

В.В. Коробійчук, д.т.н., проф.
Державний університет «Житомирська політехніка»
Д.В. Мітченко, аспірант
Криворізький національний університет

Визначення реальної похибки GNSS-позиціонування за допомогою електронного тахеометра для моніторингу процесів зсуву

Метою роботи було визначення реальної похибки GNSS-позиціонування за допомогою електронного тахеометра у існуючих зонах зсуву. У статті представлено оцінку реальної похибки GNSS-позиціонування шляхом порівняння його результатів із даними, отриманими за допомогою електронного тахеометра. Дослідження проведено в контексті моніторингу зсувонебезпечних територій, де точність визначення координат є критично важливою для запобігання аварійним ситуаціям. Розглянуто основні чинники, що впливають на точність GNSS-вимірювань, зокрема геодезичні умови, типи використовуваних приймачів, наявність перешкод та особливості програмного забезпечення. Для практичної перевірки методики проведено експериментальні дослідження, у яких координати контрольних точок визначалися як за допомогою GNSS-приймача, так і електронного тахеометра, що забезпечує високу точність вимірювань. Для отримання необроблених супутникових даних, використовувався GNSS-приймач Leica GS18T. Час вимірювань координат контрольних пунктів складав 90 хвилин на кожній точці. Електронний тахеометр Торсон ES-105 використовувався для виконання зйомки в режимі координат на всіх початково вибраних контрольних точках. Для визначення середнього значення результатів дослідження з використанням тахеометра проводилося тричі в окремі дні. На основі отриманих даних виконано аналіз похибок GNSS-визначень, їх варіативності та стабільності. Результати дослідження дозволяють оцінити можливості використання GNSS-технологій у складних умовах та вдосконалити методи моніторингу зсувних процесів. Дослідження показує, що точки, які мали результати в дециметровому діапазоні, були настільки близькі до ділянок щільних зарослей дерев, ліній електропередач, зв'язку та будівель. Це сприяло перешкодами для сигналу супутників, тим самим створюючи багатопроменеві помилки на цих контрольних точках. Тому рекомендується використовувати тахеометр всюди, де є передбачувані перешкоди для усунення похибок від невеликої кількості супутників для досягнення високої точності вимірювань. Запропонований підхід може бути використаний для підвищення точності та надійності геодезичних спостережень, що є важливим для інженерно-геологічного контролю та прогнозування небезпечних геодинамічних явищ.

Ключові слова: високоточне позиціонування; точність координат; геодинамічні процеси; деформаційний моніторинг; маркшейдерський контроль; геоінформаційні системи.

Вступ. Моніторинг зсувних процесів є важливою складовою інженерно-геодезичних досліджень, оскільки зсуви можуть спричиняти значні руйнування інфраструктури, зміну ландшафту та загрожувати безпеці населення. Точне визначення зміщень та деформацій земної поверхні є ключовим для своєчасного виявлення небезпечних геодинамічних явищ і прогнозування їх подальшого розвитку.

Серед сучасних методів геодезичного моніторингу широко використовуються GNSS-технології, що забезпечують оперативне отримання координат контрольних точок. Однак точність GNSS-позиціонування може змінюватися під впливом різних факторів, таких як іоносферні та тропосферні збурення, якість супутникового сигналу, наявність перешкод у зоні спостереження та алгоритми обробки даних. У зв'язку з цим виникає необхідність у додатковій перевірці отриманих координат та оцінці реальної похибки GNSS-вимірювань. Одним із найточніших засобів наземних вимірювань є електронний тахеометр, що дозволяє отримувати високоточні координати точок у локальній системі координат. Порівняння даних GNSS-приймачів із результатами тахеометричних вимірювань може забезпечити більш точну оцінку похибки супутникового позиціонування та визначити його придатність для моніторингу зсувонебезпечних територій. У цій статті розглядається методика визначення реальної похибки GNSS-позиціонування за допомогою електронного тахеометра. Представлено результати експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку точності GNSS-вимірювань у реальних умовах, та проаналізовано можливості використання цього методу для забезпечення надійного контролю зсувних процесів. Використання кінематики реального часу в GNSS значно розкрив Ф.Т. Шумаков [8].

