

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2026-1\(97\)-467-474](https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-467-474)
УДК 528.7:622.2

А.В. Панасюк, к.т.н., доц.
М.С. Куницька, ст. викладач
Державний університет «Житомирська політехніка»
В.О. Назаренко, д.т.н., проф.
Г.В. Бруй, к.т.н., доц.
С.В. Сахно, к.т.н., доц.
Технічний університет «Метінвест політехніка»

Інтеграція даних БПЛА-зйомки в систему геодезичного моніторингу підземних гірничих виробок

У статті розглянуто методологічні та практичні аспекти інтеграції даних безпілотної авіаційної зйомки (БПЛА-фотограмметрії) із традиційним маркшейдерським геодезичним моніторингом підземних гірничих виробок. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення оперативності та просторової щільності спостережень за деформаціями земної поверхні в умовах інтенсифікації гірничих робіт та обмежених можливостей класичних методів.

Метою дослідження є розробка комплексної методики суміщення поверхневих цифрових моделей рельєфу (ЦМР), отриманих засобами БПЛА, із підземними інструментальними спостереженнями у єдиній системі координат УСК-2000.

Методи дослідження включають геопросторову прив'язку хмар точок, отриманих у різні періоди спостережень, їх узгодження в єдиній системі координат та подальше зіставлення для кількісної оцінки осідання земної поверхні над діючими очисними вибоями.

Наведено результати апробації методики на прикладі шахтного поля, де середньоквадратична похибка інтегрованого рішення не перевищувала ± 23 мм по висоті, що відповідає нормативним вимогам до маркшейдерських знімків. Показано, що застосування інтегрованого підходу дозволяє скоротити час польових робіт на 60–70 %, підвищити частоту спостережень та забезпечити дистанційний контроль небезпечних зон.

Запропонована методика може бути впроваджена у систему геодезичного забезпечення гірничих підприємств. Отримані результати доцільно використовувати для вдосконалення систем моніторингу деформацій земної поверхні.

Ключові слова: БПЛА-фотограмметрія; маркшейдерський моніторинг; осідання земної поверхні; цифрова модель рельєфу; УСК-2000; хмара точок; підземні гірничі виробки; геодезичний контроль.

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток підземного видобутку корисних копалин в Україні супроводжується підвищеними вимогами до геодезичного моніторингу зсувів та деформацій земної поверхні. Традиційні маркшейдерські методи, засновані на нівелюванні та тахеометричних зніманнях, забезпечують необхідну точність, проте характеризуються значними витратами часу, обмеженою просторовою щільністю спостережень і підвищеним ризиком для персоналу в зонах потенційного обвалу [1].

Стрімкий розвиток технологій безпілотної авіаційних систем (БАС) та фотограмметричної обробки даних відкрив нові можливості для дистанційного зондування земної поверхні. Сучасні БПЛА мультироторного та літакового типу забезпечують виконання аерофотознімання з просторовою роздільною здатністю до 1–2 см/піксель, що є достатнім для моніторингу деформаційних процесів за умов належної геодезичної прив'язки. Водночас залишається невирішеним питання методологічної сумісності даних, отриманих дистанційними методами, із маркшейдерськими підземними спостереженнями. Відсутність уніфікованих алгоритмів геопросторової інтеграції різнорідних даних у єдиній системі координат є суттєвим обмеженням для широкого впровадження БПЛА-технологій у гірничій промисловості України [2].

Отже, **актуальність цієї теми** є очевидною.

Метою дослідження є розробка та апробація методики інтеграції даних БПЛА-фотограмметрії з системою геодезичного моніторингу підземних гірничих виробок в єдиній системі координат УСК-2000.

Завдання дослідження:

- аналіз існуючих підходів до геодезичного моніторингу деформацій поверхні над підземними виробками;
- розробка схеми геодезичної прив'язки БПЛА-зйомки до мережі маркшейдерських реперів;
- створення алгоритму зіставлення мультитемпоральних хмар точок;
- апробація методики та оцінка точності інтегрованого рішення;
- розробка рекомендацій щодо впровадження методики відповідно до вимог ДКЗУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання геодезичного моніторингу земної поверхні над підземними гірничими виробками розглядалися у роботах численних вітчизняних і зарубіжних дослідників. У практиці геодезичного моніторингу прийнято враховувати вимоги до просторової щільності спостережних ліній і точності визначення зсувів у трьох координатних площинах [3].

