

Д.С. Поліщук, аспірант
А.В. Панасюк, к.т.н., доц.
С.В. Кальчук, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Оптимізація маршрутів польотів при обробці даних за допомогою програмного забезпечення Agisoft Metashape

Останні кілька років спостерігається розвиток та популяризація вимірювання дистанційним методом. Цей розвиток був спричинений розширенням людської діяльності. Оскільки гірничодобувна галузь постійно розвивається, а проєкти стають все більш складними, застосування віддаленого вимірювання найближчими роками продовжить стрімко зростати. Виконання зйомки за допомогою БПЛА все більше знаходить своє застосування в гірничій сфері. Такі технології доволі прості в своєму використанні, за допомогою яких можливо виконувати складні завдання за короткий термін часу. Метою дослідження є розробка та оцінка методики оптимізації маршрутів польотів БПЛА для збору фотограмметричних даних, що обробляються за допомогою програмного забезпечення Agisoft Metashape. Взявши до уваги зазначене, постає питання з вибору оптимального варіанта польотів БПЛА для проведення зйомки у видобувній галузі. На сьогодні не існує порівняння варіантів побудови маршруту польоту БПЛА, тому розгляд методики оптимізації маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для збору фотограмметричних даних, що обробляються у програмному забезпеченні Agisoft Metashape є актуальним. Представлені результати експериментального дослідження, яке демонструє вплив різних варіантів маршруту польоту на якість 3D-модельовання.

Дослідження має важливе значення для проведення маркшейдерських замірів на гірничовидобувних підприємствах. Оптимізація методів планування маршрутів польотів дозволяє значно підвищити точність і якість отриманих просторових даних, що безпосередньо впливає на ефективність ухвалення рішень під час проведення зйомки. Оптимізація маршрутів польотів сприяє: підвищенню ефективності збору даних, покращенню якості кінцевих результатів, зниженню впливу людського фактора, оптимізації витрат, розширенню можливостей застосування аерофотознімання.

Зважаючи на зазначене вище, буде доцільно провести дослідження з визначення оптимального варіанта проєктування маршруту польоту БПЛА під час проведення маркшейдерських робіт.

Ключові слова: фотограмметрія; безпілотні літальні апарати, Agisoft Metashape; оптимізація маршрутів; аерофотознімання; 3D-модельовання.

Актуальність теми. Сучасні технології аерофотознімання та фотограмметрії відіграють ключову роль у багатьох сферах, враховуючи картографію, геодезію, сільське господарство, екологічний моніторинг та будівництво. У цій роботі буде розглянуто використання БПЛА в геодезії, а саме під час виконання маркшейдерських робіт. Способи проведення маркшейдерської зйомки за допомогою БПЛА характеризуються дальністю та конфігурацією маршруту польоту, які визначаються метою та особливостями завдання, що стоять перед маркшейдерською службою. Маркшейдерська зйомка може проводитися як для виконання певного завдання, так і для поповнення планової документації.

Безпілотні технології як інструмент виконання інженерних завдань у галузі геодезії щільно зайняли своє місце. Підйом розвитку конструктивних новинок, зменшення розмірів та форм, комплектації, які також зазнавали змін, призвело до виникнення класифікації БПЛА, появи всіляких методик проведення вимірювань залежно від виду виконання необхідного завдання. Процес еволюції використання БПЛА торкнувся майже всіх сфер інженерної справи: від виміру лінійних об'єктів до дендрологічних досліджень лісових масивів. Таким чином, широке поширення безпілотної технології, зокрема в геодезії, не могло оминути маркшейдерську справу. [2]

Одним із найважливіших етапів аерофотознімання є оптимізація маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або пілотованих літаків, що дозволяє підвищити ефективність збору даних та зменшити витрати часу й ресурсів. Для проведення геодезичних робіт на сьогоднішній день аерофотозйомка найрентабельніший та найактуальніший спосіб геодезичних замірів.

