УДК 528.48:551.435.62
DOI https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-27

ОЦІНКА МІНІМАЛЬНО ВИЯВЛЮВАНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗСУВНИХ СХИЛІВ ЗА ДАНИМИ БАГАТОРАЗОВОГО НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

Мітченко Дмитро Володимирович,
аспірант
Криворізького національного університету;
Головний маркшейдер
ПРАТ «ПІВНІЧНИЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ»
ORCID ID: 0009-0000-4647-906X

У статті розглянуто проблему достовірного виявлення деформацій зсувних схилів за даними багаторазового наземного лазерного сканування (TLS). Незважаючи на високу точність сучасних геодезичних технологій, інтерпретація малих різниць між тривимірними геометричними моделями рельєфу ускладнюється впливом низки похибок, а саме: безпосередньо вимірювань; суміщення різночасових хмар точок, отриманих під час лазерного сканування; геодезичної прив'язки. Перелічені похибки можуть призводити до хибних висновків щодо реальних деформацій зсувних схилів. Метою дослідження є розробка методики оцінки мінімально виявлюваних деформацій (Limit of Detection, LoD) з урахуванням впливу основних джерел похибок у TLS-моніторингу. Методика дослідження базується на інтеграції TLS-даних, отриманих за результатами неодноразових GNSS-вимірювань, та аналізі похибок на етапах збору, обробки та суміщення просторових даних. Для оцінки достовірності виявлених змін використано статистичний підхід, що враховує точність лазерного сканування, похибки реєстрації хмар точок та геодезичної прив'язки. Запропоновано формалізований критерій визначення порогу виявлення деформацій, який дозволяє відокремлювати реальні зміщення від шумів вимірювань. У роботі проаналізовано вплив геометрії поверхні сканування, щільності хмар точок та умов знімання на величину мінімально виявлюваних деформацій. Встановлено, що нерівномірність покриття поверхні, наявність зон тінювання та складна морфологія рельєфу істотно підвищують рівень невизначеності, що безпосередньо впливає на точність визначення змін деформацій зсувних схилів. Обґрунтовано необхідність оптимізації конфігурації станцій сканування та параметрів знімання для підвищення достовірності результатів. У результаті дослідження встановлено, що мінімально виявлювані величини деформацій залежать від умов знімання, геометрії сканування та якості інтеграції даних і можуть перевищувати номінальну точність окремих методів. Практичне застосування (запропонованого підходу) виконаних досліджень дозволяє підвищити достовірність інтерпретації результатів моніторингу, зменшити ризик помилкових висновків та оптимізувати процес виконання польових робіт. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем геодезичного моніторингу зсувних процесів, а також при розробці методик оцінки та раннього попередження геодинамічних ризиків.

Ключові слова: *наземне лазерне сканування, зсувні процеси, мінімально виявлювана деформація, багаточасовий моніторинг, хмара точок.*

Mitchenko Dmytro. Assessment of minimally detectable deformations of landslide slopes based on multi-temporal terrestrial laser scanning data

This paper addresses the problem of reliable detection of landslide slope deformations based on multi-temporal terrestrial laser scanning (TLS) data. Despite the high accuracy of modern geodetic technologies, the interpretation of differences between three-dimensional terrain models is often complicated by measurement errors, point cloud registration inaccuracies, and georeferencing uncertainties, which may lead to misinterpretation of changes as real deformations. The aim of the study is to develop an approach for assessing minimally detectable deformations (Limit of Detection, LoD), taking into account the main sources of uncertainty in TLS-based monitoring. The research methodology is based on the integration of multi-temporal TLS data with GNSS measurements and the analysis of errors at the stages of data acquisition, processing, and spatial data alignment. A statistical approach is applied to assess the reliability of detected changes, considering the accuracy of laser scanning, point cloud registration errors, and geodetic referencing uncertainties. A formalized criterion for determining the deformation detection threshold is proposed, allowing real displacements to be distinguished from measurement noise. Additionally, the influence of scanning geometry, point cloud density, and acquisition conditions on the magnitude of minimally detectable deformations is analyzed. It is established that uneven surface coverage, shadow zones, and complex terrain morphology can significantly increase uncertainty, directly affecting the accuracy of deformation detection. The necessity of optimizing scanning station configuration and acquisition parameters to reduce errors and improve result reliability is substantiated. The study demonstrates that minimally detectable deformations depend on acquisition conditions, scanning geometry, and data integration quality, and may exceed the nominal accuracy of individual methods. The practical application of the proposed approach enhances the reliability of monitoring result interpretation, reduces the risk of erroneous conclusions, and allows optimization of field survey parameters. The obtained results can be used to improve geodetic monitoring systems for landslide processes, as well as for the development of early warning methodologies and geodynamic risk assessment.

