

## **Визначення параметрів автофокуса об'єктива при дослідженні деформаційних процесів за допомогою цифрового стереознімання**

*Об'єкти Криворізьких гірничодобувних підприємств займають великі території, тому їх моніторинг потребує значних матеріальних витрат та часу. Сучасні дистанційні методи дозволяють підвищити ефективність цих робіт не тільки за рахунок скорочення часу на їх виконання, а й за рахунок підвищення точності отриманих результатів та забезпечення безпеки виконання вимірів. Найбільш ефективним дистанційним методом спостереження за деформаційними процесами на об'єктах гірничодобувних підприємств є фотограмметричний з використанням цифрових камер, характеристики яких впливають на якість отриманих зображень.*

*Метою дослідження є аналіз характеристик цифрових камер з метою визначення їх оптимальних значень для отримання знімків високої якості при нестандартному розташуванні базису відносно об'єкту зйомки. Методика робіт полягає у виконанні експериментальних знімків з різними параметрами камери з подальшим опрацюванням отриманих знімків. Експериментальні роботи було виконано на об'єктах ПРАТ «ЦГЗК» та будівлях міста. В результаті досліджень визначені оптимальні параметри камери, які дозволяють отримувати знімки високої якості при нестандартному розташуванні базису відносно об'єкта знімання. Наукова новизна досліджень полягає в отриманні ефективної методики виконання знімальних робіт в складних умовах, на об'єктах гірничодобувних підприємств, коли зніманням необхідно охопити велику площу.*

*Практична значущість отриманих результатів полягає у розробленні ефективної методики цифрового знімання великих площ під кар'єрами, відвалами та іншими об'єктами, на яких здійснюються роботи зі спостереження за деформаційними процесами. Отримана методика дозволяє підвищити точність моніторингу об'єктів гірничодобувних підприємств та забезпечити безпеку виконання робіт.*

**Ключові слова:** цифрова зйомка; характеристики камери; деформації; зсув; гірський масив

**Вступ.** Дистанційні методи знімання особливо ефективні при дослідженні за стійкістю бортів кар'єрів і відвалів та станом інших об'єктів, розташованих на територіях гірничих відводів гірничодобувних підприємств, на яких небезпечно знаходиться виконавцю робіт або немає можливості прямого доступу до них [1]. Класичні маркшейдерсько-геодезичні методи контролю деформаційних процесів забезпечують високу точність визначення величин деформацій у місцях знаходження реперів профільних ліній, однак не дозволяють охопити інструментальними вимірами весь масив. Але так як більшість Криворізьких кар'єрів, відвалів та зон зсуву і провалів мають великі розміри, тобто займають великі площі, то роботи, пов'язані зі спостереженням за різного роду деформаціями з використанням класичних методів, виконуються тривалий час та вимагають значних матеріальних витрат. Тому виробничниками та вченими приділяється значна увага впровадженню ефективних дистанційних методів з використанням сучасних приладів та програм [2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Фотограмметричні методи завжди були ефективними при вирішенні широкого кола задач майже у всіх галузях народного господарства, в тому числі і в гірництві. Ці методи дозволяють: у короткий термін складати карти й плани на великі ділянки з мінімальними матеріальними витратами; визначати об'єми земляних та гірничих робіт без впливу на результати особистих помилок; визначати координати великої кількості точок фактично на один фізичний момент, не використовуючи для цього трудомісткі польові роботи; досліджувати важкодоступні об'єкти або небезпечні для знаходження на них людини тощо [3, 4]. Сьогодні ці методи отримали новий поштовх у своєму розвитку, чому посприяв розвиток цифрових технологій [5, 6].

Останнім часом для підвищення ефективності фотограмметричного методу знімання використовуються безпілотні літальні апарати БПЛА, на які може встановлюватися устаткування, що дозволяє вирішувати широке коло задач підприємства [7, 8]. Окрім БПЛА на гірничодобувних підприємствах широко використовуються електронні прилади, які можуть працювати без відбивача та здійснювати дистанційні вимірювання. Всі дистанційні методи мають свої переваги, але цифровий

фотограмметричний метод є найбільш ефективний серед інших, особливо при дослідженнях деформацій будівель, споруд та земної поверхні [9].