З появою спеціалізованого програмного забезпечення, такого як Agisoft Metashape, стало можливим не лише автоматизувати процес обробки знімків, а й покращити планування маршрутів польотів. Agisoft Metashape дозволяє користувачам створювати високоточні тривимірні моделі місцевості, ортофотоплани та цифрові моделі рельєфу на основі аерофотознімків. Оптимізація маршрутів польотів у цьому контексті

є критично важливою, оскільки правильне планування дозволяє забезпечити рівномірне покриття знімків, мінімізувати кількість необхідних кадрів та скоротити витрати на виконання знімальних робіт.

Дослідження в цій галузі спрямовані на розробку та впровадження методик, що дозволяють удосконалити процес зйомки, забезпечуючи баланс між якістю отриманих даних і витратами на їхнє отримання. Оптимізація маршрутів польотів враховує різноманітні фактори, такі як рельєф місцевості, погодні умови, технічні характеристики БПЛА та вимоги до кінцевого продукту обробки [5].

Основними методами дослідження є аналіз літератури, аналіз програмного забезпечення, що використовується при обробці польових матеріалів. Теоретичною частиною роботи є дослідження праць, які пов'язані з такими напрямками роботи, як маркшейдерська зйомка за допомогою БПЛА, роботи, пов'язані з прокладанням маршрутів польоту БПЛА, вплив наявності опорних знаків на поверхні зйомки.

Використовуючи методи цифрового та математичного моделювання було проведено обробку отриманих результатів, у результаті чого можливо здійснити оцінку якісних характеристик проведення маркшейдерської зйомки. Проведені аналітичні дослідження в цій роботі показують, що пропонувані варіанти проведення маркшейдерських зйомок сприяють ефективному проведенню маркшейдерських зйомок за допомогою БПЛА.

Дослідження проводилося на родовищі з видобування бурштину в Коростенському районі, в процесі якого було виконано замір відпрацьованої гірничої маси підприємства за допомогою квадрокоптера DJI Phantom 4 та тахеометра Sokkia 550RXL. Заміри квадрокоптером було виконано для 4 варіантів по два заміри для кожного варіанта, загалом було проведено 8 замірів. Після проведення польових робіт було виконано обробку даних за допомогою AgiSoft Metashape (для DJI Phantom 4) та Civil 3D (для Sokkia 550RXL). Після чого проведено обрахунок об'ємів та аналіз отриманих результатів.

Взявши до уваги зазначене вище, можемо зробити висновок, що є доцільним проведення даного дослідження. У роботі буде розглянуто основні підходи до планування маршрутів польотів для обробки їх у програмному забезпеченні Agisoft Metashape. Особлива увага буде приділена методам підвищення ефективності аерофотознімання та забезпеченню високої якості кінцевих результатів.

Метою статті є дослідження з визначення оптимального приладу БПЛА для проведення маркшейдерських зйомок.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Наземна фотограмметрія сьогодні пропонує досить дешевий, інтуїтивно зрозумілий і ефективний підхід до 3D-моделювання. Однак важливий вибір, який БПЛА і яке програмне забезпечення використовувати, непростий і потребує розгляду, оскільки вибір буде впливати на отриману тривимірну хмару точок та її похідні.

Є дві головні переваги використання дронів у видобутку корисних копалин. По-перше, безпілотники, оснащені різними типами датчиків, можуть проводити швидку перевірку території, як у надзвичайній ситуації, так і в разі виявлення небезпеки. По-друге, огляд і розблокування заблокованих свердловин і рудопроходів можна проводити за допомогою дронів, зазначали Шахмораді та Талєбі [9].

Санчес-Соріано та Рохо-Гала проводили дослідження з оптимізації автономної навігації безпілотника з навчанням його за допомогою штучного інтелекту. Їхні дослідження стосувалися щільної міської забудови [8].

Енес Атїк та Аркалі провели дослідження з визначення впливу наявності та розташування наземних контрольних точок на точність проведення зйомки [1].