Застосування класичних методів нівелювання для оцінки осідання земної поверхні детально висвітлено в наукових працях, у яких показано, що ці методи забезпечують високу точність визначення вертикальних зміщень на рівні $\pm 2-5$ мм при використанні нівелірів II класу [4-6]. Водночас їх застосування пов'язане зі значними витратами часу та праці, а також обмеженою просторовою щільністю спостережень.

З розвитком технологій лазерного сканування та БПЛА-фотограмметрії спостерігається розширення можливостей дослідження деформаційних процесів земної поверхні. За даними зарубіжних досліджень, використання БПЛА дозволяє отримувати цифрові моделі рельєфу з точністю на рівні 2-5 см за стандартних умов аерофотознімання [7]. Підвищення точності до 1-2 см досягається за рахунок оптимального розміщення наземних контрольних точок (GCP) та коректної геодезичної прив'язки.

Існуючі підходи до інтеграції даних БПЛА з маркшейдерськими спостереженнями не забезпечують повного алгоритму взаємодії поверхневих і підземних спостережень у єдиній системі координат, зокрема в частині їх узгодження та аналізу, що зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Методи дослідження. Запропонована методика базується на триетапному підході до інтеграції різнорідних геодезичних даних (рис. 1):

- створення єдиної маркшейдерської опорної мережі на земній поверхні в системі координат УСК-2000 з передачею координат і висот у підземні виробки через шахтні стволи;
- виконання аерофотознімання із застосуванням БПЛА з прив'язкою до пунктів опорної мережі та побудовою геоприв'язаних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) поверхні;
- математичне зіставлення цифрових моделей рельєфу різних епох спостережень і їх порівняння з підземними маркшейдерськими даними в єдиній системі координат.



Рис. 1. Загальна схема інтеграції даних БПЛА-зйомки з підземним маркшейдерським моніторингом

Геодезична опорна мережа для БПЛА-зйомки закладається у вигляді спостережних рядів над зонами очікуваного осідання. Опорні пункти суміщаються з маркшейдерськими реперами, координати яких визначаються методом ГНСС RTK у системі УСК-2000 з точністю $\pm 10-15$ мм у плані та $\pm 20-25$ мм за висотою [8].

Особливістю розміщення наземних контрольних точок (GCP) при БПЛА-зйомці над гірничими підприємствами є необхідність врахування динамічного характеру деформаційних процесів [9]. Рекомендується застосування комбінованої схеми розміщення GCP: стабільні зовнішні репери (за межами зони осідання) використовуються для трансформації хмари точок, внутрішні – для контролю якості [10].

Передача координат у підземні виробки здійснюється методом гіроскопічного орієнтування або методом подвійного відвісу через шахтний ствол із точністю кутових вимірювань $\pm 30''$. Для виконання моніторингового знімання рекомендується застосування мультироторного БПЛА (DJI Matrice 300 RTK або аналог) з метричною камерою та вбудованим приймачем ГНСС RTK. Параметри польоту визначаються з умови забезпечення просторової роздільної здатності зображень $GSD \leq 3$ см/піксель (рис. 2, 3):

- висота польоту – 100–150 м над рельєфом;
- поздовжнє перекриття – 80 %;
- поперечне перекриття – 70 %;
- кількість GCP – не менше 5–8 на 1 км².

