей термін розглядається як процес трансформації даних, які були зібрані за допомогою наземного лазерного сканування (НЛС).

Ці дані переводяться з локальної системи координат приладу в іншу систему, що визначена незалежними геодезичними методами, як-от тахеометрія або GNSS.

Таке вирівнювання є необхідним для подальшого інтегрованого аналізу, оскільки дані, здобуті різними методами, представляють один і той же об'єкт, але у різних системах координат.

Як відомо, хмари точок з ЛСД відображають об'єкт, фіксуючи декартові координати мільйонів точок від поверхонь, що відбивають світло.

Зазвичай, декілька таких хмар, отриманих з різних станцій, об'єднуються в цільну модель за допомогою прямої або непрямої реєстрації.

В даній роботі була використана саме непряма реєстрація, що передбачає використання загальних контрольних точок (GCP).

Для цього поблизу приладу (на відстанях до 50 м) були розміщені спеціальні мітки, координати центрів яких визначалися програмним забезпеченням Leica Cyclone.

Ці координати були зафіксовані спершу в локальній системі ЛСД, а потім були застосовані для обчислення параметрів перетворення.

Оскільки ідентичні марки були інтегровані і в тахеометричну мережу, стала реальною географічна прив’язка скан-даних відносно системи координат тахеометра.

Для спільного узгодження двох типів координат було використано шестипараметричне перетворення Гельмерта, що охоплює три зміщення та три повороти у просторі.

Параметри перетворення, які були розраховані, були використані для трансформації цілої хмари точок, за допомогою власноруч створеного скрипту в середовищі Matlab.

Отже, всі скани, отримані у 2021 році, були перенесені в єдину систему координат.

Однак, застосування тієї ж тахеометричної мережі для вимірювань у 2020 році було нереальним.

У зв'язку з цим, було вирішено вдатися до іншого методу – алгоритму ICP (Iterative Closest Point), який реалізовано в програмному забезпеченні CloudCompare.

На початковому етапі виконувалось ручне, попереднє вирівнювання сканів, враховуючи візуально ідентифіковані спільні об'єкти (наприклад, кути будівель, фундаменти або інші постійні елементи місцевості).

Це дало змогу розмістити хмарні дані 2020 року у тих самих координатах, що й дані за 2021 рік.

Потім відбувалося автоматичне, прецизійне узгодження з шістьма ступенями свободи, яке визначало ще один набір параметрів перетворення.

Він ґрунтувався на найкращому збігу спільних зон, що були незмінними та стійкими до деформацій протягом усього часу спостереження.

Отже, забезпечувалася сумісність даних між обома періодами часу, що дозволяє їх порівнювати без викривлень, спричинених розбіжностями в системах координат.

На рисунку 10 показано приклад накладених ділянок, застосованих для точного вирівнювання; їх виділено для наочності.

Цей метод гарантує високоточне поєднання даних з різних періодів часу, що є ключовим для подальшого дослідження деформацій.

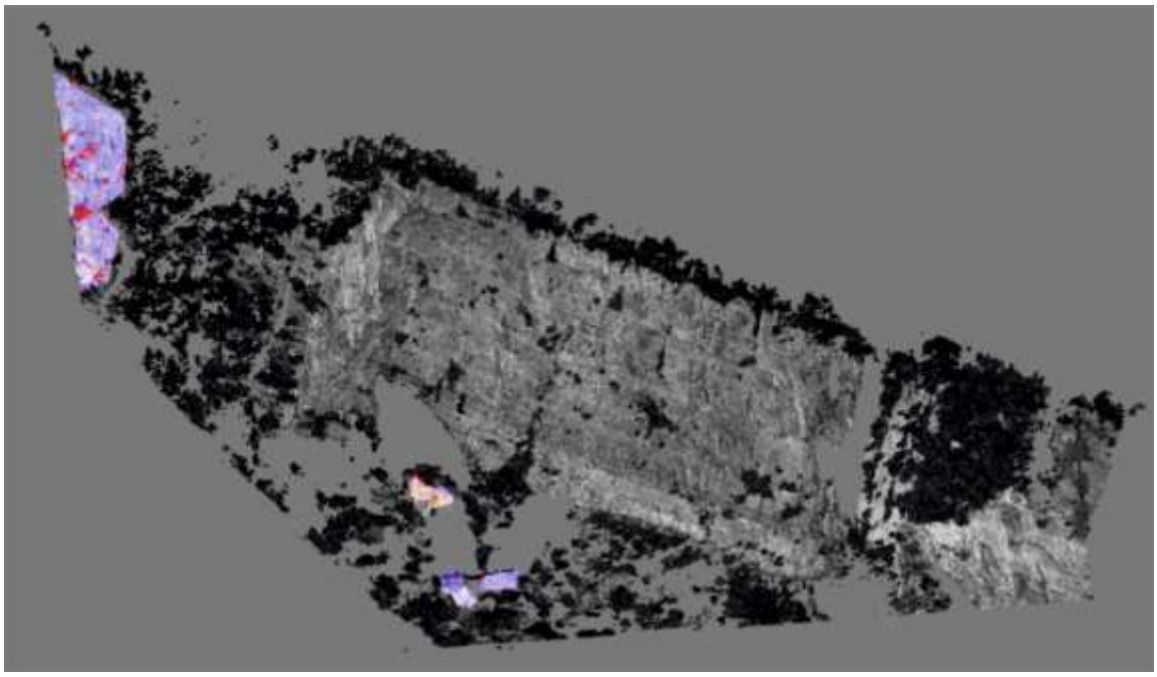


Рисунок 10. Територія дослідження з виділеними областями, використаними для перетворення хмар точок з 2020 року в систему координат 2021 року.

Припускається, що виділені ділянки простору залишалися незмінними протягом року, хоча очевидно, що ця теорія не може бути бездоганною.

Згідно з цим, під час процедури реєстрації було застосовано ітеративне зменшення коефіцієнта накладання між двома масивами даних.

Процедура починалася з найбільшого можливого накладання у 100% і тривала зі зниженням, аж поки не було досягнуто задовільного перетворення.

Визначення "задовільне" тут стосується візуально підтвердженої відповідності між геометричними особливостями об’єкта, такими як лінії та кути, які чітко видно в обох хмарах точок.

На практиці, якщо коефіцієнт перекриття знизити до 80%, було отримано задовільні результати, і це значення було затверджено для подальшої роботи.

Для кількісної оцінки ефективності перетворення обчислювали середньоквадратичну помилку (СКП).

Необхідно наголосити, що коректна реєстрація двох масивів даних сканування можлива лише тоді, коли вони мають подібну або однакову густину точок.

Враховуючи це, хмари точок, отримані з різних відстаней, вирівнювали окремо.

Це дозволило мінімізувати систематичні помилки, зумовлені різною щільністю даних.

У підсумку було визначено два окремих показники СКП:

- для сканування з віддаленої точки (локація 1), СКП виявився 9,3 см,
- для сканування з ближчої позиції (локація 2), СКП склав 7,3 см.

Ці дані було визнано прийнятними, беручи до уваги, що обставини не дозволяли використати більш прецизійні способи фіксації для двох окремих часових проміжків.

З одного боку, наведені величини можуть видатися досить значними у порівнянні з стандартними умовами моніторингу, де показники точності мають більш суворі вимоги.

З іншого ракурсу, потрібно зважати на специфіку об'єктів, що розглядаються.

Сканування виконували, прив'язуючись до природних конфігурацій місцевості, а саме до скель.

В таких обставинах неможливо однозначно визначити абсолютну стабільність з точністю до сантиметра.

Навіть незначні зрушення, що відбуваються локально на тих поверхнях, які візуально видаються нерухомими, можуть спровокувати відчутне зростання СКП (середньоквадратичної похибки).

Отже, дослідження здобутих даних однозначно свідчить, що під час опрацювання різнорідних масивів з наземного лазерного сканування, використання методів, як при роботі з точковими геодезичними вимірами, має певні ліміти.

Щоб точно виявляти деформації та мінімізувати вплив локальних змін рельєфу, необхідно значно подовжити часові проміжки між періодами моніторингу.