Викладення основного матеріалу. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко використовуються в різних сферах застосування завдяки їхній здатності забезпечувати швидке та точне картографування та генерувати тривимірні просторові дані. Зокрема, БПЛА стають все більш цінними в областях фотограмметрії та дистанційного зондування. Якість таких продуктів, як ортофотозйомки та цифрова модель рельєфу, створених БПЛА, значно покращується завдяки інтеграції додаткових датчиків у поєднанні з прогресом у апаратних і програмних технологіях. Позиціонування є фундаментальним компонентом просторової інформації у фотограмметрії БПЛА, що робить інтеграцію приймачів глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) важливою для максимізації оперативної ефективності. В аерофотограмметрії існує два підходи до геоприв'язки: прямий і непрямий. Пряме геоприв'язування визначає положення та орієнтацію камери за допомогою бортових систем GNSS та IMU, усуваючи залежність від наземних контрольних точок (GCP). Непрямий підхід спирається на GCP, чий позиції відомі. Це вимагає прямої взаємодії з досліджуваною областю, ретельного розміщення GCP, точного зіставлення зображення та ретельного калібрування для забезпечення точних результатів [4].

За відсутності опорних точок якість позицій камери на основі GPS суттєво впливає на точність хмар точок БПЛА, створених за допомогою прямої геоприв'язки. RTK вимагає використання спеціальних апаратних і програмних компонентів для досягнення можливостей високоточного позиціонування. Апаратне забезпечення включає приймач GNSS, який підтримує функції RTK, антену і базову станцію.

Було проведено широкий спектр досліджень для оцінки точності позиціонування в фотограмметрії БПЛА. Ці дослідження виявили різноманітні висновки щодо прямої чи непрямої геоприв'язки.

Базуючись на цих попередніх дослідженнях GCP, зрозуміло, що стратегія розподілу GCP є ефективною для підвищення точності локалізації в різних програмах картографування та зйомки з використанням повітряних або супутникових зображень. Опорні точки відіграють важливу роль у мінімізації помилок, що виникають через приймач GNSS, топографічні зміни та датчик. Оскільки маркування великої кількості GCP потребує великої праці, потрібно створити економічно ефективні рішення для визначення відповідного розподілу та кількості. З іншого боку, необхідні подальші дослідження для вивчення впливу розгортання GCP на застосування фотограмметрії на основі БПЛА у великих міських районах [3].

У цьому дослідженні виконано порівняння різних варіантів польотів БПЛА для знаходження оптимального варіанта. Для виконання порівняння було проведено замір та виконано підрахунок об'ємної ваги відпрацьованої площі родовища. Дане дослідження проводилося для 4 варіантів побудови маршруту польоту БПЛА:

- 1 варіант – 2D (одинарна сітка) з використанням наземних опорних точок (рис. 1);
- 2 варіант – 2D (одинарна сітка) без використання наземних опорних точок (рис. 1);
- 3 варіант – 3D (подвійна сітка) з використанням наземних опорних точок (рис. 2);
- 4 варіант – 3D (подвійна сітка) без використання наземних опорних точок (рис. 2).