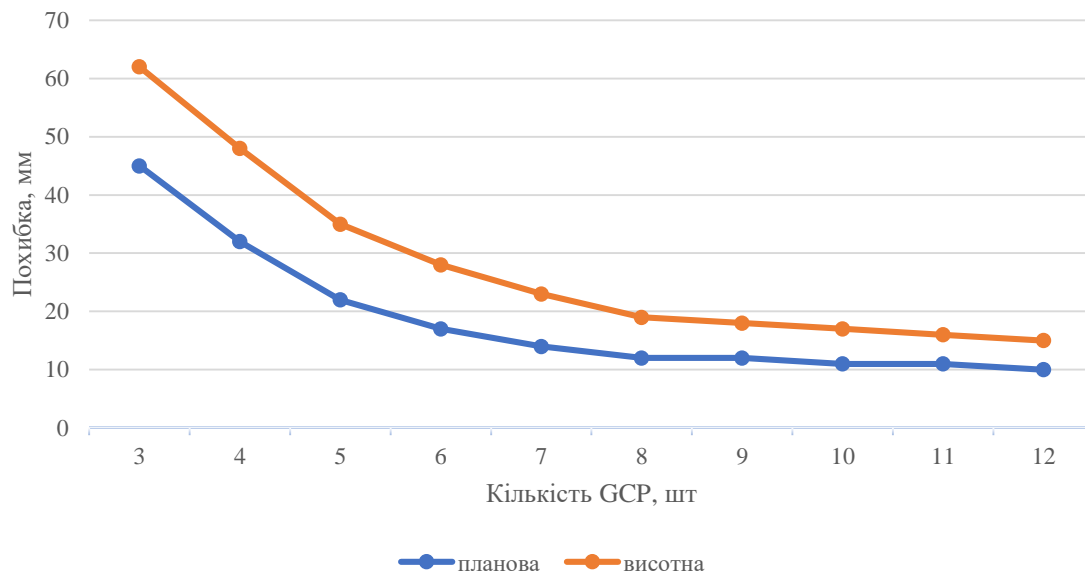


Рис. 2. Вплив параметрів зйомки на точність побудови ЦМР. Залежність похибки від кількості GCP

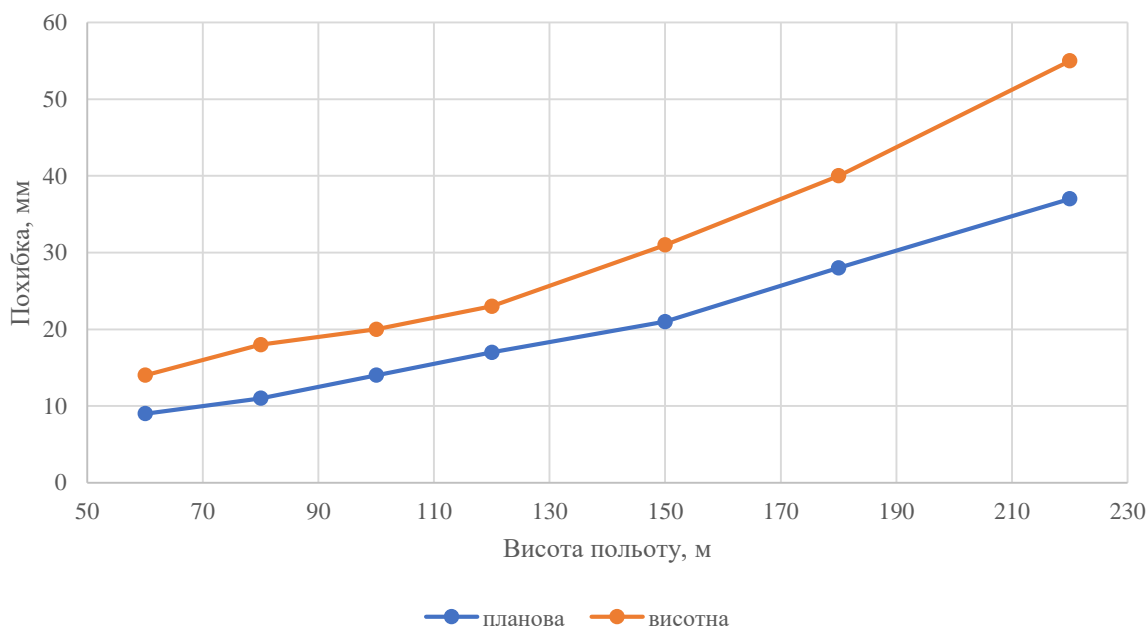


Рис. 3. Вплив параметрів зйомки на точність побудови ЦМР. Залежність похибки від висоти польоту

Фотограмметрична обробка виконується у програмному комплексі Agisoft Metashape Professional і включає формування щільної хмари точок (Dense Cloud), побудову цифрової моделі рельєфу (ЦМР) та ортофотоплану з точністю, що відповідає вимогам масштабу 1:500–1:1000.