Переваги фотограмметричних методів досліджено у багатьох роботах вітчизняних та зарубіжних вчених. Їх дослідження спрямовані на вибір платформи для виконання знімальних робіт, типу знімальної апаратури, способу геодезичної прив'язки та програмного забезпечення для опрацювання отриманої інформації [10–12]. При цьому недостатньо уваги приділено аналізу та удосконаленню основних параметрів знімальної камери, від характеристик якої залежить якість зображення та побудованої цифрової моделі.

**Метою статті** є розробка методики виконання наземного цифрового знімання за допомогою удосконаленої техніки підготовки апаратури до процесу знімання.

**Викладення основного матеріалу.** Проектування цифрової фототеодолітної зйомки для кожного об'єкта виконується після детального вивчення характеристики місцевості та польового рекогносрування. При виборі місць розташування станцій знімання, визначальним було забезпечення безперешкодної видимості на об'єкт та безпеки знаходження безпосередніх виконавців робіт. На практиці часто бази фотографування доводиться розташовувати під значним кутом до об'єкта знімання, як, наприклад, було здійснено під час дослідження провалля, спричиненого підземними гірничими роботами шахти ім. Колачевського (рис. 1).

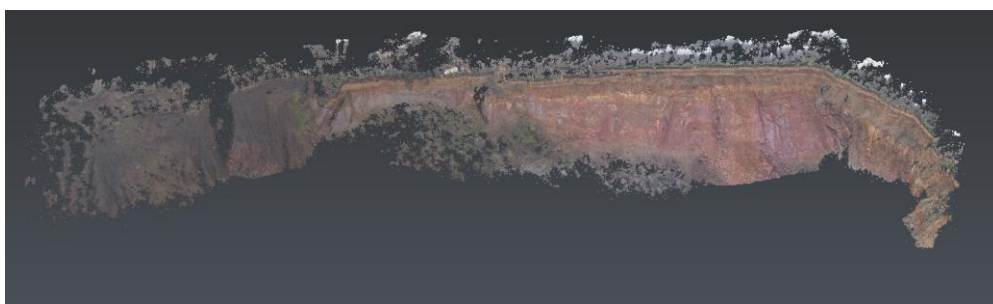


Рис. 1. Хмара точок 3D-моделі укосу провалля від шахти ім. Колачевського

Але при значному куті скосу головного оптичного променя, завдяки невеликій відстані до об'єкта знімання (від 240 до 495 м), отримано високу щільність точок 3D-моделі: при стандартних програмних налаштуваннях – із кроком 7–8 мм; при підвищених – із кроком 3–5 мм. Такий рівень деталізації забезпечує можливість контролювати не лише динаміку зсувних процесів, але й стан всього гірського масиву в межах зон геологічних порушень.

На досліджуваній території гірничого відводу перетинаються чотири тектонічні розломи, що накладає додаткові навантаження на методику робіт та підвищує вимоги до точності отримання даних моніторингу. На рисунку 2 представлені результати дослідження зони провалля за допомогою цифрового знімання, на якому у правій частині наведено шкалу величин деформацій та кількість точок у відсотках з певною величиною.

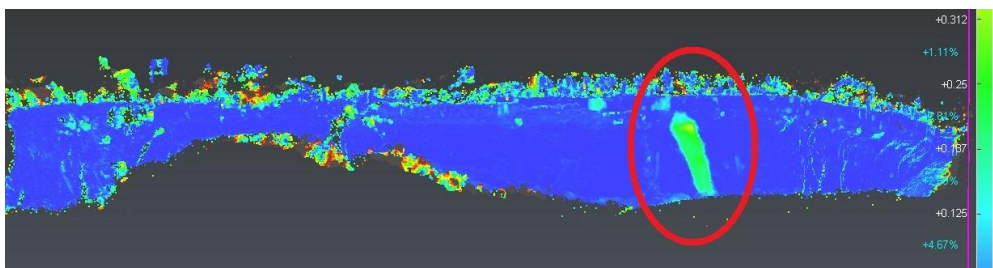


Рис. 2. Результати моніторингу зони провалля від шахти ім. Колачевського

Великі розміри кар'єрів Криворізького басейну впливають на збільшення відстаней до об'єктів знімання при виконанні цифрової стереофотограмметричної зйомки, що викликає певні складності при опрацюванні знімків отриманого масштабу. Зокрема, при дослідженні стану східного борту кар'єру № 1 ПрАТ «Центральний гірничозбагачувальний комбінат», відстані від західного борту до об'єктів знімання становлять від 900 до 1300 метрів (рис. 3).

