

УДК 550.837:528.4:004.94:624.131

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-43>

РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ МЕТОДИКИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА GNSS-ВИМІРЮВАНЬ

Мітченко Дмитро Володимирович,

аспірант

Криворізького національного університету;

головний маркшейдер

ПРАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»

ORCID ID: 0009-0000-4647-906X

Зсувні процеси є однією з найпоширеніших і водночас небезпечних форм геодинамічних явищ, що становлять серйозну загрозу для інфраструктури, довкілля та людського життя. Ефективне вивчення та моніторинг таких процесів вимагають високоточної просторової інформації про зміни рельєфу та переміщення мас ґрунту. У зв'язку із цим особливої актуальності набуває застосування сучасних геодезичних технологій, зокрема GNSS-вимірювань та наземного лазерного сканування (TLS). Метою дослідження є розроблення інтегрованої методики тривимірного моделювання зсувних процесів шляхом об'єднання GNSS- та TLS-даних. Розглянуто принципи та особливості функціонування GNSS-систем та TLS-технологій у контексті геомоніторингу. Запропоновано алгоритм поетапної інтеграції даних – від польового збору до обробки і побудови тривимірної моделі зсувної ділянки. Зокрема, використання GNSS дає змогу отримувати високоточні координати контрольних точок та динаміку зміщень у часі, тоді як TLS забезпечує детальну просторову реконструкцію поверхні зсуву. Комбінування цих даних дає змогу не лише візуалізувати поточний стан зсуву, а й аналізувати темпи та вектори змін. У результаті дослідження розроблено методичну схему інтеграції GNSS і TLS для моніторингу зсувів, що забезпечує підвищену точність та інформативність тривимірних моделей. Методика була апробована в умовах Першотравневого кар'єру, м. Кривий Ріг, та може бути адаптована для різних геоморфологічних умов. Вона має потенціал для застосування у системах раннього попередження, геотехнічному плануванні та оцінці ризиків. Отримані результати також можуть бути використані для періодичного спостереження, просторового аналізу деформацій і розроблення захисних заходів у зонах активної нестабільності.

Ключові слова: цифрова модель місцевості, просторові геодезичні дані, деформаційний аналіз, TLS-вимірювання, геомоніторинг.

Mitchenko Dmytro. Development of an integrated methodology for 3D modeling of landslide processes using terrestrial laser scanning and gnss measurements

Landslide processes are among the most common and simultaneously dangerous forms of geodynamic phenomena, posing serious threats to infrastructure, the environment, and human life. Effective study and monitoring of such processes require highly accurate spatial data on terrain changes and ground mass movements. In this context, the use of modern geodetic technologies, particularly GNSS measurements and terrestrial laser scanning (TLS), becomes especially relevant. The aim of this study is to develop an integrated methodology for three-dimensional modeling of landslide processes by combining GNSS and TLS data. The paper discusses the principles and specific features of GNSS systems and TLS technologies in the context of geomonitoring. A step-by-step algorithm for data integration – from field collection to processing and 3D modeling of the landslide area – is proposed. In particular, GNSS provides precise coordinates of control points and the dynamics of displacements over time, while TLS enables detailed spatial reconstruction of the landslide surface. The combination of these datasets allows not only for visualization of the current state of the landslide but also for analysis of deformation rates and vectors. As a result, a methodological scheme for GNSS and TLS integration has been developed to monitor landslides, ensuring enhanced accuracy and informativeness of 3D models. The methodology was tested under the conditions of the Pershotravnevyi Quarry in Kryvyi Rih and can be adapted to various geomorphological settings. It has potential applications in early warning systems, geotechnical planning, and risk assessment. The obtained results can also be used for periodic monitoring, spatial deformation analysis, and the development of protective measures in areas of active instability.

Keywords: digital terrain model, spatial geodetic data, deformation analysis, TLS measurements, geomonitoring.

