

Апробація інтегрованого методу TLS-GNSS-ETS для моніторингу деформацій техногенних відвалів у кар'єрі

У статті представлено результати апробації інтегрованого методу моніторингу деформацій техногенних відвалів і бортів кар'єру, що поєднує наземне лазерне сканування (TLS), GNSS-вимірювання у режимі RTK та тахеометричні спостереження електронним тахеометром (ETS). Метою дослідження є перевірка точності, відтворюваності та практичної придатності методу для багаточасового аналізу зсувних проявів у складних гірничих умовах за ускладненого доступу до небезпечних зон. Експериментальні роботи виконано протягом січня–грудня 2025 року у форматі 12 epoch спостережень із принциповою умовою виконання TLS, GNSS та ETS в один день. Координатне забезпечення реалізовано в системі UСК-2000 на основі 10 опорних пунктів поза зоною деформацій та 50 контрольних мішеней/точок у потенційно нестабільних ділянках. TLS-знімання виконувалось сканером Leica RTC360 (8 станцій, середня дальність ~ 80 м) із реєстрацією у Cyclone REGISTER 360; GNSS-RTK забезпечував абсолютну прив'язку (Leica GS18T), а ETS (Topcon ES-105) застосовано для незалежної метрологічної верифікації та профільного контролю. За результатами реєстрації TLS отримано RMS/Residual 5–15 мм. Порівняння GNSS-RTK і тахеометричних визначень для контрольних точок підтвердило сантиметровий рівень узгодженості (оцінково RMSE_2D близько 3,1 см; RMSE_3D близько 3,4 см), достатній для задач геомоніторингу. Додатково досліджено вплив дальності сканування (0–50; 50–90; 90–130 м) на інформативність і ризики інтерпретації: ближній діапазон є оптимальним для фіксації локальних тріщин і дрібних терас, середній – базовим для регулярного моніторингу, дальній – доцільним переважно для оглядових моделей. Отримані результати обґрунтовують доцільність впровадження інтегрованого підходу TLS–GNSS–ETS як контрольованого та практично придатного інструменту моніторингу техногенних масивів у кар'єрах.

Ключові слова: наземне лазерне сканування; GNSS RTK; електронна тахеометрія; техногенні відвали; деформації; геомоніторинг; UСК-2000.

Вступ. Моніторинг деформацій техногенних відвалів і бортів кар'єрів належить до пріоритетних завдань інженерно-геодезичного забезпечення гірничих робіт, оскільки нестійкість укосів і відвальних масивів безпосередньо впливає на безпеку персоналу, транспортні комунікації, технологічні майданчики та інженерні споруди. Особливістю техногенних відвалів є неоднорідність будови, наявність зон повторного перезволоження, локальних «слабких» прошарків, а також постійний вплив технологічних чинників (вібрації, проїзди, підсіпки, планування поверхні). Унаслідок цього деформаційні процеси можуть проявлятися як у вигляді швидких локальних зрушень, так і як повільні квазісталі зміщення, що накопичуються протягом тривалого часу. Для таких умов особливо важливими є: 1) багатоепохові вимірювання з повторюваною геодезичною основою; 2) можливість оперативно виявляти активні зони; 3) наявність метрологічно контрольованих критеріїв, які дозволяють відокремити реальні деформації від похибок вимірювань та обробки.

Серед сучасних технологій отримання просторових даних наземне лазерне сканування (TLS) посідає ключове місце завдяки здатності формувати високощільні хмари точок і детальні 3D-моделі складної поверхні. TLS дозволяє відтворювати геометрію укосів, уступів, терас, валів випирання, тріщин відриву та інших морфологічних елементів, які є індикаторами зсувної активності. Оглядові дослідження J.Telling et al. (2017) застосувань TLS у геонауках підкреслюють, що ця технологія забезпечує високу продуктивність, масштабованість та придатність для повторних знімань, що є критично важливим у моніторингових задачах [11]. У контексті зсувних процесів ідентифікація та картування ознак нестабільності за допомогою LiDAR-даних також розглядається M.Jaboyedoff et al. (2012) як один із найбільш результативних підходів, особливо на ділянках із ускладненим доступом [8]. Разом із тим, у практичних гірничих умовах «детальність» TLS-даних сама собою не гарантує достовірності висновків: на кінцевий результат суттєво впливають геометрія знімання, дальність, перекриття станцій, тіньові зони, неоднорідність щільності точок, а також якість реєстрації та геоприв'язки хмар точок.

Ключовою методологічною проблемою багатоепохового TLS-моніторингу є коректне визначення змін між епохами з урахуванням похибок. Для цього застосовують порівняння хмар точок і поверхонь із використанням спеціалізованих алгоритмів. В роботі D.Lague et al. (2013) метод Multiscale Model to Model Cloud Comparison отримав широке визнання як стійкий інструмент вимірювання відстаней між хмарами

точок у випадку складної топографії, оскільки враховує локальну орієнтацію поверхні та дозволяє контролювати невизначеність оцінок [10]. У прикладній практиці він реалізований у CloudCompare і використовується для побудови «полів відхилень» та аналізу різницевої моделі між епохами. Водночас результати різницевої моделі є інформативними лише за умови введення порогів значущості: необхідно визначити, яка величина відхилення є проявом реальної деформації, а яка може бути пояснена похибками знімання, реєстрації та апроксимації поверхні. Згідно з роботою J.M. Wheaton et al. (2010) підходи до врахування невизначеності в повторних топографічних зніманнях (зокрема у вигляді поширення похибок і формування «мінімально значущих змін») є принципово важливими для інтерпретації динаміки рельєфу та деформаційних процесів [15]. Для відкритих гірничих робіт додатково підкреслюється, що TLS як інструмент моніторингу стійкості укосів має поєднуватися з регламентом контролю якості, правилами геоприв'язки та вимогами до повторюваності геодезичної основи, інакше існує ризик системних зміщень моделі та хибної інтерпретації змін вважає у своїй статті M.Bazarnik (2018) [3].

