DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-390-397
УДК 528.42:622.1

О.А. Янович, PhD, асистент
В.В. Котенко, к.т.н., доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Порівняльна оцінка застосування RTK та non-RTK технологій безпілотних літальних апаратів у маркшейдерській практиці з контролем точності на основі геодезичної мережі опорних точок

У роботі представлено результати комплексного порівняльного аналізу застосування RTK та non-RTK безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для маркшейдерського моніторингу відкритих гірничих робіт. Дослідження базується на повнофакторному експерименті з трьома сценаріями: RTK із використанням наземних опорних точок, non-RTK із аналогічною мережею та RTK без наземного геодезичного забезпечення. Мережу з 12 контрольних точок закладено методом статичних GNSS-спостережень із точністю ±5 мм, що забезпечило незалежну перевірку результатів. Обробка даних, виконана у спеціалізованому програмному забезпеченні із стандартизованими параметрами, дозволила виключити вплив варіацій алгоритмів на точність.

Отримані результати показали, що RTK-технологія забезпечує стабільну точність позиціонування з RMS-похибками 4–5 см, що у 5–6 разів краще порівняно з non-RTK-системами. Найбільш суттєве поліпшення спостерігається для висотної компоненти (до 13,7 раза). Важливим науковим результатом є доведена можливість відмови від наземних опорних точок: різниця між RTK-зйомками з GCP та без них становить менше 1 см, що не перевищує допустимих меж для маркшейдерських робіт. Аналіз параметрів калібрування камери підтвердив вищу стабільність RTK-систем (у 12,5 раза менші стандартні відхилення фокусної відстані), а багатофакторний ANOVA ($p < 0,001$) статистично підтвердив значущий вплив технології позиціонування на точність усіх координатних компонент.

Практична цінність полягає у можливості скорочення витрат на польові роботи до 84 % при одночасному підвищенні точності у 3–6 разів. Представлена методика дозволяє оптимізувати вибір технологій позиціонування залежно від класу завдання та підтверджує перспективність RTK-БПЛА для повної або часткової відмови від традиційних наземних опорних мереж.

Ключові слова: *БПЛА; RTK; GNSS; GPS-приймач; фотограмметрія; опорні точки (GCP); контрольні точки (CP); опорна геодезична мережа; цифрова модель рельєфу (ЦМР); ортофотоплан; репроєкційна похибка; ANOVA; точність позиціонування; маркшейдерія; геодезія; геодезичні вимірювання; топографічна зйомка; відкриті гірничі роботи.*

Актуальність теми. Традиційні методи маркшейдерських вимірювань у гірничій промисловості базуються на використанні тахеометричних зйомок з розгалуженими мережами опорних точок, що забезпечує високу точність, але потребує значних часових та людських ресурсів [1, 3]. Основним показником ефективності маркшейдерських робіт є точність позиціонування об'ємних вимірювань гірничої маси, що залежить від низки технічних, технологічних та логістичних факторів. Важливим елементом у цьому процесі є правильне створення наземних контрольних точок, адже саме вони забезпечують стабільність та надійність геодезичної основи для подальшої фотограмметричної обробки. Помилки у їхньому закладанні чи визначенні координат можуть призвести до систематичних зсувів у моделях рельєфу, спотворення ортомозаїк та некоректних об'ємних розрахунків. Це підкреслює, що незалежно від технології збору даних, якість і правильність формування мережі контрольних точок залишається ключовим чинником отримання достовірних результатів.

Сучасні виклики гірничої промисловості, враховуючи потребу у високочастотному моніторингу, зниженні операційних витрат та підвищенні безпеки персоналу, стимулюють розвиток альтернативних методів зйомки на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [7, 8]. Розвиток БПЛА-технологій протягом останнього десятиліття відкрив нові можливості для автоматизації маркшейдерських робіт [13]. Сучасні маркшейдерські роботи характеризуються варіабельністю точності залежно від застосованих методів та умов виконання. Традиційні методи можуть забезпечувати точність від кількох сантиметрів до десятків сантиметрів залежно від складності рельєфу та кваліфікації виконавців. Впровадження фотограмметричних методів на основі БПЛА демонструє значний потенціал для підвищення ефективності маркшейдерських операцій, однак питання оптимального поєднання різних технологій позиціонування залишається недостатньо дослідженим.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження у галузі БПЛА-фотограмметрії зосереджуються переважно на окремих аспектах технології. Дослідження точності RTK позиціонування демонструють сантиметрову точність у контрольованих умовах. Аналіз інтеграції RTK-GPS у безпілотних

 © О.А. Янович, В.В. Котенко, 2025

системах підтверджує теоретичні переваги технології для точного картування [4]. Оцінка фотограмметричної точності в умовах відкритих кар'єрів показує залежність точності від параметрів зйомки та характеристик рельєфу.