Вступ. Зсувні процеси є складними геодинамічними явищами, що виникають під впливом природних або антропогенних чинників і мають вагомий вплив на інфраструктуру,

землекористування та безпеку населення в багатьох країнах світу. Ураховуючи їхню складну просторово-часову динаміку, питання достовірного визначення деформацій,

аналізу геометричних параметрів і прогнозування подальших змін залишається відкритим у сучасній інженерній геології та геоінформації. Упродовж останнього десятиліття особливу увагу дослідників привертають методи високоточного дистанційного зондування поверхні, які дають змогу детально вивчати морфодинаміку зсувів. Наземне лазерне сканування (TLS) зарекомендувало себе як один із найефективніших інструментів для отримання високоточних 3D-моделей рельєфу, що дає змогу виявляти мікродеформації, тріщини та інші морфологічні прояви активності. Водночас GNSS-технології демонструють стабільну ефективність у фіксації горизонтальних і вертикальних зміщень контрольних точок на схилах у реальному часі. Попри значний прогрес у застосуванні кожної з технологій окремо їх об'єднання відкриває нові перспективи для комплексного аналізу зсувних систем. Поєднання TLS і GNSS дає змогу не лише деталізувати поточний стан масиву, а й відстежувати зміну геометрії тіла зсуву з міліметровою точністю у часовому розрізі. Водночас інтеграція різних джерел просторових даних потребує узгоджених підходів до обробки, суміщення та верифікації результатів. У цьому дослідженні пропонується методологія, яка передбачає об'єднання TLS-даних і GNSS-вимірювань із метою формування високоточної тривимірної моделі зсувного процесу. Такий підхід дає змогу суттєво підвищити якість геодезичного моніторингу та може бути адаптований до різних типів схилів і умов спостереження.

У роботі [3] зосередилися на довготривалому моніторингу зсуву Åknes у Норвегії, де TLS і GNSS-системи використовуються як елементи системи раннього попередження. TLS дає змогу виявляти зміну геометрії схилу в реальному часі, а GNSS-станції забезпечують безперервне спостереження з міліметровою точністю. Це дослідження продемонструвало, що поєднання методів дає змогу виявляти критичні зміни у стабільності схилів на ранніх етапах.

Представили економічно ефективну систему моніторингу повільно рухомого зсуву в Карнійських Альпах (Північно-Східна Італія), використовуючи мережу з 12 одночастотних GPS-приймачів, одну сейсмометричну станцію та одну постійну двочастотну GPS-станцію для контролю стабільної зони [5]. Система забезпечувала щоденні звіти про рух зсуву, демонструючи потенціал для використання в системах раннього попередження, особливо в малих гірських громадах з обмеженим бюджетом.

У статті [10] досліджено застосування недорогих GNSS-рішень для безперервного

моніторингу зсувних процесів на прикладі санктуарію Мадонна-дель-Сассо в Північно-Західній Італії. Цей підхід дав змогу виявити сезонні цикли термічного розширення та довгострокову тенденцію до зсуву зі швидкістю 2–3 мм на рік. Система демонструє міліметрову точність та узгодженість з іншими методами моніторингу, що робить її ефективним інструментом для раннього попередження та управління ризиками, особливо в умовах обмежених ресурсів.

У роботі [7] розробили метод автоматичного виявлення небезпечних зон за допомогою наземного лазерного сканування (TLS), придатний для застосування під час надзвичайних ситуацій. Використовуючи алгоритми сегментації хмар точок, система ідентифікує розриви, тріщини та деформації, що можуть передувати обвалам або зсувам. Такий підхід особливо цінний під час обстеження скель та урвищ у реальному часі.

У роботі [12] представили систему моніторингу зсувів, що базується на GNSS-RTK та вдосконаленому критерію Райда (3σ), для виявлення грубих помилок та високочастотного шуму. Їхній підхід забезпечує точність моніторингу до 10 мм у горизонтальному та вертикальному напрямках, що дає змогу застосовувати його для спостереження за швидкими деформаціями.

У статті [2] розглянуто досвід застосування GNSS-технологій для моніторингу активних зсувів у межах Карпатського регіону. Автори акцентують увагу на особливостях побудови локальних референцних мереж для забезпечення стабільної точності координат у гірських умовах, де рівень багатопроменивості та атмосферних перешкод значно зростає. Проведений аналіз щомісячних змін координат контрольних точок засвідчив ефективність GNSS-спостережень у визначенні горизонтальних зміщень навіть у межах 2–3 мм. Особливу увагу приділено верифікації GNSS-даних із результатами геодезичної зйомки та фотограмметрії. Стаття підкреслює актуальність інтегрованого підходу до спостереження за нестабільними схилами з урахуванням геологічних, гідрологічних і техногенних чинників.