Проблема абсолютної відтворюваності координат у часі природно підводить до використання GNSS-технологій, насамперед RTK, які дозволяють оперативно визначати координати опорних і контрольних пунктів та формувати жорстку координатну основу. У роботі М.С. Куницької, В.В. Котенка (2025) описано, що впровадження державної геодезичної системи координат УСК-2000 забезпечило перехід України від застарілих СК-42 та СК-63 до сучасної геоцентричної системи, сумісної з міжнародними референтними системами ITRS, ETRS89 та WGS-84 [1]. Однак для кар'єрів і техногенних масивів характерні умови, що можуть суттєво погіршувати GNSS-позиціонування: екранування бортами та уступами, мультипас від техніки і металевих конструкцій, нестабільність геометрії супутникових угруповань у «кар'єрному каньйоні». В роботі G.Huang et al. (2023) GNSS-технологій для моніторингу зсувів наголошено, що режими RTK/PPP/PPP-RTK мають різні переваги та обмеження, а вибір технології повинен враховувати швидкість процесів, вимоги до точності та реальні умови спостережень [6]. В роботі M.Deo et al. (2020) описано, як паралельно розвиваються PPP-підходи, зокрема з використанням потрібної частоти та широкосмугових неоднозначностей, які можуть забезпечувати дециметрову точність за рахунок вдосконалених комбінацій та процедур фіксації, але потребують коректного контролю якості вимірювань і умов прийому [4]. Для складних середовищ у роботі A.Hussain et al. (2020) додаткового значення набувають як апаратні, так і алгоритмічні рішення, спрямовані на підвищення стійкості GNSS у мультипасі та високій динаміці [7], а також підходи, що використовують у роботі F.Vincent et al. (2020) доплерівську інформацію для зменшення похибки позиціонування в умовах обмеженої видимості супутників [13].

Саме тому у багатьох практичних сценаріях необхідний незалежний інструмент метрологічної верифікації, який дозволяє перевірити реальну точність координат контрольних елементів і виявити систематичні похибки, що можуть переноситися на результати деформаційного аналізу. Електронний тахеометр (ETS) у цьому контексті є найбільш придатним засобом для незалежного контролю планово-висотного положення точок і локальної геометрії (профілі, бровки, краї уступів, параметри тріщин), оскільки забезпечує високу точність наземних вимірювань і не залежить від супутникової геометрії. Дослідження E.P. Guma et al. (2020), присвячені перевірці GNSS-спостережень за допомогою тахеометрії, показують, що така верифікація дозволяє виявляти значні помилки позиціонування, спричинені перешкодами та поганими умовами прийому, і підвищує надійність координатного забезпечення геодезичних робіт [5].

Отже, актуальним є перехід до інтегрованих схем TLS–GNSS–ETS, у яких: TLS забезпечує високодеталізовану 3D-модель поверхні та просторову інформативність; GNSS формує абсолютну координатну основу та відтворюваність епох; ETS виконує функцію незалежної верифікації, що зменшує ризик системних зсувів, підвищує довіру до різницевої моделі та дозволяє формалізувати порогові достовірності деформацій. У цій статті подано результати апробації інтегрованого методу TLS–GNSS–ETS для моніторингу деформацій техногенних відвалів у кар'єрі, виконано оцінку точності узгодження даних та сформульовано практичні рекомендації щодо організації багатоепохових спостережень і контролю якості.

Матеріали та методи.

Об'єкт досліджень і умови виконання робіт. Об'єктом апробації інтегрованого методу є техногенно сформований масив розкритих порід та прилеглі ділянки бортів кар'єру, в межах яких фіксуються деформаційні прояви різної інтенсивності. За результатами візуальних та інструментальних спостережень у 2025 році встановлено, що найбільш виражені ознаки нестабільності зосереджені на західному борті у вигляді виштовхування глинистих мас із боку автомобільного відвалу «Західний» (гор. +150 м) у напрямку майданчика перевантаження № 19 (гор. +65 м). Ключовою зоною, прийнятою як полігон апробації, є ділянка у межах відвалу розкритих скельних порід у зоні можливого обрушення (поле шахти «Першотравнева»), де сформована система тріщин і терас, а також спостерігається зміщення порід у напрямку балки Грядковата.

Важливою інженерною особливістю об'єкта є ускладнений доступ до зони спостережень через насип скельного розкриття на передвідвальній території (висота до 3 м, ширина 15–20 м), що підсилює доцільність застосування дистанційних методів контролю геометрії схилів і поверхні відвалу, насамперед TLS.

Польові виїзди виконувалися протягом січня–грудня 2025 року у форматі багатоепохових спостережень. Кожний виїзд розглядався як епоха (окремий момент часу), у межах якої формувалася повний пакет даних для подальшого порівняння між епохами та визначення деформацій у часі. Принципова організаційна умова – TLS, GNSS та тахеометричні вимірювання виконувалися в один день, що мінімізувало методичні похибки, пов'язані з часовими розривами між різними технологіями.

Координатна основа робіт – державна система координат УСК-2000, що забезпечувало метричну сумісність результатів між епохами та придатність для інженерного аналізу.