На рисунку 4 представлені результати моніторингу східного борту кар'єру № 1 ПрАТ «ЦГЗК» з розфарбуванням певних величин відповідним кольором.

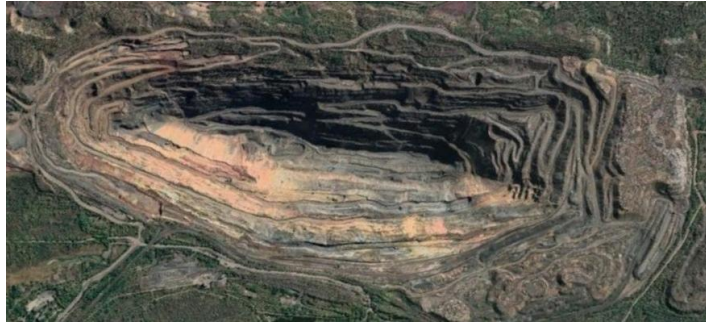


Рис. 3. Кар'єр № 1 ПРАТ «ЦГЗК»

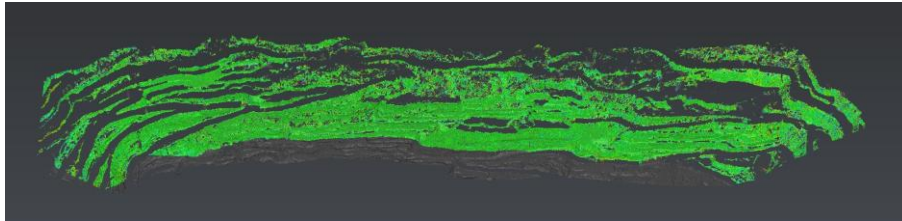


Рис. 4. Результати моніторингу східного борту кар'єру № 1 ПРАТ «ЦГЗК»

При дослідженні стану бортів кар'єру № 4 ПРАТ «ЦГЗК» також було враховано вплив величини скосу головного оптичного променя (при зйомці південної і північної частини борту) та відстані до верхніх горизонтів західного борту, яка складає близько 1280 метрів. На рисунку 5 представлені результати моніторингу південного, західного та північного борту кар'єру № 4 ПРАТ «ЦГЗК» з розфарбуванням величин деформацій.

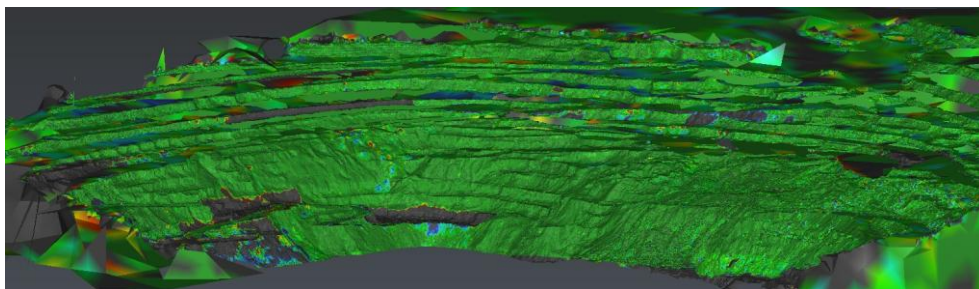


Рис. 5. Результати моніторингу південного, західного і північного борту кар'єру № 4 ПРАТ «ЦГЗК»

Отримані нами результати спостережень за станом бортів кар'єрів Кривбасу довели, що під час використання нестандартного розташування базисів відносно об'єктів знімання, виникає спотворення класичної геометрії взаємного їх розташування, що потім практично не можна виправити, й це впливає на збільшення похибок на краях знімальної ділянки.

При цьому, підвищити якість результатів знімання суттєво віддалених ділянок, можна за рахунок підвищення якості вихідних даних, тобто якості цифрових знімків, за якими будуються цифрові моделі. Якість і детальність цифрової моделі, отриманої за результатами наземної цифрової стереофотограмметричної зйомки, залежать безпосередньо від технічних характеристик цифрового знімального обладнання. Основними характеристиками обладнання, які впливають на якість отриманого цифрового матеріалу є: роздільна здатність матриці (розмір пікселів та розміри матриці); властивості оптики об'єктива, його фокусна відстань, діафрагма та система фокусування.