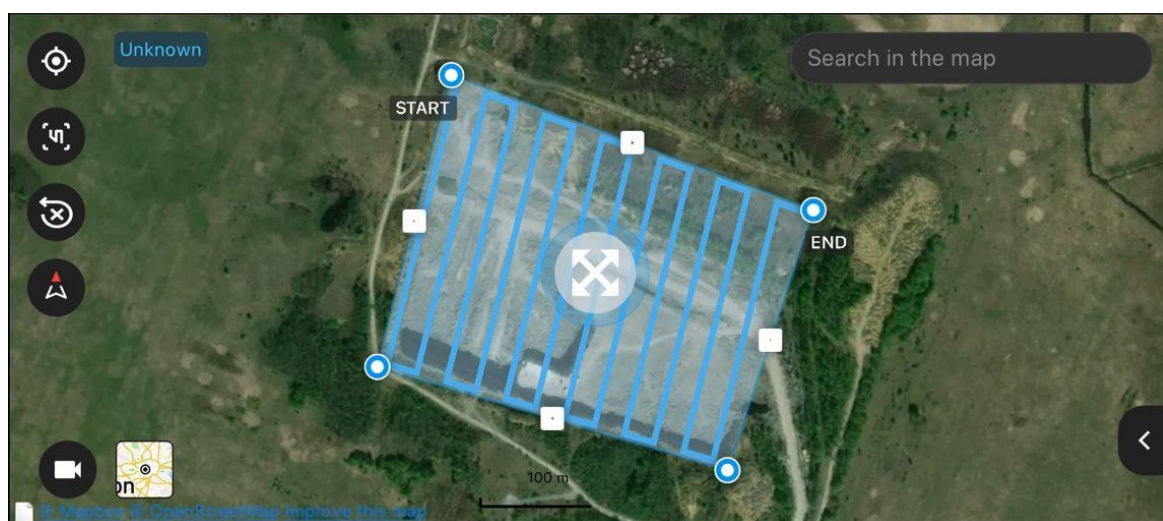


Рис. 1. Маршрут польоту БПЛА за одинарною сіткою



Рис. 2. Маршрут польоту БПЛА за подвійною сіткою

Таблиця 1

Порівняння отриманих результатів підрахунку об'єму відпрацьованої гірничої маси

	Об'єм, м ³				Civil3D (на основі тахеометричної зйомки)
	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	
Замір 1	3603	3516	3695	3641	3675
Замір 2	3591	3595	3687	3647	

Після чого для проведення контролю було виконано замір відпрацьованого простору підприємства тахеометром Sokkia 550RXL та виконано обрахунок за допомогою програмного забезпечення Civil 3D.

Для отримання результату було виконано порівняння 4 варіантів та варіанта з заміром тахеометром, результати проведення замірів внесено до таблиці 1.

В результаті проведених замірів потрібно розрахувати середнє значення для кожного варіанта, що наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Середнє арифметичне для кожного з варіантів

	Об'єм, м ³				Civil3D (на основі тахеометричної зйомки)
	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	
Середнє значення	3597	3556	3691	3644	3675

Наступним етапом визначення оптимального варіанта польоту є визначення абсолютного та відносного відхилення (%) кожного з варіантів до тахеометричної зйомки, результати наведено в таблицях 3–4 відповідно.

Таблиця 3

Абсолютне відхилення варіантів від тахеометричної зйомки

	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Відхилення, м ³	78	119	-16	31

Таблиця 4

Відносне відхилення варіантів від тахеометричної зйомки

	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Відхилення, %	2,12	3,25	0,44	0,84

За результатами розрахунків відхилень можемо зробити висновок, що варіанти 1, 3 та 4 можливі до використання під час проведення маркшейдерської зйомки за допомогою БПЛА.

Одним із основних етапів визначення є розрахунок розбіжності між першим та другим варіантами, результати розрахунку наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Розбіжність між першим та другим варіантами замірів

	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Розбіжність, м ³	12	79	8	6

Результати розбіжностей між замірами свідчать про те, що варіант 2 взагалі не можна використовувати для проведення маркшейдерських робіт. Для виконання таких робіт можемо використовувати варіанти 1, 3 та 4.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами дослідження було визначено варіант планування польотів, що впливають на проведення зйомки відпрацьованої площі гірничодобувного підприємства. Та проведено порівняння результатів обрахунку за різними варіантами планування польоту за допомогою БПЛА (1 варіант – 2D (одинарна сітка) з використанням наземних

опорних точок, 2 варіант – 2D (одинарна сітка) без використання наземних опорних точок, 3 варіант – 3D (подвійна сітка) з використанням наземних опорних точок, 4 варіант – 3D (подвійна сітка) без використання наземних опорних точок) з тахеометричною зйомкою. За результатами такого порівняння можемо зробити висновок, що 3 варіанти з 4 досліджуваних проведення зйомки можливі до використання, оскільки відхилення від еталонного значення менші ніж допустима похибка проведення даних робіт. Допустимими до використання є варіанти 1, 3 та 4. Оскільки найменша похибка під час виконання зйомки при варіанті 3 (3D (подвійна сітка) з використанням наземних опорних точок), а найменша розбіжність між замірами для 4 варіанта, тому рекомендуємо саме ці варіанти для проведення зйомки відпрацьованої площі гірничодобувного підприємства.