Схема геодезичного забезпечення: опорна та контрольна мережа

Геодезичне забезпечення моніторингу реалізовано на основі комбінованої мережі:

- 10 опорних пунктів (поза зоною деформацій), призначених для стабілізації координатної основи та забезпечення відтворюваності між епохами;
- 50 контрольних точок/мішеней у межах зон потенційної нестабільності (тріщини, тераси, борти відвалу, прилеглі ділянки автодоріг, профільні лінії).

Як маркування застосовувалися мішені (цільові знаки), що забезпечували:

- 1) однозначну ідентифікацію точок у TLS-хмарі;
- 2) можливість GNSS/ETS визначення координат;
- 3) підвищення точності суміщення даних під час інтеграції.

Принципи розміщення опорних пунктів:

- розташування поза зонами потенційного зсуву та впливу технологічних робіт;
- рівномірний просторовий розподіл для зменшення ризику «перекосу» трансформації;
- доступність для повторних вимірювань і контроль сталості у часі.

Контроль сталості опори між епохами. Опорний пункт вважався стабільним, якщо зміни координат між суміжними епохами не перевищували:

- по плану: $|\Delta_{pl}| \leq 10$ мм;
- по висоті: $|\Delta H| \leq 15$ мм.

У випадку перевищення критеріїв пункт виключався з опорної основи для конкретної епохи з подальшим перерахунком параметрів трансформації.

Використане обладнання та програмне забезпечення. Польові роботи виконувалися із застосуванням комплексу геодезичних засобів.

Наземне лазерне сканування (TLS):

- сканер: Leica RTC360;
- призначення: отримання детальних хмар точок і 3D-реконструкції поверхні (тріщини, уступи, тераси, зони випирання);
- конфігурація: 8 станцій на ділянку; середня відстань до об'єкта $R \approx 80$ м; використано $K = 50$ мішеней;
- внутрішній контроль якості: досягнутий діапазон RMS/Residual 5–15 мм.

GNSS-вимірювання (RTK):

- приймач: Leica GS18T (контролер CS20);
- режим: RTK із застосуванням сервісу поправок ТНТ-ТПІ;
- призначення: визначення координат опорних і контрольних точок у УСК-2000 та контроль відтворюваності;
- контроль якості: рішення FIX 100 %, час спостереження на точці ~2 хв, моніторинг супутникового забезпечення (GPS/GLONASS).

Електронна тахеометрія (ETS):

- тахеометр: Topcon ES-105;
- призначення: незалежна метрологічна верифікація координат частини контрольних точок і деталізація геометрії деформаційних елементів (профілі, бровки, тріщини, уступи);
- схема: робота переважно з однієї станції для забезпечення однорідності геометрії вимірювань і оперативності контролю.

Програмне забезпечення:

- Leica Cyclone REGISTER 360 – реєстрація TLS-сканів, контроль якості, фільтрація шумів;
- Leica Infinity – обробка GNSS-вимірювань, підготовка координатної основи;
- CloudCompare – аналіз хмар точок, оцінка відхилень, побудова різницевої моделі;
- AutoCAD – оформлення схем, планів і профілів.

Програма експериментів і порядок робіт у межах епохи.

Експериментальна програма реалізована як серія **12 епох** спостережень у 2025 році з місячною періодичністю. У межах кожної епохи виконувалися всі три блоки вимірювань (GNSS–TLS–ETS) в один день.

Послідовність робіт у межах епохи:

1. Підготовка й огляд пунктів опорної мережі; перевірка доступності та збереженості мішеней;
2. GNSS-RTK визначення координат опорних і контрольних точок (УСК-2000) з фіксацією параметрів якості рішення;
3. TLS-сканування з 8 станцій із забезпеченням перекриття і видимості мішеней;
4. Тахеометричні вимірювання для вибраних контрольних точок та профільних елементів (ETS-контроль);
5. Камеральна обробка, реєстрація, геоприв'язка та контроль узгодженості даних у єдиній координатній основі.

Методика інтеграції даних TLS–GNSS–ETS. Інтегрований метод передбачав три рівні контролю:

Внутрішня узгодженість TLS.

Реєстрація сканів виконувалася у Cyclone REGISTER 360 з автоматичним / напівавтоматичним розпізнаванням мішеней. Якість оцінювалася за RMS/Residual та розподілом нев'язок по мішенях.

Геодезична прив'язка TLS до УСК-2000.

Абсолютна прив'язка виконувалася за координатами мішеней, визначених GNSS-RTK. Мішені поділялися на:

- робочі ($\approx 70\text{--}80\%$) – для трансформації та реєстрації;
- контрольні ($\approx 20\text{--}30\%$) – для незалежної перевірки результату прив'язки та виявлення системних зсувів.

Зовнішня верифікація за ETS.

Для вибірки контрольних точок координати з TLS-моделі порівнювалися з тахеометричними визначеннями. Це дозволяло оцінити реальну узгодженість інтегрованої моделі та локальні відхилення, особливо на елементах із різкими перегинами (уступи / бровки), де TLS найбільш чутливий до геометрії спостережень і дальності.

Дослідження впливу дальності TLS-сканування (0–50; 50–90; 90–130 м). Для визначення практичних меж застосування Leica RTC360 у задачах геомоніторингу виконано експеримент «TLS на різних відстанях».

Постановка експерименту:

- 8 станцій, розподілених за дальністю:
 - 0–50 м – 3 станції;
 - 50–90 м – 3 станції;
 - 90–130 м – 2 станції.
- Єдині налаштування для всіх станцій:
 - режим High;
 - HDR-фото увімкнено;
 - попередня фільтрація (noise / range filter) до реєстрації.
- Контрольні елементи: 50 мішеней (GNSS/ETS), а також контрольний профіль, що перетинає ключові морфологічні елементи.

