

О.А. Янович, аспірант
В.Г. Левицький, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Сучасні підходи до виконання маркшейдерських підрахунків квартальної зйомки вийнятої блочної сировини та розкривних порід із застосуванням БПЛА

У статті представлено методологію виконання маркшейдерських підрахунків квартальної зйомки вийнятої блочної сировини та розкривних порід із застосуванням технології аерофотограмметричного знімання. Дослідження базується на використанні безпілотного літального апарата DJI Mini 3 Pro для зйомки ділянок родовища та подальшій обробці даних у спеціалізованому програмному забезпеченні Agisoft Metashape і Civil 3D. Розроблено оптимальну методику планування польотів з параметрами перекриття знімків 80/70 % та висотою зйомки 60 м, що забезпечує високу точність кінцевих моделей. Особливу увагу приділено системі закріплення та координування опорних точок, що складалася з постійних забетонованих маркерів та тимчасових точок, нанесених фарбою безпосередньо на блоки у кар'єрі. Аналіз точності вимірювань показав, що середньоквадратична похибка становила 48–57 мм для опорних та 123–138 мм для контрольних точок. Доведено, що сезонні зміни, зокрема відсутність листя на деревах, позитивно впливають на якість фотограмметричної обробки, покращуючи розпізнавання зв'язуючих точок. Запропонована технологія забезпечує ефективне визначення об'ємів вийнятої гірничої маси та розкривних порід з високою точністю та значно меншими часовими та ресурсними витратами порівняно з традиційними методами маркшейдерських вимірювань.

Ключові слова: маркшейдерське забезпечення; аерофотограмметрія; БПЛА; цифрове моделювання поверхні; Civil 3D; Agisoft Metashape; цифрове знімання; підрахунок об'ємів.

Маркшейдерські підрахунки є важливим компонентом гірничодобувної галузі, особливо при видобутку блочної сировини. Квартальна зйомка дозволяє систематично контролювати обсяги видобутої корисної копалини та розкривних порід, що є необхідним для точного планування виробництва, економічного аналізу та дотримання вимог природоохоронного законодавства.

Актуальність дослідження. Підвищення вимог до точності та оперативності маркшейдерського забезпечення гірничих робіт є нагальною потребою сучасної гірничодобувної галузі України, особливо у контексті видобутку блочної сировини. Традиційні методи наземної зйомки характеризуються значними часовими витратами, що знижує періодичність вимірювань та точність звітності. За даними Державної служби статистики, у 2023–2024 роках спостерігається зростання видобутку блочного каменю, що посилює вимоги до точності обліку видобутих корисних копалин, як зазначено в [5].

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відкриває нові можливості для підвищення точності та швидкості визначення об'ємів вийнятої сировини. Однак досі відсутні систематизовані методики застосування БПЛА для регулярних квартальних зйомок, що знижує точність результатів та ускладнює їх порівняння у часовій перспективі.

Мета дослідження – розробка та апробація методики виконання маркшейдерських підрахунків квартальної зйомки із застосуванням аерофотограмметричного знімання на базі БПЛА.

Завдання дослідження:

1. Розробка оптимальної методики планування польотів БПЛА;
2. Визначення оптимальних параметрів знімання;
3. Розробка системи закріплення та координування опорних точок;
4. Оцінка точності визначення об'ємів вийнятої сировини та розкривних порід;
5. Аналіз впливу сезонних факторів на результати знімання.

Об'єкт дослідження: процес виконання маркшейдерських підрахунків на кар'єрах блочної сировини.