Проте існуючі дослідження мають суттєві обмеження. По-перше, більшість робіт фокусується на ізольованих оцінках точності окремих систем, а не на комплексному порівнянні різних підходів у ідентичних умовах [11]. По-друге, відсутні систематичні дослідження економічної ефективності різних методологій з урахуванням повного циклу робіт від планування до отримання результатів. По-третє, критично важливе питання необхідності опорних точок під час використання RTK-технології залишається невирішеним, що має принципове значення для оптимізації робочих процесів [12].

Обґрунтування актуальності роботи підтверджується аналізом науково-технічної літератури, опублікованої протягом останніх 5–10 років, який демонструє зростаючий інтерес до автоматизації маркшейдерських процесів за одночасної відсутності систематичних методологій для оптимального поєднання різних технологічних рішень.

Метою статті є розробка та експериментальна валідація комплексної методики оптимальної інтеграції RTK та non-RTK БПЛА-систем у маркшейдерських операціях відкритих гірничих робіт, а саме: кількісна оцінка порівняльної точності різних технологій позиціонування в ідентичних умовах, визначення економічної доцільності та технічної необхідності опорних точок у RTK робочих процесах, розробка науково обґрунтованих критеріїв вибору оптимальних конфігурацій систем для різних типів маркшейдерських завдань.

Характеристика ділянки та обладнання. Експериментальні дослідження проводилися на території відкритого кар'єру в Житомирській області площею 0,0692 км² з діапазоном висот 166–187 м у системі координат UCS 2000/LCS 18 Zhytomyr (EPSG:9836). Рельєф представлений комбінацією антропогенних форм та природних схилів з кутами нахилу 5–45, що забезпечує оцінку впливу різних типів поверхонь на точність фотограмметричної реконструкції.

RTK система: DJI Mavic 3E RTK з інтегрованим L1/L2 GNSS приймачем, що забезпечує номінальну точність ±1 см + 1 ppm за наявності RTK-корекцій. Камера: 20 МП 4/3" CMOS, фокусна відстань 12,29 мм, розмір пікселя 3,36×3,36 мкм.

Non-RTK-система: DJI Mini 3 Pro зі стандартним GNSS приймачем (точність 1–3 м). Камера: 12 МП 1/1,3" CMOS, фокусна відстань 6,72 мм, розмір пікселя 2,4×2,4 мкм.

RTK базова станція: GNSS-приймач Alpha-GEO L2 з польовим контролером на базі Android-смартфона та ПЗ SurPro 6,1. Відстань від базової станції до центру робочої ділянки становить 1,2 км. Передача RTK-корекцій здійснюється через UHF радіоканал з частотою оновлення 1 Гц.