Key words: *terrestrial laser scanning, landslide processes, minimally detectable deformation, multi-temporal monitoring, point cloud.*

Вступ. Процеси зсуву належать до найбільш небезпечних геодинамічних явищ, що призводять до деформацій рельєфу, порушення стійкості схилів, руйнування інженерних об'єктів та створюють загрозу для безпеки територій. Для своєчасного виявлення таких змін необхідні методи моніторингу, здатні фіксувати просторові деформації з високою точністю та у часовій динаміці. Серед сучасних підходів важливе місце займають GNSS-технології, які широко застосовуються для моніторингу зсувів у реальному часі та забезпечують отримання координатних даних для оцінки зміщень схилів [6].

Поряд із супутниковими спостереженнями, наземне лазерне сканування (TLS) є одним із найбільш інформативних засобів дослідження деформаційних процесів, оскільки дозволяє формувати високодеталізовані тривимірні моделі поверхні. Його перевага полягає у високій щільності хмари точок, можливості багаторазового повторення зйомок та детальній фіксації морфологічних особливостей об'єкта. Застосування лазерних сканерів для високороздільного моніторингу зсувів продемонстровано у роботі, де деформації аналізувалися за допомогою feature tracking та гістограмного аналізу, що підтвердило ефективність TLS для просторового відстеження змін нестійких масивів [5].

Сучасні дослідження свідчать, що багаторазові лазерні сканування та інші дистанційні дані є ефективним інструментом кількісної оцінки геоморфодинаміки схилів. Зокрема, багаторазове наземне лазерне сканування використовується для дослідження складних ерозійних форм, де важливим є не лише факт отримання тривимірної моделі, а й оптимізація схеми зйомки, що безпосередньо впливає на повноту покриття та якість подальшого аналізу змін [3]. Аналогічно, використання мультичасових даних наземного LiDAR у поєднанні з наземними фотографіями та вебкамерними спостереженнями дозволяє кількісно оцінювати геоморфодинаміку схилів у складних природних умовах [10].

Важливою перевагою дистанційних методів є можливість фіксації змін у різних типах нестабільних рельєфних систем. Це підтверджується дослідженнями активних геоморфологічних процесів на прибережних урвищах, де дистанційні методи використовувалися для аналізу сучасної морфодинаміки схилових форм [4], а також роботами, у яких близькодіапазонні методи зондування дали змогу простежити кінематику та геоморфологічні зміни дестабілізованого скельного льодовика [8]. Хоча наведені об'єкти відрізняються за генезисом від класичних зсувів, ці дослідження підтверджують загальну ефективність багаторазових тривимірних спостережень для аналізу змін нестійких поверхонь.

Разом із тим, отримання детальних тривимірних моделей саме по собі не розв'язує проблему достовірного виявлення деформацій. Порівняння поверхонь, побудованих у різні моменти часу, може відображати як реальні геоморфологічні зміни, так і вплив похибок вимірювань, умов зйомки, геометрії сканування, дальності до об'єкта, а також помилок суміщення хмар точок. Методичне значення має оцінка невизначеності TLS-даних, що показано на прикладі постійної довгобазової системи лазерного сканування, де спеціально аналізувався вплив похибок на кількісне визначення змін поверхні [9].

Таким чином, для задач моніторингу зсувних схилів особливо важливим є не лише виявлення різниці між моделями, отриманими у різні проміжки часу, а й встановлення того, чи є ця різниця статистично та методично достовірною. Це зумовлює необхідність переходу від простого порівняння моделей до оцінки мінімально виявлюваних деформацій, тобто такого порогу змін, який перевищує сумарну невизначеність вимірювань. Особливо актуальною ця проблема є для інженерно-геодезичного моніторингу зсувів, де навіть невеликі зміщення можуть бути діагностично значущими.

Отже, аналіз сучасних досліджень показує, що TLS і GNSS є ефективними інструментами для спостереження за нестійкими схилами, однак питання достовірного розмежування реальних деформацій і шумів вимірювань залишається недостатньо опрацьованим. У зв'язку з цим метою даної роботи є оцінка мінімально виявлюваних деформацій зсувних схилів за багаторазовими даними наземного лазерного сканування з урахуванням основних джерел похибок, що виникають на етапах знімання, суміщення та інтерпретації просторових даних.

Матеріали та методи. Дослідження виконано на ділянці нестійкого борту Першотравневого кар'єру в межах м. Кривий Ріг. Вибір цього об'єкта зумовлений наявністю техногенно порушеного рельєфу, складною геометрією уступів, локальними зонами розущільнення масиву та візуальними ознаками деформаційних процесів. Для даної території характерні тріщини, уступоподібні форми, просадки та окремі ділянки перерозподілу гірничої маси, що дає можливість апробувати підхід до оцінки мінімально виявлюваних деформацій у реальних умовах.