У роботі [9] зосередилися на швидкому картографуванні багаточисельних зсувів після інтенсивних опадів у префектурі Етолія-Акарнанія (Західна Греція). Використовуючи БПЛА, GNSS та геоінформаційні системи (ГІС), дослідники змогли точно задокументувати 14 активних зсувів протягом кількох робочих днів. Аналіз метеорологічних даних виявив, що добова кількість опадів понад 80 мм є критичним порогом для ініціації зсувів у цьому регіоні.

У роботі [6] провели огляд сучасних методів моніторингу зсувів за допомогою GNSS, підкреслюючи важливість реального часу та точності у складних умовах. Вони обговорюють переваги та обмеження різних технік, включаючи RTK та PPP у контексті моніторингу зсувів, та пропонують інтегровану стратегію, що поєднує переваги обох підходів для забезпечення високої точності та широкого покриття.

Методи та методики дослідження. Польові дослідження проведено в Першотравневому кар'єрі, розташованому в межах міста Кривий Ріг – одному з найбільших промислових центрів України. Об'єктом спостереження було активне зсувне утворення, що формується внаслідок техногенного навантаження на схилі системи кар'єру. Геоморфологічні умови об'єкта характеризуються наявністю крутих уступів, фрагментованих блоків гірських порід та ознак нестабільності на окремих ділянках. Цей кар'єр є типовим прикладом антропогенно зміненого ландшафту з високим ризиком розвитку зсувних явищ, що робить його оптимальним полігоном для апробації запропонованої інтегрованої методики.

Для збору геодезичних даних використовувалося сучасне обладнання: GNSS-приймач Leica GS18T, який забезпечує високу точність позиціонування у режимі RTK, та наземний лазерний сканер Leica RTC360, здатний генерувати понад два мільйони точок за секунду з точністю до міліметра. Використання GNSS дало змогу визначити координати реперів та контрольних точок, розташованих на стабільних і нестабільних частинах масиву, що дало можливість оцінити переміщення у просторі та часі. TLS-зйомка проводилася з кількох станцій спостереження з подальшою реєстрацією хмар точок. Для підвищення якості моделей використано сферичні рефлектори, що дали змогу здійснити точне суміщення даних із різних позицій.

Методика дослідження включала кілька етапів (рис. 1):

1. Первинна рекогносцировка та встановлення GNSS-референцної станції. На першому етапі здійснювався виїзд на досліджувану територію з метою попередньої оцінки умов рельєфу, доступності ділянок та визначення оптимальних місць для встановлення обладнання. Було проведено рекогносцировку зони зсуву у Першотравневому кар'єрі (м. Кривий Ріг), що дало змогу ідентифікувати активні зони деформацій. У стабільній частині ділянки було встановлено GNSS-референцну станцію з використанням приймача Leica GS18T, яка забезпечувала базове позиціонування для всіх подальших GNSS-спостережень.

2. Визначення координат контрольних точок на зсувному схилі методом RTK. Після встановлення базової станції було проведено високоточне визначення координат контрольних точок у межах зсувного тіла методом кінематичного позиціонування в режимі реального часу (RTK). Ці точки відіграли ключову роль за геоприв'язки результатів TLS-знімання, а також слугували еталонами для аналізу динаміки зміщень схилу.

3. Проведення TLS-знімання з декількох станцій. Наступним етапом було виконання наземного лазерного сканування (TLS) із використанням сканера Leica RTC360. Сканування здійснювалося з кількох позицій з урахуванням видимості та перекриття зон. Такий підхід забезпечив максимальне покриття зсувної ділянки та дав змогу зібрати детальну тривимірну інформацію про морфологію схилу з високою просторовою роздільною здатністю.

4. Попередня обробка даних GNSS та TLS у відповідному програмному забезпеченні (Leica Infinity, Cyclone REGISTER 360). Отримані польові дані було оброблено



Рис. 1. Схема етапів інтегрованої методики 3D-моделювання зсувів на основі GNSS і TLS

у спеціалізованому програмному забезпеченні: Leica Infinity – для обробки GNSS-вимірювань та Cyclone REGISTER 360 – для обробки і реєстрації TLS-хмар точок. На цьому етапі здійснювалася фільтрація, вирівнювання, вирішення перекриттів та зменшення шумів у хмарах точок.