4.2 Картування GB-SAR на даних наземного лазерного сканування

Головна ідея концепції злиття даних, що застосовується в нашому дослідженні, полягає в максимальному використанні сильних сторін кожного окремого методу вимірювання, супроводжуваному одночасним зменшенням їхніх недоліків.

Відомо, що ключова перевага GB-SAR полягає у його надзвичайній точності при оцінюванні зсувів, навіть на рівні міліметрів.

Але, як вже зазначалося, цей метод має суттєві обмеження: зміщення визначається тільки в напрямку, що є перпендикулярним до апертури, а також в межах діапазону $\pm\lambda/4$, що ускладнює інтерпретацію отриманих даних у випадках складних тривимірних деформацій.

Для подолання цих перешкод запропонували інтегрувати дані наземного лазерного сканування та GNSS.

Ці методики, на противагу GB-SAR, надають відомості як про напрям, так і про величину справжнього зрушення у тривимірному просторі.

Відповідно, їх можна використати як зовнішнє джерело для визначення вектора реального зсуву, що в свою чергу дає змогу:

1. здійснити трансформацію даних GB-SAR у ту ж систему координат, як дані лазерного сканування чи GNSS;

2. спроєктувати зсув, отриманий з GB-SAR, на цей вектор;

3. зняти неоднозначність фази та скоригувати оцінену величину зсуву, спираючись на більш достовірні результати з інших методик.

Найскладнішим і водночас критичним етапом у цій процедурі є процес перетворення координат.

На відміну від наземного лазерного сканування, тахеометрії або GNSS, де перетворення даних можливе безпосередньо, спираючись на координати реперних точок або положення приладу, у випадку з GB-SAR такого спрощення не досягти.

Тут недостатньо мати лише інформацію про координати місця, де розміщено прилад, та дані з двох епох тахеометричних вимірювань.

Для забезпечення відповідності даних, необхідно визначати напрямки зміщень в єдиній системі координат, що корелюватиме з лазерним скануванням і GNSS.

З цією метою було проведено обчислення відстаней $S\,i$ та кутів напрямків $\theta\,i$ між системою GB-SAR і кожною точкою хмари точок, здобутої методом наземного лазерного сканування.

Такий підхід гарантував геометричну узгодженість даних, що є критично важливим для їхньої подальшої інтеграції та корекції.

$$S_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2 + \Delta Z_i^2} \qquad (1)$$

$$\theta_i = arctan\frac{\Delta X_i}{\Delta Y_i} \qquad (2)$$

де ($\Delta X\, i$, $\Delta Y\, i$, $\Delta Z\, i$) – це відмінності в координатах між GB SAR і точкою i з хмари точок.

Координати, що стосуються позиціонування обладнання GB-SAR, визначено як центр ваги шести окремо заміряних точок, які було отримано завдяки тахеометру.

Використання даного методу дозволило скоротити локальні похибки і гарантувати більш надійне положення пристрою у системі координат тахеометричних вимірювань.

На додаток до координат, ключовим параметром для подальшого поєднання даних є орієнтація GB-SAR у системі координат тахеометра.

Ця направленість фактично визначає кут, під яким пристрій "бачить" досліджувану область, і без її встановлення погодження даних між різними вимірювальними джерелами було б неможливим.

Орієнтацію можна визначити різними методами.

Найбільш поширений з них полягає в порівнянні кутів направлення лінії між GB-SAR у його персональній локальній системі координат та аналогічних кутів у системі тахеометра.

Таким чином, різниця між цими значеннями дозволяє встановити кутову орієнтацію пристрою у більш загальній системі координат.

Іншим методом є використання координат кутових реперних точок GB-SAR, тобто точок прив'язки на корпусі приладу, які визначають його напрямок.

Хоча ця техніка не надто прецизійна, зважаючи на те, що базова лінія становить лише 2,3 метри (що мало у порівнянні з робочою дистанцією до

1000 метрів), в умовах браку вихідної інформації, вона все одно залишається єдиним прийнятним виходом для визначення просторового положення.

З метою підвищення надійності, орієнтація визначалась чотири рази, після чого обчислювалось середнє арифметичне, яке приймалося за кінцевий результат.

Це допомогло уникнути випадкових помилок, що виникають при кожному окремому обчисленні.

На другому етапі отриману орієнтацію було вилучено з кутів $\theta\, i$, щоб розрахувати орієнтацію $O\, i$ для кожної точки в масиві точок GB-SAR.

Завдяки цій процедурі дані було переведено у систему координат поперечного діапазону, що є критично важливим кроком для подальшого об’єднання результатів з іншими джерелами геодезичної інформації.

$$O_i = \theta_i - O_0 \qquad (3)$$

Використовуючи обчислені показники $S\, i$ та $O\, i$, кожна точка у хмарі даних має унікальний зв'язок з конкретним пікселем інтерферометричного зображення GB-SAR.

Завдяки цьому, кожній точці з хмари стає доступним ряд додаткових атрибутів, успадкованих від даних GB-SAR.

Наприклад: координати у напрямку поперечної дальності, показник когерентності, величина стандартного відхилення фази, або навіть оцінка зміщення.

Таким чином, для кожної окремо взятої точки об'єкта формується розширений вектор параметрів, який поєднує інформацію, отриману з різних методів вимірювання.

На цій стадії з'являється шанс об'єднати дані, зібрані з GB-SAR та наземного лазерного сканування, в одну координатну систему.

Інтеграція даних можлива у двох форматах:

- У тривимірній системі координат (див. рис. 11), де можна створити просторову модель у вигляді хмари точок.

  Це дає змогу безпосередньо досліджувати деформаційні процеси у фактичному геометричному просторі.
- У двовимірній системній координат GB-SAR (див. рис. 12). Тут інформація подається у вигляді інтерферометричних зображень, що полегшує аналіз часових рядів, когерентності та інших параметрів безпосередньо у проєкції вимірювань GB-SAR.

Отож, синергія даних, яка відбувається на рівні кожної точки, відмикає шлюзи для взаємного збагачення обох інформаційних джерел.

Наземне лазерне сканування привносить геометричну точність та збільшену просторову деталізацію, у той час як GB-SAR забезпечує високу чутливість до деформаційних процесів, зважаючи на часовий масштаб.

У поєднанні ці методи формують міцний інструмент для більш комплексного та достовірного вивчення деформаційних процесів.

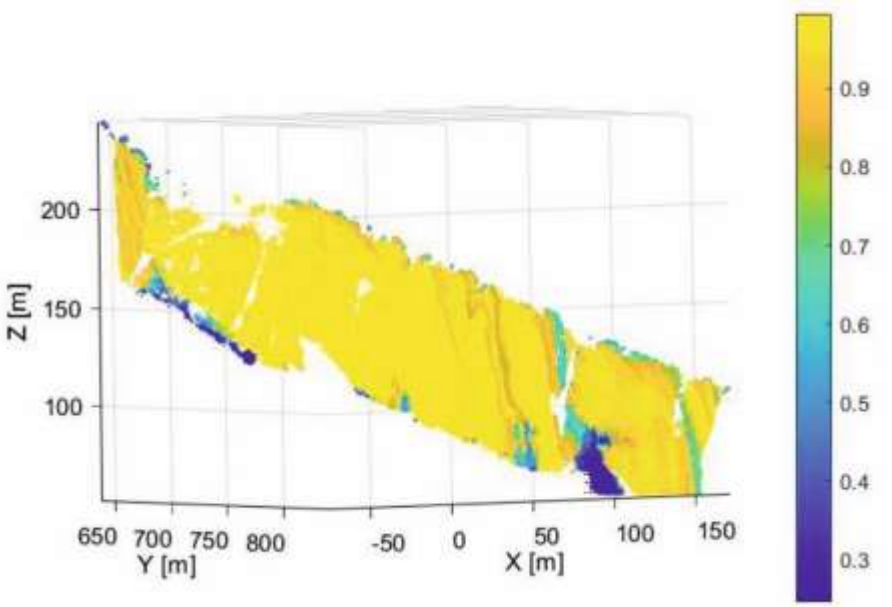


Рисунок 11: 3D хмара точок, забарвлена значеннями когерентності даних GB-SAR за 2021 рік

