

УДК 622.1:528.02

О.В. ДОЛГІХ, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

## ВИБІР ТИПУ ЗНІМАЛЬНОЇ КАМЕРИ ДЛЯ МАРКШЕЙДЕРСЬКОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГІРНИЧОДОБУВНИХ ПІДПРИЄМСТВ

**Метою** досліджень є аналіз цифрової дзеркальної камери та камери мобільного телефону з метою вибору певного типу для виконання зйомок об'єктів гірничодобувних підприємств. Виконання аналізу залежності точності знімальних робіт від характеристик знімального устаткування, умов об'єкту та задач, які вирішуються за її результатами. Спираючись на вимоги до певного виду знімальних робіт, пропонується вибір найбільш ефективних засобів знімання.

**Методи досліджень** ґрунтуються на аналізі виконаних знімальних робіт на різних об'єктах гірничодобувних підприємств: кар'єрах, відвалах, хвостосховищах, проммайданах. Обґрунтовано використання камер мобільних телефонів для вирішення задач, що не потребують високої точності визначень, та дзеркальних цифрових камер для вирішення задач з достатньо високою точністю.

**Наукова новизна** результатів досліджень полягає в отриманні даних для обґрунтування вибору фотограмметричних характеристик камер, які можуть використовуватися для виконання знімальних робіт з необхідною або достатньою точністю визначень за побудованими цифровими планами та моделями. Аналіз результатів досліджень дозволив зробити висновок про можливість використання камер деяких мобільних телефонів для зйомок об'єктів гірничодобувних підприємств.

**Практична значимість** виконаних досліджень полягає у визначенні даних, необхідних для вибору знімальної камери при вирішенні задач, що характеризуються різною точністю, оперативністю та умовами виконання. Отримані характеристики камер мобільних телефонів, які можуть використовуватися для зйомок гірничих об'єктів та визначені умови і особливості виконання таких знімальних робіт. Встановлено, що на точність цифрової моделі, отриманої камерою мобільного телефону, суттєво впливає схема розташування опорних точок.

**Результати досліджень.** Знімальні роботи, виконані різними камерами, дозволили визначити характеристики з якості зображень. Досліджені питання зменшення геометричних спотворень зображення, вибору програмного забезпечення для опрацювання зображень, зменшення залежності щільності матриці пікселів та кута охоплення зйомкою місцевості від елементів внутрішнього орієнтування камери. Визначено вимоги до параметрів знімання об'єктів гірничодобувних підприємств та точність знімання за допомогою камери мобільного телефону.

**Ключові слова:** цифрова зйомка, тип камери, гірничодобувні підприємства, точність зйомки.

doi:10.31721/2306-5451-2022-1-54-63-70

**Проблема і її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Актуальній темі впровадження цифрової зйомки для створення маркшейдерських планів на об'єкти гірничодобувних підприємств та для дослідження їх стану присвячена значна кількість наукових праць. Актуальність впровадження цифрової фотограмметрії підтверджується підвищенням ефективності маркшейдерського забезпечення гірничих робіт не тільки при відкритій, а й при підземній розробці родовищ корисних копалин. Заслугують на увагу дослідження з використання дронів для зйомки підземних гірничих виробок.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Підвищенню ефективності маркшейдерського забезпечення сприяє використання методів цифрової фотограмметрії для виконання знімальних робіт з повітря та з землі [1-3]. На сьогодні на гірничодобувних підприємствах впроваджуються ресурсозберігаючі технології [4] які вимагають ефективного маркшейдерського забезпечення. Особлива увага приділяється впровадженню сучасних технологій для робіт зі спостереження за зсувами та деформаціями окремих об'єктів, гірських порід та денної поверхні [5-9].