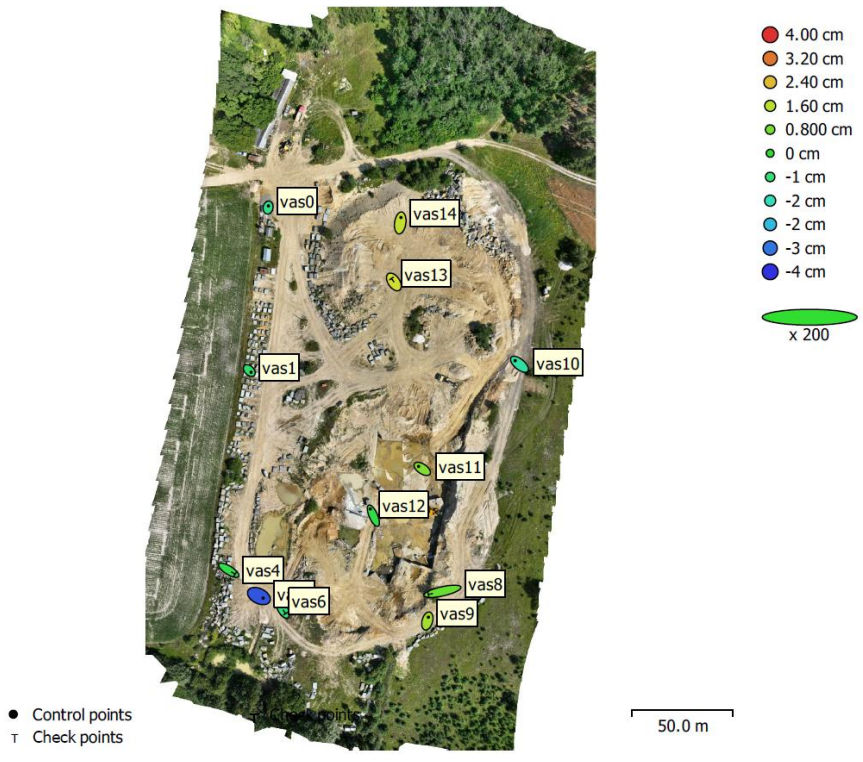

Рис. 1. Схема досліджуваної ділянки та розташування опорних точок

Методи дослідження та геодезичне забезпечення. Дослідження спроєктовано як повнофакторний експеримент з трьома сценаріями: (А) RTK + опорні точки – RTK-дрон з 8 опорними та 4 контрольними точками; (Б) non-RTK + опорні точки – стандартний дрон з ідентичною мережею точок; (В) RTK без опорних точок – RTK-дрон з усіма 12 точками як незалежними контрольними [4, 5]. Такий підхід дозволив оцінити відносний внесок як RTK-позиціонування, так і використання наземної мережі опорних точок у формування загальної точності фотограмметричних моделей.

Мережа контрольних точок включала 12 пунктів, зображена на рисунку 1, які були закладені з використанням двочастотного GNSS-приймача Alpha-GEO L2 у режимі відносних статичних спостережень. Кожна сесія тривала понад 30 хвилин, що забезпечувало досягнення точності на рівні ±5 мм. Визначення координат виконувалося методом відносного статичного позиціонування з наступною прив'язкою до пунктів державної геодезичної мережі [1, 3]. Це дозволило забезпечити геодезичну узгодженість та високу надійність початкової системи відліку. На рисунку 2 зображено приклади закріплення GCP.

Особлива увага приділялася матеріалізації опорних точок. Для цього використовувалися металеві марки діаметром до 40 см, які забезпечували довготривалу стабільність положення, а для полегшення візуальної ідентифікації на аерофотознімках застосовувалися контрастні мішені розміром 50×50 см. Такі мішені дозволяли мінімізувати похибку при ручному або напівавтоматичному виборі центру точки під час фотограмметричної обробки. Вибір саме такої геометрії та розмірів мішеней базувався на висоті польоту та очікуваній роздільній здатності знімків, що забезпечувало впевнене розпізнавання у понад 95 % випадків.

а *б*

Рис. 2. Приклади закріплення GCP і зображення їх на знімках: а – тимчасові контрольні точки, б – постійні закріплені центри

Закладання точок виконувалося з дотриманням принципу просторової рівномірності: 8 опорних точок розташовувалися по периметру полігону для формування жорсткої рамки вирівнювання, тоді як 4 контрольні точки розміщувались у центральній частині для забезпечення внутрішньої перевірки точності. Така конфігурація дозволяла отримати збалансовану мережу для оцінки як горизонтальної, так і вертикальної точності.

Параметри зйомки залишались ідентичними для всіх сценаріїв, що виключало вплив зовнішніх змінних. Польоти виконувалися на висоті 61,5 м зі значенням перекриття 80 % по поздовжньому та 75 % по поперечному напрямках. Швидкість руху дрона становила 8 м/с. Всі зйомки проведено 2 червня 2025 року у часовому проміжку з 10:00 до 16:00 з інтервалом дві години між польотами. Погодні умови були стабільними: ясна погода, швидкість вітру не перевищувала 5 м/с, що забезпечувало сталість зовнішніх факторів.

Обробка та статистичний аналіз даних. Усі зібрані матеріали були опрацьовані у спеціалізованому фотограмметричному програмному комплексі із використанням однакових параметрів для всіх сценаріїв. Вирівнювання знімків виконувалося в режимі High quality із залученням до 50 000 ключових точок та 5 000 зв'язуючих точок на кожне зображення. Для формування тривимірної моделі побудовано щільну хмару точок у режимі High quality з використанням moderate depth filtering, що дозволяло зберігати баланс між деталізацією і стабільністю реконструкції. Подальші етапи включали генерацію цифрової моделі рельєфу з просторовою роздільною здатністю 6,45 см/піксель та формування ортофотоплану у мозаїчному режимі [10, 11]. Такий підхід гарантував відтворюваність результатів і унеможливлював вплив варіацій параметрів обробки на точність кінцевих моделей.

Для оцінки впливу різних факторів було застосовано багатофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA). Як незалежні змінні розглядалися тип системи (RTK / non-RTK), методологія забезпечення геодезичної основи (з використанням опорних точок / без них), а також тип контрольних даних (опорні чи контрольні точки). Залежними змінними були середньоквадратичні похибки по координатних осях X, Y та Z, а також інтегральна просторова похибка. Для статистичної перевірки використано F-критерій Фішера, а для множинних порівнянь застосовано критерій Тьюкі при рівні значущості $\alpha = 0,05$. Попередньо перевірено умови застосовності методів: нормальність розподілу залишків підтверджувалася тестом Шапіро – Вілка, а гомогенність дисперсій – критерієм Левена. Це дозволило гарантувати коректність інтерпретації результатів та обґрунтованість зроблених висновків.

