

**В.В. Котенко, к.т.н., доц.
М.С. Куницька, ст. викладач
О.А. Янович, аспірант, асистент
І.А. Піскун, асистент**

Державний університет «Житомирська політехніка»

Обґрунтування параметрів аерофотознімання з використанням БПЛА для геодезичного забезпечення кар'єру

У статті досліджено питання обґрунтування параметрів аерофотознімання з використанням безпілотних літальних апаратів для геодезичного забезпечення гірничих робіт у кар'єрах. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення точності, оперативності та економічної ефективності топографо-геодезичних робіт в умовах інтенсифікації гірничого виробництва та впровадження цифрових технологій. Метою роботи є визначення та наукове обґрунтування оптимальних параметрів аерофотознімання, які забезпечують нормативну точність створення топографічних планів на прикладі Покостівського родовища гранодіоритів. У дослідженні використано методи аналізу сучасних підходів до застосування БПЛА у геодезичній практиці, розрахунку параметрів аерофотознімання, а також математичного моделювання залежностей між висотою польоту, роздільною здатністю знімків, кількістю аерофотознімків і тривалістю виконання робіт. Для забезпечення планово-висотної прив'язки застосовано GNSS-вимірювання з використанням RTK-технології, що дозволило досягти високої точності визначення координат опорних точок. У результаті проведених досліджень встановлено оптимальні параметри аерофотознімання для створення ортофотоплану масштабу 1:2000, зокрема обґрунтовано вибір висоти польоту, параметрів перекриття знімків та очікуваної точності результатів. Отримані результати підтверджують, що використання БПЛА забезпечує високу деталізацію зображень (до 1 см/піксель), необхідну точність геопросторових даних та зниження трудомісткості робіт. Практичне значення дослідження полягає у можливості застосування розроблених рекомендацій для оптимізації геодезичного забезпечення кар'єрів, підвищення ефективності планування гірничих робіт і впровадження сучасних цифрових технологій у гірничій галузі.

Ключові слова: *безпілотні літальні апарати; аерофотознімання; геодезичне забезпечення; кар'єр; фотограмметрія; ортофотоплан; цифрова модель поверхні; GNSS RTK.*

Актуальність теми. Сучасний розвиток геодезичної галузі характеризується стрімким впровадженням новітніх технологій, серед яких безпілотні літальні апарати (БПЛА) посідають провідне місце. Їх використання суттєво змінює підходи до виконання топографо-геодезичних робіт, зокрема у гірничодобувній промисловості, де точність і оперативність отримання просторової інформації є критично важливими.

Застосування БПЛА забезпечує можливість створення високоточних картографічних матеріалів, оперативного контролю стану родовищ та отримання детальної інформації про геометрію гірничих виробок. Використання цифрових технологій, зокрема тривимірного моделювання, дозволяє відтворювати структуру кар'єрів із високим рівнем деталізації, що сприяє підвищенню ефективності планування гірничих робіт та прийняття інженерних рішень.

Розвиток дистанційних методів дослідження земної поверхні супроводжується вдосконаленням технічних характеристик БПЛА, цифрових камер та програмного забезпечення для обробки даних. Це дозволяє автоматизувати процеси збору та аналізу інформації, зменшити трудомісткість робіт і мінімізувати вплив людського фактора. Особливо важливою перевагою є можливість виконання зйомок у складнодоступних або потенційно небезпечних умовах відкритих гірничих виробок.

Разом із тим ефективність використання БПЛА у геодезичному забезпеченні значною мірою залежить від правильного вибору параметрів аерофотознімання, таких як висота польоту, перекриття знімків, роздільна здатність та щільність покриття території. Недостатнє обґрунтування цих параметрів може призвести до зниження точності отриманих результатів або нераціонального використання ресурсів.

Особливої актуальності набуває розробка та обґрунтування оптимальних параметрів аерофотознімання для умов відкритих родовищ корисних копалин, зокрема Покостівського родовища гранодіоритів. Це дозволяє забезпечити створення високоточних топографічних матеріалів, необхідних для ефективного ведення гірничих робіт, планування виробничих процесів і моніторингу стану території.