У роботі застосовано комплекс емпіричних та теоретичних методів наукового дослідження. Експериментальні дослідження проведено на діючому кар'єрі з видобутку блочної сировини у Житомирській області протягом двох кварталів 2024 року (вересень та грудень), що дозволило оцінити вплив сезонних факторів на результати вимірювань подібно до досліджень, описаних у [8]. Для збору даних використано метод аерофотограмметричної зйомки з застосуванням БПЛА DJI Mini 3 Pro, для координування опорних точок – GNSS-вимірювання в режимі RTK. Обробка отриманих даних здійснювалася методами цифрової фотограмметрії в програмі Agisoft Metashape [14] з використанням алгоритмів Structure from Motion, а для створення цифрових моделей поверхні застосовано метод геостатистичної інтерполяції (крігінг) [4] в Civil 3D [15]. Розрахунок об'ємів виконано методом

порівняння різночасових цифрових моделей рельєфу з оцінкою точності методами математичної статистики. Організація регулярних квартальних зйомок вимагає стандартизації процесу для забезпечення високої точності та повторюваності результатів. На основі проведених експериментальних досліджень було встановлено оптимальні параметри знімання: повздовжнє перекриття 80 % та поперечне перекриття 70 %. Ці значення забезпечують достатню кількість спільних точок на сусідніх знімках, що є критично важливим для точної побудови цифрової моделі місцевості.

Емпіричним шляхом було визначено, що оптимальна висота польоту для кар'єрів блочної сировини становить 60 метрів. Під час використання БПЛА DJI Mini 3 Pro [13] це дозволяє досягти просторової роздільної здатності знімків 2,14 см/піксель, що забезпечує необхідну деталізацію для чіткої ідентифікації опорних точок та детального відображення структури поверхні.

Для забезпечення координатної прив'язки аерофотознімків була розроблена комбінована система опорних точок, подібно до методики, запропонованої в роботі [11], що враховує:

- постійні опорні точки (3 штуки), закріплені забетонованими маркерами поза межами гірничої діяльності, що створює стабільну опорну мережу між зйомками;
- тимчасові маркери (8–9 штук), нанесені фарбою безпосередньо на блоки в кар'єрі, що підвищують точність моделювання в зоні активних гірничих робіт.

Оптимальне розміщення опорних марок на найвищій та найнижчій точках ділянки зйомки дозволяє мінімізувати помилки при визначенні висотних відміток та підвищити точність розрахунку об'ємів. Визначення координат опорних точок проводиться за допомогою GNSS-приймача з використанням RTK-поправок, що забезпечує сантиметрову точність вимірювань у реальному часі.

Всі вимірювання виконуються в місцевій системі координат МСК-18, що відповідає вимогам нормативних документів та забезпечує сумісність з іншою картографічною документацією підприємства. Стандартизація підготовчого етапу забезпечує надійну основу для точного визначення об'ємів вийнятої блочної сировини та розкривних порід.

Виконання аерофотограмметричної зйомки на кар'єрі блочної сировини вимагає систематичного підходу для забезпечення достовірності результатів. Основною перевагою регулярної квартальної зйомки є можливість створення стандартизованої методики, що мінімізує похибки вимірювань.

Після успішного завершення першої зйомки, яка повністю відповідає вимогам точності та забезпечує повноту даних для подальших обчислень, маршрути польоту зберігаються та використовуються повторно при кожному наступному зніманні. Це технічне рішення забезпечує максимальну повторюваність результатів знімання, що є критично важливим для коректного порівняння поверхонь різних періодів та розрахунку об'ємів видобутку.

Для знімання використовувався безпілотний літальний апарат DJI Mini 3 Pro, що має такі технічні характеристики:

- вага: 249 г;
 - час польоту: до 34 хвилин;
 - максимальна швидкість: 16 м/с;
 - стійкість до вітру: до 10,7 м/с;
 - камера: 1/1.3-дюймовий CMOS сенсор, 48 МП;
 - об'єктив: FOV 82,1°, f/1,7;
 - максимальна роздільна здатність: 4032×3024 пікселів.
- У програмі планування польотів DJI Fly були встановлені такі параметри зйомки:
- висота польоту: 60 м;
 - повздовжнє перекриття: 80 %;
 - поперечне перекриття: 70 %;
 - швидкість польоту: 18 км/год;
 - режим зйомки: фото, одиночний;
 - кут нахилу камери: -90° (вертикально вниз);
 - орієнтація дрона: вперед.