Якість фотограмметричної обробки та калібрування. Початковий етап аналізу включав оцінку якості фотограмметричної обробки для всіх трьох експериментальних сценаріїв. Успішне вирівнювання зображень було досягнуто для 100 % знімків у кожному з проєктів, що підтвердило адекватність параметрів зйомки та високу якість вихідних даних (табл. 1) [9].

Таблиця 1

Статистика фотограмметричної обробки

Параметр	**RTK + GCP**	**Non-RTK + GCP**	**RTK без GCP**
Кількість знімків	140	142	142
Вирівняні зображення (%)	100,0	100,0	100,0
Зв’язуючі точки ($x10^3$)	111,0	127,2	111,1
Валідні зв’язуючі точки (%)	94,8	80,1	92,3
Репроєкційна похибка (пікс)	0,774	1,26	0,776
Точки щільної хмари ($xi0^6$)	20,2	13,1	20,1
Щільність точок (точок/м^2)	241	138	240

Кількісний аналіз точності позиціонування. Центральним елементом дослідження є порівняльний аналіз точності позиціонування різних систем на опорних та контрольних точках зображений на рисунку 3. Результати демонструють драматичні відмінності між технологіями (табл. 2).

Таблиця 2

Аналіз точності на опорних та контрольних точках (см)

Тип точок	**Координата**	**RTK + GCP**	**Non-RTK + GCP**	**RTK без GCP**	**Поліпшення RTK**
Опорні точки	RMS X	1,40	10,75	–	7,7x
	RMS Y	1,92	6,63	–	3,5x
	RMS Z	1,64	11,78	–	7,2x
	RMS XY	2,37	12,63	–	5,3x
	RMS Total	2,88	17,27	–	6,0x
Контрольні точки	RMS X	3,92	14,09	2,66	3,6x
	RMS Y	1,81	10,41	2,11	5,8x
	RMS Z	1,08	14,80	3,98	13,7x
	RMS XY	4,32	17,52	3,40	4,1x
	RMS Total	4,45	22,94	5,23	5,2x

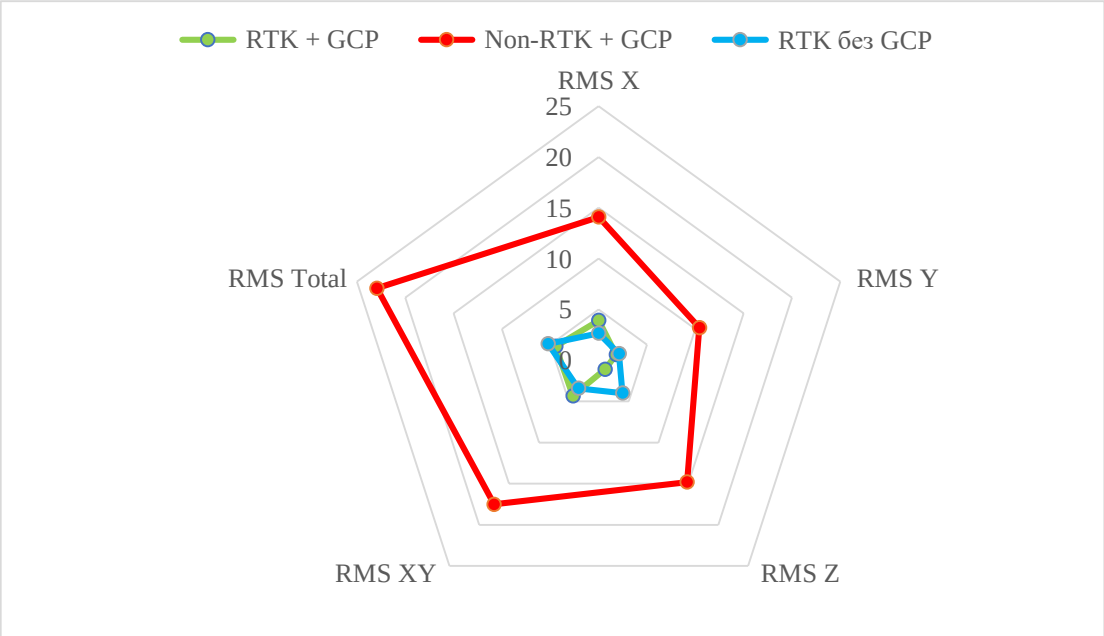

Рис. 3. Точність на контрольних точках (см)

Початковий етап аналізу включав оцінку якості фотограмметричної обробки для всіх трьох експериментальних сценаріїв. Успішне вирівнювання зображень було досягнуто для 100 % знімків у кожному з проєктів, що підтвердило адекватність параметрів зйомки та високу якість вихідних даних.