Алгоритм порівняння ЦМР двох суміжних епох реалізується у середовищі QGIS/CloudCompare та включає такі операції:

1. Попередня реєстрація хмар точок методом ICP (Iterative Closest Point) з використанням стабільних реперних площинок;
2. Обчислення різницевої моделі (DoD – DEM of Difference) між ЦМР двох епох з усуненням систематичних похибок;
3. Фільтрація статистичних викидів методом σ -відсіювання (порогове значення – 3σ);
4. Побудова карт ізоліній рівних осідань із кроком 10–20 мм та аналіз їх відповідності теоретичним мульдам осідання;
5. Порівняння результатів БПЛА-моніторингу з інструментальними даними маркшейдерських реперів підземного ряду.

Викладення основного матеріалу. Експериментальну перевірку запропонованої методики виконано на ділянці шахтного поля площею 2,4 км², де здійснюється відпрацювання пласта потужністю 1,2 м на глибині 420 м. Для оцінки точності закладено 24 реperi у трьох зонах осідання, координати яких визначено методом нівелювання II класу.

Результати оцінки точності БПЛА-моніторингу за даними контрольних реперів наведено у таблиці 1 та на рисунку 4.

Таблиця 1

Точність БПЛА-моніторингу осідання поверхні за зонами

Зона осідання	RMSE X (мм)	RMSE Y (мм)	RMSE Z (мм)	Кількість GCP
Ділянка 1 – центр	±12	±11	±18	8
Ділянка 2 – крило	±15	±14	±22	6
Ділянка 3 – периферія	±19	±17	±28	5
Середнє	±15	±14	±23	6,3