Основу вихідних даних становили результати неодноразового наземного лазерного сканування, доповнені геодезичною прив'язкою

контрольних точок за GNSS-вимірюваннями. Для лазерного знімання застосовувався сканер Leica RTC360, який забезпечує високу щільність хмари точок і дозволяє відтворювати складну морфологію схилу у тривимірному вигляді. Координатне забезпечення виконувалося за допомогою Leica GS18T. У випадках, коли супутникові вимірювання могли ускладнюватися затіненням, наявністю конструкцій або несприятливою конфігурацією огляду неба, для контрольної перевірки окремих пунктів допускався тахеометричний контроль із використанням Topcon ES-105.

Польовий етап складався з кількох послідовних операцій. Насамперед проводилася рекогносцировка території, у ході якої визначалися межі ділянки спостережень, оцінювалася доступність окремих фрагментів схилу та підбиралися місця встановлення опорних і контрольних точок. Окрему увагу приділяли вибору стабільних зон за межами активної деформації, оскільки саме вони використовувалися як базові елементи для подальшої геодезичної прив'язки та контролю просторової незмінності моделей різних циклів спостережень.

Після цього формувалася мережа контрольних точок. Їх координати визначалися GNSS-методом у режимі, що забезпечував потрібну точність для геоприв'язки результатів TLS-зйомки. Контрольні точки розміщувалися таким чином, щоб охопити як стабільну частину полігону, так і прилеглі до нестійкої зони ділянки. Такий підхід давав змогу не лише задати єдину систему координат для всіх епох спостережень, а й надалі оцінювати просторове зміщення моделей відносно опорної основи.

Наземне лазерне сканування виконувалося з кількох станцій. Їхнє розташування підбиралося з урахуванням рельєфу, наявності перекриття між сусідніми сканами та мінімізації зон тінювання. Кількість позицій визначалася конфігурацією схилу: чим складнішою була геометрія уступів і чим більше локальних нерівностей містила поверхня, тим більшої кількості станцій потребувало знімання. Для підвищення точності взаємної реєстрації використовувалися сферичні мішені або інші стабільні орієнтири, що чітко розпізнавалися у сусідніх сканах. Усі цикли багаторазових спостережень намагалися виконувати за максимально подібної схеми розміщення сканера, щоб зменшити вплив відмінностей геометрії знімання на результати порівняння.

Камеральна обробка даних починалася з опрацювання GNSS-спостережень у програмному середовищі Leica Infinity, де перевірялися координати опорних пунктів і виконувалося їх узгодження в єдиній системі. Паралельно скани кожної епохи реєструвалися в Cyclone REGISTER 360. На цьому етапі здійснювалися зшивання окремих позицій, попередня фільтрація шуму, відсікання випадкових відбиттів і перевірка якості перекриття між станціями. У результаті для кожного циклу спостережень формувалася зведена хмара точок, що відображала реальний стан поверхні на момент знімання.

Після реєстрації кожна окрема хмара точок приводилася до спільної системи координат