Ключовою рекомендацією для підвищення точності аерофотограмметричної зйомки є запуск безпілотного літального апарату з однієї й тієї ж точки при кожному зніманні. Ця методика, ефективність якої підтверджена дослідженнями [6, 9], значно зменшує похибки при автоматичному зніманні, оскільки початкові параметри орієнтування дрона залишаються незмінними. На практиці це забезпечується шляхом позначення на місцевості фіксованої точки старту, координати якої залишаються незмінними від зйомки до зйомки. Після завершення польоту за заданим маршрутом обов'язковим етапом є перевірка кількості та якості отриманих фотознімків. Оператор має перевірити відсутність розмитих або перекритих хмарами знімків, переконатись у достатньому перекритті між кадрами та повноті охоплення території. У випадку виявлення дефектних знімків або пропусків у покритті необхідно виконати додатковий політ для заповнення виявлених прогалин.

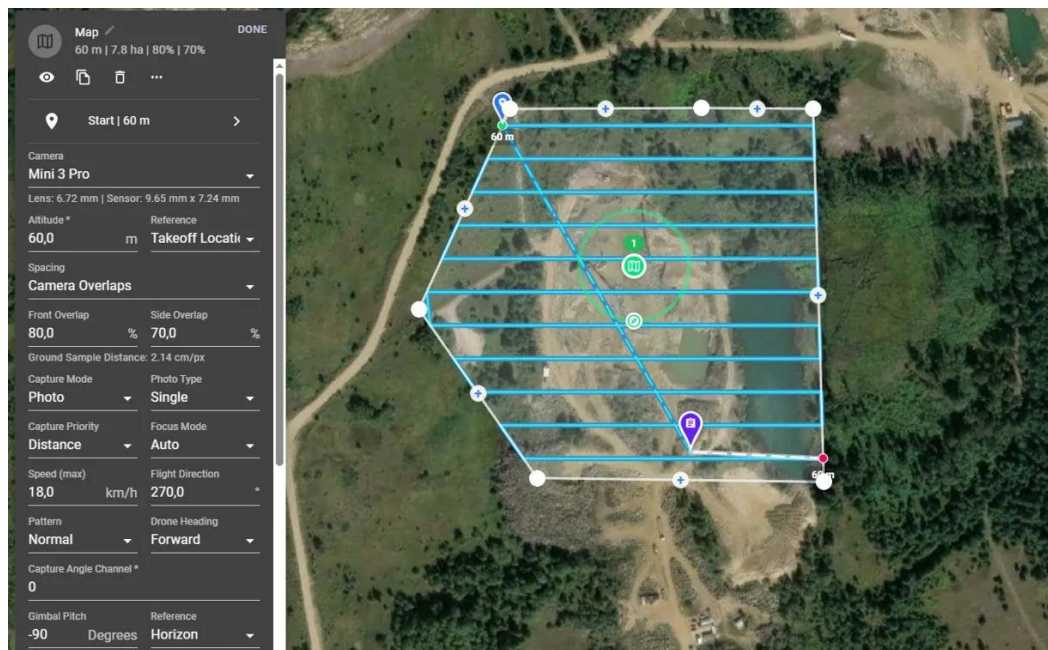


Рис. 1. Інтерфейс планувальника польоту та відображення прогнозованого маршруту

Варто зазначити, що при регулярному проведенні зйомок за однаковими маршрутами та з однаковими параметрами кількість помилок під час знімання стає мінімальною або взагалі відсутньою. Це пояснюється як напрацюванням практичного досвіду оператором, так і оптимізацією параметрів польоту відповідно до конкретних умов родовища. Такий «ефект навчання» сприяє підвищенню ефективності та якості маркшейдерських робіт у довгостроковій перспективі.

Якість отриманих знімків безпосередньо впливає на точність побудови цифрової моделі місцевості та, відповідно, на точність розрахунку об'ємів. Тому контроль якості фотознімків є важливим етапом, який не можна недооцінювати.

Систематичний підхід до виконання аерофотограмметричної зйомки забезпечує стабільно високу якість вихідних даних, що є передумовою для точного визначення об'ємів видобутку блочної сировини та розкривних порід на наступних етапах обробки.