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

Метою роботи є визначення та обґрунтування оптимальних параметрів аерофотознімання з використанням БПЛА для підвищення ефективності геодезичного забезпечення та створення точних ортофотопланів і цифрових моделей поверхні кар'єру.

Викладення основного матеріалу. Геодезичне забезпечення гірничих робіт на відкритих родовищах є важливою складовою ефективного функціонування гірничодобувних підприємств. Воно включає виконання комплексу топографо-геодезичних робіт, спрямованих на отримання достовірної інформації про просторове положення гірничих виробок, контроль об'ємів видобутку, а також моніторинг змін рельєфу кар'єру. В умовах інтенсивного розвитку гірничих робіт особливої ваги набуває оперативність оновлення геопросторових даних та їх точність.

Традиційні методи геодезичних зйомок, зокрема тахеометричні вимірювання, хоча й забезпечують високу точність, проте характеризуються значною трудомісткістю та обмеженою швидкістю отримання результатів. Це ускладнює їх застосування для регулярного моніторингу великих територій кар'єрів, де відбуваються постійні зміни. У зв'язку з цим все більшого поширення набувають аерофотограмметричні методи, що базуються на використанні безпілотних літальних апаратів. Вони дозволяють швидко отримувати великі обсяги просторових даних із високою деталізацією, формувати ортофотоплани та цифрові моделі поверхні, що відображають фактичний стан території.

Разом із тим, ефективність застосування БПЛА у геодезичному забезпеченні значною мірою залежить від правильного вибору параметрів аерофотознімання. Саме ці параметри визначають точність, повноту та економічну доцільність отриманих результатів. Тому важливим завданням є їх обґрунтування з урахуванням умов конкретного родовища та вимог до кінцевих геодезичних матеріалів.

Безпілотні літальні апарати, або дрони, довели свою ефективність як сучасний інструмент для створення картографічної продукції, планів територій та інших геопросторових даних (табл. 1). Завдяки своїй гнучкості технології на базі БПЛА відкривають нові можливості для оптимізації різних типів проєктів, надаючи точні, локалізовані дані без труднощів доступу або ризиків, пов'язаних із безпосереднім обстеженням об'єкта. Вони забезпечують високу швидкість виконання робіт, економічну доцільність та значну деталізацію отриманих результатів. Сучасні БПЛА дозволяють отримувати зображення з роздільною здатністю до 1 см/піксель, що дає можливість фіксувати навіть дрібні елементи об'єктів. Важливою перевагою є також підвищення безпеки виконання робіт, оскільки зменшується необхідність перебування персоналу в небезпечних зонах, а також багатофункціональність отриманих даних, які можуть використовуватися для різних інженерних і аналітичних задач.

Таблиця 1

Основні переваги використання БПЛА у геодезичних роботах

Перевага	Характеристика
Швидкість та економічна доцільність	Аерофотознімання є одним із найбільш ефективних способів фіксації стану місцевості, що дозволяє значно скоротити час виконання робіт та зменшити витрати порівняно з традиційними методами
Висока деталізація та точність	Зйомка з повітря забезпечує отримання повної інформації про об'єкт дослідження. Сучасні БПЛА дозволяють досягати роздільної здатності до 1 см/піксель, що дає можливість фіксувати найменші деталі
Якість виконання та безпека робіт	Використання БПЛА зменшує необхідність перебування персоналу в небезпечних умовах. Якість результатів залежить від технічних характеристик обладнання, кваліфікації оператора та дотримання технології виконання зйомки
Багатофункціональність і адаптивність	Отримані дані можуть використовуватися для вирішення широкого кола завдань: від проєктування і будівництва до моніторингу територій, аналізу змін та оцінки ризиків

Безпілотні літальні апарати класифікуються за низкою технічних та функціональних характеристик, зокрема за рівнем автономності польоту, граничною швидкістю, максимальною висотою польоту, конструктивними особливостями (кількістю двигунів і гвинтів), типом системи керування, а також наявністю додаткових елементів захисту. Така класифікація дозволяє обрати оптимальний тип БПЛА залежно від умов виконання геодезичних робіт.