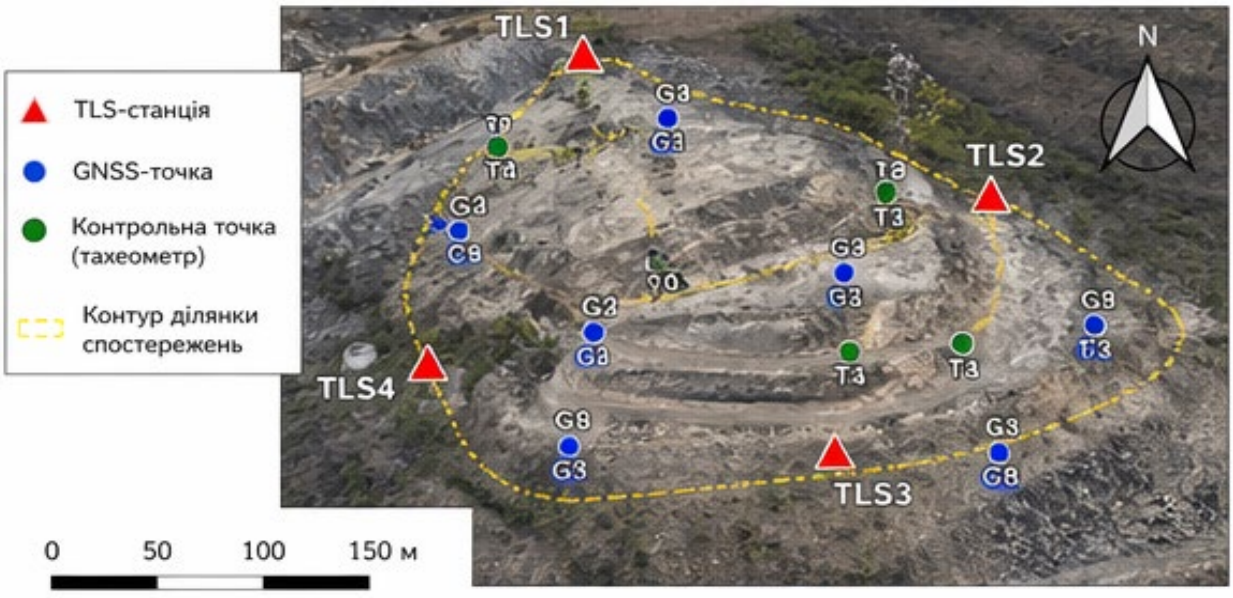

Рис. 1. Схема розташування TLS-станцій та контрольних GNSS-точок

на основі контрольних пунктів. Далі виконувалося уточнювальне суміщення моделей у CloudCompare із застосуванням алгоритму ICP (Iterative Closest Point). Використання цього алгоритму дозволяло зменшити залишкові взаємні зміщення між хмарами точок і забезпечити коректне порівняння поверхонь різних епох. Якість суміщення оцінювали за залишками на контрольних точках і значенням середньоквадратичної похибки реєстрації. Для подальшого аналізу допускалися лише ті пари моделей, для яких досягався прийнятний рівень просторового узгодження.

Після завершення геоприв'язки та суміщення виконувалося безпосереднє порівняння циклічних хмар точок. Для цього обиралися або повні моделі поверхні, або окремі ділянки підвищеного інтересу: зони тріщиноутворення, локальні тераси, просадки, уступи та фрагменти, де візуально фіксувалися ознаки нестабільності. Визначення змін проводилося шляхом обчислення просторових відстаней між поверхнями двох сусідніх епох спостережень. Отримані значення трактувалися не як автоматично достовірні деформації, а як потенційні зміни, що потребують перевірки з урахуванням сумарної похибки всієї вимірювальної схеми.

Для цього в дослідженні застосовано підхід оцінки мінімально виявлюваної деформації. Його суть полягає у визначенні такого порогу зміни поверхні, який перевищує сукупну невизначеність, що виникає на всіх етапах роботи – від польового знімання до обчислення різниць між моделями. До складових цієї невизначеності віднесено: власну похибку лазерного сканування, похибку взаємної реєстрації сканів, похибку суміщення хмар точок та похибку геодезичної прив'язки контрольних точок. Узагальнений поріг мінімально виявлюваної деформації визначали за формулою:

$$LoD = \pm 1{,}96 \cdot \sqrt{\sigma_{TLS}^2 + \sigma_{reg}^2 + \sigma_{GNSS}^2}$$

де

σ_{TLS} – похибка, пов'язана з точністю лазерного сканування;

σ_{reg} – похибка суміщення і реєстрації хмар точок;

σ_{GNSS} – похибка геодезичної прив'язки;

1,96 – коефіцієнт для довірчої ймовірності 95 %.

Інтерпретація результатів виконувалася за таким принципом: якщо абсолютна різниця між поверхнями перевищувала значення LoD, зміна вважалася достовірною деформацією; якщо ж вона не досягала цього порогу, її відносили до зони невизначеності. Такий підхід дозволив уникнути помилкового трактування локальних відхилень, які можуть бути наслідком не реального зміщення масиву, а особливостей геометрії знімання, неоднорідної щільності точок або залишкових похибок суміщення.

Для підвищення надійності висновків результати багаторазового TLS-порівняння зіставлялися з польовими спостереженнями та геодезичними даними контрольних точок. Особлива увага приділялася ділянкам, де зміни за моделями перевищували поріг мінімально виявлюваної деформації та одночасно підтверджувалися морфологічними ознаками активізації процесу. Це забезпечило перехід від простого фіксування різниці між моделями до обґрунтованого виділення реально значущих деформацій зсувного схилу.

Результати. Першим результатом дослідження стало формування узгоджених різночасових тривимірних моделей нестійкої ділянки борту Першотравневого кар'єру. Після реєстрації сканів, геодезичної прив'язки та просторового суміщення отримано цифрове представлення схилу, придатне для часових порівнянь. Модель відобразила геометрію техногенного масиву як багатоярусної системи з горизонтами +115, +130, +145, +160 та +175 м. Загальна висота утворення становить близько 60 м; центральна частина схилу характеризується значними кутами нахилу, тоді як південний борт має пологішу конфігурацію і в межах спостережень не виявив виражених ознак активізації.

Другий блок результатів стосується якості просторових даних. Наземне лазерне сканування забезпечило високу деталізацію поверхні: на локальних ділянках щільність хмари точок становила 5 000–10 000 т/м², що дало змогу впевнено виділяти дрібні морфологічні елементи схилу. Під час просторового узгодження моделей встановлено, що середньоквадратична похибка інтеграції перебуває в межах 2,5–3,5 см. Саме це значення задає нижню межу, нижче якої виявлені зміни не можуть автоматично трактуватися як реальні деформації.

Порівняння різночасових моделей показало, що деформації розподілені по схилу нерівномірно. Найбільш виразні зміни зосереджені в локальній зоні, пов'язаній із районом воронки №1 на горизонті +150 м. Тут зафіксовано поєднання кількох ознак нестійкості: тріщиноутворення, просідання, формування терасоподібних уступів і локальних розривів поверхні. Просторове положення цих форм свідчить про розвиток деформацій у напрямку балки Грядковата. Натомість периферійні частини схилу не продемонстрували такої концентрації змін, а окремі різниці між моделями там здебільшого не виходили за межі очікуваної невизначеності.