Стандартизація процесу зйомки дала вагомий результат в аспекті стабільності отриманих даних. Зберігання однакових маршрутів та параметрів зйомки забезпечило отримання близької кількості фотознімків у різні квартали: 330 у третьому кварталі та 334 у четвертому. Ця незначна різниця у кількості знімків свідчить про високу відтворюваність процесу аерофотограмметричної зйомки.

При обробці даних у програмі Agisoft Metashape було автоматично виявлено і розпізнано зв'язуючі точки – унікальні елементи місцевості, що відображені на кількох знімках та використовуються для їх взаємного орієнтування. Кількість таких точок склала 168 тисяч для третього кварталу та 175 тисяч для четвертого кварталу. Аналіз цих даних дозволяє зробити висновок, що сезонні зміни впливають на якість фотограмметричної обробки – відсутність листя на деревах у зимовий період сприяє кращому розпізнаванню спільних точок на знімках та покращує загальну якість об'єднання фотографій.

Система опорних точок, що слугує для точної координатної прив'язки моделі, складалася з двох типів маркерів: 3 постійні забетоновані знаки, встановлені поза зоною проведення гірничих робіт, та тимчасові маркери, нанесені фарбою безпосередньо в кар'єрі (8 точок у вересні та 9 у грудні). Після імпорту координат опорних точок у програму частина з них була зарезервована як контрольні – вони не використовувалися для побудови моделі, а слугували для незалежної оцінки її точності.

Важливим показником якості створеної цифрової моделі є похибки прив'язки по опорних та контрольних точках. У вересні середньоквадратична похибка по опорних точках склала 57 мм, по контрольних точках – 138 мм. У грудні ці показники покращились до 48 мм по опорних і 123 мм по контрольних точках. Це свідчить про високу точність прив'язки моделі до реальних координат, що особливо важливо для подальших об'ємних розрахунків.

Після оптимізації положення камер, що є етапом уточнення елементів їх внутрішнього та зовнішнього орієнтування, було створено щільну хмару точок – тривимірну множину точок з визначеними просторовими координатами, що представляє поверхню об'єкта зйомки. Наступним кроком стала класифікація точок – процес автоматичного розподілу точок хмари за категоріями для відділення точок, що належать земній поверхні, від тих, що відповідають рослинності, техніці та іншим об'єктам.

Класифікація є ключовим етапом обробки, оскільки для коректної побудови цифрової моделі місцевості (ЦММ) необхідно враховувати лише точки, що відповідають рельєфу, виключаючи з розрахунків всі сторонні об'єкти, що відповідає методикам, запропонованим у роботі [2]. Автоматичне визначення й виключення класів «висока рослинність» та «автомобілі» дозволило отримати модель, що відображає виключно поверхню землі та елементи кар'єру, без впливу тимчасових об'єктів.

Створена цифрова модель місцевості стала основою для побудови ортофотоплану – растрового зображення з усуненими перспективними спотвореннями та єдиним масштабом, що точно відповідає топографічному плану. Використання лише точок земної поверхні при побудові ЦММ забезпечило суттєве підвищення якості ортофотоплану за рахунок зменшення кількості «клаптиків» – фрагментів зображень, що формують мозаїку ортофотоплану. Такий підхід не лише оптимізує витрати обчислювальних ресурсів на обробку даних, але й значно покращує візуальне сприйняття кінцевого продукту, що важливо для інтерпретації результатів маркшейдерських підрахунків.

Наступним етапом роботи стало експортування отриманої хмари точок у програму Civil 3D для подальшого аналізу та розрахунку об'ємів виїнятої гірничої маси.

По експортованим хмарам точок створюються поверхні у програмному середовищі Civil 3D. Процес перетворення хмари точок у повноцінну поверхню вимагає застосування математичних методів інтерполяції для визначення висотних відміток у місцях, де точки відсутні.