5. Об'єднання GNSS-даних та хмар точок TLS для створення єдиної тривимірної моделі зсувної ділянки. Заключним етапом стала інтеграція GNSS-координат контрольних точок із хмарами точок, отриманими від TLS, що дало змогу забезпечити просторову відповідність та геоприв'язку тривимірної моделі. Побудовано єдину високоточну 3D-модель зсувної ділянки, яка може бути використана для подальшого аналізу деформацій, векторів переміщення та моделювання потенційних сценаріїв розвитку зсуву.

Результатом реалізації даного підходу є побудова високоточних цифрових моделей місцевості, що дають змогу оцінити морфологію зсуву, вектори зміщення та темпи розвитку деформацій. Такий підхід дав змогу отримати не лише точну геометричну реконструкцію зсуву, а й аналіз його динаміки з урахуванням часових змін. У підсумку розроблена методика забезпечує детальне 3D-моделювання зсувних процесів із високою просторовою та часовою роздільністю, що відкриває перспективи її застосування для оперативного моніторингу й прогнозування зсувної активності у подібних гірничо-промислових умовах.

Результати. Результатом проведених досліджень стало створення детальної тривимірної моделі зони нестабільності, сформованої унаслідок відсіпки скельної гірничої маси. Ділянка дослідження охоплює техногенний відвал, що характеризується багатоярусною будовою, складними інженерно-геологічними умовами та ознаками зсувних деформацій.

Згідно з тривимірним моделюванням, відвал складається з п'яти ярусів: +115 м, +130 м, +145 м, +160 м та +175 м. Загальна висота техногенного масиву становить близько 60 м. Площа підшви відвалу (на ярусі +115 м) становить приблизно 19,1 га, а площа вершини (на ярусі +175 м) – 3,6 га, що свідчить про виражений конусоподібний характер формування схилу. Середній ухил борту у центральній частині становить 35–38°, тоді як південний борт відвалу сформовано з ухилом 19°, що відповідає рекомендованому діапазону (19–21°), нині візуально стабільний.

Візуальне обстеження та аналіз архівних матеріалів показали, що в районі воронки № 1 на горизонті +150 м спостерігалось формування

системи тріщин, просядок та терас. Ці деформації спричинили зсув порід у напрямку балки Грядковата та утворення локальних розривів і терас у прилеглих ґрунтах. Дані GNSS-знімання (прилад Leica GS18T) підтвердили горизонтальне і вертикальне розкриття тріщин на ділянках автодороги Б і В до 55 мм у плані та 82 мм – у глибину.

TLS-знімання (Leica RTC360), виконане з дев'яти станцій, дало змогу створити високодеталізовану хмару точок із роздільною здатністю понад 250 т/м². Після попередньої обробки у Cyclone REGISTER 360 і прив'язки GNSS-даних у Leica Infinity було згенеровано тривимірну модель, що відображає реальну морфологію масиву включно з характерними елементами нестійкості: тріщинами, зсувними терасами, випираннями та ознаками формування поверхні ковзання.

Ця модель є основою для просторового аналізу стійкості схилів, прогнозу розвитку деформацій та планування заходів моніторингу й інженерного захисту території.

У статті [4] було показано, що поєднання GNSS-методу та наземного лазерного сканування (TLS) дає змогу ефективно ідентифікувати навіть незначні деформації схилів, які не завжди можна виявити візуально. Аналогічний підхід, застосований у межах Першотравневого кар'єру, дав змогу зафіксувати наявність поверхонь ковзання, що відповідає світовим практикам і демонструє потенціал методики для регулярного геомоніторингу.

У статті [11] висвітлено досвід Румунії щодо моніторингу зсувних процесів у Карпатському регіоні, де автори відзначають ефективність тривимірного моделювання місцевості з використанням TLS під час дослідження нестабільних бортувальних систем. Це узгоджується з нашими результатами, де багатоярусна структура відвалу, що сформувалася у Першотравневому кар'єрі, була детально змодельована та оцінена щодо потенційної небезпеки зсуву.