Кількісне підтвердження активізації отримано за результатами геодезичних спостережень на контрольованих ділянках автодоріг Б і В. Зафіксоване розкриття тріщин досягало 55 мм у плані та 82 мм за глибиною. На відміну від локальних сантиметрових відхилень, які можуть бути пов'язані з похибками суміщення або нерівномірністю знімання, ці значення мають інженерно значущий характер і свідчать про фактичний розвиток деформаційного процесу. Отже, саме на цих ділянках різниця між станами поверхні перевищує рівень фонової невизначеності та може розглядатися як достовірна ознака нестійкості.

Окремо проаналізовано вплив геодезичної прив'язки на достовірність інтерпретації. Порівняння GNSS-визначень із тахеометричним контролем показало, що для GNSS похибка у площині змінювалася від -42 до +62 мм, а за висотою – від -27 до +43 мм. Для тахеометричних вимірювань відповідні відхилення були меншими: від -14 до +11 мм у площині та від -11 до +16 мм за висотою. Це свідчить, що при аналізі малих змін саме геодезична складова може істотно впливати на межу достовірного виявлення деформацій. Частина змін сантиметрового рівня не може бути інтерпретована без урахування похибки прив'язки, особливо у складних умовах кар'єру.

Узагальнення результатів дозволяє виділити дві групи змін. До першої належать зміни, що перевищують сумарний рівень похибок і супроводжуються морфологічними ознаками нестійкості; вони інтерпретуються як достовірні деформації. До другої належать локальні відмінності між різночасовими моделями, які виникають у межах очікуваної невизначеності й не мають чіткого польового підтвердження; такі зміни слід відносити до зони недостовірного виявлення. Практично це означає, що сама наявність різниці між двома хмарами точок ще не є достатньою підставою для висновку про активізацію зсувного процесу.

Отже, достовірне виявлення деформацій у межах техногенного схилу визначається не лише деталізацією TLS-знімання, а сукупною дією трьох чинників: якості просторового суміщення моделей, точності геодезичної прив'язки та морфологічної виразності самих змін. Найбільш надійно фіксуються деформації, які одночасно перевищують рівень похибок, просторово концентруються в межах нестійких зон і підтверджуються незалежними геодезичними або польовими спостереженнями. Саме такий підхід формує підставу для подальшої оцінки мінімально виявлюваних деформацій як критерію відокремлення реальних змін від шуму вимірювань.

Обговорення. Отримані результати підтвердили, що при аналізі багаторазових TLS-даних ключовим є не саме фіксування різниці між поверхнями, а встановлення межі, після якої така різниця може розглядатися як достовірна деформація. Цей висновок добре узгоджується з підходом, у якому запропоновано метод обчислення detectable landslide за даними наземного лазерного сканування, тобто фактично здійснено перехід від простого вимірювання змін до оцінки порога їх виявлення [2]. У нашому дослідженні аналогічна логіка реалізована через