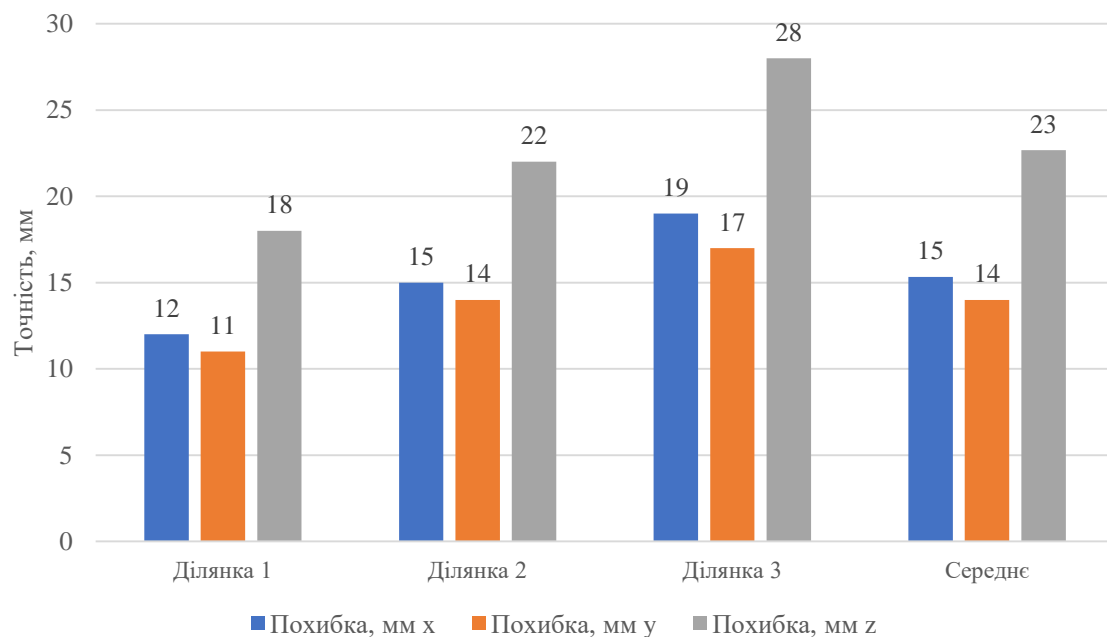


Рис. 4. Точність БПЛА-моніторингу осідання поверхні за зонами

Отримані значення RMSE по висоті в межах ± 23 мм задовольняють нормативні вимоги до I класу точності маркшейдерських знімків для масштабу 1:500 при висоті перерізу 0,5 м. Порівняно з даними традиційного нівелювання, похибка БПЛА-методу не перевищує $\pm 25\%$ від нівелірного виміру, що є прийнятним для моніторингового спостереження.

Порівняльний аналіз традиційного маркшейдерського методу, автономної БПЛА-фотограмметрії та запропонованого інтегрованого підходу виконано за ключовими параметрами ефективності (табл. 2, рис. 5).

Таблиця 2

Порівняльна характеристика методів геодезичного моніторингу

Параметр	Традиційний маркшейдерський метод	БПЛА-фотограмметрія	Інтегрований підхід
Охоплення площі	Обмежене (точкове)	До 1 км ² за політ	Комплексне, поверхня + підземне
Точність (план)	3–5 мм (теодоліт)	2–5 см (без GCP)	1–2 см (з GCP)
Час зйомки	8–24 год	1–3 год	4–8 год (комплекс)
Небезпечні ділянки	Прямий доступ потрібен	Дистанційно	Дистанційно
Моніторинг деформацій	Складний, тривалий	Мультитемпоральний	Автоматизований
Нормативна база	ДКЗУ, НПАОП	Обмежена	Потребує розробки