**Постановка задачі.** З кожним роком на ринку з'являється велика кількість високотехнологічних приладів, інструментів, пристроїв, що дозволяє вибрати найбільш доцільні прилади для вимірвальних робіт чи камеру для зйомок [10]. Але вибрана камера повинна бути досліджена

[11-14]. У 1999 році з'явився перший мобільний телефон з камерою VisualPhone VP-210. Телефон дозволяв зробити 20 кольорових фотографій у форматі JPEG. На той час більшість телефонів не комплектувалися камерами, а у 2000 році з'явилась модель Nokia 3310 з камерою. Інтенсивний розвиток галузі дозволив вже у вересні 2010 року компанією Nokia випустити на ринок Nokia N8 – смартфон з найсучаснішою на той час камерою з матрицею у 12 мегапікселей і її розміром 1/1,83". Дзеркальні цифрові камери на той час показували достатньо високі якісні характеристики. У 2002 році компанія Canon мала в асортименті модель EOS-1Ds з матрицею у 11,4 мегапікселів, у 2020-2021 роках моделлю середнього сегменту став телефон Samsung Galaxy A31. За даними сайту виробника, камери мали матриці з 48 Мп, 8 Мп та 5 Мп, відповідно із діафрагмами f/2.0, f/2.4 та f/2.2. Камера такої моделі була об'єктом досліджень з метою використання її маркшейдерською службою гірничого підприємства при вирішенні різних виробничих завдань.

Важливим елементом цифрової камери, що відповідає за якість зображення (окрім роздільної здатності матриці) є об'єктив. Камера Samsung Galaxy A31 має матрицю з кількістю пікселів майже вдвічі більшу, ніж має камера Canon EOS 6D MarkII. Але відомо, що більша кількість пікселів не гарантує більш якісне зображення (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики камер

Камера	Кількість Мрiх	Діаметр лінзи об'єктиву, мм	Розмір матриці, мм
Samsung Galaxy A31	48	2	відсутні дані
Canon EOS 6D MarkII	26,2	40	359x24

**Викладення матеріалу та результати.** Важливою задачею є вибір камери для зйомки гірничих виробок. Звісно, що вимагати ідеальної якості зображення від камери з діаметром лінзи 2 мм та порівнювати її з камерою, яка має об'єктив з діаметром лінзи 40 мм, не зовсім коректно. Тому цифрова модель, побудована цифровою камерою Canon EOS 6D MarkII з об'єктивом Canon EF 50mm f/1.4USM була прийнята за еталон. Фотографування було виконане з 8 точок, в результаті отримано 143 знімка.

Попри значно більшу кількість пікселів в камері Samsung Galaxy A31, ніж в камері Canon EOS 6D MarkII, зображення отримані дзеркальним фотоапаратом, мають вищу якість. На рис. 1 наведено знімки, отримані з ближньої, середньої і дальньої відстаней, на яких видно різницю у якості зображень. Відомо, що на якість зображення також впливає величина фокусної відстані, для досліджуваних камер, вони складають відповідно 50 мм та 4 мм. Різниця фокусних відстаней викликає різні величини кута огляду місцевості та щільність пікселів, з яких складається зображення гірничих виробок.

Фактором впливу на якість зображення є наявність геометричних спотворень, що важливо у випадках, коли дані знімальних робіт використовуються для вирішення точних метричних задач. Значна кількість спеціальних програм з фотограмметричного опрацювання знімків має можливість виконання калібрування об'єктивів. Функція калібрування є в програмних продуктах Agisoft Metashape, 3DF Zephyr, PhotoModeler Premium, Photomod тощо. В першому наближенні, при попередній оцінці дисторсії та інших параметрів камери, можна користуватись програмним продуктом Imatest Master. В програмі Imatest Master є можливість за одним параметром визначити рівень геометричних спотворень і порівняти з візуально комфортною величиною дисторсії та з величинами спотворення інших камер.

Задача вибору камери і об'єктиву, для наземного стереоскопічного знімання гірничих виробок, не може вирішуватися один раз на тривалий час. Елементи знімальних камер постійно удосконалюються, тому характеристики камер змінюються: кількість пікселів в матриці, розмір матриці, схеми об'єктивів, розробляються нові матеріали для лінз та їх покриття. Постійне удосконалення характеристик камер дозволяє підвищувати якість результатів знімання.