Для створення кожної поверхні застосовується метод інтерполяції кригінга. Цей геостатистичний метод оптимально підходить для моделювання поверхонь у гірничій справі, оскільки враховує просторову кореляцію між точками вимірювань та забезпечує мінімальну дисперсію оцінки. Інтерполяція кригінга дозволяє отримати найбільш вірогідні значення висот між відомими точками, що особливо важливо при моделюванні складних форм рельєфу кар'єру.

Важливим аспектом при порівнянні поверхонь є коректне визначення границь розрахункових ділянок. У цьому дослідженні границі для порівняння поверхонь встановлювалися візуально шляхом аналізу ортофотопланів різних періодів [3]. При цьому враховувалися зміни, що відбулися у конфігурації виробок, та результати польових спостережень безпосередньо на ділянці проведення гірничих робіт.

Такий підхід до визначення границь розрахункових ділянок дозволяє сконцентрувати увагу саме на зонах активного видобутку та виключити з підрахунків області, де зміни відсутні або несуттєві. Це не лише підвищує точність розрахунків, але й оптимізує використання обчислювальних ресурсів. Після створення поверхонь та визначення границь розрахункових ділянок виконується безпосереднє порівняння поверхонь за допомогою стандартних інструментів Civil 3D. Програма автоматично обчислює різниці висот між поверхнями у кожній точці і на основі цих даних розраховує об'єми виїнятої гірничої маси.



Рис. 2. Зображення простору моделювання Civil 3D і вікна аналізу поверхонь

Рисунок 2 демонструє результати виконаного порівняння поверхонь з відокремленими зонами по горизонтам робіт. Представлена цифрова модель кар'єру, де чітко видно хмару точок, що формує тривимірну модель поверхні; кольорами виділено різні зони робіт – рожевим позначено ділянки видобутку корисних копалин (горизонти 196 та 202), а жовтим – зони розкривних робіт, при цьому сині лінії окреслюють контури ділянок.

Таблиця 1

Результати підрахунку об'ємів

Назва ділянки	Площа (м ²)	Виїмка (м ³)	Насип (м ³)	Чистий об'єм (скорег.) (м ³)
Гор. 196	491,89	359,07	2,01	489,88
Розкрив	3497,52	2465,75	273,17	3224,34
Гор. 202	3382,53	1392,19	77,87	3304,66
Всього	7372,94	4217,01	353,05	7018,88

Таблиця 1 демонструє результати маркшейдерських підрахунків об'ємів виїмної блочної сировини та розкривних порід, отриманих методом порівняння цифрових моделей місцевості. На ділянці горизонту 196 площею 491,89 м² виконано виїмку об'ємом 359,07 м³, що з урахуванням насипу 2,01 м³ дає скорегований чистий об'єм 489,88 м³. Найбільший об'єм видобутку спостерігається на ділянці розкриву площею 3497,52 м², де об'єм виїмки становить 2465,75 м³, а скорегований показник – 3224,34 м³. На горизонті 202 при площі 3382,53 м² об'єм виїмки склав 1392,19 м³ із скорегованим значенням 3304,66 м³. Загальний обсяг видобутих матеріалів за досліджуваний період становить 4217,01 м³ виїмки та 7018,88 м³ чистого скорегованого об'єму при загальній площі досліджуваних ділянок 7372,94 м².

Використання запропонованої методики дозволяє суттєво підвищити точність та оперативність маркшейдерських підрахунків квартальної зйомки порівняно з традиційними методами. Автоматизація процесу обробки даних та застосування сучасних програмних засобів значно зменшує вплив людського фактора на результати розрахунків, що підвищує їх об'єктивність та достовірність.

На основі проведеного дослідження можна зробити наступні **висновки**:

1. Застосування безпілотних літальних апаратів та сучасних методів фотограмметрії дозволяє суттєво підвищити ефективність маркшейдерських підрахунків квартальної зйомки виїмної блочної сировини та розкривних порід;
2. Оптимальними параметрами для аерофотограмметричної зйомки кар'єру є: висота польоту 60 м, повздовжнє перекриття 80 %, поперечне перекриття 70 %. Такі параметри забезпечують достатню деталізацію знімків (2,14 см/піксель) та високу точність побудови цифрової моделі місцевості;
3. Для забезпечення високої точності вимірювань необхідно використовувати комбіновану систему опорних точок, що включає постійні забетоновані маркери та тимчасові опорні точки на ключових висотних відмітках;
4. Стандартизація процесу зйомки, враховуючи збереження однакових маршрутів польоту та запуск дрона з фіксованої точки, є критично важливою для забезпечення порівнянності результатів різних періодів;
5. Сезонні фактори, зокрема стан рослинності, впливають на якість фотограмметричної обробки. Зйомка у період відсутності листя на деревах забезпечує більш високу точність результатів.