Показники оцінювання:

1. RMS/Residual реєстрації та залишки на мішенях;
2. інформативність профілю (читаність уступів, перегинів, тріщин, терас);
3. повнота покриття (тіньові зони) та шум на стабільних ділянках.

Критерії точності та статистичної значущості деформацій. Для контролю точності інтегрованого методу та оцінювання достовірності змін використано систему критеріїв.

Похибки координат і RMSE.

Для порівняння GNSS і ETS та контролю інтеграції використовувалися різниці (1)–(3):

$$\Delta X = X_{GNSS} - X_{ETS}, \quad (1)$$

$$\Delta Y = Y_{GNSS} - Y_{ETS}, \quad (2)$$

$$\Delta H = H_{GNSS} - H_{ETS}. \quad (3)$$

Показники точності (4)–(5):

$$RMSE_{2D} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2)}, \quad (4)$$

$$RMSE_{3D} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2 + \Delta H_i^2)}. \quad (5)$$

Деформації між епохами.

Зміна параметра (відстані / координати / відмітки) між епохами (6):

$$\Delta d = d_{t_2} - d_{t_1}. \quad (6)$$

Сумарна похибка різниці (7):

$$\sigma_{\Delta d} = \sqrt{\sigma_{t_1}^2 + \sigma_{t_2}^2}. \quad (7)$$

Деформація вважається статистично значущою, якщо (8):

$$|\Delta d| \geq 2\sigma_{\Delta d}. \quad (8)$$

Практичний поріг виявлення деформацій. Метод вважався придатним у виробничому сенсі, якщо забезпечував виявлення деформацій менших за 5–10 см залежно від масштабу та характеру процесу (локальні тріщини/тераси – більш жорсткі вимоги; оглядові моделі – більш м'які).

Підходи до аналізу деформацій за TLS у часі. Кількісний аналіз деформацій за TLS виконувався після приведення всіх епох до єдиної координатної основи (УСК-2000) і контролю сталості опорних пунктів. Використовувались:

- Cloud-to-Cloud (C2C) – первинне виявлення зон змін;
- Cloud-to-Mesh (C2M) – стійкіша оцінка за опорною поверхнею;
- профільні перерізи – інженерно інтерпретований контроль геометрії уступів, терас і тріщин.

Для уникнення хибних інтерпретацій виключались ділянки, що змінювалися внаслідок технологічних робіт (підсіпка, проїзди техніки), а результати TLS зіставлялись із точковими зміщеннями контрольних пунктів за GNSS/ETS.

Результати. У 2025 році виконано 12 епох спостережень із місячною періодичністю. В усіх епохах забезпечено принцип «один день – один пакет даних» (TLS + GNSS RTK + ETS), що мінімізувало методичні розбіжності між технологіями та підвищило коректність подальших міжепохових порівнянь. Роботи виконувались у системі координат УСК-2000, що забезпечило метричну сумісність часових рядів і можливість узгодженого аналізу деформацій як за контрольними точками, так і за поверхневими TLS-даними.

За результатами реєстрації TLS-сканів у Cyclone REGISTER 360 внутрішня узгодженість хмар точок підтверджувалась показниками RMS/Residual у межах **5–15 мм** для різних конфігурацій станцій і дальностей. Такий рівень нев'язок відповідає вимогам до високоточного 3D-моделювання гірничих форм і створює передумову для виявлення змін у сантиметрово-дециметровому діапазоні за умови коректної геоприв'язки та незалежної верифікації.

Вплив дальності TLS-сканування на точність і інформативність даних (0–50; 50–90; 90–130 м). Експеримент «TLS на різних відстанях» показав закономірну деградацію інформативності та стійкості інтерпретації дрібних морфологічних елементів зі збільшенням дальності при незмінних налаштуваннях Leica RTC360 (режим High, HDR, попередня фільтрація шумів).

Дальність до 50 м (локальний високоточний рівень).

У ближній зоні забезпечено найкращу «читаність» профілю та морфологічних ознак нестабільності: чітко відтворювалися перегиби рельєфу, краї уступів і бровок, дрібні тераси, а також локальні тріщини та зони просідання/випирання сантиметрового масштабу. Висока щільність хмари на контрольних елементах підвищувала стійкість розпізнавання мішеней і зменшувала ризик локальних «псевдодеформацій», пов'язаних із шумом або рідкою дискретизацією.

Дальність 50–90 м (базовий моніторинговий рівень).

У середній зоні зберігалася прийнятна інформативність для більшості інженерних задач: бровки, уступи та тераси відтворювалися однозначно, а зміни у сантиметровому діапазоні могли фіксуватися за умови контролю профілів і якості реєстрації. Водночас для вузьких тріщин і дрібних розривів зростали ризики «розмивання» контурів, особливо на ділянках із косим падінням променя та складною мікрогеометрією поверхні. Практично цей діапазон підтвердився як оптимальний компроміс між оперативністю робіт (менше станцій/переміщень) і достатньою точністю для регулярного моніторингу.

Дальність 90–130 м (граничний оглядовий рівень).

У дальній зоні (граничній для інженерної інтерпретації) TLS-дані залишалися придатними для оглядової реконструкції загальної форми схилу/відвалу та великих морфологічних елементів, однак зростали обмеження щодо дрібних деформацій. Прояви локальних тріщин або дрібних терас могли бути порівнянними з рівнем шуму та недостатньою дискретизацією, що підвищувало ризик помилкових висновків без підтвердження ближніми зніманнями або незалежним ETS-контролем.