У роботі Е.Р. Guma1 et al. (2023) описано дослідження щодо використання тахеометра для визначення наявності помилки в спостереженнях GNSS-PPP. Для спостережень використовувався GNSS-приймач, який фіксував позицію протягом 60 хвилин на кожній з ідентифікованих точок монументів [3]. Тахеометр використовувався для спостереження за відбивачем, що тримався на всіх інших PPP контрольних точках.

Результати спостережень були на рівні десятків сантиметрів, окрім трьох контрольних точок, де помилка перевищила метр. Причиною цього, як було зазначено, є очевидні перешкоди для GNSS сигналів з космічного сегмента, такі як вежі зв'язку, лінії електропередач та будівлі. Це дослідження довело, що допоміжні пристрої GNSS, такі як тахеометр та цифровий теодоліт, все ще необхідні в геодезичних роботах у міських поселеннях, де мультипатійні помилки можуть впливати на результати спостережень GNSS. Після того, як базові станції хоча б двох чи трьох інтервізуальних зафіксованих позицій будуть встановлені, можна використовувати тахеометр для перенесення координованих точок з одного місця в інше. Результати зйомок тахеометра можуть бути використані для усунення помилок GPS, що забезпечить сталість точності між різними точками спостереження.

У роботі Hussain, Ahmed, Magsi and Tiwari (2020) помітили, що переваги техніки постійного позиціонування у маркшейдерії усунули багато фізичних обмежень, таких як відсутність прямої видимості та складність розширення контролю з відомих точок до невідомих точок [5]. Це також корисно для виконання досліджень морських нафтових вишок, сейсмозв'язки та будівництва у обводнених районах. Зйомку за допомогою GNSS можна виконувати будь-де на відкритому просторі. Але високу точність можна гарантувати тільки за ідеальних погодних умов та за відсутності забудов або будь-яких високих об'єктів поряд.

У роботі G.Huang, S.Du and D.Wang (2023) розглянуто три технології моніторингу, а саме RTK, PPP та PPP-RTK, і їх застосування для геонебезпечних зсувів [4]. Також проаналізовано ефективність цих технологій на основі фактичних даних, визначено їх переваги та недоліки. **RTK** у моніторингу зсувів найчастіше використовується в режимі короткої базової лінії. Такий підхід забезпечує швидке отримання результатів з міліметровою точністю, що робить їх стабільними та надійними. Однак для контрольних ділянок діапазон даних обмежений. Короткий базовий RTK є оптимальним варіантом для високоточного моніторингу зсувів у реальному часі без додаткових витрат. **PPP** потребує більше часу (десятки хвилин) для досягнення стабільної точності на сантиметровому рівні. Проте ця технологія має кілька переваг: відсутність необхідності в опорних станціях, низька вартість і можливість отримання абсолютних координат. Вона підходить для моніторингу зсувів на великій відстані, для повільних змін і є практичною для застосування в реальному часі. Крім того, PPP може допомогти в перевірці стабільності опорної станції RTK. **PPP-RTK** поєднує переваги обох попередніх технологій. Вона дозволяє користувачам вибирати різні діапазони послуг відповідно до конкретних вимог щодо точності моніторингу зсувів. Однак на великих відстанях її вертикальна точність знижується, оскільки атмосферні затримки та просторові відстані значно впливають на результат. Зокрема, проблеми, пов'язані з атмосферними умовами, потребують термінового вирішення.