Оскільки знімання гірничих виробок виконується аналогічно як знімання відкритих територій, при якому суттєве значення має параметр ISO, який дозволяє мінімізувати змазування зображення, що виникає від впливу поривів вітру, та недоліки зображення через недостатню освітленість, що виникає під час знімання. Таким чином, як показали дослідження, при виникненні екстремальних умов при виконанні польових робіт, практично всі характеристики знімального обладнання важливі, так як кожна з них впливає на кінцевий результат – якість побудови моделі.

Протягом виконання наземного стереознімання гірничих виробок у період з 2005 по 2025 рік, було використано п'ять цифрових камер: Canon 350D, Canon 1200D, Canon 750D, Canon 6D Mark II та сучасна

камера Canon 5DS R. Також було застосовано близько десятка об'єктивів із фіксованою фокусною відстанню – від «портретника» Canon EF 50 mm до довгофокусних систем типу MC 3M-5CA 500 mm.

У даний час у цифровій камері Canon 5DS R використовується 85-міліметровий об'єктив Sigma 85 mm f/1.4 DG HSM, а також 50-міліметровий Canon EF 50 mm f/1.4, як резервний. Камера Canon 5DS R та об'єктиви Sigma 85 mm f/1.4 DG HSM та Canon EF 50 mm f/1.4 належать до преміального класу, вони забезпечують високу чіткість та загальну якість зображення завдяки матриці з роздільною здатністю 50,6 МП. Але і будь-який високоякісний об'єктив преміального класу, у більшості випадків, має незначні похибки автофокусування, що призводить до зниження якості отриманих зображень.

Методика наземного стереознімання, яке виконується на кар'єрах Кривого Рогу при дослідженні зсувів та різного роду деформацій, відрізняється від класичної тим, що не потребує фокусування на близько розташовані об'єкти, а здійснюється воно переважно на віддалені об'єкти, що забезпечується положенням об'єктива на нескінченність. Для більшості об'єктивів зона чіткого зображення, що відповідає положенню об'єктива на нескінченність, починається з відстані приблизно 30 метрів. Через це, технічним рішенням було обрано калібрування фокусування об'єктива виключно за об'єктами, розташованими на значних відстанях.

За тестовий об'єкт зйомки було використано елементи місцевості, розташовані на різних відстанях. Для точного налаштування автофокусування було відібрано контрольні об'єкти, розташовані на дистанціях 40, 137, 201, 344, 876 та 1070 метрів. Такий набір відстаней забезпечує охоплення практично всього робочого діапазону дистанцій, характерних для наземного стереознімання гірничих виробок. На рисунку 6 червоним кольором показані контрольні об'єкти, а на рисунку 7 – їх збільшене зображення з наведенням відстаней до них.