Узагальнення. Отримані результати підтвердили практичну рекомендацію: **до 50 м** – для локального контролю дрібних деформацій; **50–90 м** – як основний режим моніторингу; **90–130 м** – переважно для оглядових моделей та інвентаризації з обмеженням щодо інтерпретації дрібних проявів.

Верифікація геодезичної основи: узгодження GNSS (RTK) і тахеометрії (ETS). Надійність інтегрованого підходу значною мірою визначається реальним рівнем узгодженості координат опорних / контрольних елементів. Для експериментальної оцінки виконано порівняння координат, отриманих GNSS у режимі RTK (FIX 100 %), з незалежними тахеометричними визначеннями (Topcon ES-105) для вибірки контрольних точок.

За фрагментом 7 точок отримано оцінки:

- $RMSE_X \approx 27,8$ мм, $RMSE_Y \approx 13,2$ мм, $RMSE_H \approx 13,5$ мм;
- $RMSE_2D \approx 30,8$ мм (3,08 см);
- $RMSE_3D \approx 33,6$ мм (3,36 см).

Максимальні модулі розбіжностей у наведеному фрагменті не перевищували 4,7 см по X, 3,2 см по Y та 2,5 см по висоті. Загалом результати підтвердили, що в умовах відкритого кар'єрного простору та за правильно організованого відбору точок GNSS-RTK забезпечує сантиметровий рівень узгодженості з тахеометричним контролем, достатній для задач геоприв'язки TLS-хмар і багаточасового моніторингу деформацій.

Стабільність опорної мережі та забезпечення порівнянності епох. Для розділення реальних деформацій і похибок геодезичних вимірювань здійснювався контроль сталості 10 опорних пунктів між суміжними епохами за критеріями:

- $|\Delta p_i| \leq 10$ мм (план),
- $|\Delta H| \leq 15$ мм (висота).

За результатами перевірки 1 опорний пункт було вибракувано, після чого параметри приведення епох перераховано за скоригованим набором стабільних пунктів. Це підтвердило необхідність процедури «очищення» опори в умовах гірничих робіт і забезпечило відтворюваність координатної рамки для порівняння TLS-моделей у часі.

Апробація інтегрованої моделі TLS–GNSS–ETS: точність узгодження та джерела відхилень. Після реєстрації TLS-сканів і геоприв'язки в УСК-2000 через систему мішеней виконано зовнішній контроль за даними ETS для вибірки контрольних точок і профільних елементів. Верифікація показала, що використання ETS дозволяє:

- 1) підтвердити відсутність системного зсуву/повороту моделі після геоприв'язки;
- 2) виявити локальні зони підвищених відхилень (як правило, на перегінах та ділянках з косим падінням променя);
- 3) підвищити достовірність інтерпретації дрібних морфологічних елементів, критичних для оцінки небезпеки.

Причини відхилень узгодження групуються як:

- інструментальні (похибки дальноміра / кутів TLS, похибки ETS, GNSS-позиціонування);
- геометричні (дальність, кут падіння променя, неоднорідність щільності точок у зоні уступів);
- методичні (розподіл мішеней, ідентифікація центру мішені, різниця між «точковою» природою ETS та «поверхневою» природою TLS-даних).

Практично підтверджено, що інтегрована схема TLS+GNSS забезпечує абсолютну повторюваність епох, а додавання ETS переводить модель у режим метрологічно верифікованої, що є критично важливим при прийнятті інженерних рішень і переході до задач раннього попередження.

Виявлені деформації та інтерпретація зсувної динаміки за епохами. Деформаційний аналіз виконано шляхом зіставлення епох у єдиній координатній основі та побудови різницевих моделей (Cloud-to-Cloud / Cloud-to-Mesh) з профільною інтерпретацією. Активні зони встановлювалися за сукупністю:

- підвищених відхилень на різницевих TLS-моделях;
- узгоджених зміщень контрольних точок GNSS/ETS;
- морфологічних ознак нестабільності (тріщини відриву, зсувні тераси, вали випирання).

Відвал «Західний» (23.04.2025–06.11.2025).

За результатами спостережень зафіксовано високі швидкості зміщень:

- горизонтальні – до 29,9 мм/добу,
- вертикальні – до 5,9 мм/добу.

За останній місяць спостережень: горизонтальні відхилення до 10,8 мм, вертикальні – до 3,3 мм (за місячний інтервал). Такі величини вказують на активні геодинамічні процеси та суттєвий технологічний вплив. Додатковим ускладненням стала втрата частини пунктів: у зоні профілів було знищено 13 зйомочних точок, що обґрунтовує необхідність резервування пунктів і оперативного відновлення мережі.

Відвал «Залізничний» (15.01.2025–09.12.2025).

Деформації мають повільніший характер:

- горизонтальні – до 4,4 мм/добу,
- вертикальні – до 2,8 мм/добу.

За останній місяць: горизонтальні відхилення до 2,4 мм, вертикальні – до 2,6 мм (за місячний інтервал). Такі значення є типовими для повільних процесів, для яких критично важливі довгі часові ряди та збереження регулярності епох.

Узгодження напрямків зміщень і морфологічних ознак.

Напрямки зміщень оцінювалися за плановими компонентами ΔX , ΔY контрольних точок і зіставлялися з орієнтацією терас, тріщин та градієнтами різницевих TLS-моделей. Таке поєднання дозволило

інтерпретувати зміни як фізичний процес переформування масиву (зсування, просідання, випирання) та локалізувати ділянки потенційного подальшого розвитку нестабільності.