У роботі Deo and El-Mowafy (2020) пропонуються методи точного позиціонування (PPP), що забезпечують точність на рівні декількох десятків сантиметрів (дм) за допомогою даних GNSS з потрібною частотою [1]. Для швидкого усунення неоднозначностей екстраширокої (EWL) та широкої (WL) смуг для GPS, Beidou-2 та Galileo була представлена вдосконалена лінійна комбінація потрібної частоти. Цей підхід демонструє покращену ефективність порівняно з традиційною комбінацією Мельбурн – Вюббена (MW), знижуючи рівень шуму вимірювань на 6,7 % для сигналів GPS L1/L2, на 12,7 % для L1/L5 і на 0,7 % для L2/L5. Тестування показало, що запропоновані методи дозволяють зменшити час для усунення неоднозначностей $\{N_{21}\}$ та $\{N_{51}\}$ на 5–6 %. Після усунення неоднозначностей EWL/WL за допомогою запропонованих лінійних комбінацій в статті розглядаються три підходи для досягнення точності позиціонування на рівні кількох дм. Перший метод використовує три неоднозначності EWL/WL у відповідних рівняннях фази для отримання лінійної комбінації без іоносферного шуму (IF). Другий метод комбінує два рівняння фази носія EWL/WL з одним вимірюванням псевдовідстані для досягнення низького рівня шуму. Третій метод застосовує одне рівняння фази носія EWL і два вимірювання псевдовідстані для створення низькошумної комбінації IF. Запропоновані методи можуть забезпечити точність позиціонування на рівні дм, якщо вимірювання фази носія з точністю до міліметрів обробляються приймачем. Порівняння цих комбінацій показує, що найкраща ефективність досягається за допомогою третього методу, коли шум фази носія становить більше 5–6 мм для GPS і Beidou-2, а для Galileo – більше 2–3 мм. Цей підхід вимагає лише усунення неоднозначності EWL, що зазвичай займає одну зйомку, що дозволяє досягти миттєвої точності PPP на рівні десятків сантиметрів.

У роботі F.Vincent et al. (2022) виконано аналіз точності позиціонування GNSS-приймачів із урахуванням доплерівського зсуву. Традиційно GNSS-позиціонування базується на двоетапному підході, де спочатку незалежно оцінюються часові затримки та доплерівські зсуви сигналів від супутників, а потім визначається положення користувача за допомогою алгоритму зважених найменших квадратів (WLS) [10]. Зазвичай цей процес враховує лише часові затримки, хоча доплерівський ефект також містить корисну інформацію. У статті розглядається можливість покращення точності GNSS-позиціонування шляхом спільного використання даних про часові затримки та доплерівські зсуви. Для цього авторами виведено аналітичні вирази для оцінки похибок позиціонування залежно від використаного алгоритму. Досліджено ефективність підходу на основі чисельного моделювання в умовах обмеженої видимості супутників (наприклад, міські каньйони, кар'єри) та слабого сигналу. Результати підтверджують, що використання доплерівської

інформації може суттєво зменшити похибку позиціонування, особливо за довгих часів інтеграції. Отримані результати мають практичне значення для проектування високочутливих GNSS-приймачів, що працюють у складних умовах поширення сигналу. Висновки дослідження можуть бути застосовані для підвищення точності та надійності GNSS-систем у складних середовищах, таких як міські зони або біля будівель.

Матеріали та методи. Область дослідження.