У 2005-2008 роках Криворізьким національним університетом виконувалися роботи по складанню планів кар'єру Інгuleцького ЗГК в масштабі 1:1000. Для виконання таких робіт, оптимальною на той час цифровою знімальною апаратурою була камера Canon EOS350D з об'єктивом Canon Lens EF 50 mm 1:1,8II. Даний об'єктив був розроблений фірмою Canon у 1990 році і декілька десятків років був кращим за вагою, світлосилою та ціною. Цей об'єктив позиціонується як стандартний фікс-об'єктив, що складається з 6 елементів у п'яти групах. Ефективна фокусна відстань для камери з кроп фактором 1.6x (APS-C), якою є Canon EOS350D,

складає 80 мм. Для повнорозмірних матриць фокусна відстань дорівнює 50 мм. Більш «світлий» об'єктив Canon EF 50 mm f 1.4 USM з'явився у 1993 році. У 2015 році з'явився об'єктив Canon EF Lens 50 mm 1:1.8 STM, а у 2018 році – один з останніх – Canon Lens RF 50 mm F1.2 L USM. На останню модель ціна складає до 100 тисяч гривень, через що, для цифрового знімання гірничих виробок його застосування інколи економічно недоцільне. Між об'єктивами зі світловою потужністю 1.8 та надсвітлопотужними об'єктивами зі світловою потужністю 1.0 і 1.2, є модель Canon EF 50 mm f 1.4 USM, яка була прийнята за основний об'єктив для знімання кар'єрів і інших гірничих об'єктів у 2018-2021 роках.



*a*

*b*



*c*

*d*



*e*

*f*

**Рис. 1.** Порівняння якості зображень, отриманих різними камерами: *a, c, e* – зображення, отримані камерою пристрою Samsung Galaxu A31; *b, d, f* – зображення, отримані камерою Canon EOS 6D MarkII

Відповідно до вибору цифрової камери необхідно підкреслити, що для виконання досліджень, нами в різні часи використовувалися об'єктиви: Canon EOS350D; Canon 1100D; Canon 1200D; Canon 750D. А з 2019 року нами використовується повнокадрова камера Canon EOS 6D MarkII.

Для об'єктивів, які використовувалися у дослідженнях (Canon Lens EF 50 mm 1:1,8II, Canon EF 50 mm f 1.4 USM, Sigma AF 85/1.4 EX DG HSM), було визначено загальний параметр дис-

торсії. Ця величина була також досліджена для камер мобільних телефонів Huawei Y6 Pro, Samsung Galaxy A30S та Samsung Galaxy A31. Зазначені мобільні телефони мають різні дати виробництва і відповідно різні характеристики (табл. 2). Результати досліджень камер мобільних телефонів наведено на рис. 2-4.

Таблиця 2

Характеристики камер мобільних телефонів			
Мобільний пристрій	Кількість Мпіх	Світосила	Фокусна відстань/розмір сенсору
Samsung Galaxy A31	48	f/2.0	5 мм/1/2.0"
Samsung Galaxy A30S	25	f/1.70	4 мм/1/2.8"
Huawei Y6 Pro	13	f/2.0	4/відсутні дані