Одним із найбільш ефективних рішень у сучасній геодезичній практиці є використання БПЛА з RTK-модулем. Принцип роботи RTK-технології базується на застосуванні двочастотних GNSS-приймачів, при якому базова станція формує поправки до координат і передає їх у реальному часі на приймач, встановлений на безпілотному літальному апараті. Це дозволяє суттєво зменшити вплив атмосферних та інших похибок і забезпечити високоточне визначення координат.

Відповідно до вимог чинної Інструкції з топографічного знімання (ГКНТА-2.04-02-98), топографічні роботи у масштабах 1:5000–1:500 повинні виконуватися з використанням аерофототопографічних і наземних методів. Використання БПЛА дозволяє реалізувати повний технологічний цикл створення топографічних матеріалів від аерофотознімання до побудови ортофотопланів і цифрових моделей поверхні. Згідно з нормативними вимогами, середня похибка визначення координат об'єктів не повинна перевищувати 0,5 мм у масштабі для відкритої місцевості та 0,7 мм – для складних умов. Враховуючи ці вимоги, параметри аерофотознімання, зокрема значення GSD, повинні підбиратися таким чином, щоб забезпечити достатній рівень деталізації та точності при дешифруванні об'єктів.

Таким чином, застосування безпілотних літальних апаратів у геодезичному забезпеченні гірничих робіт дозволяє підвищити ефективність виконання зйомок, забезпечити отримання високоточних геопросторових даних та створити надійну основу для подальшого планування і контролю гірничих процесів.

Важливим етапом виконання аерофотограмметричних робіт є обґрунтування та розрахунок параметрів аерофотознімання, від яких безпосередньо залежить точність і ефективність отриманих результатів. Розрахунок параметрів зйомки здійснювався із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення DroneDeploy, що дозволяє оптимізувати параметри польоту з урахуванням заданих вимог до кінцевого продукту. У процесі планування аерофотознімання визначено основні параметри польоту, зокрема висоту польоту, поздовжнє та поперечне перекриття знімків, площу покриття території та кількість аерофотознімків. Вибір параметрів здійснювався з урахуванням необхідності забезпечення достатньої роздільної здатності зображень (GSD) для створення ортофотоплану заданого масштабу.

Одним із ключових етапів підготовки до аерофотознімання є визначення параметрів планово-висотної прив'язки. Важливим завданням є встановлення мінімально необхідної кількості опорних точок, а також розробка раціональної схеми їх розміщення на території зйомки. Правильно організована система опорних точок суттєво впливає на геометричну точність ортофотоплану та цифрових моделей поверхні, а також дозволяє оптимізувати витрати на виконання робіт.

У межах дослідження для умов Покостівського родовища гранодіоритів (північно-східна ділянка) виконано розрахунок параметрів аерофотознімання з використанням безпілотного літального апарата DJI Mavic 3 Enterprise. Вихідні дані включали площу ділянки, необхідний масштаб картографічного матеріалу (1:2000), вимоги до точності, а також технічні характеристики використовуваного обладнання.

На основі заданих умов визначено оптимальні параметри аерофотознімання, які забезпечують необхідну деталізацію та точність отриманих геопросторових даних. Отримані результати стали основою для подальшого виконання аерофотозйомки та обробки матеріалів.

Важливим етапом дослідження є оцінка очікуваної точності результатів аерофотознімання, яка дозволяє визначити відповідність обраних параметрів зйомки вимогам до створення топографічних матеріалів. Розрахунок очікуваної точності виконано для безпілотного літального апарата DJI Mavic 3 Enterprise при висоті польоту 50 м.

Отримані результати показали, що обрані параметри аерофотознімання забезпечують необхідний рівень точності як у плані, так і по висоті для створення топографічного плану масштабу 1:2000. При цьому досягнуто значного запасу точності, що свідчить про доцільність використання обраних параметрів та підтверджує ефективність застосування БПЛА для виконання геодезичних робіт у кар'єрах.

Наступним етапом дослідження стало формування проекту польоту з урахуванням геометрії території та особливостей об'єкта зйомки. Досліджувана ділянка включала діючий кар'єр з видобутку блоків, території відвалів м'яких і твердих порід, виробничу зону з промисловими об'єктами, а також адміністративно-побутову частину. Загальна площа території становила близько 15 га.