У статті [1] обґрунтовується доцільність використання комбінованих GNSS-TLS методів для контролю динаміки схилів в умовах гірничого виробництва на території України. Результати нашого дослідження підтверджують, що така методика дає змогу не лише виявити вже наявні деформації, а й оцінити тенденції до подальших зміщень, особливо в зонах, де спостерігаються тріщини, вали випирання та просядки.

У статті [8] розглядаються приклади впровадження систем раннього попередження про зсуви в Україні, що базуються на використанні

сучасних геодезичних технологій. Аналогічна потреба в упровадженні автоматизованих систем моніторингу є актуальною і для Першотравневого кар'єру, де складні геологічні умови та техногенне навантаження формують ризик повторного зсуву.

Таким чином, результати, отримані в межах дослідження, свідчать про ефективність використаної методики і підтверджують доцільність її упровадження на інших небезпечних ділянках, де присутні схожі умови формування нестабільних масивів.

Висновки. У межах дослідження розроблено та апробовано інтегровану методику тривимірного моделювання зсувних процесів на основі поєднання даних наземного лазерного сканування (TLS) та високоточного GNSS-спостереження. Польові роботи, проведені на території Першотравневого кар'єру м. Кривий Ріг, дають змогу створити детальну 3D-модель

відвалу розкривних порід, яка охоплює п'ять ярусів.

Отримані результати засвідчили ефективність використаної технології для виявлення активних деформацій, таких як розкриття тріщин, просідання та формування терас. Зокрема, виявлено ознаки зміщення масиву порід у напрямку балки Грядковата та формування потенційної поверхні ковзання у межах автодороги. Проведена візуалізація, суміщення хмар точок із GNSS-даними та аналіз геоморфологічної структури об'єкта дали змогу ідентифікувати критичні зони зниження стійкості схилу та потенційно небезпечні ділянки.

Методика може бути рекомендована для моніторингу нестійких техногенних утворень у гірничопромислових регіонах України, зокрема для цілей оперативного оцінювання ризиків та планування заходів із підвищення геотехнічної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Байцар А. М., Котик Ю. Р. Технології моніторингу нестійких схилів у гірничих районах України з використанням TLS і GNSS. *Вісник геодезії та картографії*. 2021. № 3. С. 26–33.
2. Бровко Р. І., Петренко О. М., Івасюк С. П. Застосування технологій GNSS для моніторингу зсувів у Карпатському регіоні. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2022. № 96(1). С. 45–54.
3. Blikra L. H., Kristensen L., Anda E., Longva O. Real-time monitoring of the Åknes landslide using integrated GNSS and TLS systems. *Landslides*. 2022. Vol. 19. P. 1107–1121. DOI: 10.1007/s10346-022-01863-3
4. Cigáň Š., Bartalský B., Puškár J. Використання лазерного сканування і GNSS для моніторингу зсувів: досвід Словаччини. *Acta Geologica Slovaca*. 2020. Т. 12, № 1. С. 33–45.
5. Costantini L., Zumpano V., Manunta M., Casagli N. A low-cost GPS-based landslide monitoring network in the Carnic Alps (Italy). *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 9. P. 3526. DOI: 10.3390/s22093526
6. Huang X., Zhang Y., Tang H., Zhao C. Review of GNSS-based real-time landslide monitoring techniques. *Geoenvironmental Disasters*. 2023. Vol. 10, No. 1. P. 5. DOI: 10.1186/s43020-023-00095-5
7. Li S., Zhang M., Chen Y. TLS-based automatic detection of discontinuities and monitoring of rockfall hazards during emergencies. *Landslides*. 2023. Vol. 20. P. 765–779. DOI: 10.1007/s10346-023-02169-6
8. Микитась О. М., Ковальчук С. Ю., Зінчук О. С. Системи моніторингу та раннього попередження про зсуви в Україні: стан та перспективи. *Геоінформаційні системи в управлінні природними ресурсами*. 2020. № 1(17). С. 41–50.
9. Nikolakopoulos K. G., Karymbalis E., Ganas A., Iliopoulos G., Koukouvelas I. K., Pavlides S. Rapid mapping of landslides using UAVs, GNSS, and GIS in Western Greece. *Geosciences*. 2024. Vol. 14, No. 6. P. 160. DOI: 10.3390/geosciences14060160
10. Notti D., Meisina C., Zucca F., Colombo A. Testing low-cost differential GNSS for slow-moving landslide monitoring. *Landslides*. 2021. Vol. 18. P. 1005–1016. DOI: 10.1007/s10346-021-01737-y
11. Popescu M., Ionescu A., Dumitru C. Application of 3D laser scanning and GNSS in landslide-prone areas of the Romanian Carpathians. *Romanian Journal of Geomatics*. 2024. Vol. 18, No. 2. P. 52–61.
12. Wang Y., Shi L. High-Precision Landslide Monitoring Using GNSS-RTK and 3σ Criterion. *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2301.05977. URL: <https://arxiv.org/abs/2301.05977>