Рис. 6. Контрольні об'єкти, використані для калібрування автофокусування

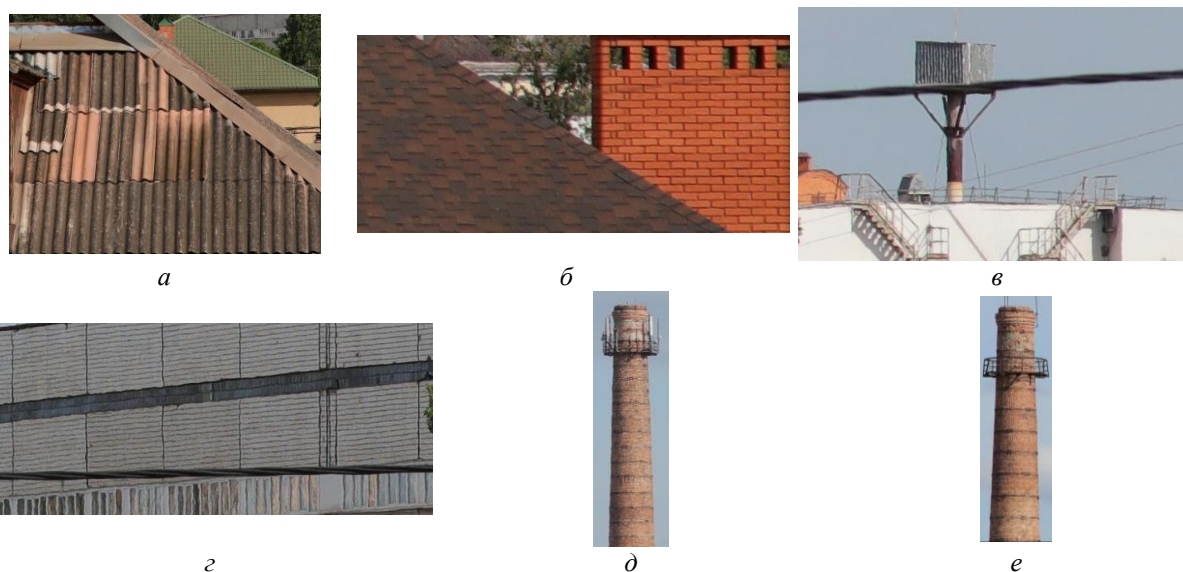


Рис. 7. Відстані до контрольних об'єктів: а – 40 м; б – 137 м; в – 876 м; г – 201 м; д – 344 м; е – 1070 м

Для мікрорегулювання, тобто точного налаштування автофокусу об'єктів, може застосовуватися програмний комплекс Reikan Focal. Цей програмний комплекс дозволяє виконати вибір оптимальних параметрів автофокусування. Для цього використовується можливість програми під'єднання цифрової камери до персонального комп'ютера та, аналізуючи серію знімків роздрукованого еталону, визначати необхідні коригування для фокусування об'єктива.

Знімання кожного об'єкта виконувалося зі штатива з однаковими налаштуваннями камери, змінювався лише параметр «Точне налаштування АФ» у діапазоні від +20 до -20 одиниць.

У результаті проведеного експерименту було отримано 240 знімків, за результатами оцінювання їх якості у програмному забезпеченні Agisoft Metashape, було побудовано шість окремих графіків, а для мінімізації похибок, зниження рівня випадкового шуму та отримання узагальненої тенденції всі дані були агреговані в один загальний графік (рис. 8).

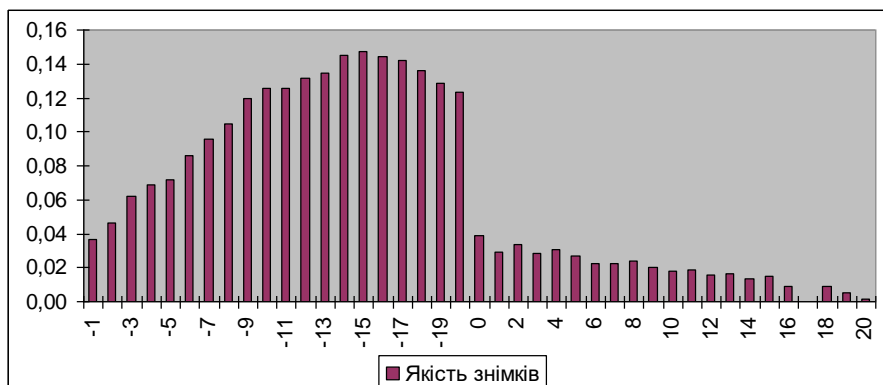


Рис. 8. Загальний графік оцінки якості знімків

За підсумковим графіком встановлено, що найвища якість зображень досягається при значеннях параметра «Точне налаштування АФ» у діапазоні від -14 до -17. Враховуючи отримані дані, при мікрорегулюванні автофокусу було встановлено значення -15, як є оптимальним та використовувалося у подальшому при виконанні робіт зі спостереження за деформаціями.

Перевірку якості калібрування камери також здійснено шляхом порівняння знімків уступу шахти ім. Колачевського. На цьому об'єкті відстані до об'єктів знімання коливаються в межах 350–700 м (з урахуванням дальніх об'єктів, що знаходяться за межами провалля). Калібрування автофокусу дозволило суттєво підвищити чіткість та детальність зображень на великих відстанях до об'єкту знімання, наприклад, на відстані 1310 м під час знімання копра сусідньої шахти. Різницю якості зображень, залежно від значення параметру «Точне налаштування АФ», можна оцінити по знімках, отриманих в результаті знімання у зоні зсуву від шахти ім. Колачевського за дати 10.05.2024 р. (до калібрування автофокусу) та 27.05.2024 р. (після калібрування автофокусу). На рисунку 9 наведені зображення копра шахти, на рисунку 10 – будівлі, розташовані в зоні зсуву, а на рисунку 11 – укіс обвалу.