Список використаної літератури:

1. Small UAV-borne polarimetric SAR imaging system / I.Catapano, G.Ludeno, G.Gennarelli, F.Soldovieri // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, Issue 21. DOI: 10.3390/rs11212573.
2. Зуска А.В. Сучасні методи маркшейдерського забезпечення гірничих робіт : навч. посіб. / А.В. Зуска. – Дніпро : НТУ «ДП», 2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.nmu.org.ua/ua/content/infrastructure/structural_divisions/science_met_dep/composition_writing/Зуска_А.В._Сучасні%20методи.pdf.
3. Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas / X.Tong, X.Liu, P.Chen and other // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7, Issue 6. – P. 6635–6662. DOI: 10.3390/rs70606635.
4. Nguyen H. Kriging for set-valued data / H.Nguyen, N.Cressie, A.Baddeley // Spatial Statistics. – 2019. – Vol. 32. DOI: 10.1016/j.spasta.2019.100359.
5. Нормативно-правове регулювання надрокористування / Г.І. Рудько, О.В. Миргородський, М.М. Курило, О.А. Лагода. – Київ : Гіперіон, 2019.
6. 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. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.11.021.

7. Волковський О.С. Використання безпілотних літальних апаратів при виконанні маркшейдерських робіт на відкритих гірничих розробках / О.С. Волковський, К.М. Бондар // Вісник Криворізького національного університету. – 2022. – Т. 54. – С. 133–138. DOI: 10.31721/2306-5451-2022-1-54-133-138.
8. Cook K.L. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection / K.L. Cook // *Geomorphology*. – 2017. – Vol. 278. – P. 195–208. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.11.009.
9. Cryderman C. Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations / C. Cryderman, S.B. Mah, A. Shufletoski // *Geomatica*. – 2014. – Vol. 68, Issue 4. – P. 309–317. DOI: 10.5623/cig2014-405.
10. Oniga V.E. Determining the optimum number of ground control points for obtaining high precision results based on UAS images / V.E. Oniga, A.I. Breaban, F. Statescu // *Proceedings*. – 2018. – Vol. 2, Issue 7. DOI: 10.3390/ecrs-2-05165.
11. Азаркова Н.В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Маркшейдерські роботи на кар'єрах» / Н.В. Азаркова. – Дніпро : НТУ «ДП», 2020.
12. Mini 3 Pro User Manual / DJI. – 2022 [Electronic resource]. – Access mode : https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mini_3_Pro/20220509/DJI_Mini_3_Pro_User_Manual_v1.0_EN.pdf.
13. Agisoft Metashape User Manual / Agisoft LLC. – Professional Edition. Version 2.0. – 2022 [Electronic resource]. – Access mode : https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf.
14. Civil 3D Documentation / Autodesk. – 2023 [Electronic resource]. – Access mode : <https://knowledge.autodesk.com/support/civil-3d>.

References:

1. Catapano, I., Ludeno, G., Gennarelli, G. and Soldovieri, F. (2019), «Small UAV-borne polarimetric SAR imaging system», *Remote Sensing*, Vol. 11, Issue 21, doi: 10.3390/rs11212573.
2. Zuska, A.V. (2021), *Suchasni metody marksheiderskoho zabezpechennia hirnychikh robit, navch. posib.*, NTU «DP», Dnipro, [Online], available at: https://www.nmu.org.ua/ua/content/infrastructure/structural_divisions/science_met_dep/composition_writing/Zuska_A.V._Suchasni%20metody.pdf
3. Tong, X., Liu, X., Chen, P. et al. (2015), «Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas», *Remote Sensing*, Vol. 7, Issue 6, pp. 6635–6662, doi: 10.3390/rs70606635.
4. Nguyen, H., Cressie, N. and Baddeley, A. (2019), «Kriging for set-valued data», *Spatial Statistics*, Vol. 32, doi: 10.1016/j.spasta.2019.100359.
5. Rudko, H.I., Myrhorodskiy, O.V., Kurylo, M.M. and Lahoda, O.A. (2019), *Normatyvno-pravove rehuliuвання nadrokorystuvannya*, Hiperion, Kyiv.
6. 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, doi: 10.1016/j.geomorph.2016.11.021.
7. Volkovskiy, O.S. and Bondar, K.M. (2022), «Vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ pry vykonanni marksheiderskykh robit na vidkrytykh hirnychikh rozrobkakh», *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, Vol. 54, pp. 133–138, doi: 10.31721/2306-5451-2022-1-54-133-138.
8. Cook, K.L. (2017), «An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection», *Geomorphology*, Vol. 278, pp. 195–208, doi: 10.1016/j.geomorph.2016.11.009.
9. Cryderman, C., Mah, S.B. and Shufletoski, A. (2014), «Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations», *Geomatica*, Vol. 68, Issue 4, pp. 309–317, doi: 10.5623/cig2014-405.
10. Oniga, V.E., Breaban, A.I. and Statescu, F. (2018), «Determining the optimum number of ground control points for obtaining high precision results based on UAS images», *Proceedings*, Vol. 2, Issue 7, doi: 10.3390/ecrs-2-05165.
11. Aharkova, N.V. (2020), «Metodychni vkazivky do vykonannya laboratornykh robit z dystsypliny “Marksheiderski roboty na karierakh”», NTU «DP», Dnipro.
12. DJI (2022), *Mini 3 Pro User Manual*, [Online], available at: https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mini_3_Pro/20220509/DJI_Mini_3_Pro_User_Manual_v1.0_EN.pdf
13. Agisoft LLC (2022), *Agisoft Metashape User Manual*, Professional Edition, Version 2.0, [Online], available at: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf
14. Autodesk (2023), *Civil 3D Documentation*, [Online], available at: <https://knowledge.autodesk.com/support/civil-3d>

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

Наукові інтереси:

- організація та планування гірничих робіт;
 - маркшейдерська справа;
 - цифрове знімання з БПЛА.
- E-mail: km_yuoa@ztnu.edu.ua.

Левицький Володимир Григорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0002-3892-5848>.

Наукові інтереси:

- процеси гірничого виробництва;
- маркшейдерські роботи.

E-mail: v.levytskyi@ztu.edu.ua.

Yanovych O.A., Levytskyi V.G.

Modern approaches to performing mine surveying calculations of quarterly surveying of extracted block raw materials and overburden using UAVs

The paper presents a methodology for performing mine surveying calculations of quarterly surveying of extracted block raw materials and overburden using aerial photogrammetry technology. The research is based on the use of the DJI Mini 3 Pro unmanned aerial vehicle for surveying deposit areas and subsequent data processing in specialized software Agisoft Metashape and Civil 3D. An optimal flight planning methodology has been developed with image overlap parameters of 80/70 % and a shooting height of 60 m, which ensures high accuracy of the final models. Special attention is paid to the system of fixing and coordinating reference points, which consisted of permanent concrete markers and temporary points marked with paint directly on blocks in the quarry. Analysis of measurement accuracy showed that the root mean square error was 48–57 mm for reference points and 123–138 mm for check points. It has been proven that seasonal changes, particularly the absence of leaves on trees, positively affect the quality of photogrammetric processing, improving the recognition of tie points. The proposed technology provides effective determination of the volume of extracted mining mass and overburden with high accuracy and significantly less time and resource costs compared to traditional methods of mine surveying measurements.

Keywords: mine surveying support; aerial photogrammetry; UAV; digital surface modeling; Civil 3D; Agisoft Metashape; digital surveying; volume calculation.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2025.