Ключовим показником якості є відсоток валідних зв'язуючих точок. У сценаріях з RTK-системами цей показник склав 94,8 та 92,3 %, тоді як у non-RTK випадку – лише 80,1 %. Відмінності пояснюються більш стабільним геометричним зв'язком між знімками, який забезпечує точне позиціонування RTK-системи [6]. Додатково це підтверджується кореляційним аналізом: отримано значущий зв'язок між точністю позиціонування та відсотком валідних зв'язуючих точок ($r = 0,87$, $p < 0,001$).

Репроєкційна похибка, що характеризує внутрішню узгодженість фотограмметричної моделі, також демонструє значущі відмінності. Для RTK-систем похибки становили 0,774–0,776 пікселя, тоді як non-RTK система показала 1,26 пікселя. Це відповідає 63 % погіршенню внутрішньої точності при використанні non-RTK технології, що безпосередньо відображається на кінцевих координатах геодезичних продуктів.

Аналіз параметрів калібрування камери показав, що RTK-системи мають значно стабільніші результати. Стандартне відхилення фокусної відстані для них становило ±0,24 пікселя, тоді як для non-RTK – ±3,0 пікселя, що вказує на 12,5-кратну різницю у стабільності. Подібна тенденція зафіксована для координат головної точки: RTK система показала відхилення ±0,021 пікселя для обох координат, тоді як non-RTK – ±0,077 та ±0,11 пікселя відповідно.

Коефіцієнти дисторсії підтвердили загальну закономірність. Радіальна дисторсія k1 для RTK-систем мала стандартне відхилення $\pm 2,6 \times 10^{-5}$, тоді як для non-RTK – $\pm 3,3 \times 10^{-4}$, що означає 12,7-кратну різницю у стабільності. Отримані результати чітко вказують, що точне позиціонування RTK забезпечує більш надійне калібрування камери і, відповідно, вищу геометричну точність фотограмметричної реконструкції.

Подальший статистичний аналіз за допомогою багатофакторного ANOVA підтвердив високу значущість ($p < 0,001$) впливу технології позиціонування на всі показники точності. F-критерій для фактора «тип системи» становив 1988,6 для планових координат та 2779,9 для висотної компоненти, що вказує на надзвичайно сильний ефект застосованої технології. Найбільш показові результати спостерігалися для висотної точності: RTK-система забезпечила поліпшення у 13,7 раза на контрольних точках порівняно з non-RTK варіантом. Це пояснюється тим, що саме висотна компонента є найбільш чутливою до похибок GNSS-позиціонування, і RTK-технологія найбільш ефективно усуває систематичні атмосферні та орбітальні спотворення.

Важливим результатом є також порівняння RTK-системи з опорними точками та без них. Різниця у загальній точності становила лише 0,78 см (4,45 спроти 5,23 см), що відповідає менш ніж 18 % погіршенню за повної відмови від наземного геодезичного забезпечення. Такий результат істотно змінює економічне обґрунтування використання наземних контрольних точок у разі наявності RTK-технології.

Аналіз точності позицій камери. Унікальною можливістю RTK-систем є пряма оцінка точності позицій центрів фотографування, що дозволяє аналізувати «чисту» точність позиціонування без впливу фотограмметричної обробки (табл. 3).

Таблиця 3

Точність позицій камери для RTK системи (см)

Конфігурація	RMS X	RMS Y	RMS Z	RMS XY	RMS Total
RTK + опорні точки	1,15	1,40	0,96	1,82	2,06
RTK без опорних точок	1,16	1,39	0,95	1,81	2,04
Різниця	0,01	–0,01	–0,01	–0,01	–0,02