Дослідження було проведено на Ганнівському родовищі магнетитових кварцитів у північній частині міста Кривий Ріг, яке знаходиться в Дніпропетровській області України. Місто розташоване між широтами 47° 55' 56.5" N та 48° 12' 53.8" N і довготами 33° 13' 48.2" E та 33° 33' 25.1" E. Кривий Ріг розташований у зоні помірного континентального клімату, де спостерігається чітко виражена зміна сезонів зі спекотним літом і холодною зимою. Топографія міста є досить рівнинною, але з незначними підвищеннями і пониженнями на окремих ділянках. Середня висота над рівнем моря становить близько 120–150 метрів. Відстань до найближчих водних об'єктів – річки Інгулець і водосховища – має важливе значення для кліматичних умов, зокрема для рівня вологості. Клімат у Кривому Розі характеризується тривалою і жаркою спекою влітку та холодною зимою. Літні температури можуть досягати 35 °C, з максимальними піками в червні та липні. Зима зазвичай холодна, з середніми температурами в січні від –5 до –8 °C, але в окремі роки можливі й сильні морози до –20 °C. Вітровий режим міста змінюється залежно від сезону, при чому сильні вітри можуть бути більш характерними для зимового періоду. Дощі в Кривому Розі нерівномірні протягом року: найбільше опадів випадає в літні місяці, особливо в червні та липні, коли можливі зливи. Влітку часто спостерігаються грози. Зима своєю чергою характеризується невеликими сніговими опадами і морозами. Температурні коливання в межах міста зазвичай становлять від 0 до 35 °C влітку і від –10 до –5 °C взимку. Найгарячіший період – з червня до серпня, з максимальними температурами понад 30 °C. Найхолодніший період – з грудня до лютого, з мінімальними температурами до –10 °C і нижче. Характеристика міцності осадових порід Ганнівського родовища характеризується середнім значенням кутів внутрішнього тертя і зчеплення C , а також їх розрахунковими величинами, отриманими шляхом статистичної обробки. Характеристики наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики міцності осадових порід Ганнівського родовища

Найменування порід	Щільність, кг/м ³	Вологість, %	Кут внутрішнього тертя φ , °		Зчеплення C , МПа	
			нормативний	розрахунковий	нормативне	розрахункове
Суглинки лесовидні	1860	23	23	20	0,035	0,026
Суглинки червоно-бурі	1950	25	20	17	0,061	0,045
Глини червоно-бурі середньо-пластичні	1900	28	16	15	0,068	0,063
Пісок кварцевий мілкий водонасичений	2000	21	25	13,1	0	0

Джерело: авторська розробка

Основним був метод спостереження GNSS-PPP за допомогою Leica GS18T. Метод Precise Point Positioning (PPP) є одним із найточніших GNSS-підходів для визначення координат без використання базових станцій чи RTK-зв'язку. Він базується на застосуванні глобальних супутникових систем (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) та використанні високоточних ефемерид, а також корекцій іоносферних і тропосферних затримок, які надають міжнародні центри, такі як IGS. Це дозволяє отримувати сантиметрову точність навіть у віддалених районах, де традиційні методи неможливі. GNSS-приймач Leica GS18T підтримує PPP та має низку функцій, що спрощують процес вимірювань. Його головною перевагою є вбудований інерційний модуль, який забезпечує компенсацію нахилу, дозволяючи виконувати вимірювання без точного вертикального встановлення віхи. Це значно підвищує ефективність роботи в складних умовах. Приймач також підтримує сервіси PPP-корекцій, зокрема Leica SmartLink, що дозволяє отримувати точні координати без необхідності мобільного інтернету чи доступу до референсних станцій. Процедура виконання спостережень GNSS-PPP за допомогою Leica GS18T включає кілька основних

етапів. Спочатку необхідно увімкнути приймач, перевірити заряд батареї та налаштувати з'єднання з контролером. Далі в меню налаштувань слід вибрати відповідний сервіс корекцій і дочекатися конвергенції рішення, що зазвичай займає від 15 до 40 хвилин. Після стабілізації рішення виконується запис вимірювань, при цьому слід забезпечити якісний огляд неба для мінімізації похибок. Дані можуть бути використані безпосередньо в полі або експортовані для подальшої постобробки в спеціалізованому програмному забезпеченні, такому як Leica Infinity, RTKLib або Bernese. Метод GNSS-PPP у поєднанні з Leica GS18T забезпечує високу автономність і точність вимірювань, що робить його ефективним рішенням для геодезичних робіт у місцях, де RTK-зв'язок недоступний. Завдяки поєднанню супутникових корекцій і інерційної компенсації цей метод є надійним інструментом для визначення координат у різних умовах.