Планування польоту здійснювалося з урахуванням необхідного перекриття знімків, конфігурації ділянки та вимог до рівномірності покриття території. Розроблений проект польоту забезпечив повне охоплення досліджуваної ділянки та створив умови для отримання якісних вихідних даних для подальшої фотограмметричної обробки (рис. 1).



Рис. 1. Проект аерофотознімальних робіт на досліджуваній ділянці Покостівського родовища гранодіоритів

У процесі підготовки було виконано аналіз ключових параметрів зйомки з метою оптимізації конфігурації польоту. Одним із ключових параметрів аерофотознімання є роздільна здатність зображень (GSD), яка визначає рівень деталізації отриманих даних і безпосередньо залежить від висоти польоту безпілотного літального апарата (рис. 2).

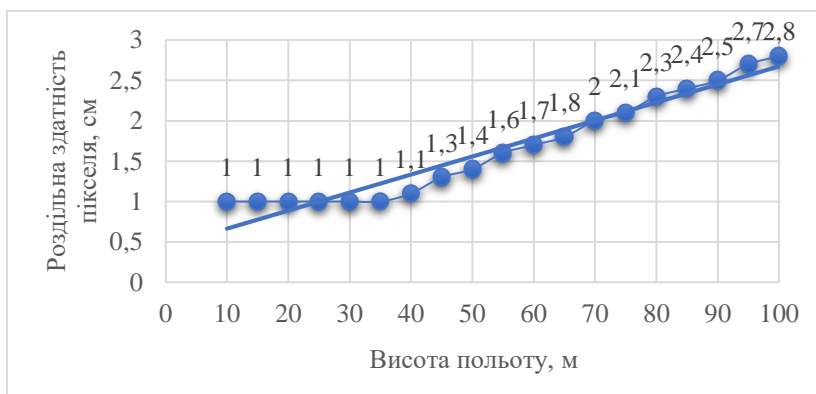


Рис. 2. Залежність роздільної здатності одного пікселя на місцевості від висоти польоту

Кількість аерофотознімків є важливим параметром, що впливає на тривалість виконання зйомки та обсяг подальшої обробки даних (рис. 3).

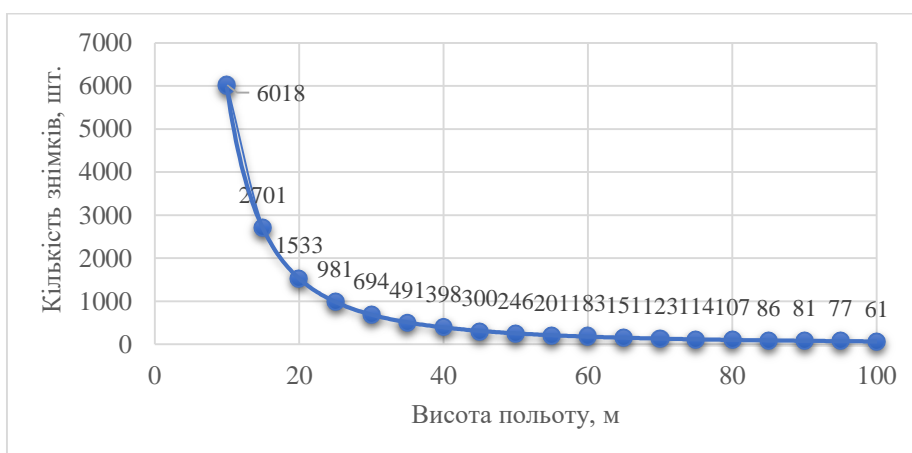


Рис. 3. Залежність кількості фотознімків від висоти польоту

Тривалість виконання аерофотознімання є важливим показником ефективності робіт і залежить від висоти польоту безпілотного літального апарата (рис. 4).