Список використаної літератури:

1. Atik M.E. Comparative Assessment of the Effect of Positioning Techniques and Ground Control Point Distribution Models on the Accuracy of UAV-Based Photogrammetric Production / M.E. Atik, M.Arkali, // *Drones*. – 2025. – Vol. 9. – № 15.
2. Jarahizadeh S. Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using AgiSoft Photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra / S.Jarahizadeh, B.A. Salehi // *Sensors*. – 2024. – № 24. – 286 p.
3. Lee S. Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry / S.Lee, Y.Choi // *Geosyst.* – 2016. – № 19. – P. 197–204.
4. Xiaohan L. Enable UAVs safely flight in low-altitude: A Preliminary research of the public air route network of UAVs / L.Xiaohan, Ch.Xu, H.Yue // 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – 2019. DOI: 10.1109/icuas.2019.8798083.
5. Hassanalian M. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review / M.Hassanalian, A.Abdelkefi // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2017. – Vol. 91. – P. 99–131.
6. Pomortseva O. PROCESSING OF GEODESIC DATA OBTAINED WITH THE HELP OF UAVS / O.Pomortseva, S.Kobzan, P.Steshenko // *Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ»*. – Boston, USA, 2022. – P. 162–165.
7. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives / H.Ren, Y.Zhao, W.Xiao and other // *Int. J. Coal Sci Technol.* – 2019. – № 6. – P. 320–333.
8. Optimized Autonomous Drone Navigation Using Double Deep Q-Learning for Enhanced Real-Time 3D Image Capture / J.Sánchez-Soriano, M.Á. Rojo-Gala, G.Pérez-Pérez and other // *Drones*. – 2024. – № 8. – 725 p.
9. Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry / J.Shahmoradi, E.Talebi, P.Roghanchi, M.A. Hassanalian // *Drones*. – 2020. – № 4. – 34 p.
10. Improvement of Workflow for Topographic Surveys in Long Highwalls of Open Pit Mines with an Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion / I.Zapico, J.B. Laronne, L.Sánchez Castillo, J.F. Martín Duque // *Remote Sens.* – 2021. – № 13 (17).
11. Барановський А.Ю. Використання коптерів на гірничих підприємствах / А.Ю. Барановський; Р.В. Соболевський // Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки 10–12 травня 2017 року. – Житомир : Житомирська політехніка, 2020. – С. 199–200.
12. Куницька М.С. Використання аерофотозйомки в гірничій галузі / М.С. Куницька, А.О. Криворучко // Тези VII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів», 16–17 квітня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2020. – С. 23–25.
13. 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.

References:

1. Atik, M.E. and Arkali, M. (2025), «Comparative Assessment of the Effect of Positioning Techniques and Ground Control Point Distribution Models on the Accuracy of UAV-Based Photogrammetric Production», *Drones*, Vol. 9, No. 15.
2. Jarahizadeh, S. and Salehi, B.A. (2024), «Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using AgiSoft Photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra», *Sensors*, No. 24, 286 p.
3. Lee, S. and Choi, Y. (2016), «Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry», *Geosyst*, No. 19, pp. 197–204.
4. Xiaohan, L., Xu, Ch. and Yue, H. (2019), «Enable UAVs safely flight in low-altitude: A Preliminary research of the public air route network of UAVs», *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, doi: 10.1109/icuas.2019.8798083.
5. Hassanalian, M. and Abdelkefi, A. (2017), «Classifications, applications, and design challenges of drones: A review», *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 91, pp. 99–131.
6. Pomortseva, O., Kobzan, S. and Steshenko, P. (2022), «PROCESSING OF GEODESIC DATA OBTAINED WITH THE HELP OF UAVS», *Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ»*, Boston, USA, 2022, pp. 162–165.
7. Ren, H., Zhao, Y., Xiao, W. et al. (2019), «A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives», *Int. J. Coal Sci Technol*, No. 6, pp. 320–333.
8. Sánchez-Soriano, J., Rojo-Gala, M.Á., Pérez-Pérez, G. et al. (2024), «Optimized Autonomous Drone Navigation Using Double Deep Q-Learning for Enhanced Real-Time 3D Image Capture», *Drones*, No. 8, 725 p.

9. Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P. and Hassanalian, M.A. (2020), «Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry», *Drones*, No. 4, 34 p.
10. Zapico, I., Laronne, J.B., Sánchez Castillo, L. and Martín Duque, J.F. (2021), «Improvement of Workflow for Topographic Surveys in Long Highwalls of Open Pit Mines with an Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion», *Remote Sens*, No. 13 (17).
11. Baranovskiy, A.Iu. and Cobolevskiy, R.V. (2020), «Vykorystannia kopteriv na hirnychkykh pidpriemstvakh», *Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi on-line konferentsii aspirantiv, molodykh uchenykh ta studentiv, prysviachenoi Dniu nauky*, 10–12 travnia 2017 roku, Zhytomyrska politehnika, Zhytomyr, pp. 199–200.
12. Kunytska, M.S. and Kryvoruchko, A.O. (2020), «Vykorystannia aerofotoziomky v hirnychii haluzi», *Perspektyvy rozvytku hirnychoi spravy ta ratsionalnoho vykorystannia pryrodnykh resursiv*, Tezy VII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh, 16–17 kvitnia, Zhytomyrska politehnika, Zhytomyr, pp. 23–25.
13. Panasiuk, A.V. and Polishchuk, D.S. (2024), «Obgruntuvannia vyboru optymalnoho pryladu BPLA dlia provedennia marksheiderskoi ziomkyg», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (93), pp. 420–427.

Поліщук Дмитро Сергійович – здобувач освітньо-наукового ступеня «доктор філософії» Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0009-0007-4257-8037>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- дистанційне зондування землі.

Панасюк Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>.

Наукові інтереси:

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

Кальчук Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0003-3179-2787>.

Наукові інтереси:

- фізико-механічні властивості природного декоративного каменю;
- геометрія надр;
- моделювання процесів гірничого виробництва.

Polischuk D.S., Panasiuk A.V., Kalchuk S.V.

Optimization of flight routes for data processing using Agisoft Metashape software

In recent years, remote measurement methods have been developed and popularized. The expansion of human activities caused this development. As the mining industry constantly evolves and projects become increasingly complex, the application of remote measurement will continue to grow rapidly in the coming years.

The use of UAVs for surveying is increasingly finding applications in the mining sector. These technologies are quite simple to use, enabling complex tasks to be performed in a shorter period. The research aims to develop and evaluate a methodology for optimizing UAV flight routes for collecting photogrammetric data processed using Agisoft Metashape software. Taking this into account, the question arises of choosing the optimal option for UAV flights for conducting surveys in the mining industry. Currently, there is no comparison of options for constructing UAV flight routes, so considering the methodology for optimizing flight routes of unmanned aerial vehicles (UAVs) for collecting photogrammetric data processed in Agisoft Metashape software is relevant. The results of an experimental study are presented, demonstrating the impact of different flight route options on the quality of 3D modeling.

This research is important for conducting mine surveying measurements at mining enterprises. Optimization of flight route planning methods significantly improves the accuracy and quality of the obtained spatial data, which directly affects the efficiency of decision-making during surveying. Flight route optimization contributes to improving data collection efficiency, enhancing the quality of final results, reducing human factor influence, optimizing costs, and expanding the possibilities of aerial photography application.

Taking into account the above, it would be appropriate to conduct research to determine the optimal option for designing UAV flight routes when conducting mine surveying work.

Keywords: photogrammetry; unmanned aerial vehicles; Agisoft Metashape; route optimization; aerial photography; 3D modeling.

Стаття надійшла до редакції 31.03.2025.