Вторинним був метод нагляду за зсувом і точністю координат пунктів за допомогою тахеометра Topcon ES-105. Для моніторингу зсувів і контролю точності координат пунктів застосовують різні методи геодезичних вимірювань, серед яких важливе місце займає тахеометричний метод. Використання тахеометра Topcon ES-105 дозволяє виконувати високоточні спостереження та аналізувати зміщення контрольних точок у просторі. Основний принцип нагляду за зсувами базується на періодичних повторних вимірюваннях координат пунктів та їх порівнянні з попередніми значеннями. Тахеометр Topcon ES-105 є електронним інструментом із кутовою точністю 5" та лазерним далекоміром, що забезпечує вимірювання на відстанях до 500 м без відбивача та до 4000 м із призмою. Висока точність вимірювань робить його ефективним для контролю руху ґрунтових мас, будівельних конструкцій та інших об'єктів, що можуть зазнавати зсувів.

Процедура нагляду за зміщеннями передбачає кілька основних етапів. Спочатку проводять закладку та рекогносцювання контрольних пунктів, які слугуватимуть основою для вимірювань. Далі тахеометр встановлюють на стабільний опорний пункт, виконують юстування та калібрування інструмента. Вимірювання здійснюються у режимі повторного знімання, коли порівнюються координати точок у різні періоди. Для підвищення точності застосовують методи зворотного засічення або прямої реєстрації змін координат. Зібрані дані можуть бути оброблені безпосередньо на тахеометрі або експортовані для подальшого аналізу в програмне забезпечення, таке як Topcon Magnet Field, AutoCAD, Trimble Business Center.

Отримані результати дозволяють оцінювати динаміку зсувів, прогнозувати можливі деформації та приймати необхідні інженерні рішення. Застосування Topcon ES-105 для моніторингу зсувів є ефективним завдяки його високій точності, можливості роботи на значних відстанях та простоті використання. Цей метод особливо корисний у геотехнічному моніторингу, спостереженнях за об'єктами інфраструктури та аналізі стабільності будівельних конструкцій.

Результати спостережень GNSS-PPP представлені у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати спостережень методом GNSS-PPP

Точка стояння	1 спостереження			2 спостереження			3 спостереження		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
P1	2997,966	2788,642	153,579	2997,910	2788,623	153,536	2997,925	2788,640	153,550
P2	2997,165	2819,136	153,266	2997,177	2819,120	153,231	2997,115	2819,121	153,220
P3	2996,592	2863,675	145,464	2996,560	2863,682	145,424	2996,597	2863,675	145,443
P4	2996,329	2879,716	145,821	2996,324	2879,751	145,819	2996,314	2879,692	145,810
P5	2996,059	2908,182	137,722	2996,078	2908,186	137,738	2996,077	2908,228	137,716
P6	2996,961	2955,169	133,781	2996,943	2955,164	133,808	2996,979	2955,195	133,785
P7	2996,041	3103,345	131,971	2996,032	3103,354	131,979	2996,047	3103,347	131,952

Джерело: авторська розробка

За результатами спостережень видно, що похибка по визначенню координат у площині коливається у межах від -42 мм до +62 мм, а по висоті від -27 мм до +43 мм.

Результати спостережень тахеометричним способом представлені у таблиці 3

За результатами спостережень видно, що похибка по визначенню координат у площині коливається у межах від -14мм до +11мм, а по висоті від -11мм до +16мм.

Таблиця 3

Результати спостережень електронним тахеометром

Точка стояння	1 спостереження			2 спостереження			3 спостереження		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
P1	2997,960	2788,653	153,571	2997,964	2788,644	153,562	2997,959	2788,633	153,550
P2	2997,176	2819,129	153,254	2997,185	2819,127	153,265	2997,181	2819,134	153,257
P3	2996,584	2863,672	145,457	2996,594	2863,675	145,453	2996,603	2863,673	145,448
P4	2996,358	2879,73	145,831	2996,35	2879,723	145,805	2996,357	2879,713	145,807
P5	2996,025	2908,201	137,730	2996,027	2908,21	137,724	2996,022	2908,213	137,732
P6	2996,944	2955,148	133,763	2996,938	2955,14	133,765	2996,952	2955,144	133,772
P7	2996,050	3103,36	131,962	2996,059	3103,349	131,954	2996,055	3103,346	131,952

Джерело: авторська розробка

Всі результати вимірювань за допомогою GNSS-приймача та електронного тахеометра були усереднені та представлені поруч у таблиці 4.