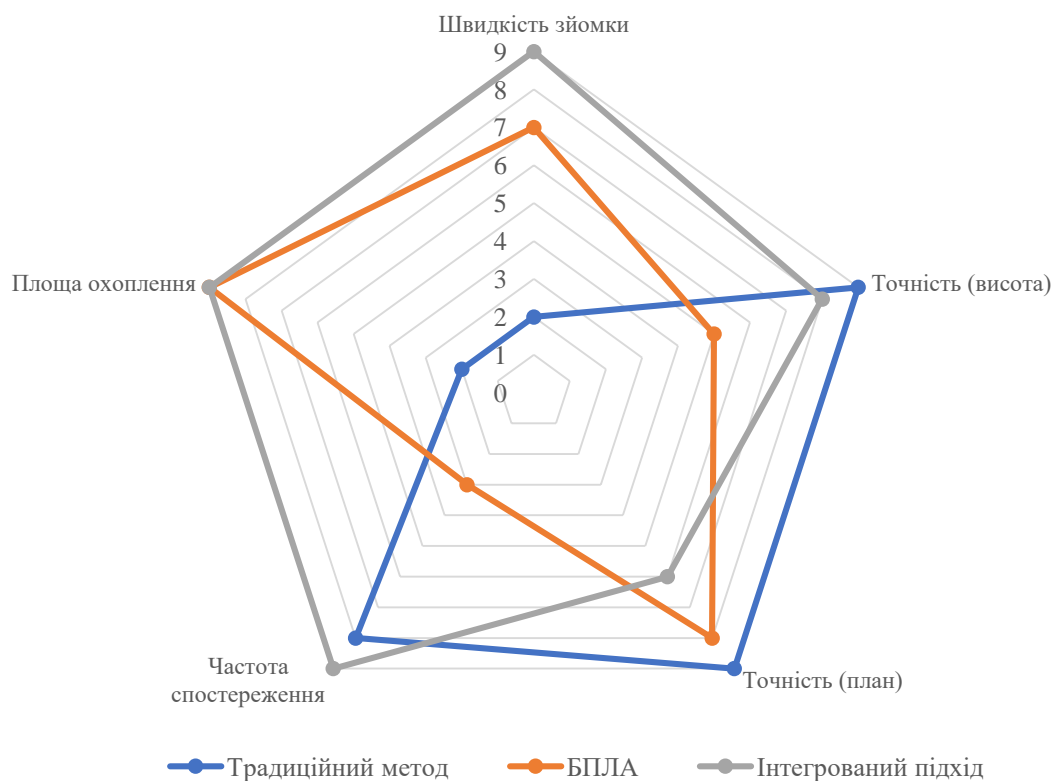


Рис. 5. Порівняльна характеристика методів геодезичного моніторингу

Аналіз даних таблиці свідчить, що інтегрований підхід поєднує переваги обох методів: висока просторова щільність спостережень, характерна для БПЛА-фотограмметрії, доповнюється метричною точністю традиційних інструментальних вимірювань на контрольних реперах. Скорочення часу польових робіт становить близько 65 % порівняно з традиційним маркшейдерським методом.

Побудовані карти ізоліній осідання демонструють чіткий кореляційний зв'язок між положенням очисного вибою та формою мульди осідання. Максимальне зафіксоване осідання в центральній частині мульди становило 312 мм, що узгоджується з теоретичними розрахунками з відносною похибкою 8,4 %.

Аналіз динаміки розвитку осідань за чотирма епохами спостережень (з інтервалом 50 діб) дозволив встановити, що швидкість активного осідання становила 2,1–3,8 мм/добу, що не перевищує допустимих значень для даного типу підробки. Залишкове осідання після завершення видобутку складало 12–15 % від максимального (рис. 6).

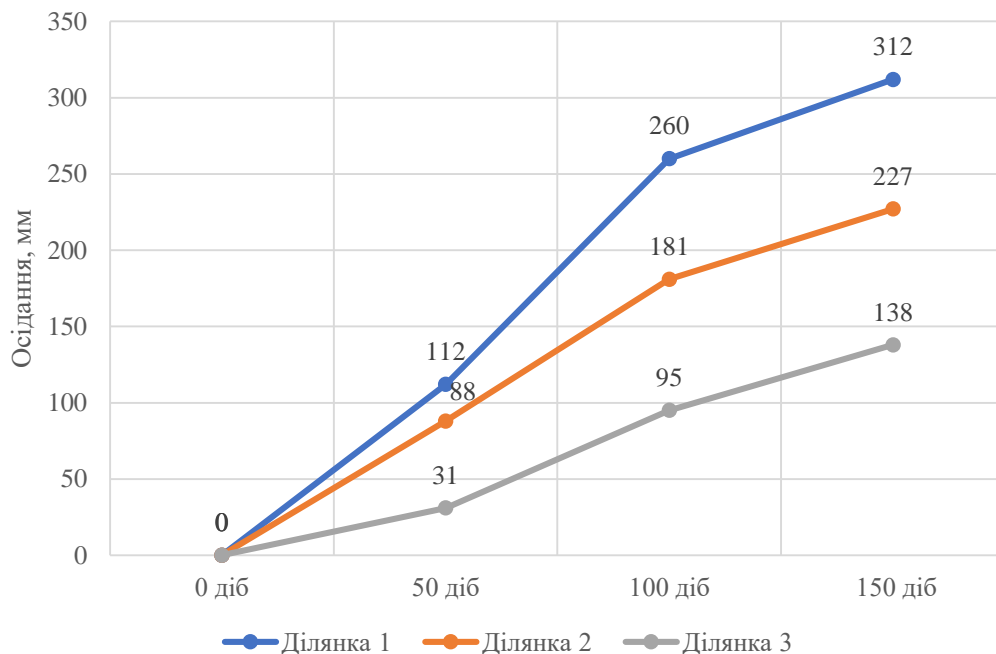


Рис. 6. Динаміка осідань за спостереженнями

Висновки та перспективи. У результаті проведеного дослідження розроблено комплексну методику інтеграції даних БПЛА-фотограмметрії з системою маркшейдерського геодезичного моніторингу підземних гірничих виробок, яка забезпечує узгодження поверхневих і підземних спостережень у єдиній системі координат УСК-2000. Запропоновано оптимальну схему геодезичної опорної мережі для БПЛА-зйомки над зонами підробки з поєднанням стабільних зовнішніх реперів і контрольних точок, що дозволяє досягти середньоквадратичної похибки цифрової моделі рельєфу на рівні ± 23 мм за висотою.