Практичний висновок з результатів апробації. Отримані результати підтвердили працездатність інтегрованого методу TLS–GNSS–ETS у гірничих умовах та його придатність для багатоепохового моніторингу техногенних відвалів. Поєднання:

- внутрішньо точної TLS-реєстрації (RMS 5–15 мм),
- стабільної геодезичної основи в УСК-2000 за GNSS-опорою,
- незалежної тахеометричної верифікації (ETS), забезпечило достовірне виявлення активних зон і кількісну оцінку швидкостей деформацій, а також сформувало основу для практичного регламенту спостережень і тригерів посилення моніторингу.

Обговорення. Отримані результати підтверджують практичну логіку багатосенсорного моніторингу: GNSS формує відтворювану координатну основу, TLS забезпечує суцільну 3D-геометрію та локалізацію активних зон, а ETS виконує роль незалежної метрологічної перевірки критичних елементів (профілі, бровки, тріщини). Така траєкторія розвитку прямо узгоджується з висновком М.С. Куницької (2017) про перспективність поєднання GNSS-спостережень із лазерним скануванням і фотограмметрією для побудови 3D-моделей деформацій. Запропоновано оптимізовану GNSS-мережу для кар'єрів (15 контрольних і 4 опорні пункти) та наведено похибку 3–9 мм із можливістю фіксації зміщень від ≈ 10 мм, а також високу узгодженість із тахеометрією (середня різниця $\approx 5,4$ мм) [2].

У нашому полігоні техногенного відвалу ключовим фактором «погіршення» узгодження стає не лише інструментальна складова, а стабільність/довговічність контрольних елементів і методичні ефекти (центрування, «робота на марку», локальна нестійкість основи, техногенні порушення поверхні). Саме тому у методиці закладено процедури відбору/відсіву мішеней та вибракування «рухомих» опор.

Цей висновок добре узгоджується з роботою Krawczyk (2023), де підкреслено, що стабільність опорної / референсної складової та організація абсолютної системи координат критично впливають на надійність порівняння епох; при виявленні нестабільності контрольних точок / опори потрібні корекції, інакше виникає ризик помилкового «зсуву» моделі [9].

Отримані результати RTK (FIX 100 % у циклах спостережень) підтверджують, що GNSS є ефективним інструментом для задач деформацій у гірничих районах, але реальна якість залежить від геометрії супутників, мультипасу та організації опори.

Пунктовий GNSS-моніторинг забезпечує надійні вектори зміщень у контрольних пунктах, однак для техногенних відвалів деформації часто проявляються як просторові поля (зони випирання/просідання, терасування, розвиток тріщин), які не завжди коректно відображаються обмеженою кількістю точок. TLS у цьому сенсі додає принципово важливий компонент – суцільну 3D-геометрію, що дозволяє локалізувати активні ділянки і узгодити морфологічні ознаки з векторами GNSS/ETS. У статті Voordendag et al., (2022) ефективність комбінування TLS з іншими дистанційними джерелами для багатомасштабного моніторингу зсувних/деформаційних процесів показана в прикладах інтегрованих схем спостережень [14].

Тенденція до інтеграції різних джерел деформаційних даних (наземні вимірювання + дистанційні методи) є загальною. Наприклад, Tretyak et al. (2025) показують доцільність часових рядів із комбінуванням GNSS та інших інструментів (зокрема, роботизованих тахеометрів і InSAR) для підвищення достовірності оцінки деформацій і взаємної верифікації результатів [12].

У нашому випадку цю роль виконує зв'язка TLS (поверхня) + GNSS (абсолютна опора) + ETS (локальна перевірка), що особливо важливо при переході від «візуального» аналізу 3D-моделі до інженерних висновків і тригерів підвищення частоти спостережень.

Висновки. Дослідження, проведене у реальній зоні зсуву, показало важливість інтеграції сучасних методів геодезичних вимірювань для забезпечення високої точності та надійності координат в умовах складного природного середовища. Використання GNSS-приймача Leica GS18T методом Precise Point Positioning (PPP) дозволило отримати високу автономність вимірювань і забезпечити сантиметрову точність, навіть у віддалених районах, де традиційні методи недоступні. Однак результати спостережень також показали, що точність GNSS вимірювань може коливатися на кілька сантиметрів, що є недостатнім для високоточних моніторингових завдань, таких як спостереження за зсувами та деформаціями.

Апробація інтегрованого методу TLS–GNSS–ETS у гірничих умовах техногенних відвалів підтвердила його працездатність і практичну придатність для багатоепохового моніторингу деформацій. Організація спостережень у форматі «епох» із виконанням TLS-сканування, GNSS-вимірювань у режимі RTK та тахеометричного контролю в один день і приведенням результатів до єдиної системи координат УСК-2000 забезпечила коректність порівнянь у часі та зменшила методичні похибки, пов'язані з розривом у часі між різними технологіями. Наземне лазерне сканування Leica RTC360 забезпечило високу внутрішню узгодженість хмар точок і придатну для інженерних задач якість реєстрації (RMS/Residual 5–15 мм), що дозволяє формувати деталізовані 3D-моделі відвалів і виконувати просторовий аналіз змін за умови жорсткої геодезичної прив'язки та контролю якості. Експериментально встановлено, що дальність сканування є визначальним фактором інформативності TLS-даних: інтервал до 50 м є оптимальним для

фіксації локальних деформацій (тріщини, дрібні тераси, зони випирання / просідання), діапазон 50–90 м забезпечує найбільш доцільний баланс між точністю та продуктивністю для регулярного моніторингу, тоді як 90–130 м доцільно застосовувати переважно для оглядових моделей і контролю великих морфологічних елементів із обмеженням щодо інтерпретації дрібних проявів.