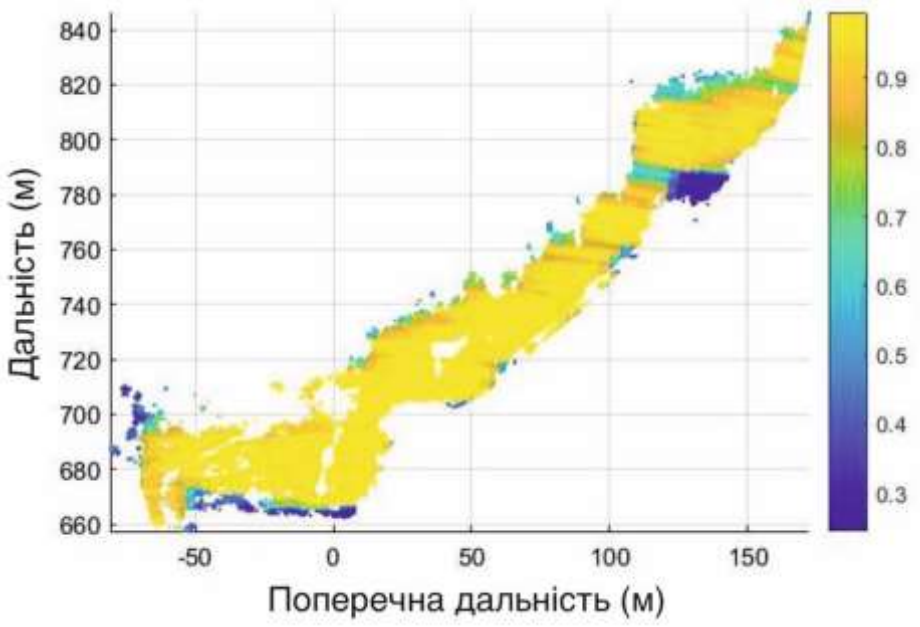


Рисунок 12: Хмара точок, відображена на двовимірній системі координат GB-SAR та забарвлена за когерентністю даних GB-SAR за 2021 рік

На рисунку 12 зображено ідентичний просторовий візерунок когерентності, як і на рисунку 11, що підтверджує коректність виконаного перетворення та точність прив'язки двох масивів даних до єдиної системи координат.

Це ключовий аргумент на користь використаної методики інтеграції даних, оскільки збіг параметрів когерентності виступає незалежним критерієм правильності перетворення.

Замість застосування хмари точок для реалізації перетворення існує можливість використовувати цифрову модель рельєфу (ЦМР), створену на основі тієї самої хмари точок.

Однак у даному разі перетворення стає складнішим, адже необхідно брати до уваги погрішності інтерполяції та ризик втрати локальних геометричних особливостей, які наявні безпосередньо у хмарі точок.

Стосовно точності: для вимірювань в межах одного періоду GB-SAR демонструє вражаючу чутливість, з точністю визначення відносних деформацій, що досягає субміліметрового рівня.

Проте точність визначення деформацій між двома епохами напряму залежить від коректності узгодження та об’єднання систем координат, що у цьому дослідженні було забезпечено використанням тахеометричних вимірювань та даних наземного лазерного сканування.

Відтак, найбільшу похибку спостерігаємо на цьому кроці, і вона прямо залежить від точності наземного лазерного сканування.

Не менш значущим фактором є точність, з якою ми визначаємо передбачуваний напрямок зміщення.

Цей параметр вважається найважливішим: навіть якщо окремі методи відзначаються високою просторовою та часовою точністю, неточності у визначенні напряму можуть суттєво впливати на величину спроектованого реального зміщення.

Водночас, точність цього напрямку може бути підвищена шляхом використання інших геодезичних методів (GNSS, тахеометрії), а також залучення геологічних чи конструктивних моделей, які описують передбачувану кінематику об'єкта.

Точність розташування окремих сенсорів або пікселів має менше значення, ніж коректність визначення напряму.

4.3 Поточковий аналіз деформації

Для даних, отриманих з GNSS, можливе обчислення варіацій базових ліній, тобто відмінностей у координатах в обрані моменти часу.

Ці відмінності візуалізують зміну взаємного розташування роверів стосовно референтної станції, і тому можуть бути інтерпретовані як переміщення в просторі.

Іншими словами, аналіз базових ліній забезпечує пряму оцінку деформаційних процесів, що відбуваються на території, яка досліджується.

Отже, точковий аналіз деформацій може бути проведений, виходячи з вимірювань змін базових ліній, що робить методи GNSS надзвичайно корисним інструментом моніторингу.

В таблиці 6 наведено результати обчислень різниць базових ліній (виконаних відповідно до даних таблиці 4), а також результати статистичного дослідження, яке дає змогу оцінити надійність виявлених змін.

Таблиця 6. Аналіз деформації базової лінії GNSS двох періодів

Базова лінія	**Різниця базових показників (2020-2021)**			**Тестові значення**		
	ΔdE (мм)	ΔdN (мм)	Δdh (мм)	E	N	h
M-M1	-1.5	-15.9	1.5	0.14	1.45	0.06
M-M2	1.6	-12.7	-29.7	0.16	1.12	1.23

Для проведення тестування, враховується стандартне відхилення обчислених базових ліній, розглянуте для кожного з двох періодів вимірювань.

Це необхідно, щоб оцінити реальну статистичну значущість зафіксованих змін в розташуванні роверних станцій.

Окрім цього, варто враховувати стандартні відхилення координат опорних станцій, адже їхнє положення визначається за допомогою інформації з перманентних станцій GNSS.

Водночас, точна інформація про величину похибки таких координат у вихідних даних не представлена.

Отже, для розрахунків ми спираємося на оголошену виробником точність вимірювань, зазначену в таблицях.

Варто підкреслити, що ми використовуємо тільки складову похибки, яка не залежить від відстані між точками вимірювань – так звану адитивну складову похибки.

Такий підхід дає можливість отримати коректніші значення статистичних показників, навіть якщо вихідні дані обмежені.

Наприклад, для східної складової різниці базисних ліній ми визначаємо стандартне відхилення, яке потім використовується як орієнтовне значення під час оцінки стабільності.

Подібні обчислення проводяться також для північної та висотної складових, забезпечуючи загальний аналіз деформацій.

$$s_{\Delta dE} = \sqrt{s^2_{dE_2020} + s^2_{dE_2021} + s^2_{E_2020} + s^2_{E_2021}} \quad (4)$$

Відповідне тестове значення може бути обчислене за допомогою

$$t_{\Delta dE} = \left|\frac{\Delta dE}{s_{\Delta dE}}\right| \quad (5)$$

Тестові показники для решти координатних складових, що стосуються північної та висотної осей, розраховуються за аналогічним алгоритмом.

Узагальнені дані представлені у таблиці 6.

Порівняння цих показників із критичними значеннями, котрі відповідають нормальному розподілу випадкових похибок при рівні значущості 95%, вказує: жоден із тестів не перевищує поріг статистичної значущості.

Інакше кажучи, невідповідності у вихідних даних, які лежать в основі аналізу, між двома проміжками часу, які ми розглядаємо, можна обґрунтувати лише впливом випадкових помилок вимірювань, і вони не сигналізують про існування конкретних змін, яким можна було б довіряти.

Відтак, беручи до уваги вимірювання GNSS, випливає, що контрольні точки демонстрували сталість впродовж усього часового відрізку, який розглядається.

4.4 Площинний аналіз деформацій наземного лазерного сканування та GB-SAR

Для аналізу змін, що відбулися з площинами, застосовано три підходи, в основі яких лежить зіставлення двох хмар точок, сформованих в різні часові проміжки.

Розрахунки середньоквадратичної похибки (СКП) виявили: для ділянки 1 – 9,3 см, для ділянки 2 – 7,3 см.

Таким чином, щоб зафіксовані невідповідності можна було вважати статистично важливими (за умови, що похибки розподілені нормально та за t-критерієм = 1,96), вони повинні перевищувати 18,2 см для даних з ділянки 1 та 14,3 см – для даних з ділянки 2.