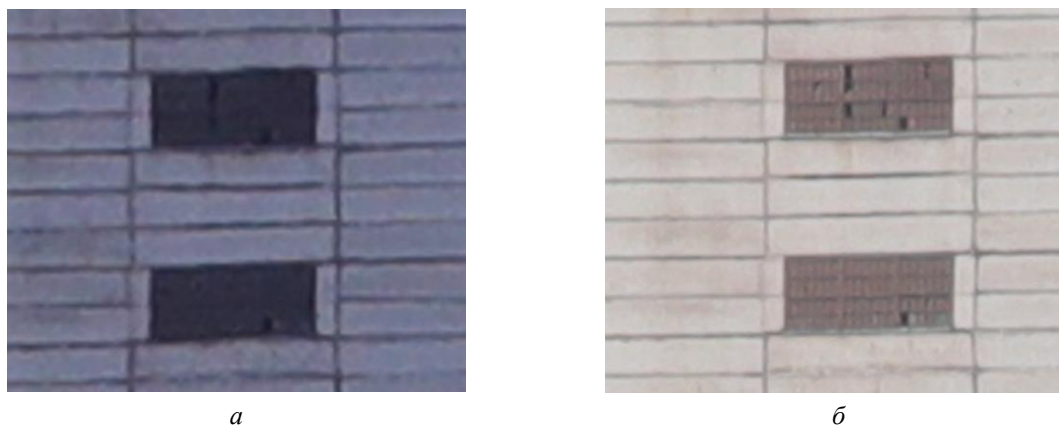


Рис. 9. Порівняння якості зображень копра шахти, отриманих з відстані 510 м: а – за дату 10.05.2024 р.; б – за дату 27.05.2024 р.

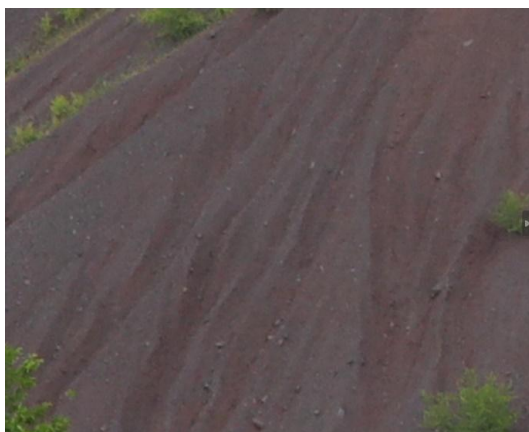


а



б

Рис. 10. Порівняння якості зображень будівлі, отриманих з відстані 510 м:  
а – за дату 10.05.2024 р.; б – за дату 27.05.2024 р.



а



б

Рис. 11. Порівняння якості зображень укосу обвалу, отриманих з відстані 510 м:  
а – за дату 10.05.2024 р.; б – за дату 27.05.2024 р.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Отримання детальної цифрової моделі місцевості або високоточних хмар точок є неможливим без отримання за результатами знімання якісних цифрових знімків об'єкта зйомки. Для забезпечення високої якості зображень, незалежно від класу об'єктива чи цифрової камери (аматорського чи професійного рівня), необхідним етапом є виконання робіт з калібрування об'єктива. Зі збільшенням кількості пікселів на площу цифрової матриці, відповідно зростає допустима віддаленість об'єктів зйомки, що підвищує вимоги до точності калібрування оптичної системи.

#### References:

1. Dolgikh, O. and Dolgikh, L. (2020), «The study of the collapse zone by remote methods», *E3S Web of Conferences*, doi: 10.1051/e3sconf/202016603002.
2. Vassena, G. and Clerici, A. (2018), «Open pit mine 3D mapping by TLS and digital photogrammetry: 3D model update thanks to a slam based approach», *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-1145-2018.
3. Pozzebon, A., Benini, M., Bocci, C. et al. (2023), «Grid-layout ultrasonic LoRaWAN-based sensor networks for the measurement of the volume of granular materials», *Measurement*, Vol. 220, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113404.
4. Xiao, K., Li, C., Fan, M. et al. (2024), «Quantitative prediction methods and applications of digital ore deposit models», *Ore Geology Reviews*, Vol. 168, doi: 10.1016/j.oregeorev.2024.106049.
5. Stothard, P. and Shirani, Faradonbeh R. (2023), «Application of UAVs in the mining industry and towards an integrated UAV-AI-MR technology for mine rehabilitation surveillance», *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Taylor and Francis Ltd.*, doi: 10.1080/25726668.2023.217.