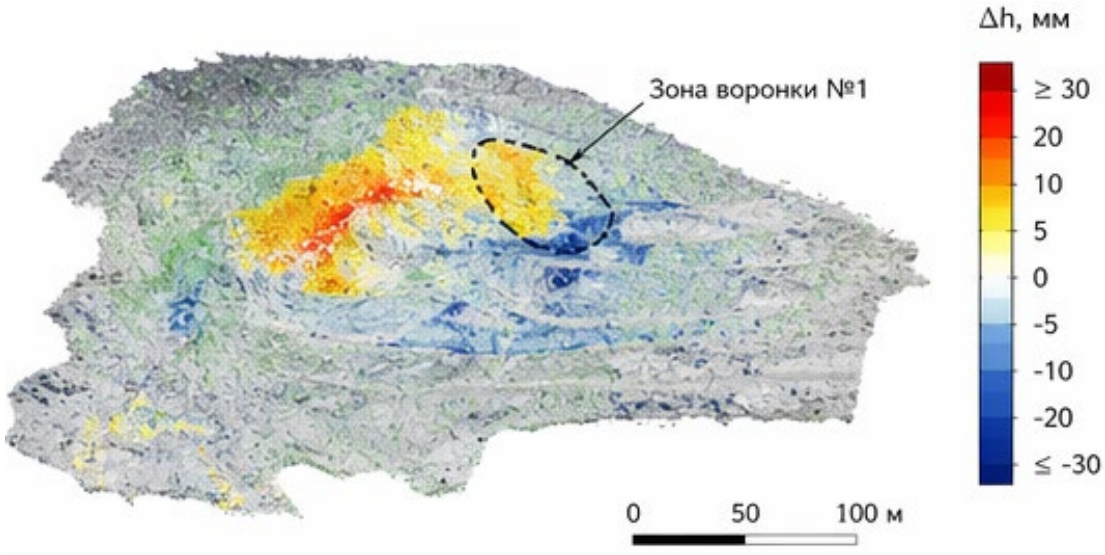

Рис. 2. Карта різниць між моделями

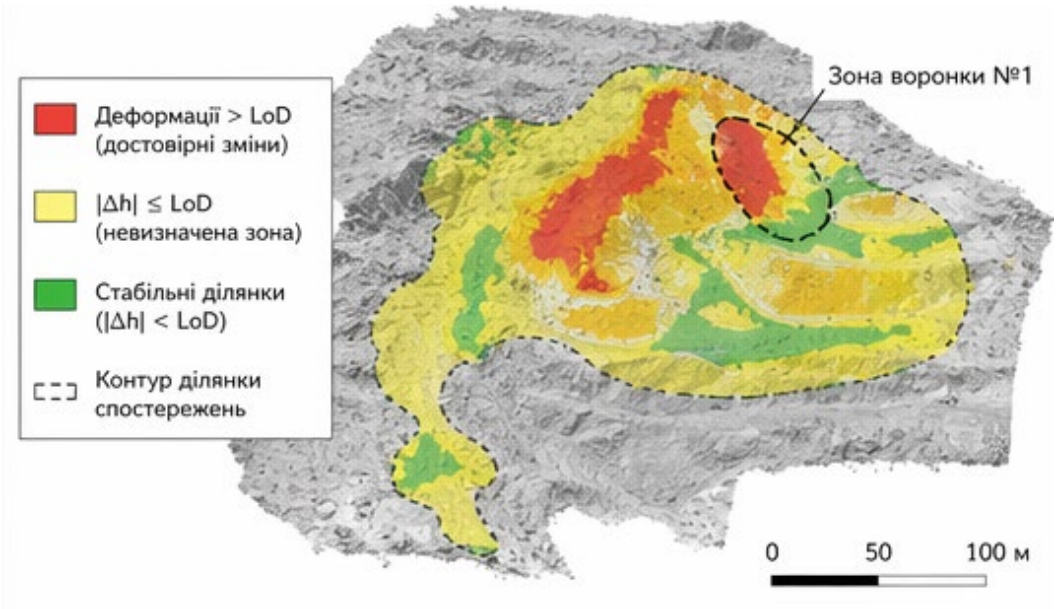

Рис. 3. Зони достовірних деформацій та невизначеності

використання мінімально виявлюваної деформації як критерію відокремлення реальних зміщень від шуму вимірювань.

Водночас результати показали, що достовірність виявлених змін значною мірою залежить від якості підготовки та обробки вихідних даних. Це узгоджується з дослідженням, у якому TLS-моніторинг деформацій схилу розглядається як ефективний спосіб отримання дискретних тривимірних даних поверхні, а окрема увага приділяється процедурам реєстрації хмар точок [12]. Для нашої роботи це має принципове значення, оскільки навіть за наявності щільної хмари точок похибки просторового суміщення здатні суттєво впливати на інтерпретацію малих змін і, відповідно, на величину порога достовірного виявлення деформацій.

Суттєвим є й те, що рівень невизначеності у TLS-завданнях не є сталою величиною, а змінюється залежно від геометрії сканування та властивостей поверхні. Це прямо підтверджено у праці, де показано, що оцінка Level of Detection повинна враховувати похибку дальномірної складової та вплив таких чинників, як відстань до об’єкта, кут падіння променя, інтенсивність відбиття й матеріал поверхні [11]. У нашому випадку саме ці фактори пояснюють, чому частина локальних відмінностей між епохами не може трактуватися як деформація без додаткової перевірки, особливо на ділянках зі складною морфологією, затіненням та нерівномірним покриттям.

Наші результати також узгоджуються із загальними висновками огляду TLS-технологій для моніторингу деформацій в інженерних задачах, у якому багаторазове порівняння хмар точок визначено як базову схему аналізу, а серед головних умов надійного виявлення деформацій названо планування вимірювань, точну реєстрацію, геоприв’язку та вибір адекватного способу change detection [7]. Для досліджуваного техногенного схилу це важливо, оскільки достовірність підсумкового результату формується не лише точністю сканера, а всією вимірювально-аналітичною схемою – від вибору станцій до контролю якості суміщення моделей, отриманих у різні проміжки часу.

Окремо слід відзначити, що вибір способу аналізу деформацій впливає на характер отриманої інформації. У дослідженні, присвяченому порівнянню методів виявлення деформацій за TLS- та UAS-даними, показано, що point cloud-based methods є придатними для виявлення площинно розподілених змін поверхні, тоді як feature-based та image-based підходи краще працюють для локальних переміщень окремих елементів [1]. У цьому контексті обраний у нашій роботі підхід можна вважати виправданим: основний акцент зроблено на виявленні просторово розподілених змін поверхні схилу за багаторазовими TLS-моделями, а польові та геодезичні спостереження використано як засіб локальної верифікації найбільш значущих зон деформації.