У першому розглянутому нами сценарії, умовно названому "хмара-до-хмари", процес зіставлення базувався на безпосередньому порівнянні двох наборів точок, використовуючи як основний критерій відстань до найближчого сусіда.

Аналіз даних з місця події 1 показав, що абсолютні значення відстаней між точками, отриманими на двох різних етапах (дивіться рисунок 13, зверху), швидше відображають варіації щільності даних на поверхні об'єкта (в даному випадку, скелі), аніж реальні зміни у її положенні.

Візуально, в областях, позначених помаранчевим та червоним кольорами, могли виникнути припущення про наявність деформацій.

Натомість подальший аналіз даних з локації 2 (див. ілюстрацію 13, знизу) вказав на відсутність періодичних деформацій або явних тенденцій до зсувів.

Переважна більшість точок сконцентрована в синій та світло-зеленій зонах, що відповідає відстаням "хмара-хмара" в діапазоні 0–22 мм, розподіленим без визначеної системи по всій площі гірської породи.

Несистематичне скупчення червоних, жовтих та помаранчевих точок найчастіше фіксується в зонах, де наявна рослинність, яка впливає на якість сканування та спотворює локальні результати.

Відтак, робиться висновок, що згідно з методикою "хмара–хмара" не було зафіксовано жодних переконливих свідчень зміщень або схильностей до деформації.

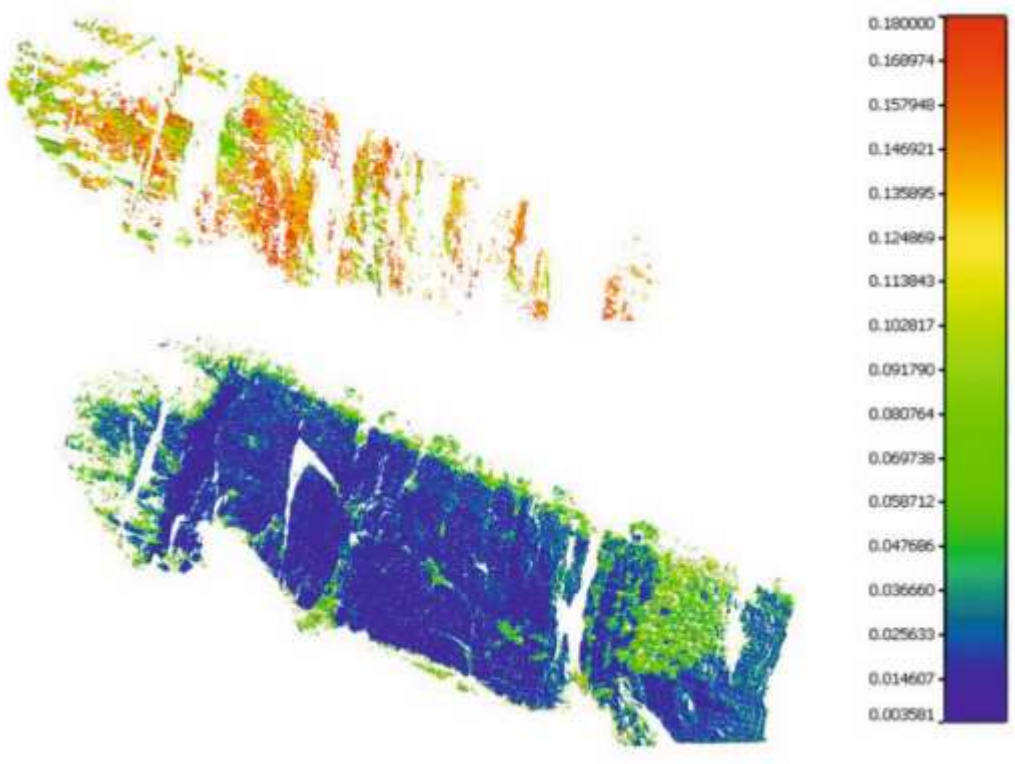


Рисунок 13. Порівняння хмара-хмара скелі Зверху — сканування з великої відстані. Знизу — сканування з малої відстані.

Другий підхід до аналізу, який, як я вважаю, є більш доцільним у цій конкретній ситуації, передбачає побудову сітчастої моделі поверхні, використовуючи одну з хмар точок як основу.

Після цього інформація з іншої хмари інтегрується з цією еталонною поверхнею.

Цей метод забезпечує більш незалежне уявлення можливих зміщень, адже дозволяє уникнути впливу випадкових близьких сусідів.

Вони можуть спотворити результати при порівнянні "хмара-до-хмари" через присутність похибок або виділених значень.

Особливість цього способу полягає у можливості трактування відхилень у обох напрямах – як тих, що мають плюс, так і тих, що мають мінус.

Для цього задіяна спеціально розроблена колірна гамма (див. малюнок 14), яка демонструє розташування точок відносно згенерованої поверхні: показники з плюсом вказують на точки перед поверхнею, а показники з мінусом – на точки за нею.

Отже, це дає змогу більш наочно виділяти потенційні ділянки деформації.

Підсумки аналізу говорять про те, що жодна з досліджених областей не виявляє ознак значних зміщень.

Усі виявлені відхилення залишаються в межах похибок вимірювань, при цьому просторовий розподіл позитивних і негативних значень не вказує на наявність системних закономірностей.

Це додатково підтверджує стабільність досліджуваного скельного масиву протягом періоду, який розглядається.

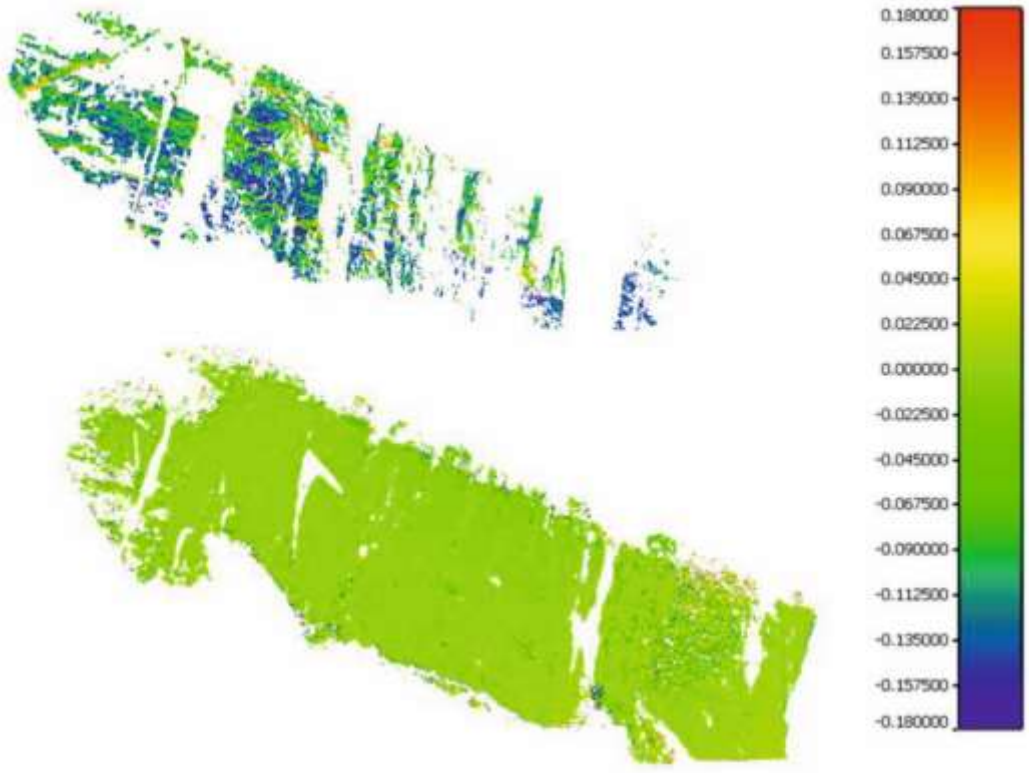


Рисунок 14. Порівняння скелі. Зверху — скани з дальньої відстані. Знизу — скани з ближньої відстані.