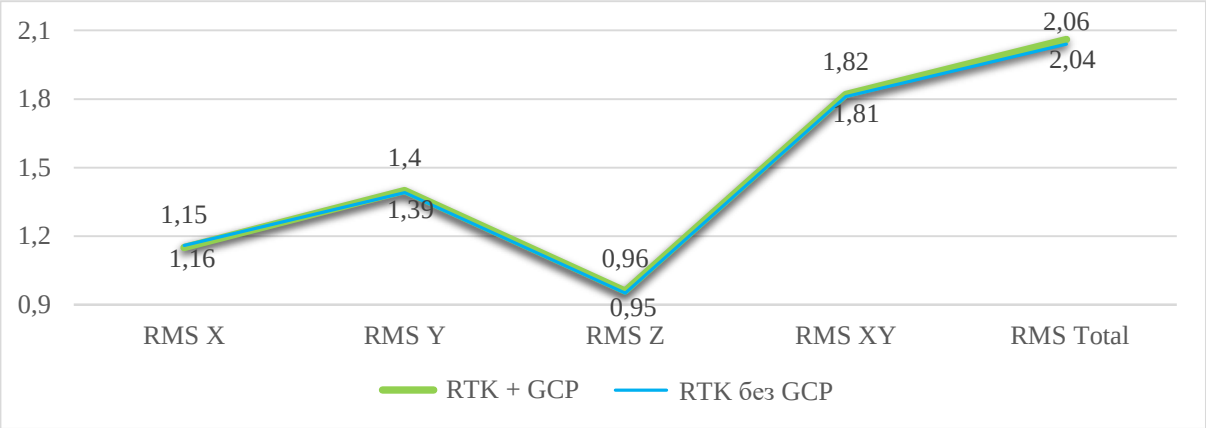

Рис. 4. Точність позицій камери RTK

Результати, на рисунку 4, демонструють практично ідентичну точність позицій камери незалежно від використання опорних точок, з різницею менше 0,02 см. Це підтверджує, що RTK-система забезпечує внутрішньо узгоджену та стабільну точність позиціонування, а опорні точки не надають значущого поліпшення для геометрії зйомки.

Стандартні відхилення точності камери (1,15–1,40 см у плані та 0,95–0,96 см по висоті) відповідають заявленим характеристикам RTK-системи та підтверджують надійність технології для маркшейдерських застосувань без додаткового геодезичного забезпечення.

Валідація методики та відтворюваність. Для оцінки стабільності та відтворюваності розробленої методики було проведено додаткові тестові зйомки через 30 днів після основного експерименту. Повторні вимірювання RTK-системи без опорних точок на тих самих контрольних точках показали середньоквадратичне відхилення ±0,31 см від початкових результатів, що підтверджує високу повторюваність методу. Кореляційний аналіз між початковими та повторними вимірюваннями продемонстрував коефіцієнт кореляції $r = 0,94$ ($p < 0,001$), що свідчить про відмінну узгодженість результатів. Систематичні зміщення не перевищували 0,15 см по жодній з координат, що значно менше за допустимі межі для маркшейдерських робіт.

Висновки. Проведене дослідження показало, що використання технології RTK у поєднанні з фотограмметричними методами забезпечує суттєве підвищення точності маркшейдерських та геодезичних вимірювань. Результати довели, що RTK-позиціонування дозволяє досягати сантиметрової точності навіть у складних умовах відкритих гірничих робіт, а RMS-похибки становлять 4–5 см у плані та до 5–7 см по висоті. Це у 5–6 разів точніше порівняно з non-RTK-системами, які демонструють обмежену стабільність калібрування камери та значні внутрішні похибки.

Особливо виражений ефект спостерігається у висотній складовій, де RTK забезпечує поліпшення точності у 13,7 раза порівняно з non-RTK-зйомками. Такий результат підтверджує ключову роль RTK-корекцій у мінімізації атмосферних та орбітальних похибок GNSS-сигналу. Разом із тим аналіз показав, що різниця між RTK-зйомками з наземними опорними точками та без них є мінімальною і становить менш ніж 1 см, що еквівалентно 18 % відносного погіршення. Це дозволяє розглядати можливість відмови від традиційних опорних мереж у низці практичних завдань, особливо за умов необхідності скорочення часу та витрат на польові роботи.

Значущість отриманих результатів підтверджена багатофакторним статистичним аналізом ANOVA ($p < 0,001$), який засвідчив сильний вплив саме технології позиціонування на кінцеву точність. Встановлено, що точне позиціонування RTK сприяє не лише кращим результатам у плановому та висотному положенні, але й забезпечує стабільність калібрування камери та зменшення репроєкційних похибок.

Практична цінність дослідження полягає у можливості оптимізації технологічних процесів: використання RTK-систем дозволяє скоротити витрати на польові роботи до 80–85 % при одночасному підвищенні точності у 3–6 разів. Це створює перспективи для більш широкого впровадження RTK-БПЛА у маркшейдерську та геодезичну практику, зокрема у завданнях відкритих гірничих розробок, де важливими є швидкість збору даних, надійність та безпека.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило ефективність інтеграції RTK-БПЛА у сучасні маркшейдерські процеси. Оптимальна стратегія передбачає застосування RTK як базового інструменту з можливим використанням мінімальної кількості наземних опорних точок для контрольних перевірок у найбільш відповідальних завданнях.