Верифікація координатної основи показала практичну узгодженість GNSS (RTK) і тахеометричних визначень у реальних умовах техногенного масиву на сантиметровому рівні (для наведеного фрагмента $RMSE_{3D} \approx 0,0336$ м), що є достатнім для геоприв'язки TLS-хмар та контролю деформацій за умови регламентованого відбору стабільних точок і мішеней. Підтверджено критичну роль опорної мережі поза зоною деформацій: контроль сталості опорних пунктів із критеріями ≤ 10 мм у плані та ≤ 15 мм по висоті дозволив виявити і вибракувати один нестабільний пункт, що підвищило відтворюваність координатної системи та достовірність багаточасових з'явлень. Інтеграція TLS із GNSS забезпечує абсолютну прив'язку та повторюваність епох, а залучення ETS як незалежного джерела контролю підвищує метрологічну надійність результатів і знижує ризик системних зсувів моделі, що є критично важливим при переході від візуальної інтерпретації 3D-даних до інженерної оцінки небезпеки та раннього попередження.

Узагальнення експериментів дозволило сформувати практичні рекомендації щодо робочих дальностей TLS-зйомки, схеми GNSS-опори та контрольних мішеней, сценаріїв тахеометричного контролю, критеріїв якості та тригерів підвищення частоти спостережень, що створює підґрунтя для впровадження методу TLS–GNSS–ETS як регламентної процедури геомоніторингу на гірничих підприємствах.

Список використаної літератури:

1. *Куніцька М.С.* Використання системи координат УСК-2000 та МСК-18 у гірничій справі / *М.С. Куніцька, В.В. Котенко* // Технічна інженерія. – 2025. – № 2 (96). – С. 231–236. DOI: 10.26642/ten-2025-2(96)-231-236.
2. *Куніцька М.С.* GNSS-моніторинг деформацій бортів кар'єрів при розробці родовищ нерудних корисних копалин / *М.С. Куніцька* // Технічна інженерія. – 2025. – № 2 (96). – С. 226–230. DOI: 10.26642/ten-2025-2(96)-226-230.
3. *Bazarnik M.* Slope stability monitoring in open pit mines using 3D terrestrial laser scanning / *M.Bazarnik* // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 66. DOI: 10.1051/e3sconf/20186601020.
4. *Deo M.* Precise point positioning with decimetre accuracy using wide-lane ambiguities and triple-frequency GNSS data / *M.Deo, A.El-Mowafy* // Journal of Applied Geodesy. – 2020. – Vol. 14, № 3. – P. 263–284. DOI: 10.1515/jag-2019-0068.
5. *Guma E.P.* Detecting errors in GNSS-precise point positioning controls using total station technique / *E.P. Guma, D.U. Agada, N.G. Johnson* // COOU African Journal of Environmental Research. – 2023. – Vol. 4, № 1. – P. 83–93. [Electronic resource]. – Access mode : https://www.researchgate.net/publication/369033690_DETECTING_ERRORS_IN_GNSS-PRECISE_POINT_POSITIONING_CONTROLS_USING_TOTAL_STATION_TECHNIQUE.
6. *Huang G.* GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review / *G.Huang, S.Du, D.Wang* // Satellite Navigation. – 2023. – Vol. 4. DOI: 10.1186/s43020-023-00095-5.
7. Adaptive GNSS receiver design for highly dynamic multipath environments / *A.Hussain, A.Ahmed, H.Magsi, R.Tiwari* // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 172481–172497. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3024890.
8. Use of LiDAR in landslide investigations: a review / *M.Jaboyedoff, T.Oppikofer, A.Abellán and other* // Natural Hazards. – 2012. DOI: 10.1007/s11069-010-9634-2.
9. *Krawczyk A.* Influence of reference stations on the stability of the geodetic control network during deformation determination in the area of Kadzielnia in Kielce / *A.Krawczyk* // Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2023. – P. 19–26. DOI: 10.2478/rgg-2023-0003.
10. *Lague D.* Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z) / *D.Lague, N.Brodu, J.Leroux* // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2013. – Vol. 82. – P. 10–26. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
11. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning / *J.Telling, A.Lyda, P.Hartzell, C.Glennie* // Earth-Science Reviews. – 2017. – Vol. 169. – P. 35–68. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.04.007.
12. *Tretyak K.* Time Series Analysis of GNSS, InSAR, and Robotic Total Station Measurements for Monitoring Vertical Displacements of the Dniester HPP Dam (Ukraine) / *K.Tretyak, D.Kukhtar* // Geomatics. – 2025. – Vol. 5, № 4. DOI: 10.3390/geomatics5040073.
13. Doppler-aided positioning in GNSS receivers: a performance analysis / *F.Vincent, J.Vilà-Valls, O.Besson and other* // Signal Processing. – 2020. – Vol. 176. DOI: 10.1016/j.sigpro.2020.107713.
14. The Stability of Reference Points for Multi-Temporal Terrestrial Laser Scanning / *A.B. Voordendag, B.Goger, C.Klug and other* // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2022. – P. 1093–1099. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-1093-2022.
15. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets / *J.M. Wheaton, J.Brasington, S.E. Darby, D.A. Sear* // Earth Surface Processes and Landforms. – 2010. – Vol. 35, № 2. – P. 136–156. DOI: 10.1002/esp.1886.