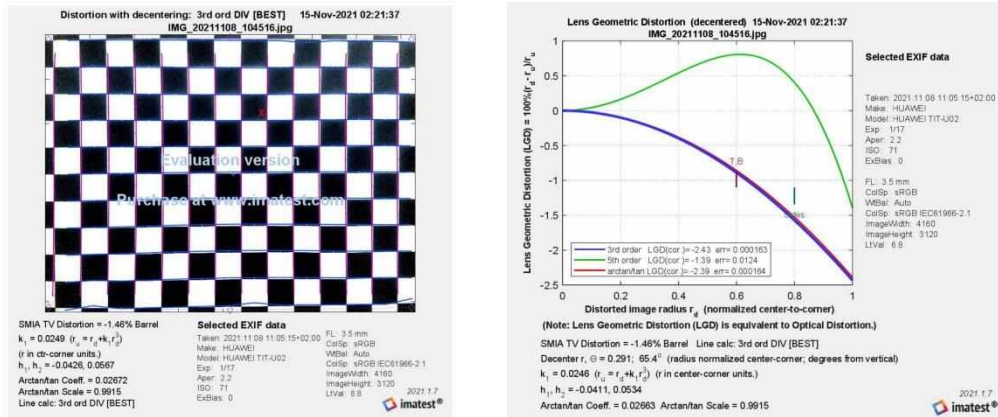


Рис. 2. Результати досліджень камери мобільного телефону Huawei Y6 Pro

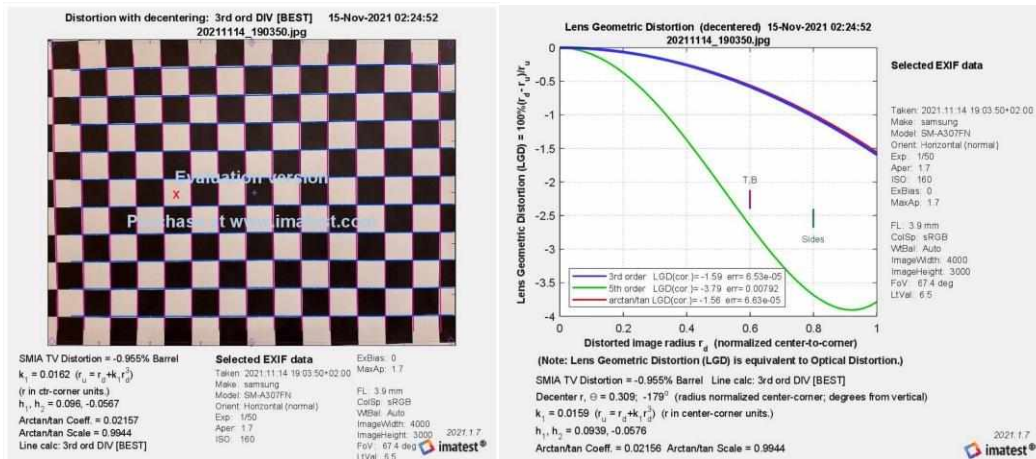


Рис. 3. Результати досліджень камери мобільного телефону Samsung Galaxy A30S

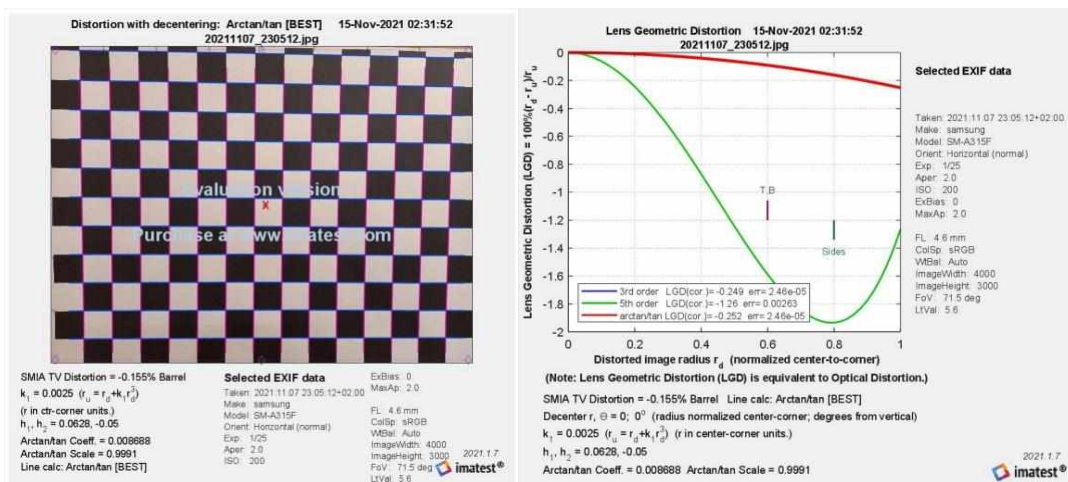


Рис. 4. Результати досліджень камери мобільного телефону Samsung Galaxy A31

В результаті були отримані неочікувані результати. В першу чергу це стосується результатів дослідження камери мобільного пристрою Samsung Galaxy A31, яка показала практично ідеальні характеристики з викривлення (дисторсії), що перевищило характеристики деяких брендових об'єктивів дзеркальних камер. Можна зробити припущення, що в програмному забезпеченні Samsung Galaxy A31 за замовчуванням включена функція автоматичного виправлення дисторсії й інших спотворень (хроматичні аберації цих пристроїв не досліджувались).

Камери мобільних телефонів Huawei Y6 Pro та Samsung Galaxy A30S показали «бочкоподібну» дисторсію за параметром SMIA TV Distorsion відповідно -1.46% Barrel та -0.955 Barrel. Камера Samsung Galaxy A31 за даним параметром показала -0.155% Barrel.

При дослідженнях використано по декілька знімків, отриманих кожним пристроєм.

Мобільний телефон Huawei Y6 Pro випущений значно раніше ніж інші, тому при дослідженнях отриманих ним зображень, підвищувалась їх контрастність за допомогою програмного забезпечення. Виконувалося це для того, щоб можна було зробити аналіз знімків за допомогою програми Imatest Master. Доведено, що більш сучасні мобільні телефони мають камери, в яких значно вищі показники з контрасту білого.