Останнім з використаних підходів для аналізу є багатомасштабна модель для моделювання (див. рис. 15).

Її основна перевага полягає в здатності оцінювати поверхню, оперуючи двома хмарами точок одночасно, а відмінності між двома періодами визначаються на основі певного набору точок, для котрих також розраховуються нормалі.

Це дає змогу не тільки більш точно визначати ймовірні зміни, а й запобігати помилкам, що можуть бути спричинені випадковими точками чи локальними викидами.

Ще одна велика перевага цього способу – можливість враховувати тривимірні дані про непевність для кожної конкретної точки простору.

Таким чином, він стає ближчим до класичного геодезичного підходу у аналізі деформацій, де стохастична модель використовується для опису

похибок вимірювання та безпосередньо включає ці похибки в процес прийняття рішень щодо існування чи відсутності реальних деформацій.

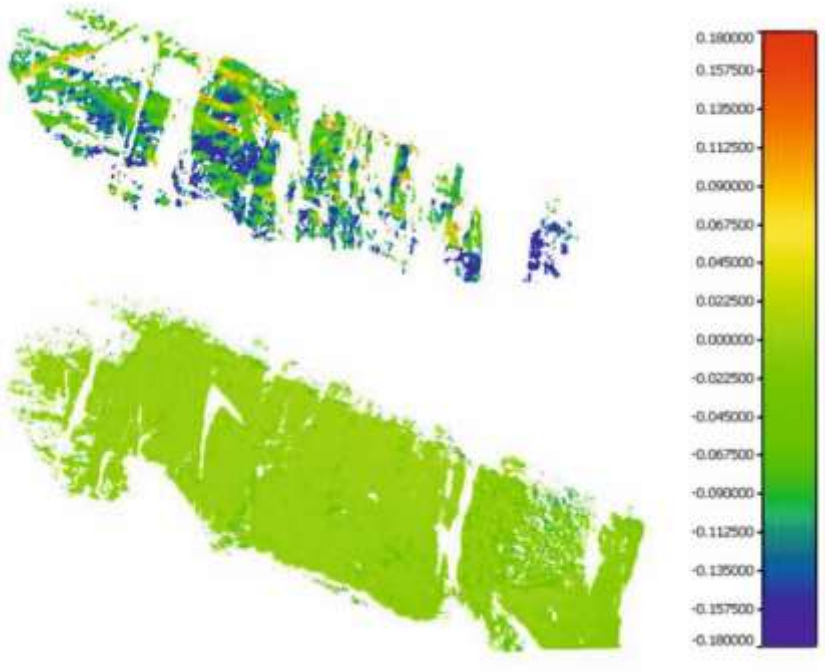


Рисунок 15. Багатомасштабна модель. Зверху — скани з дальньої відстані. Знизу — скани з ближньої відстані.

Це робить підхід суттєво міцнішим та більш обґрунтованим з наукової точки зору, порівнюючи з двома попередніми методами.

У нашому випадку тривимірну невизначеність координат точок відображають середньоквадратичні відхилення трансформації: 9,3 см для сканування з позиції 1 та 7,3 см для сканування з позиції 2.

Ці значення визначають межу точності, в межах якої можна інтерпретувати отримані дані.

Альтернативним варіантом є застосування закону розповсюдження дисперсії-коваріації, який дозволяє теоретично розрахувати невизначеність, використовуючи математичну модель похибок.

Натомість, у реальних умовах лазерного сканування, застосування багатомасштабної моделі видається більш виправданим та інформативним,

адже вона інтегрує як геометричні характеристики об'єкта, так і стохастичний характер вимірювань.

Отримані дані аналізу деформацій по площинах демонструють відмінну відповідність з результатами точкового аналізу.

Ця відповідність даних свідчить про те, що досліджувана скельна ділянка може вважатися стабільною протягом обох проаналізованих періодів.

Водночас, цей висновок не слід розглядати як абсолютну гарантію незмінності у майбутньому.

Динаміка геологічних процесів, зокрема взаємодія з навколишнім середовищем, скажімо, кліматичні коливання, ерозія або рух води, здатна викликати зміни в структурі.

Отже, попри відсутність на поточний момент видимих зрушень, продовження спостережень є необхідним.

Систематичний контроль дозволить фіксувати навіть незначні зміни у кам'яному масиві, що критично важливо як для наукових цілей, так і для забезпечення безпеки.

4.5 Наземний радар із синтетичною апертурою

Перш ніж порівнювати результати двох періодів зйомок наземним радарним інтерферометром, необхідно досягти їх просторового вирівнювання.

Це означає, що обидва набори даних повинні бути представлені в одній системі координат.

З цією метою в цій роботі була застосована процедура двовимірної крос-кореляції для зображень середньої амплітуди з обох часових зрізів.

Аналіз показав, що пік кореляції зафіксовано після зміщення даних 2021 року на 8 пікселів у напрямку діапазону

Це зміщення чітко відображає різницю у розмірах пікселів між двома періодами, що на середній відстані дослідження (близько 750 м) припадає на середину області інтересу.

Аби виправити цю розбіжність, дані за 2021 рік було передискретизовано, щоб вони мали такий самий розмір пікселя, як і дані 2020 року.

У процесі формування кожного нового передискретизованого пікселя було враховано вклад кожного з вихідних пікселів, використовуючи вагову функцію.

Ваги визначалися величиною площі перекриття між первинним та передискретизованим пікселем, що дозволило отримати більш точне представлення просторової структури сигналу.

Отримані результати демонструють, що передискретизація значно покращила узгодженість між двома періодами часу (див. рисунок 16).

Однак, навіть після реалізації цього заходу, її показники залишаються суттєво нижчими від рівня когерентності, що був зафіксований в межах конкретного проміжку часу (див. рисунок 11).

Це свідчить, що фактори, котрі зумовлюють втрату когерентності, не обмежуються лише різницею у розмірах пікселів.

Зокрема, до таких чинників відноситься: відмінна фаза розвитку рослинності на схилах у 2020 та 2021 роках, а також різні погодні умови під час здійснення спостережень (березень проти вересня).

З огляду на вищесказане, всередині центральної зони діючої та усталеної частин масиву було таки виявлено відокремлені ділянки, які вирізнялися високими показниками когерентності.

Характерним для цих пікселів було або повна відсутність, або мінімальний ступінь розвитку рослинного покрову, що підтверджується результатами додаткового аналізу (див. рис. 17).

Цей факт акцентує важливість природних факторів у формуванні когерентності між двома вимірами часу і вказує на обмеження застосування GB-SAR в зонах, де рослинність густо росте.

Окрім обов'язкової вимоги мінімальної зміни фази протягом кожного циклу спостережень, ключовим моментом у відборі пікселів для розрахунку зсувів була когерентність між різними періодами.

З огляду на це, для подальшого аналізу було взято до уваги лише пікселі, у яких стандартне відхилення фази не перевищувало 0,4 радіана для кожного з періодів, а значення когерентності було вищим за 0,8.

Внаслідок такого підходу, було виділено тільки 403 пікселі, які задовольнили усі встановлені вимоги.

Для порівняння, без передуючого етапу передискретизації інформації, зібраної в 2021 році, тільки 3 пікселі задовольняли заданим вимогам.

Це акцентує критичну роль такого етапу, оскільки лише таким чином можна забезпечити наявність достатнього обсягу даних для наступного аналізу.