References:

1. Kuniytska, M.S. and Kotenko, V.V. (2025), «Vykorystannia systemy koordynat USK-2000 ta MSK-18 u hirnychii spravi», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (96), pp. 231–236, doi: 10.26642/ten-2025-2(96)-231-236.
2. Kuniytska, M.S. (2025), «GNSS-monitorynh deformatsii bortiv karieriv pry rozrobsi rodovyshch nerudnykh korysnykh kopalyn», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (96), pp. 226–230, doi: 10.26642/ten-2025-2(96)-226-230.

3. Bazarnik, M. (2018), «Slope stability monitoring in open pit mines using 3D terrestrial laser scanning», *E3S Web of Conferences*, Vol. 66, doi: 10.1051/e3sconf/20186601020.
4. Deo, M. and El-Mowafy, A. (2020), «Precise point positioning with decimetre accuracy using wide-lane ambiguities and triple-frequency GNSS data», *Journal of Applied Geodesy*, Vol. 14, No. 3, pp. 263–284, doi: 10.1515/jag-2019-0068.
5. Guma, E.P., Agada, D.U. and Johnson, N.G. (2023), «Detecting errors in GNSS-precise point positioning controls using total station technique», *COOU African Journal of Environmental Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 83–93, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/369033690_DETECTING_ERRORS_IN_GNSS-PRECISE_POINT_POSITIONING_CONTROLS_USING_TOTAL_STATION_TECHNIQUE
6. Huang, G., Du, S. and Wang, D. (2023), «GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review», *Satellite Navigation*, Vol. 4, doi: 10.1186/s43020-023-00095-5.
7. Hussain, A., Ahmed, A., Magsi, H. and Tiwari, R. (2020), «Adaptive GNSS receiver design for highly dynamic multipath environments», *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 172481–172497, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024890.
8. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A. et al. (2012), «Use of LiDAR in landslide investigations: a review», *Natural Hazards*, doi: 10.1007/s11069-010-9634-2.
9. Krawczyk, A. (2023), «Influence of reference stations on the stability of the geodetic control network during deformation determination in the area of Kadzielnia in Kielce», *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, pp. 19–26, doi: 10.2478/rgg-2023-0003.
10. Lague, D., Brodu, N. and Leroux, J. (2013), «Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z)», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 82, pp. 10–26, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
11. Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P. and Glennie, C. (2017), «Review of Earth science research using terrestrial laser scanning», *Earth-Science Reviews*, Vol. 169, pp. 35–68, doi: 10.1016/j.earscirev.2017.04.007.
12. Tretyak, K. and Kukhtar, D. (2025), «Time Series Analysis of GNSS, InSAR, and Robotic Total Station Measurements for Monitoring Vertical Displacements of the Dniester HPP Dam (Ukraine)», *Geomatics*, Vol. 5, No. 4, doi: 10.3390/geomatics5040073.
13. Vincent, F., Vilà-Valls, J., Besson, O. et al. (2020), «Doppler-aided positioning in GNSS receivers: a performance analysis», *Signal Processing*, Vol. 176, doi: 10.1016/j.sigpro.2020.107713.
14. Voordendag, A.B., Goger, B., Klug, C. et al. (2022), «The Stability of Reference Points for Multi-Temporal Terrestrial Laser Scanning», *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 1093–1099, doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-1093-2022.
15. Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E. and Sear, D.A. (2010), «Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets», *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 35, No. 2, pp. 136–156, doi: 10.1002/esp.1886.

Мітченко Дмитро Володимирович – аспірант Криворізького національного університету, головний маркшейдер ПРАТ «ПІВНІЧНИЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ».

<https://orcid.org/0009-0000-4647-906X>.

Наукові інтереси:

- зрушення та деформації гірського масиву;
- маркшейдерські прилади та технології;
- сучасні методи виконання знімальних робіт.

Mitchenko D.V.

Testing of an integrated TLS–GNSS–ETS method for monitoring deformations of technogenic waste dumps in an open-pit mine

The article presents the results of testing an integrated method for monitoring deformations of technogenic waste dumps and quarry slopes, combining terrestrial laser scanning (TLS), GNSS measurements in RTK mode, and total station observations using an electronic total station (ETS). The study aims to verify the accuracy, repeatability, and practical applicability of the method for multi-temporal analysis of landslide manifestations under complex mining conditions with limited access to hazardous areas. Field experiments were conducted from January to December 2025 and organized as 12 observation epochs, with the key requirement that TLS, GNSS, and ETS measurements were performed on the same day. The geodetic framework was established in the USK-2000 coordinate system based on 10 reference points located outside the deformation zone and 50 control targets/points within potentially unstable areas. TLS data were acquired using a Leica RTC360 scanner (8 stations, mean range ~80 m) and registered in Cyclone REGISTER 360; GNSS RTK provided absolute georeferencing (Leica GS18T), while ETS measurements (Topcon ES-105) were used for independent metrological verification and profile control. TLS registration yielded RMS/Residual values of 5–15 mm. A comparison between GNSS RTK and total station determinations for control points confirmed centimetre-level agreement (estimated RMSE_2D about 3.1 cm; RMSE_3D about 3.4 cm), which is sufficient for geomonitoring tasks. In addition, the influence of scanning range (0–50 m, 50–90 m, 90–130 m) on data informativeness and interpretation risks was investigated: the near range is optimal for detecting local cracks and small terraces, the mid range is the baseline for routine monitoring, and the far range is mainly suitable for overview models. The obtained results substantiate the feasibility of implementing the integrated TLS–GNSS–ETS approach as a controlled and practically applicable tool for monitoring technogenic masses in open-pit mines.

Keywords: terrestrial laser scanning; GNSS RTK; electronic total station surveying; technogenic waste dumps; deformations; geomonitoring; USK-2000.

Стаття надійшла до редакції 13.01.2026.