Невідповідність геометричного центру:

Huawei Y6 Pro  $\Theta = 0,291, 65,4^\circ$  (radius normalized center-corner; degrees from vertical);

Samsung Galaxy A30S  $\Theta = 0,309, -179^\circ$  (radius normalized center-corner; degrees from vertical);

Samsung Galaxy A31  $\Theta = 0,01, -0.2^\circ$  (radius normalized center-corner; degrees from vertical).

Коефіцієнти  $k_1$  ( $r_u=r_d+k_1r_d^3$ ) ( $r$  in center-corner units),  $h_1$  та  $h_2$  наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів

Мобільний пристрій	$k_1$	$h_1$	$h_2$
Huawei Y6 Pro	0,0246	-0,0411	0,0534
Samsung Galaxy A30S	0,0159	0,0939	-0,0576
Samsung Galaxy A31	0,0025	0,0628	-0,050

За результатами досліджень, для зйомки борту кар'єру, було вибрано камеру Canon EOS 6D MarkII та камеру мобільного пристрою Samsung Galaxy A31.

За результатами зйомки південного і західного бортів кар'єру №4 ПрАТ «ЦГЗК» було отримано 147 знімків. При цьому було використано 5 опорних точок в координатній системі epsg: 28406 - Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger zone 6. В табл. 4 наведені характеристики опорних точок, які використовувалися для експериментальних знімальних робіт.

Таблиця 4

Характеристики опорних точок

Назва точки	Імпортовані координати, м	Фактичне положення, м	# картинки	Загальне відхилення $m_x, m_y, m_z, m$	Maximal projection error, pixels
point_5	x: 29415.206 y: 64600.052 z: 69.967	x: 29415.185 y: 64600.056 z: 69.952	32	0.027 (-0.021; 0.004; -0.015)	1.50
BK	x: 29360.206 y: 64139.315 z: 64.126	x: 29360.177 y: 64139.296 z: 64.092	69	0.049 (-0.029; -0.019; -0.034)	1.24
Stolb1	x: 29957.068 y: 63767.314 z: 76.755	x: 29957.094 y: 63767.342 z: 76.769	12	0.041 (0.026; 0.028; 0.014)	1.07
Stolb2	x: 29341.803 y: 63774.303 z: 84.692	x: 29341.782 y: 63774.306 z: 84.707	50	0.025 (-0.021; 0.003; 0.014)	1.43
mobill	x: 29760.007 y: 63672.790 z: 102.304	x: 29760.028 y: 63672.954 z: 102.313	20	0.165 (0.021; 0.164; 0.009)	1.95

Нижче наведено характеристики точності цифрових моделей, отриманих за знімками з цифрової камери Canon EOS 6D MarkII та мобільного телефону Samsung Galaxy A31 (рис. 5-7), (табл. 5, 6).

Таблиця 5

Помилки перепроєкції

Кількість значень (загальна сума)	35662
Максимальна частота (максимальна кількість)	171941
Діапазон значень (інтервал)	[0, 2,25]
Розмір контейнера (розмір кроку)	0,25

Таблиця 6

Довжини треків

Кількість значень (загальна сума)	356620
Максимальна частота (максимальна кількість)	224766
Діапазон значень (інтервал)	[0, 30]
Розмір контейнера (розмір кроку)	1