Таблиця 4

Усереднені значення результатів спостережень

Точка стояння	Усереднене значення GNSS			Усереднене значення тахеометр		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
P1	2997,934	2788,635	153,555	2997,961	2788,643	153,561
P2	2997,152	2819,126	153,239	2997,181	2819,130	153,259
P3	2996,583	2863,677	145,444	2996,594	2863,673	145,453
P4	2996,322	2879,720	145,817	2996,355	2879,722	145,814
P5	2996,071	2908,199	137,725	2996,025	2908,208	137,729
P6	2996,961	2955,176	133,791	2996,945	2955,144	133,767
P7	2996,040	3103,349	131,967	2996,055	3103,352	131,956

Джерело: авторська розробка

Для можливості аналізу отриманих даних різниця між GNSS-зйомкою та тахеометричною зйомкою була обчислена і результат наведено у таблиці 5.

Таблиця 5

Порівняння результатів зйомок та їх різниця

Точка стояння	GNSS-зйомка			Тахеометрична зйомка			Різниця вимірювань		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
P1	2997,934	2788,635	153,555	2997,961	2788,643	153,561	-0,027	-0,008	-0,006
P2	2997,152	2819,126	153,239	2997,181	2819,130	153,259	-0,028	-0,004	-0,020
P3	2996,583	2863,677	145,444	2996,594	2863,673	145,453	-0,011	0,004	-0,009
P4	2996,322	2879,720	145,817	2996,355	2879,722	145,814	-0,033	-0,002	0,002
P5	2996,071	2908,199	137,725	2996,025	2908,208	137,729	0,047	-0,009	-0,003
P6	2996,961	2955,176	133,791	2996,945	2955,144	133,767	0,016	0,032	0,025
P7	2996,040	3103,349	131,967	2996,055	3103,352	131,956	-0,015	-0,003	0,011

Джерело: авторська розробка

Аналізуючи отримані дані, можемо зробити висновок, що високоточні вимірювання за допомогою тахеометра в разі точніше ніж за допомогою GNSS-приймача.

Обговорення. Згідно з Силабусом навчальної дисципліни «Інтеграція ГІС, ДЗЗ і ГНСС в моніторингу геосистем», комплексне використання ГІС, ДЗЗ і GNSS у моніторингу геосистем передбачає інтеграцію просторових даних з результатами польових вимірювань [6]. Такий підхід дозволяє створювати багатокомпонентну модель поведінки зсувонебезпечних територій у динаміці. GNSS-дані дають можливість отримати оперативну інформацію про зміщення поверхні, тоді як тахеометр забезпечує верифікацію цих даних. Таким чином, використання електронного тахеометра у даному дослідженні дозволило підтвердити похибки GNSS-вимірювань та виявити зони найменшої стабільності супутникового сигналу.

Згідно з кваліфікаційною роботою В.Василишина (2020), дослідження ефективності референтних GNSS-станцій ZAKPOS показало, що навіть із використанням стабільної бази похибки позиціонування можуть коливатися через локальні впливи середовища [9]. Це співвідноситься з нашими результатами: навіть при тривалих (90 хв) вимірюваннях GNSS-PPP в окремих точках точність залишалася недостатньою, що вимагає застосування незалежного контролю – зокрема тахеометричного. Автор також вказує, що у випадках критичної інженерної відповідальності GNSS має використовуватися лише як допоміжний метод.