Розроблено алгоритм порівняння хмар точок, отриманих у різні періоди спостережень, для кількісної оцінки динаміки осідання земної поверхні, апробований на реальному об'єкті – шахтному полі площею 2,4 км². Встановлено, що інтегрований підхід забезпечує скорочення часу польових робіт на 60–70 % при збереженні нормативної точності спостережень, що підтверджує його економічну доцільність.

Водночас запропонована методика має ряд обмежень, які необхідно враховувати при практичному застосуванні. Зокрема, метеорологічні умови обмежують можливість виконання БПЛА-зйомки при швидкості вітру понад 10–12 м/с, наявності опадів та зниженій видимості, що впливає на регулярність спостережень. Наявність щільного рослинного покриву ускладнює побудову цифрової моделі рельєфу земної поверхні та потребує застосування алгоритмів фільтрації хмари точок. Додатковими обмеженнями є нормативна невизначеність щодо застосування БПЛА у маркшейдерському моніторингу, а також можливі обмеження використання повітряного простору в окремих гірничих регіонах.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією запропонованої методики з технологіями лазерного сканування підземних виробок (SLAM-картографування), застосуванням методів штучного інтелекту для автоматичного виявлення деформаційних аномалій, а також розробкою нормативного забезпечення застосування БПЛА-моніторингу у маркшейдерській практиці.

Список використаної літератури:

1. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом : галузевий стандарт : ДСТУ 101.00159226.001-2003. – Київ : Мінпаливенерго України, 2004. – 127 с.
2. Панасюк А.В. Обґрунтування вибору оптимального приладу БПЛА для проведення маркшейдерської зйомки / А.В. Панасюк, Д.С. Поліщук // Технічна інженерія. – 2024. – № 1 (93). – С. 420–427.
3. Маркшейдерські роботи при будівництві шахт та підземних споруд : навч. посібник / Г.О. Антупенко, Г.Ф. Гаврюк, В.О. Назаренко та ін. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – 148 с.
4. Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline / O.Bazaluk, O.Kuchyn, P.Saik and other // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13.
5. Sakhno I. Surface subsidence response to safety pillar width between reactor cavities in the underground gasification of thin coal seams / I.Sakhno, S.Sakhno, O.Vovna // Sustainability. – 2025. – Vol. 17 (6).

6. Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams / *I.Sakhno, S.Sakhno, A.Petrenko and other* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1254.
7. 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.
8. *Котенко В.В.* Обґрунтування доцільності визначення обсягів гірничої маси на основі мультикоптерної зйомки / *В.В. Котенко, М.С. Куницька* // Технічна інженерія. – 2023. – № 2 (92). – С. 234–238.
9. *Янович О.А.* Порівняльна оцінка застосування RTK та non-RTK технологій безпілотних літальних апаратів у маркшейдерській практиці з контролем точності на основі геодезичної мережі опорних точок / *О.А. Янович, В.В. Котенко* // Технічна інженерія. – 2025. – № 2 (96). – С. 390–397.
10. Використання БПЛА для удосконалення методики контролю за станом лінійних споруд / *О.В. Долгих, Л.В. Долгих, С.А. Бальязіна, Ю.І. Майборода* // Розвиток промисловості та суспільства : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Кривий Ріг : КНУ, 2018. – 97 с.

References:

1. *DSTU 101.00159226.001-2003. Pravyly pidrobky budivel, sporud i pryrodnykh ob'ektiv pry vydobuvanni vuhillia pidzemnym sposobom* (2004), haluzevyi standart, Minpalyvenerho Ukrainy, Kyiv, 127 p.
2. Panasiuk, A.V. and Polishchuk, D.S. (2024), «Obgruntuvannia vyboru optymalnoho prykladu BPLA dlia provedennia marksheiderskoi ziomky», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (93), pp. 420–427.
3. Antypenko, H.O., Havriuk, H.F., Nazarenko, V.O. et al. (2021), *Marksheiderski roboty pry budivnytstvi shakht ta pidzemnykh sporud*, navch. posibnyk, Derzhavnyi universytet «Zhytomyrska politekhnika», Zhytomyr, 148 p.
4. Bazaluk, O., Kuchyn, O., Saik, P. et al. (2023), «Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline», *Scientific Reports*, Vol. 13.
5. Sakhno, I., Sakhno, S. and Vovna, O. (2025), «Surface subsidence response to safety pillar width between reactor cavities in the underground gasification of thin coal seams», *Sustainability*, Vol. 17 (6).
6. Sakhno, I., Sakhno, S., Petrenko, A. et al. (2023), «Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams», *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1254.
7. 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.
8. Kotenko, V.V. and Kunytska, M.S. (2023), «Obgruntuvannia dotsilnosti vyznachennia obsiahiv hirnychoi masy na osnovi multykopteranoi ziomky», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (92), pp. 234–238.
9. Yanovych, O.A. and Kotenko, V.V. (2025), «Porivnialna otsinka zastosuvannia RTK ta non-RTK tekhnolohii bezpilotnykh litalnykh aparativ u marksheiderskii praktysi z kontrolem tochnosti na osnovi heodezychnoi merezhi opornykh tochok», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (96), pp. 390–397.
10. Dolhikh, O.V., Dolhikh, L.V., Baliazina, S.A. and Maiboroda, Yu.I. (2018), «Vykorystannia BPLA dlia udoskonalennia metodyky kontroliu za stanom liniinykh sporud», *Rozvytok promyslovosti ta suspilstva*, materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, KNU, Kryvyi Rih, 97 p.

Панасюк Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- дистанційне зондування землі;
- математичне моделювання;
- оцінка ресурсів.

Куницька Марина Сергіївна – старший викладач кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-2649-0939>.

Наукові інтереси:

- геодезія;
- маркшейдерська справа;
- фотограмметрія.

Назаренко Валентин Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничої справи Технічного університету «Метінвест політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-7704-9270>.

Наукові інтереси:

- зрушення та деформації гірського масиву;
- маркшейдерські прилади та технології;
- маркшейдерський супровід геобудівництва.

Бруй Ганна Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої справи Технічного університету «Метінвест політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-9527-8889>.

Наукові інтереси:

- геометризація родовищ корисних копалин;
- стійкість гірничих виробок;
- сучасні методи виконання знімальних робіт.

Сахно Світлана Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, голова циклової комісії з гірництва та електроінженерії ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-3917-9143>.

Наукові інтереси:

- геотехнічна інженерія;
- інженерна геологія;
- підземна газифікація вугілля;
- мінімізація негативних наслідків гірничих робіт на навколишнє середовище.

Panasiuk A.V., Kunytska M.S., Nazarenko V.O., Brui H.V., Sakhno S.V.

Integration of UAV survey data into the geodetic monitoring system for underground mining workings

The paper presents the methodological and practical aspects of integrating unmanned aerial vehicle (UAV) survey data (UAV photogrammetry) with traditional mine surveying geodetic monitoring of underground mining workings. The relevance of the study is determined by the need to increase the efficiency and spatial density of observations of ground surface deformation under conditions of intensified mining operations and the limitations of conventional methods.

The aim of the study is to develop a comprehensive methodology for combining surface digital terrain models (DTM) obtained from UAV surveys with underground instrumental observations within a unified coordinate system (USK-2000).

The research methods include geospatial referencing of point clouds acquired at different observation periods, their integration within a single coordinate system, and subsequent comparison for quantitative assessment of ground surface subsidence above active longwall panels.

The results of the methodology validation carried out on a mine field show that the root mean square error (RMSE) of the integrated solution does not exceed ± 23 mm in elevation, which meets the requirements for high-precision mine surveying measurements. It is shown that the proposed integrated approach reduces fieldwork time by 60–70%, increases observation frequency, and enables remote monitoring of hazardous areas.

The proposed methodology can be implemented in the geodetic support system of mining enterprises. The obtained results can be used to improve monitoring systems of ground surface deformation.

Keywords: UAV photogrammetry; mine surveying monitoring; ground surface subsidence; digital terrain model; USK-2000; point cloud; underground mining workings; geodetic monitoring.

Стаття надійшла до редакції 09.01.2026.