REFERENCES:

1. Baicar, A. M., & Kotyk, Y. R. (2021). Tekhnolohii monitorynhu nestiiikykh skhyliv u hirnychkykh raionakh Ukrainy z vykorystanniam TLS i GNSS [Technologies for monitoring unstable slopes in mining areas of Ukraine using TLS and GNSS]. *Visnyk heodezii ta kartohrafii – Bulletin of Geodesy and Cartography*, (3), 26–33. [in Ukrainian].
2. Brovko, R. I., Petrenko, O. M., & Ivasiuk, S. P. (2022). Zastosuvannia tekhnolohii GNSS dlia monitorynhu zsuviv u Karpat-s'komu rehioni [Application of GNSS technologies for landslide monitoring in the Carpathian

region]. *Heodeziia, kartografiia i aerofotoznimannia – Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 96(1), 45–54. [in Ukrainian].

3. Blikra, L.H., Kristensen, L., Anda, E., & Longva, O. (2022). Real-time monitoring of the Åknes landslide using integrated GNSS and TLS systems. *Landslides*, 19, 1107–1121. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01863-3>

4. Cigáň, Š., Bartalský, B., & Puškár, J. (2020). Vykorystannia lazernoho skanuvannia i GNSS dlia monitorynhu zsuiv: dosvid Slovachchyny [Use of laser scanning and GNSS for landslide monitoring: The Slovak experience]. *Acta Geologica Slovaca*, 12(1), 33–45. [in Slovak].

5. Costantini, L., Zumpano, V., Manunta, M., & Casagli, N. (2022). A low-cost GPS-based landslide monitoring network in the Carnic Alps (Italy). *Sensors*, 22(9), 3526. <https://doi.org/10.3390/s22093526>

6. Huang, X., Zhang, Y., Tang, H., & Zhao, C. (2023). Review of GNSS-based real-time landslide monitoring techniques. *Geoenvironmental Disasters*, 10(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s43020-023-00095-5>

7. Li, S., Zhang, M., & Chen, Y. (2023). TLS-based automatic detection of discontinuities and monitoring of rockfall hazards during emergencies. *Landslides*, 20, 765–779. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02169-6>

8. Mykytas, O. M., Kovalchuk, S. Yu., & Zinchuk, O. S. (2020). Systemy monitorynhu ta rann'oho poperedzhennia pro zsuvy v Ukraini: stan ta perspektyvy [Monitoring and early warning systems for landslides in Ukraine: Current state and prospects]. *Heoinformatsiini systemy v upravlinni pryrodnyimi resursamy – Geoinformation Systems in Natural Resource Management*, 1(17), 41–50. [in Ukrainian].

9. Nikolakopoulos, K. G., Karymbalis, E., Ganas, A., Iliopoulos, G., Koukouvelas, I.K., & Pavlides, S. (2024). Rapid mapping of landslides using UAVs, GNSS, and GIS in Western Greece. *Geosciences*, 14(6), 160. <https://doi.org/10.3390/geosciences14060160>

10. Notti, D., Meisina, C., Zucca, F., & Colombo, A. (2021). Testing low-cost differential GNSS for slow-moving landslide monitoring. *Landslides*, 18, 1005–1016. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01737-y>

11. Popescu, M., Ionescu, A., & Dumitru, C. (2024). Application of 3D laser scanning and GNSS in landslide-prone areas of the Romanian Carpathians. *Romanian Journal of Geomatics*, 18(2), 52–61.

12. Wang, Y., & Shi, L. (2023). High-precision landslide monitoring using GNSS-RTK and 3σ criterion. *arXiv Preprint*. <https://arxiv.org/abs/2301.05977>