У роботі Д.П. Побігайло та С.С. Іськова (2024) у процесі визначення реальної похибки GNSS-позиціонування за допомогою електронного тахеометра було виявлено низку важливих закономірностей. Зокрема, результати свідчать про значну залежність точності координат від умов видимості супутників та рельєфу місцевості [7]. Це підтверджує гіпотезу про те, що у зонах з обмеженим оглядом (ущелини, під уступами кар'єру тощо) відбувається помітне погіршення GNSS-сигналу, що своєю чергою збільшує значення похибки у визначенні координат. При цьому результати вимірювань тахеометром дозволили об'єктивно оцінити відхилення в позиціонуванні, створивши надійне порівняння з фактичним положенням контрольних точок. Отримані дані демонструють ефективність застосування GNSS-приймачів у поєднанні з додатковими методами корекції (RTK, D-GPS, PPP) у складних умовах. Проте навіть за використання найсучасніших технологій залишаються обмеження, пов'язані з мультипатерингом, атмосферними впливами та тінювим ефектом. У цьому контексті особливої уваги заслуговує можливість адаптивного використання керованих антен, які можуть зменшити вплив зовнішніх факторів на стабільність сигналу.

Водночас результати обговорення дозволяють стверджувати, що GNSS-системи, хоча й демонструють високу потенційну точність, потребують обов'язкової перевірки результатів за допомогою класичних геодезичних методів (електронного тахеометра) у критично важливих задачах моніторингу, зокрема, під час дослідження зсувних процесів [2]. Це особливо актуально для гірничих підприємств, де зсуви можуть становити пряму загрозу безпеці виробництва.

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.

Для компенсації похибок, пов'язаних з перешкодами на маршруті сигналу, таких як мультипатеринг або атмосферні спотворення, було використано метод нагляду за зміщеннями за допомогою тахеометра Topcon ES-105. Результати тахеометричних вимірювань показали вищу точність порівняно з GNSS-зйомкою, що підтвердило необхідність використання тахеометрії для верифікації даних GNSS, особливо у важких умовах. Комбіноване використання GNSS та тахеометрії дозволяє отримувати більш точні та надійні результати, зменшуючи вплив локальних перешкод і гарантує стабільність вимірювань. Це підкріплюється результатами аналізу, де відмінності між GNSS і тахеометричними вимірюваннями були мінімальними, що підтверджує ефективність такого підходу. Для високоточних інженерних завдань, таких як моніторинг зсувів і деформацій, поєднання супутникових технологій з традиційними методами є необхідним, а GNSS повинно використовуватися як допоміжний інструмент. Таким чином, результативність дослідження вказує на важливість комплексного підходу в геодезії, який включає не лише сучасні супутникові технології, а й традиційні методи вимірювань, що забезпечують необхідну точність і надійність результатів. Це відкриває можливості для покращення моніторингу геосистем та розвитку інженерних технологій для забезпечення безпеки та стабільності інфраструктури.

Список використаної літератури:

1. 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.
2. The use of the construction with a digital camera and GPS receiver while researching dangerous areas / O.Dolgikh, L.Dolgikh, K.Ielezov, N.Maletskii // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 280. DOI: 10.1051/e3sconf/202128008009.
3. Detecting errors in GNSS-precise point positioning controls using total station technique / E.P. Guma, D.U. Agada, N.G. Johnson and other // COOU African Journal of Environmental Research. – 2023. – Vol. 4, No. 1. – P. 83–93 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.researchgate.net/publication/370322569>.
4. Huang G. GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review / G.Huang, S.Du, D.Wang // Satellite Navigation. – 2023. – Vol. 4, No. 5. DOI: 10.1186/s43020-023-00095-5.
5. 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.
6. Інтеграція ГІС, ДЗЗ і ГНСС в моніторингу геосистем : силабус навчальної дисципліни ; Національний університет біоресурсів і природокористування України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u414/24_25_syl_integracia_gis_dzz_gnss_0.pdf.
7. Побігайло Д.П. Сучасні методи покращення точності GPS-позиціонування / Д.П. Побігайло, С.С. Ісков // Технічна інженерія. – 2024. – № 1 (93). – С. 415–419. DOI: 10.26642/ten-2024-1(93)-415-419.
8. Shumakov F.T. Suputnykova heodeziia : konspekt leksi / F.T. Shumakov. – Kharkiv : KhNAMH, 2009. – 88 p.
9. Васишин В. Використання референтних GNSS-станцій мережі ZAKPOS для підвищення точності координатних визначень : кваліфікаційна робота / В.Васишин. – Львів : Львівський національний аграрний університет, 2020. – 45 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://repository.lnau.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/1894/Васишин%20bach.pdf>.