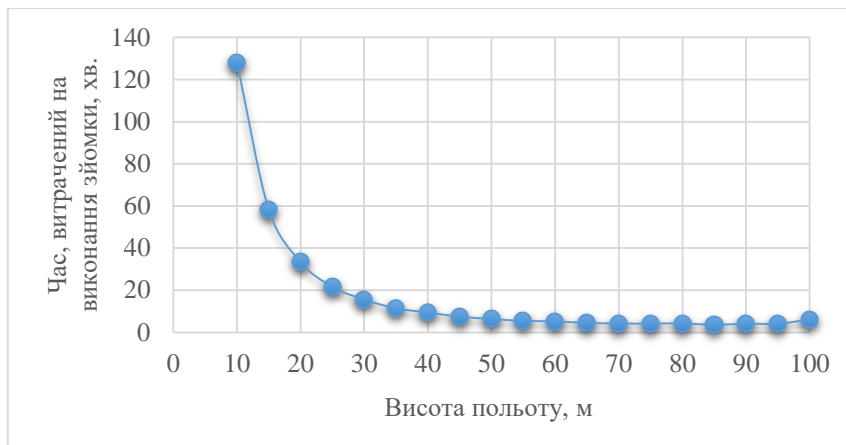


Рис. 4. Залежність витрачено часу на виконання зйомки від висоти польоту

Після виконання аерофотознімання та аналізу параметрів польоту було здійснено фотограмметричну обробку отриманих даних із використанням програмного забезпечення 3Dsurvey.

На основі обробки аерофотознімків сформовано щільну хмару точок, яка стала основою для побудови цифрової моделі поверхні (DSM). Отримана модель відображає рельєф досліджуваної території та дозволяє виконувати подальший аналіз геометричних характеристик кар'єру (рис. 5.).



Рис. 5. Цифрова модель поверхні DSM в 3DSurvey

На основі цифрової моделі поверхні сформовано ортофотоплан досліджуваної території із заданою роздільною здатністю, що забезпечує високий рівень деталізації зображення (рис. 6).



Рис. 6. Цифровий ортофотоплан в 3DSurvey

Отримані результати фотограмметричної обробки підтверджують ефективність застосування безпілотних літальних апаратів для геодезичного забезпечення гірничих робіт. Побудовані цифрова модель поверхні та ортофотоплан характеризуються високою деталізацією та точністю, що дозволяє використовувати їх для вирішення інженерних, маркшейдерських і виробничих задач. Проведений аналіз параметрів аерофотознімання дозволив обґрунтувати оптимальні умови виконання зйомки, що забезпечують раціональне поєднання точності, продуктивності та витрат ресурсів.

Висновки. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано оптимальні параметри аерофотознімання для створення топографічного плану масштабу 1:2000, зокрема висоту польоту на рівні 50 м, що забезпечує отримання зображень із роздільною здатністю близько 1–1,5 см/піксель.

Встановлено, що зі збільшенням висоти польоту з 10 до 100 м роздільна здатність знімків змінюється від 1 до 2,8 см/піксель, при цьому кількість аерофотознімків зменшується з понад 6000 до близько 60, а тривалість виконання зйомки – з понад 120 хв до 5–7 хв, що підтверджує наявність компромісу між точністю та ефективністю. Підтверджено ефективність використання БПЛА DJI Mavic 3 Enterprise у поєднанні з RTK GNSS-технологією, що дозволило досягти високої точності визначення координат опорних точок ($RMSE_x = 0,02$ м, $RMSE_y = 0,02$ м, $RMSE_z = 0,03$ м).

У результаті фотограмметричної обробки отримано цифрову модель поверхні та ортофотоплан із роздільною здатністю 1 см/піксель, що забезпечує високий рівень деталізації та можливість використання матеріалів для інженерних і маркшейдерських задач.

Таким чином, застосування БПЛА дозволяє підвищити ефективність геодезичного забезпечення гірничих робіт за рахунок зменшення трудомісткості, скорочення часу виконання зйомки та забезпечення високої точності результатів.

Список використаної літератури:

1. 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.
2. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment / M.R. James, S. Robson, S. d'Oleire-Oltmanns, U. Niethammer // *Geomorphology*. – 2017. – Vol. 280. – P. 51–66.
3. Янович О.А. Сучасні підходи до виконання маркшейдерських підрахунків квартальної зйомки вийнятої блочної сировини та розкривних порід із застосуванням БПЛА / О.А. Янович, В.Г. Левицький // Технічна інженерія. – 2025. – № 1 (95). – С. 212–218.
4. 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.
5. Глотов В. Розробка та дослідження БПЛА для аерофотознімання / В.Глотов, А.Гуніна // Геодезія, картографія та аерофотознімання. – 2018. – Вип. 87. – С. 68–80.
6. 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.
7. Söğütçü G. Monitoring slope stability: a comprehensive review of UAV applications in open-pit mining / G. Söğütçü, Ş. Kaya // *Land*. – 2024.
8. Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct georeferencing / C. Stöcker, F. Nex, M. Koeva, M. Gerke // *Geo-spatial Information Science*. – 2020. – Vol. 23. – P. 165–181.
9. 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.
10. 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.