Таким чином, обговорення отриманих результатів свідчить, що для задач моніторингу зсувних схилів недостатньо лише високої деталізації хмари точок. Практичну цінність мають

лише ті зміни, які перевищують сумарний рівень невизначеності, підтверджуються просторовою структурою деформаційних форм і не суперечать даним геодезичного контролю. Саме тому оцінка мінімально виявлюваної деформації повинна розглядатися не як допоміжний елемент, а як центральний критерій інтерпретації багаторазових TLS-спостережень.

Висновки. У статті розроблено підхід до оцінки мінімально виявлюваних деформацій зсувних схилів за неодноразовими даними наземного лазерного сканування з урахуванням похибок геодезичної прив'язки, суміщення хмар точок та умов знімання. Запропонований підхід дає змогу перейти від формального порівняння різночасових моделей поверхні до обґрунтованого виділення лише тих змін, які можуть вважатися достовірними деформаціями.

За результатами дослідження встановлено, що висока щільність і деталізація TLS-даних самі по собі не гарантують надійного виявлення малих зміщень. Достовірність інтерпретації визначається сукупною дією кількох чинників: точністю геодезичної прив'язки, якістю просторового суміщення моделей, геометрією сканування, наявністю зон тінювання та морфологічними особливостями досліджуваної поверхні. У зв'язку з цим мінімально виявлювана деформація повинна розглядатися як основний критерій оцінки значущості змін, а не як допоміжний параметр камеральної обробки.

Проведений аналіз показав, що в межах досліджуваної ділянки нестійкого борту найбільш достовірні деформації приурочені до зон тріщиноутворення, просідань та локального порушення суцільності поверхні. Саме на цих ділянках зафіксовані зміни перевищували рівень фонової невизначеності та узгоджувалися з геодезичними спостереженнями. Водночас частина локальних відмінностей між багаторазовими моделями виявилася співмірною з похибками вимірювальної схеми, а тому не може трактуватися як підтверджена деформація без додаткової перевірки.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропонована методика дозволяє підвищити достовірність геодезичного моніторингу зсувних процесів, зменшити ризик хибної інтерпретації малих змін та оптимізувати параметри польових спостережень. Її використання є доцільним під час контролю стану техногенних схилів, у системах раннього виявлення деформацій та при оцінці геодинамічних ризиків у гірничопромислових районах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Becker D., Raddatz L., Roussel C., Klonowski J. Analysis methods for deformation detection using TLS and UAS data on the example of a landslide simulation. *International Journal of Geo-Engineering*. 2024. Vol. 15. P. 9. DOI: 10.1186/s40703-023-00203-z.

2. Chen X., Ban Y., Hua X., Lu T., Tao W., An Q. A method for the calculation of Detectable Landslide using Terrestrial Laser Scanning data. *Measurement.* 2020. Vol. 160. P. 107852. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107852.

3. Domazetović F., Šiljeg A., Marić I., Panđa L. A New Systematic Framework for Optimization of Multi-Temporal Terrestrial LiDAR Surveys over Complex Gully Morphology. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 14. P. 3366. DOI: 10.3390/rs14143366.

4. Domínguez-Cuesta M.J., Rodríguez-Rodríguez L., López-Fernández C., Pando L., Cuervas-Mons J., Olona J., González-Pumariega P., Serrano J., Valenzuela P., Jiménez-Sánchez M. Using Remote Sensing Methods to Study Active Geomorphologic Processes on Cantabrian Coastal Cliffs. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 20. P. 5139. DOI: 10.3390/rs14205139.

5. Hosseini K., Reindl L., Raffl L., Wiedemann W., Holst C. 3D Landslide Monitoring in High Spatial Resolution by Feature Tracking and Histogram Analyses Using Laser Scanners. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 1. P. 138. DOI: 10.3390/rs16010138.

6. Huang G., Du S., Wang D. GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review. *Satellite Navigation*. 2023. Vol. 4. P. 5. DOI: 10.1186/s43020-023-00095-5.

7. Shen N., Wang B., Ma H., Zhao X., Zhou Y., Zhang Z., Xu J. A review of terrestrial laser scanning (TLS)-based technologies for deformation monitoring in engineering. *Measurement*. 2023. Vol. 223. P. 113684. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113684.

8. Vivero S., Lambiel C., Delaloye R. et al. Kinematics and geomorphological changes of a destabilising rock glacier captured from close-range sensing techniques (Tsarmine rock glacier, Western Swiss Alps). *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. P. 1017949. DOI: 10.3389/feart.2022.1017949.

9. Voordendag A., Goger B., Klug C., Prinz R., Rutzinger M., Sauter T., Kaser G. Uncertainty assessment of a permanent long-range terrestrial laser scanning system for the quantification of snow dynamics on Hintereisferner (Austria). *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 11. P. 1085416. DOI: 10.3389/feart.2023.1085416.