10. 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.

References:

1. 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.
2. Dolgikh, O., Dolgikh, L., Ilezov, K. and Maletskii, N. (2021), «The use of the construction with a digital camera and GPS receiver while researching dangerous areas», *E3S Web of Conferences*, Vol. 280, doi: 10.1051/e3sconf/202128008009.
3. 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/370322569>
4. Huang, G., Du, S. and Wang, D. (2023), «GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review», *Satellite Navigation*, Vol. 4, No. 5, doi: 10.1186/s43020-023-00095-5.
5. 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.
6. *Intehratsiia HIS, DZZ i HNSS v monitorynhu heosystem*, sylabus navchalnoi dystsypliny, Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy, [Online], available at: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u414/24_25_syl_integracia_gis_dzz_gnss_0.pdf
7. Pobihailo, D.P. and Iskov, S.S. (2024), «Suchasni metody pokrashchennia tochnosti GPS-pozytsionuvannia», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (93), pp. 415–419, doi: 10.26642/ten-2024-1(93)-415-419.
8. Shumakov, F.T. (2009), *Suputnykova heodeziia*, konspekt leksii, KhNAMH, Kharkiv, 88 p.
9. Vasylyshyn, V. (2020), *Vykorystannia referentnykh GNSS-stantsii merezhi ZAKPOS dlia pidvyshchennia tochnosti koordynatnykh vyznachen*, kvalifikatsiina robota, Lvivskiy natsionalnyi ahrarniy universytet, Lviv, [Online], available at: <https://repository.lnau.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/1894/Василишин%20bach.pdf>
10. 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.

Коробійчук Валентин Вацлавович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. М.Т. Бакка Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-1576-4025>.

Наукові інтереси:

- видобуток та обробка природного каменю.
- гірництво;

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.

Korobiichuk V.V., Mitchenko D.V.

Determination of the actual accuracy of GNSS positioning using a total station for monitoring landslide processes

The aim of the study is to determine the actual accuracy of GNSS positioning using a total station in existing landslide zones. The article presents an assessment of the actual GNSS positioning accuracy by comparing its results with data obtained from a total station. The research is conducted in the context of monitoring landslide-prone areas, where coordinate accuracy is critically important to prevent emergency situations. The study considers the main factors influencing GNSS measurement accuracy, including geodetic conditions, types of receivers used, presence of obstructions, and software characteristics.

To practically validate the methodology, experimental studies were conducted in which the coordinates of control points were determined using both a GNSS receiver and a total station, which provides high-precision measurements. For the acquisition of raw satellite data, a Leica GS18T GNSS receiver was used. The measurement duration at each control point was 90 minutes. A Topcon ES-105 total station was used to perform coordinate-based surveys at all initially selected control points. To determine the average result using the total station, measurements were conducted three times on separate days.

Based on the collected data, an analysis of GNSS positioning errors, their variability, and stability was performed. The research results allow for the evaluation of GNSS technology usability in complex conditions and the improvement of landslide monitoring methods. The study shows that control points with decimeter-range results were located near dense tree coverage, power lines, communication lines, and buildings, which contributed to signal obstructions and caused multipath errors. Therefore, it is recommended to use a total station in all areas where obstructions are likely, to eliminate errors caused by a limited number of visible satellites and to achieve high measurement accuracy.

The proposed approach can be used to enhance the accuracy and reliability of geodetic observations, which is crucial for engineering-geological monitoring and forecasting of hazardous geodynamic phenomena.

Keywords: high-precision positioning; coordinate accuracy; geodynamic processes; deformation monitoring; mine surveying control; geoinformation systems.

Стаття надійшла до редакції 17.04.2025.