6. Kovanič, L., Peřovský, P., Topitzer, B. and Blišťan, P. (2024), «Spatial Analysis of Point Clouds Obtained by SfM Photogrammetry and the TLS Method – Study in Quarry Environment», *Land*, doi: 10.3390/land13050614.
7. Kim, D.-P., Kim, S.-B. and Back, K.-S. (2022), «Analysis of Mine Change Using 3D Spatial Information Based on Drone Image», *Sustainability*, Vol. 14, 3433, doi: 10.3390/su14063433.
8. Yang, K., Hu, Z., Liang, Y. et al. (2022), «Automated Extraction of Ground Fissures Due to Coal Mining Subsidence Based on UAV Photogrammetry», *Remote Sens*, Vol. 14, doi: 10.3390/rs14051071.
9. Kalinichenko, V., Dolgikh, O., Dolgikh, L. and Pysmennyi, S. (2020), «Choosing a camera for mine surveying of mining enterprise facilities using unmanned aerial vehicles», *Mining of Mineral Deposits*, doi: 10.33271/mining14.04.031.
10. Meng, X., Zhang, D., Dong, S. and Yao, C. (2024), «Open-Pit Granite Mining Area Extraction Using UAV Aerial Images and the Novel GIPNet», *Remote Sens*, Vol. 16, doi: 10.3390/rs16050789.
11. Wang, Q., Fang, N., Zeng, Y. et al. (2025), «Optimizing UAV-SfM photogrammetry for efficient monitoring of gully erosion in high-relief terrains» *Measurement*, Vol. 256, doi: 10.1016/j.measurement.2025.118154.
12. Cho, J., Jeong, S. and Lee, B. (2025), «Optimal ground control point layout for UAV photogrammetry in high precision 3D mapping», *Measurement*, Vol. 257, doi: 10.1016/j.measurement.2025.118343.

**Долгіх** Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, доцент Криворізького національного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-7558-8724>.

Наукові інтереси:

- автоматизація маркшейдерських та гірничих робіт;
- цифрові методи фотограмметрії в маркшейдерії.

E-mail: o.dolhikh@knu.edu.ua.

**Долгіх** Любов Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент Криворізького національного університету.

<https://orcid.org/0000-0003-0577-5086>.

Наукові інтереси:

- цифрові методи фотограмметрії у маркшейдерії.

E-mail: dllvgeod@knu.edu.ua.

**Dolgikh O.V., Dolgikh L.V.**

#### **Determination of autofocus parameters of a lens for investigating deformation processes using digital stereoscopic imaging**

The facilities of Kryvyi Rih mining enterprises occupy vast areas, which makes their monitoring time-consuming and requires significant material resources. Modern remote-sensing methods improve the efficiency of such work not only by reducing the time needed for data acquisition, but also by increasing the accuracy of the obtained results and ensuring the safety of measurement operations. The most effective remote method for monitoring deformation processes at mining sites is photogrammetry using digital cameras, whose characteristics directly affect the quality of the resulting images. The aim of this study is to analyze digital camera parameters in order to determine their optimal values for obtaining high-quality images under non-standard baseline configurations relative to the surveyed object. The research methodology involves performing experimental imaging with various camera settings, followed by processing of the acquired images. Experimental work was carried out at the facilities of PJSC «CGOK» and on buildings within the city. As a result of the study, optimal camera parameters were identified that enable obtaining high-quality images under non-standard baseline positioning relative to the object of interest. The scientific novelty lies in developing an effective methodology for image acquisition in challenging conditions at mining sites, particularly when large areas must be covered. The practical significance of the obtained results is the development of an efficient digital imaging method for large areas near open pits, waste dumps, and other facilities where deformation monitoring is conducted. The proposed methodology enhances both the accuracy of monitoring and the safety of field operations.

**Keywords:** digital imaging; camera characteristics; deformations; displacement; rock mass.

Стаття надійшла до редакції 07.01.2026.