References:

1. Kotenko, V.V. and Kuniyska, M.S. (2023), «Obgruntuvannia dotsilnosti vyznachennia obsiahiv hirnychoi masy na osnovi multykopternoї ziomky», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (92), pp. 234–238.
2. James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S. and Niethammer, U. (2017), «Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment», *Geomorphology*, Vol. 280, pp. 51–66.
3. Ianovych, O.A. and Levitskyi, V.H. (2025), «Suchasni pidkhody do vykonannia marksheiderskykh pidrakhunkiv kvartalnoi ziomky vyiynatoi blochnoi syrovyny ta rozkrivnykh porid iz zastosuvanniam BPLA», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (95), pp. 212–218.
4. Ianovych, O.A. and Kotenko, V.V. (2025), «Porivnialna otsinka zastosuvannia RTK ta non-RTK tekhnolohii bezpilotnykh litalnykh aparativ u marksheiderskii praktysi z kontrolom tochnosti na osnovi heodezychnoi merezhi opornykh tochok», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (96), pp. 390–397.
5. Hlotov, V. and Hunina, A. (2018), «Rozrobka ta doslidzhennia BPLA dlia aerofotoznimannia», *Heodeziia, kartohrafiia ta aerofotoznimannia*, Issue 87, pp. 68–80.

6. 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*.
7. Söğütçü, G. and Kaya, Ş. (2024), «Monitoring slope stability: a comprehensive review of UAV applications in open-pit mining», *Land*.
8. 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 georeferencing», *Geo-spatial Information Science*, Vol. 23, pp. 165–181.
9. 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.
10. 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*.

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

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

Наукові інтереси:

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

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

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

Наукові інтереси:

- геодезія;
- маркшейдерська справа;
- фотограмметрія.

Янович Олександр Анатолійович – аспірант, 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.

Піскун Ігор Анатолійович – асистент кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-1658-5344>.

Наукові інтереси:

- процеси обробки природного каменю;
- дослідження якісних показників родовищ корисних копалин.

Kotenko V.V., Kunytska M.S., Yanovych O.A., Piskun I.A.

Justification of UAV-based aerial survey parameters for geodetic support of open-pit mining

The article investigates the justification of aerial survey parameters using unmanned aerial vehicles (UAVs) for geodetic support of mining operations in open-pit conditions. The relevance of the study is determined by the need to improve the accuracy, efficiency, and economic feasibility of topographic and geodetic works in the context of intensified mining activities and the implementation of modern digital technologies.

The aim of the study is to determine and substantiate optimal aerial survey parameters that ensure the required accuracy of topographic plan generation, using the Pokostivske granodiorite deposit as a case study.

The research methodology includes analysis of modern approaches to UAV application in geodetic practice, calculation of aerial survey parameters, and mathematical modeling of relationships between flight altitude, ground sampling distance (GSD), number of images, and survey duration. GNSS measurements using RTK technology were applied to ensure planimetric and altimetric referencing, enabling high-precision determination of control point coordinates.

The results of the study made it possible to establish optimal aerial survey parameters for generating a topographic plan at a scale of 1:2000. In particular, the flight altitude, image overlap parameters, and expected accuracy were substantiated. The obtained results confirm that UAV-based surveying provides high image resolution (up to 1 cm/pixel), sufficient spatial data accuracy, and reduced labor intensity.

The practical significance of the research lies in the possibility of applying the developed recommendations to optimize geodetic support of open-pit mining operations, improve planning efficiency, and implement modern digital technologies in the mining industry.

Keywords: UAV; aerial survey; geodetic support; open-pit mining; photogrammetry; orthophotoplan; digital surface model; GNSS RTK.

Стаття надійшла до редакції 06.01.2026.