10. Wegner K., Durand V., Villeneuve N., Mangeney A., Kowalski P., Peltier A., Stark M., Becht M., Haas F. Multitemporal Quantification of the Geomorphodynamics on a Slope within the Cratère Dolomieu at the Piton de la Fournaise (La Réunion, Indian Ocean) Using Terrestrial LiDAR Data, Terrestrial Photographs, and Webcam Data. *Geosciences*. 2024. Vol. 14, No. 10. P. 259. DOI: 10.3390/geosciences14100259.

11. Winiwarter L., Anders K., Wujanz D., Höfle B. Influence of ranging uncertainty of terrestrial laser scanning on change detection in topographic 3D point clouds. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. Vol. V-2-2020. P. 789–796. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-2-2020-789-2020.

12. Yin C., Li H., Hu Z., Li Y. Application of the Terrestrial Laser Scanning in Slope Deformation Monitoring: Taking a Highway Slope as an Example. *Applied Sciences.* 2020. Vol. 10, No. 8. P. 2808. DOI: 10.3390/app10082808.

REFERENCES:

1. Becker, D., Raddatz, L., Roussel, C., & Klonowski, J. (2024). Analysis methods for deformation detection using TLS and UAS data on the example of a landslide simulation. *International Journal of Geo-Engineering, 15*, Article 9. https://doi.org/10.1186/s40703-023-00203-z

2. Chen, X., Ban, Y., Hua, X., Lu, T., Tao, W., & An, Q. (2020). A method for the calculation of detectable landslide using terrestrial laser scanning data. *Measurement, 160*, Article 107852. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.10785

3. Domazetović, F., Šiljeg, A., Marić, I., & Panđa, L. (2022). A new systematic framework for optimization of multi-temporal terrestrial LiDAR surveys over complex gully morphology. *Remote Sensing, 14*(14), Article 3366. https://doi.org/10.3390/rs14143366

4. Domínguez-Cuesta, M. J., Rodríguez-Rodríguez, L., López-Fernández, C., Pando, L., Cuervas-Mons, J., Olona, J., González-Pumariega, P., Serrano, J., Valenzuela, P., & Jiménez-Sánchez, M. (2022). Using remote sensing methods to study active geomorphologic processes on Cantabrian coastal cliffs. *Remote Sensing, 14*(20), Article 5139. https://doi.org/10.3390/rs14205139

5. Hosseini, K., Reindl, L., Raffl, L., Wiedemann, W., & Holst, C. (2024). 3D landslide monitoring in high spatial resolution by feature tracking and histogram analyses using laser scanners. *Remote Sensing, 16*(1), Article 138. https://doi.org/10.3390/rs16010138

6. Huang, G., Du, S., & Wang, D. (2023). GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: A review. *Satellite Navigation, 4*, Article 5. https://doi.org/10.1186/s43020-023-00095-5

7. Shen, N., Wang, B., Ma, H., Zhao, X., Zhou, Y., Zhang, Z., & Xu, J. (2023). A review of terrestrial laser scanning (TLS)-based technologies for deformation monitoring in engineering. *Measurement, 223*, Article 113684. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113684

8. Vivero, S., Hendrickx, H., Frankl, A., Delaloye, R., & Lambiel, C. (2022). Kinematics and geomorphological changes of a destabilising rock glacier captured from close-range sensing techniques (Tsarmine rock glacier, Western Swiss Alps). *Frontiers in Earth Science, 10*, Article 1017949. https://doi.org/10.3389/feart.2022.1017949

9. Voordendag, A., Goger, B., Klug, C., Prinz, R., Rutzinger, M., Sauter, T., & Kaser, G. (2023). Uncertainty assessment of a permanent long-range terrestrial laser scanning system for the quantification of snow dynamics on Hintereisferner (Austria). *Frontiers in Earth Science, 11*, Article 1085416. https://doi.org/10.3389/feart.2023.1085416

10. Wegner, K., Durand, V., Villeneuve, N., Mangeney, A., Kowalski, P., Peltier, A., Stark, M., Becht, M., & Haas, F. (2024). Multitemporal quantification of the geomorphodynamics on a slope within the Cratère Dolomieu at the Piton de la Fournaise (La Réunion, Indian Ocean) using terrestrial LiDAR data, terrestrial photographs, and webcam data. *Geosciences, 14*(10), Article 259. https://doi.org/10.3390/geosciences14100259

11. Winiwarter, L., Anders, K., Wujanz, D., & Höfle, B. (2020). Influence of ranging uncertainty of terrestrial laser scanning on change detection in topographic 3D point clouds. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V-2-2020*, 789–796. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-789-2020

12. Yin, C., Li, H., Hu, Z., & Li, Y. (2020). Application of the terrestrial laser scanning in slope deformation monitoring: Taking a highway slope as an example. *Applied Sciences, 10*(8), Article 2808. https://doi.org/10.3390/app10082808

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 07.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026