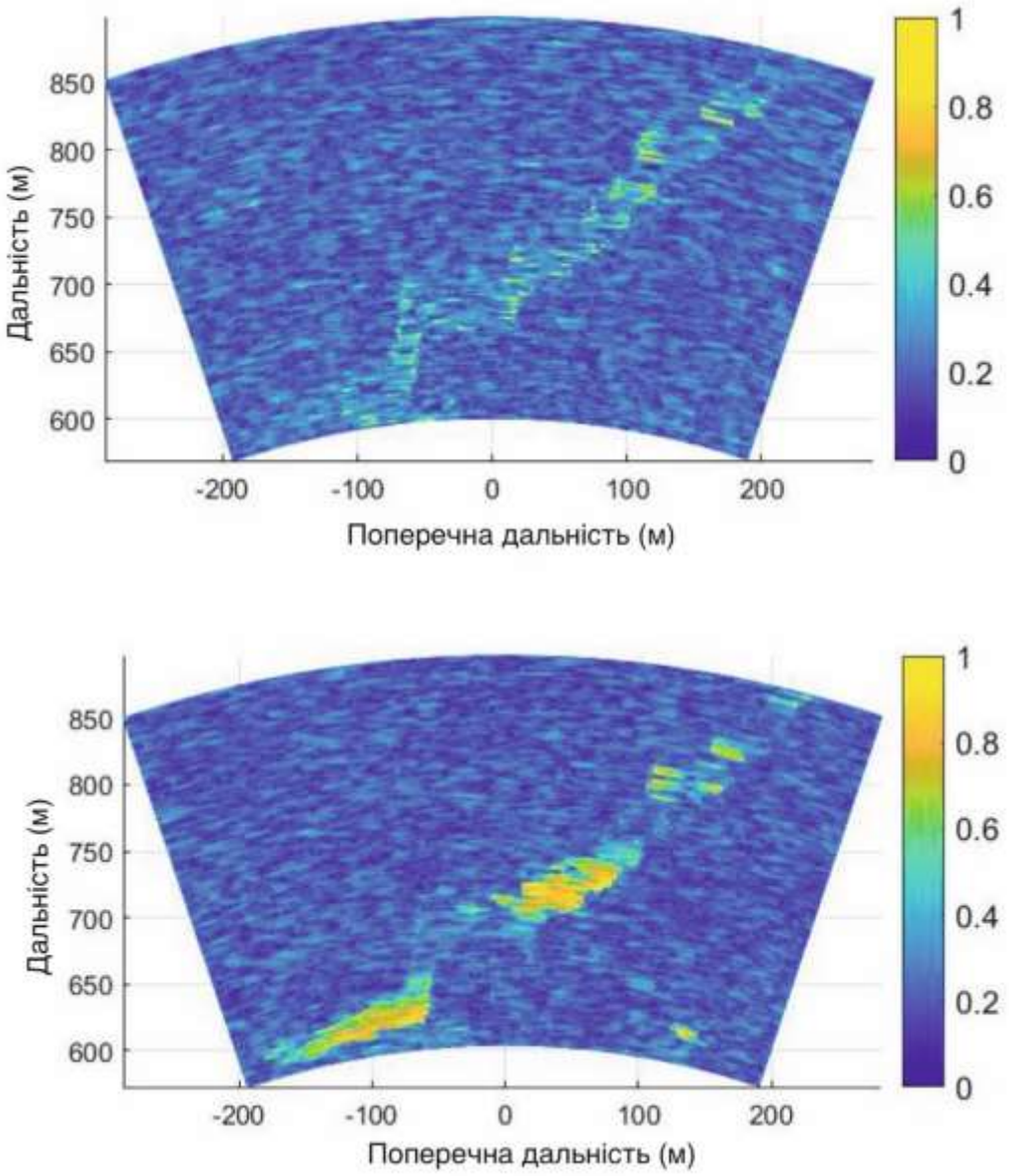
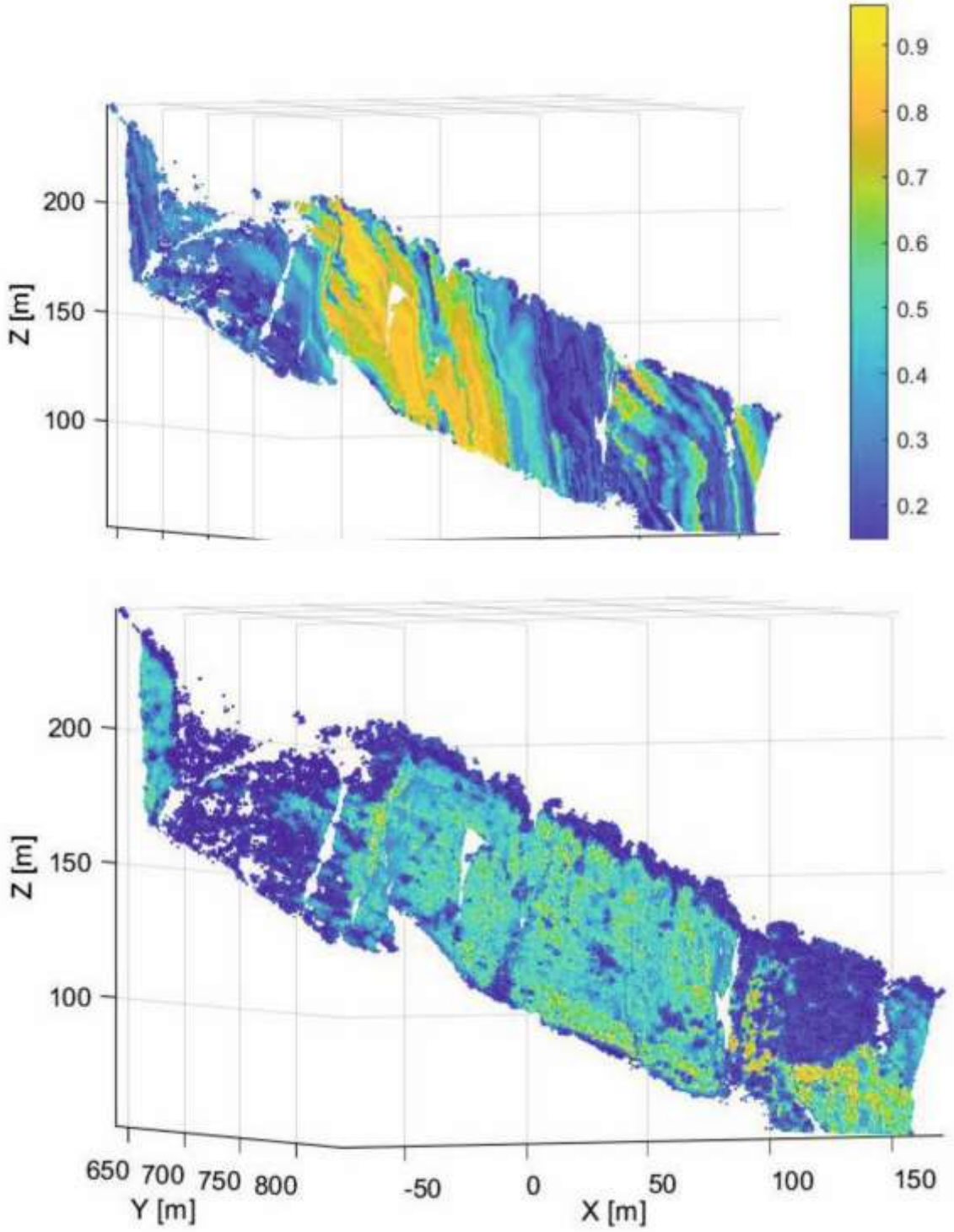


Рисунок 16: Узгодженість між 2020 та 2021 роками до повторної вибірки (змерху) та після повторної вибірки даних за 2021 рік (знизу)


0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
200
150
100
Z [m]
200
150
100
Z [m]
650 700 750 800
Y [m]
-50
0
50
100
150
X [m]