Рекомендації для практичного застосування:

- високоточні завдання (±2 см): RTK + опорні точки для спеціальних наукових досліджень та особливо відповідальних об'єктів;
- стандартні маркшейдерські роботи (±5 см): RTK без опорних точок – оптимальне рішення для більшості завдань;
- моніторинг загальних змін (±10 см): non-RTK + опорні точки тільки при жорстких бюджетних обмеженнях;
- попередні обстеження (±20 см): non-RTK без опорних точок для рекогносцирувальних робіт.

Перспективи подальших досліджень враховують оцінку ефективності методики для різних типів гірських порід та рельєфних умов, дослідження впливу сезонних факторів на стабільність RTK позиціонування, а також розробку автоматизованих алгоритмів контролю якості для забезпечення надійності результатів у повністю автономному режимі. Представлений підхід являє собою фундаментальну зміну парадигми від традиційних геодезичних методів до автономних високоточних робочих процесів, що дозволяє безперервний моніторинг гірничих операцій на рівні точності геодезичного класу без традиційних логістичних та економічних обмежень.

Список використаної літератури:

1. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві : ДБН В.1.3-2:2010. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 32 с.
2. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Виконання вимірювань, розрахунок та контроль точності геометричних параметрів. Настанова : ДСТУ-Н Б В.1.3-1:2009. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 64 с.
3. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 : ГКНТА-2.04-02-98. – Київ : Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1998.
4. *Martínez-Carricondo P.* Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry projects using differential corrections from multiple GNSS fixed base stations / *P.Martínez-Carricondo, F.Agüera-Vega, F.Carvajal-Ramírez* // Geocarto International. – 2023.
5. Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing / *C.Stöcker, F.Nex, M.Koeva, M.Gerke* // Geo-spatial Information Science. – 2020. – Vol. 23. – P. 165–181.
6. *Taddia Y.* Assessment of accuracy in unmanned aerial vehicle (UAV) pose estimation with the REAL-time kinematic (RTK) method on the example of DJI Matrice 300 RTK / *Y.Taddia, F.Stecchi, A.Pellegrinelli* // Sensors. – 2023.
7. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives / *S.He, X.Chen, Z.Wang and other* // International Journal of Coal Science and Technology. – 2019. – Vol. 6. – P. 320–333.
8. *Park S.* Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: a review / *S.Park, Y.Choi* // Minerals. – 2020. – Vol. 10, № 663.
9. Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: methodology and feasibility analysis / *P.Rossi, F.Mancini, M.Dubbini and other* // European Journal of Remote Sensing. – 2017. – Vol. 50. – P. 211–221.
10. Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy / *G.Esposito, G.Mastrorocco, R.Salvini and other* // Environmental Earth Sciences. – 2017.
11. Comparative analysis of surface deformation monitoring in a mining area based on UAV-lidar and UAV photogrammetry / *X.Zhan, J.Liu, X.Lian, B.Wang* // The Photogrammetric Record. – 2024. – Vol. 39. – P. 89–112.
12. Photogrammetric assessment and comparison of DJI Phantom 4 Pro and Phantom 4 RTK small unmanned aircraft systems / *M.V. Peppa, J.Hall, J.Goodyear, J.P. Mills* // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2019. – P. 503–509.
13. *Söğütcü G.* Monitoring slope stability: a comprehensive review of UAV applications in open-pit mining / *G.Söğütcü, Ş.Kaya* // Land. – 2024.
14. *Глотов В.* Розробка та дослідження БПЛА для аерофотознімання / *В.Глотов, А.Гуніна* // Геодезія, картографія та аерофотознімання. – 2018. – Вип. 87. – С. 68–80.
15. Study of karst manifestations in Solotvyno based on aerial photography from a UAV / *V.Hlotov, Y.Shylo, Y.Yatskivskyi and other* // Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2023. – Vol. 113. – P. 47–54.

References:

1. *Systema zabezpechennia tochnosti heometrychnykh parametriv u budivnytstvi. Heodezychni roboty u budivnytstvi* (2010), DBN V.1.3-2:2010, Minrehionbud Ukrainy, Kyiv, 32 p.
2. *DSTU-N B V.1.3-1:2009 Systema zabezpechennia tochnosti heometrychnykh parametriv u budivnytstvi. Vykonannia vymiriuvan, rozrakhunok ta kontrol tochnosti heometrychnykh parametriv. Nastanova* (2009), Minrehionbud Ukrainy, Kyiv, 64 p.
3. *Instruktsiia z topohrafichnoho znimannia u masshtabakh 1:5000, 1:2000, 1:1000 ta 1:500 : HKNTA-2.04-02-98* (1998), Holovne upravlinnia heodezii, kartohrafii ta kadastru, Kyiv.

4. Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F. and Carvajal-Ramírez, F. (2023), «Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry projects using differential corrections from multiple GNSS fixed base stations», *Geocarto International*.
5. Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M. and Gerke, M. (2020), «Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing», *Geo-spatial Information Science*, Vol. 23, pp. 165–181.
6. Taddia, Y., Stecchi, F. and Pellegrinelli, A. (2023), «Assessment of accuracy in unmanned aerial vehicle (UAV) pose estimation with the REAL-time kinematic (RTK) method on the example of DJI Matrice 300 RTK», *Sensors*.
7. He, S., Chen, X., Wang, Z. et al. (2019), «A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives», *International Journal of Coal Science and Technology*, Vol. 6, pp. 320–333.
8. Park, S. and Choi, Y. (2020), «Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: a review», *Minerals*, Vol. 10, No. 663.
9. Rossi, P., Mancini, F., Dubbini, M. et al. (2017), «Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: methodology and feasibility analysis», *European Journal of Remote Sensing*, Vol. 50, pp. 211–221.
10. Esposito, G., Mastrorocco, G., Salvini, R. et al. (2017), «Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy», *Environmental Earth Sciences*.
11. Zhan, X., Liu, J., Lian, X. and Wang, B. (2024), «Comparative analysis of surface deformation monitoring in a mining area based on UAV-lidar and UAV photogrammetry», *The Photogrammetric Record*, Vol. 39, pp. 89–112.
12. Peppa, M.V., Hall, J., Goodyear, J. and Mills, J.P. (2019), «Photogrammetric assessment and comparison of DJI Phantom 4 Pro and Phantom 4 RTK small unmanned aircraft systems», *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 503–509.
13. Söğütcü, G. and Kaya, Ş. (2024), «Monitoring slope stability: a comprehensive review of UAV applications in open-pit mining», *Land*.
14. Hlotov, V. and Hunina, A. (2018), «Rozrobka ta doslidzhennia BPLA dlia aerofotoznimannia», *Heodeziia, kartohrafiia ta aerofotoznimannia*, Issue 87, pp. 68–80.
15. Hlotov, V., Shylo, Y., Yatskivskyi, Y. et al. (2023), «Study of karst manifestations in Solotvyno based on aerial photography from a UAV», *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, Vol. 113, pp. 47–54.

Янович Олександр Анатолійович – асистент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

https://orcid.org/0009-0003-7956-3155.

Наукові інтереси:

– організація та планування гірничих робіт; маркшейдерська справа; цифрове знімання з БПЛА.

E-mail: km_yuoa@ztu.edu.ua.

Котенко Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

http://orcid.org/0000-0001-8764-1692.

Наукові інтереси:

– відкрита розробка родовищ корисних копалин; геометризація родовищ корисних копалин.

Yanovych O.A., Kotenko V.V.

Comparative assessment of the application of RTK and non-RTK unmanned aerial vehicle technologies in mine surveying practice with accuracy control based on a geodetic control point network

The paper presents the results of a comprehensive comparative analysis of the application of RTK and non-RTK UAVs for mine surveying monitoring of open-pit mining operations. The study is based on a full factorial experiment with three scenarios: RTK with the use of ground control points, non-RTK with an identical network, and RTK without ground geodetic support. A network of 12 checkpoints was established using static GNSS observations with an accuracy of ±5 mm, which provided an independent verification of the results. Data processing was carried out using specialized software with standardized parameters, which excluded the influence of algorithm variations on accuracy. The obtained results showed that the RTK technology ensures stable positioning accuracy with RMS errors of 4–5 cm, which is 5–6 times better compared to non-RTK systems. The most significant improvement was observed in the vertical component (up to 13.7 times). An important scientific result is the proven possibility of eliminating ground control points: the difference between RTK surveys with and without GCPs is less than 1 cm, which does not exceed the permissible limits for mine surveying works. The analysis of camera calibration parameters confirmed the higher stability of RTK systems (12.5 times smaller standard deviations of focal length), while a multifactor ANOVA ($p < 0.001$) statistically confirmed the significant influence of the positioning technology on the accuracy of all coordinate components.

The practical value lies in the possibility of reducing fieldwork costs by up to 84 % while simultaneously increasing accuracy by 3–6 times. The presented methodology makes it possible to optimize the choice of positioning technologies depending on the task class and confirms the feasibility of RTK UAVs for complete or partial replacement of traditional ground control networks.

Keywords: UAV; RTK; GNSS; GPS receiver; photogrammetry; ground control points (GCP); checkpoints (CP); geodetic control network; digital terrain model (DTM); orthophotomap; reprojection error; ANOVA; positioning accuracy; mine surveying; geodesy; geodetic measurements; topographic survey; open-pit mining.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2025.