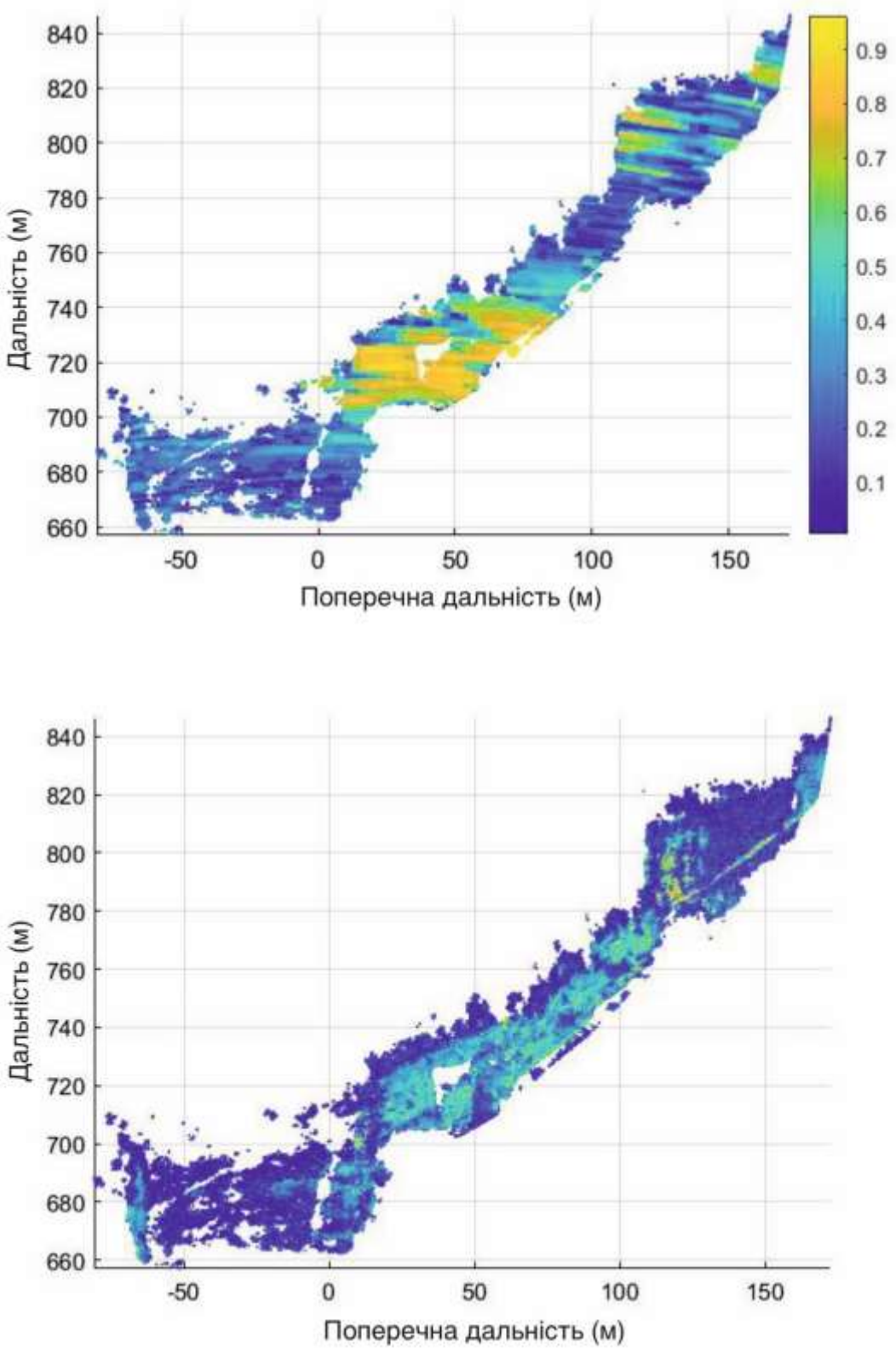


Рисунок 17: Хмара точок наземного лазерного сканування, забарвлена за когерентністю між 2020 та 2021роками

Для відібраних пікселів було проведено розрахунок інтерферометричної фази. Це різниця фаз, що зафіксована між двома періодами вимірювань.

Згідно саме з цими значеннями інтерферометричної фази визначалися величини зміщень.

Оцінка зміщень після повторної дискретизації представлена на малюнку 17.

Разом з тим, потрібно врахувати декілька обмежень у здійсненому аналізі.

Перш за все, просторове розгортання інтерферометричної фази не було виконано через обмежену кількість придатних пікселів та значні проміжки між ними.

По-друге, при обчисленнях не бралося до уваги вплив атмосферних умов, що могли різнитися у період спостережень та вносити додаткові помилки в результати.

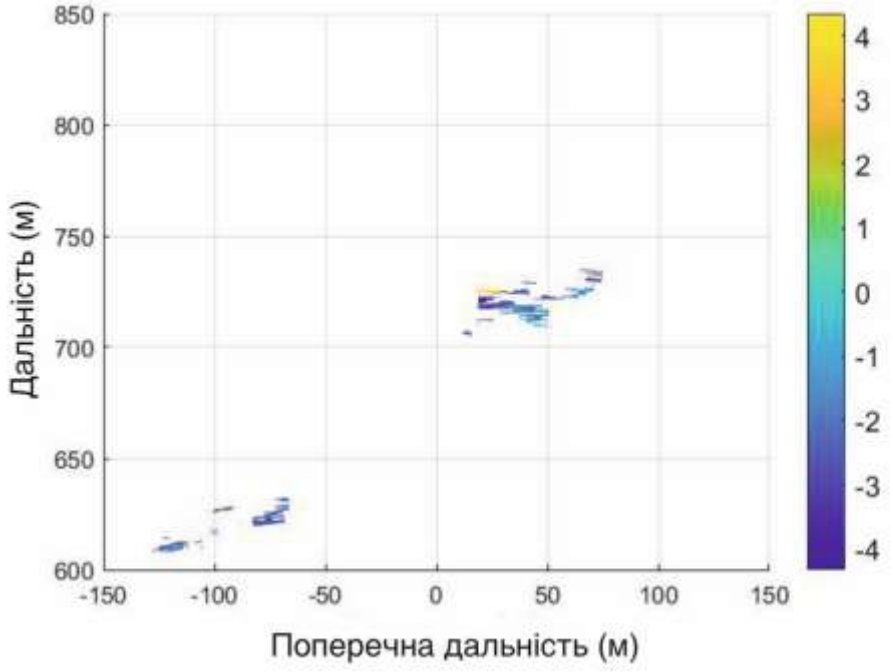


Рисунок 17: Зміщення між обома періодами після повторної вибірки даних за 2021 рік

Оцінка похибки зсуву варіюється в межах $\pm\lambda/4$, що еквівалентно приблизно ±4,3 мм.

Саме цей інтервал визначає граничне значення амплітуди деформації, яке можливо коректно виміряти на основі інтерферометричних даних.

Варто зауважити, що переважна частина, а саме приблизно 90% відібраних пікселів, демонструє негативні значення деформацій, згруповані біля нижньої межі цього інтервалу ($-\lambda/4$).

Водночас для інших пікселів характерні позитивні значення деформацій, які групуються поблизу верхньої межі діапазону вимірювання.

Це свідчить про присутність стрибків фази в цих точках, що є типовим наслідком невикористання процедури просторового розгортання інтерферометричної фази.

Ще одна риса цих зібраних даних – аналогічний розподіл деформацій, котрий зауважується як в місцях можливих зсувів, так і у відносно стабільній частині гірського масиву.

Це свідчить про те, що зареєстровані зміни, вірогідно, не репрезентують реальні геомеханічні процеси в скельному укосі, а спровоковані сторонніми чинниками.

Найбільш імовірною причиною вважається різниця в атмосферних умовах між двома етапами вимірювань, адже вони суттєво впливають на розповсюдження радіохвиль та, відповідно, на фазові характеристики сигналу.

Отже, на основі проаналізованих відомостей, існують обґрунтовані підстави припускати, що зареєстровані зміщення, з великою ймовірністю, є похибками вимірювань і не свідчать про наявність реальних деформацій гірського хребта.

Погодження цього висновку з даними наземного лазерного сканування та результатами GNSS-спостережень додатково підтверджує, що впродовж усього періоду проведення досліджень, гірський схил залишався у стабільному стані.

Висновок

У межах цієї магістерської праці було зроблено спробу всебічного поєднання різноманітної інформації, що виникла внаслідок як точкових, так і площинних способів вимірювання, з подальшим детальним вивченням деформацій.

Дослідження зосереджується на проблемі інтегрування даних точкових спостережень, таких як GNSS та тахеометрія, з інформацією, отриманою за допомогою площинних методів: наземного лазерного сканування й GB-SAR.

Також розглядається питання статистично обґрунтованого виявлення деформацій, що виникли між двома періодами площинних спостережень.

Однією з ключових перепон виявилася обмеженість даних, зібраних у 2020 році, що створило труднощі з реалізацією повноцінного об'єднання отриманих результатів.

Спершу, недосконалість системи реєстрації створила невизначеність у визначенні просторових координат для даних, отриманих за допомогою наземного лазерного сканування (TLS) та GB-SAR.

У випадку з GB-SAR, це випливає зі специфіки самого методу.

Але для лазерного сканування, така ситуація стала наслідком організаційних недопрацювань.

Проблему з лазерним скануванням вдалося розв'язати частково: було ідентифіковано стабільні ділянки на двох етапах зйомки.

Це дозволило оцінити можливі зміни лише в нестабільних частинах об’єкта.

Але, аналіз даних GB-SAR залишився незавершеним.

Водночас, поєднання даних з тахеометрії та наземного лазерного сканування для цілей картографування показало свою ефективність, дозволивши суттєво покращити інтерпретаційну цінність матеріалів, отриманих за допомогою GB-SAR моніторингу.

У ході тестового етапу жоден з методів (GNSS, тахеометрія, наземне лазерне сканування, GB-SAR), а також їхні комбінації, не зафіксували значних рухів.

Головним фактором, що зумовив відсутність помітних результатів, стало те, що передбачувані деформації мали набагато менші значення, ніж середньоквадратичні похибки, характерні для проведених спостережень.

Це призвело до отримання статистично незначущих даних.

Проведений аналіз дає змогу узагальнити, що для коректного виявлення деформацій, часовий проміжок між сесіями спостережень мусить перевищувати три роки, а найкращим інтервалом буде діапазон від чотирьох до п’яти років.

В подальших дослідженнях варто застосовувати GNSS та тахеометрію з метою гарантування точного геодезичного прив'язування, тоді як наземне лазерне сканування доцільно використовувати на дистанціях 100–200 метрів з подальшим детальним площинним аналізом.

Слід передбачити стохастичну модель, яка братиме до уваги ймовірні джерела похибок вимірювань, наприклад, у формі синтетичної матриці дисперсій та коваріацій.

Стосовно GB-SAR, хоча цей метод і може бути корисним для уточнення даних, зіставляти два часові проміжки виявилось малорезультативним через складнощі з географічним прив'язуванням.

Натомість, GB-SAR здатний показати високу ефективність як інструмент для безперервного моніторингу, фіксуючи істотні деформації навіть за кілька місяців, за умови правильного врахування погодних умов.

У цьому разі відпадає потреба у прямій геоприв’язці між періодами.

Отже, аналіз показав, що однорічний термін між замірами не є оптимальним для надійного фіксування можливих зрушень гірської маси.

Для отримання більш інформативних даних, необхідно суттєво подовжити інтервал між спостереженнями, а також впровадити всеосяжний підхід, який обов'язково братиме до уваги стохастичні характеристики вимірювань.

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). Чернігів 2002р.

8. Hassan, Aiham & Zhang, Li & Kerekes, Gabriel & Schwieger, Volker. (2022). Fusion of Inhomogeneous Geodetic Data for Rock Cliff Monitoring: a Case Study of the Lianziya Cliff in Three Gorges National Geological Park in China.

9. Carrea, D., Abellan, A., Derron, M.H., Jaboyedoff, M. (2015) Автоматична оцінка об'єму гірських порід на основі даних наземного лазерного сканування. У: Lollino G. та ін. (ред.) Інженерна геологія для суспільства та території - Том 2. Springer, Cham.

10. Dong, X., Xu, Q., Huang, R. та ін. (2019) Реконструкція поверхневих блоків гірських порід за допомогою моделювання структури гірських порід 3D TLS: гірський обвал Лонг-Чанг 2013 року, У: Механіка гірських порід та гірська інженерія, Springer, Відень.

11. Engel, P., Foppe, K., Köster, U. (2020) Інженерний моніторинг в Інтернеті речей – Розвиток та дослідження автономних сенсорних систем. У: Вундерліх, Томас А. (ред.), Інженерна обробка 20. ISBN 978-

3-87907-672-7. Віхманн - VDE Verlag.

12. Енгель, П., Фоппе, К. (2016) Моніторинг деформацій з відкритим кодом. Багатоплатформний підхід для автоматизованого спостереження в геодезії. У: Матеріали GeoTerrace 2016, Львів, Україна.

13. Го, Х.З., Хуан, Х.Б., Сюй, К.Х., Чень, В.М., Лі, Х.В., Тао, В.Х. (1999) Роботи з контролю небезпечного гірського масиву Ляньцзя та зсуву Хуанлаші в Трьох ущелинах річки Янцзи, Китай. J. Geol. Hazard.
Control, том 10, випуск 4, с. 15-34.

14. Хассан, А., Сюй, Дж., Чжан, Л., Лю, Г., Шмітт, А., Сін, К., Сюй, Ю., Оуян, К., Швігер, В. (2018) На шляху до інтеграції вимірювань GNSS та GB-SAR: Приклад моніторингу обвалу гірських порід на річці Янцзи в Китаї, конгрес FIG, Стамбул, 2018.

15. Хассан, А., Сюй, Дж., Сін, К., Швігер, В. (2019) Внесок у дисперсійний аналіз 3D-зміщень, отриманих з вимірювань GB-SAR, Журнал геодезії, картографії та кадастру - ISSN: 1454-1408.

16. Харменінг, К., Нойнер, Х. (2017) Вибір оптимальної кількості контрольних точок B-сплайну (Частина 2: Апроксимація поверхонь та застосування). Журнал прикладної геодезії, вип. 11 (2017), Випуск 2; С. 43 - 52.

17. Еррера, Г.; Фернандес-Мородо, Дж. А.; Мулас, Дж.; Пастор, М.; Лузі, Г.; Монсеррат, О. (2009) Прогнозування зсувів
модель із використанням наземних даних SAR: The Portalet case study, Engineering Geology, 105(3), 220-230.

18. Хойнеке, О., Глабш, Й., Шубек, С. (2011) Моніторинг зсувів з використанням недорогого обладнання GNSS -Досвід двох альпійських випробувальних майданчиків. Журнал цивільного будівництва та архітектури, том 5, випуск 8, с.660-669.

19. Хольст, К., Клінгбайль, Л., Ессер, Ф., Кульманн, Х. (2017) Використання порівняння хмар точок для виявлення деформацій

природних та штучних об'єктів, Матеріали INGEO 2017, 7-ма Міжнародна конференція з інженерної геодезії, Португалія, Лісабон, ISBN 978-972-49-2300-0.

20. Huang, R., Jiang, L., Shen, X., Dong, Z., Zhou, Q., Yang, B., Wang, H. (2019) - Ефективний метод моніторингу повільних зсувів за допомогою далекобійного наземного лазерного сканування: тематичне дослідження зсуву Дашу в районі водосховища Три ущелини, Китай, Landslides 16:839–855, Springer Berlin Heidelberg.

21. James, M. R., Robson, S., та Smith, M. W. (2017) 3D-виявлення топографічних змін на основі невизначеності за допомогою фотограмметрії структури з руху: точні карти для наземного контролю та безпосередньо геоприв'язаних досліджень. Earth Surf. Process. Landforms, 42: 1769–1788. doi: 10.1002/esp.4125.

22. Каукер, С., Швігер, В. (2017) Синтетична коваріаційна матриця для моніторингу за допомогою наземного лазерного сканування. журнал прикладної геодезії, вип. 11, Випуск 2, С. 77-87.

23. Kerekes, G., Schwieger, V. (2020) Модель елементарної похибки, застосована до вимірювань наземного лазерного сканування: Математика 2020, Вип. 8, випуск 4.

24. Leica Geosystems AG (2020) Технічні характеристики Leica TM30. URL: https://w3.leica-geosystems.com/, останній доступ 03.06.2020

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи:

«Комплексний підхід до аналізу стійкості скельних масивів на основі поєднання геодезичних та дистанційних методів»

Обсяг пояснювальної записки: 64 аркушів.

24.12.25 рік _____

(дата) **(підпис студента)**