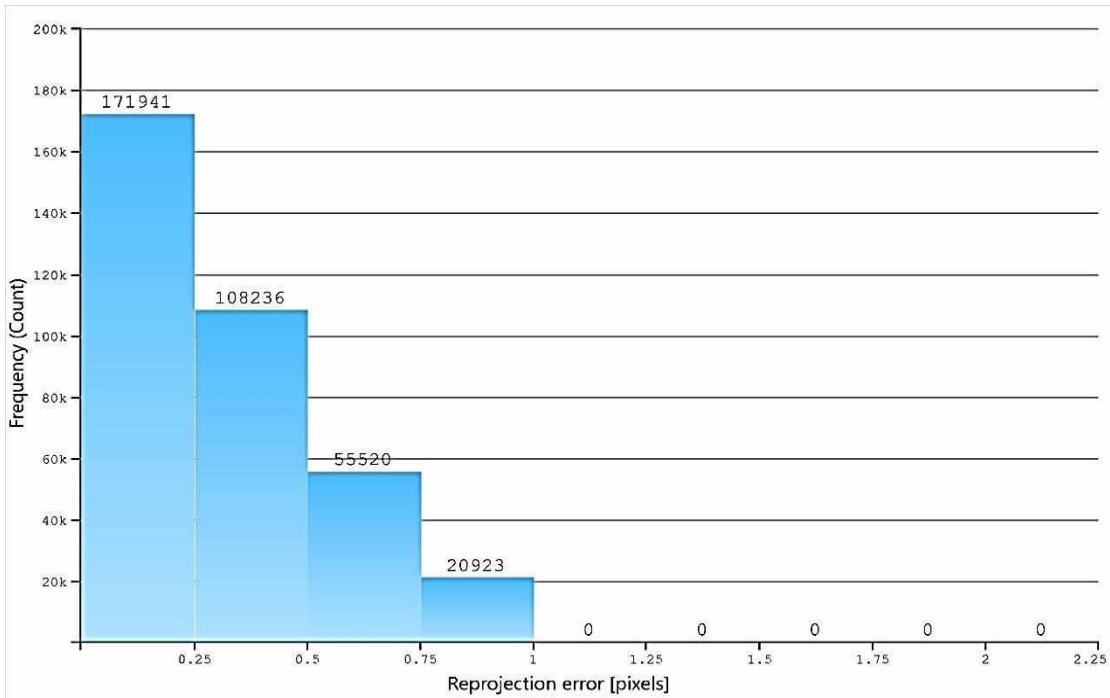


Рис. 5. Характеристика помилок моделей, побудованих за знімками отриманих камерою мобільного телефону

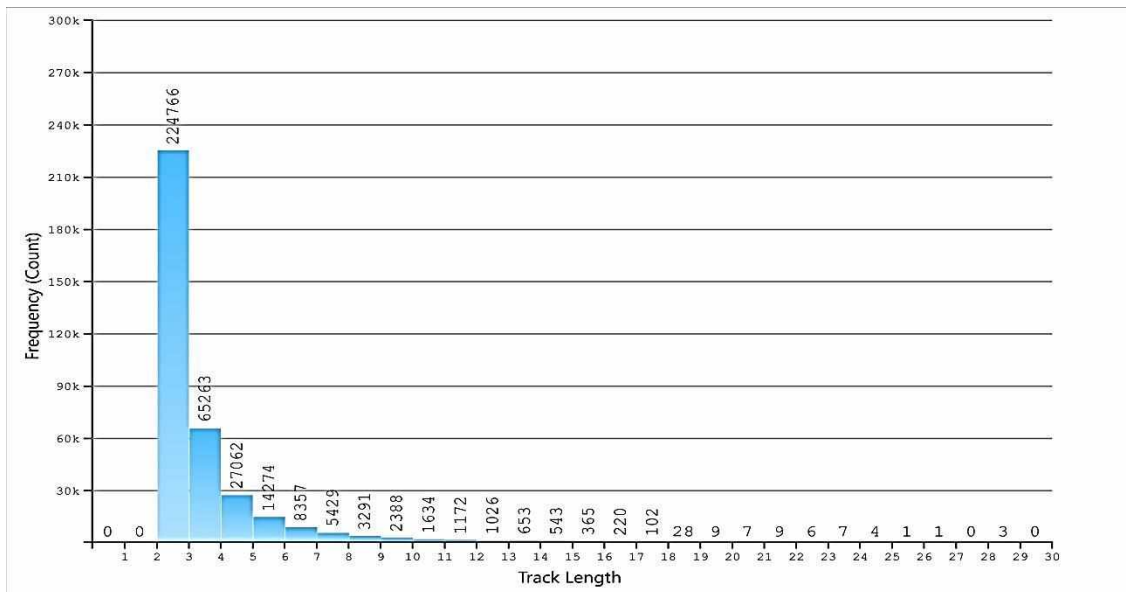


Рис. 6. Характеристика помилок моделей, побудованих за знімками отриманих цифровою камерою

Шляхом порівняння отриманої цифрової моделі з еталонною у вигляді хмари точок, отримані наступні результати:

45-60 відсотків точок мають точність від 0 см до 15 см;

25-40 відсотків точок мають погрішність від 15 см до 1-1,5 м.

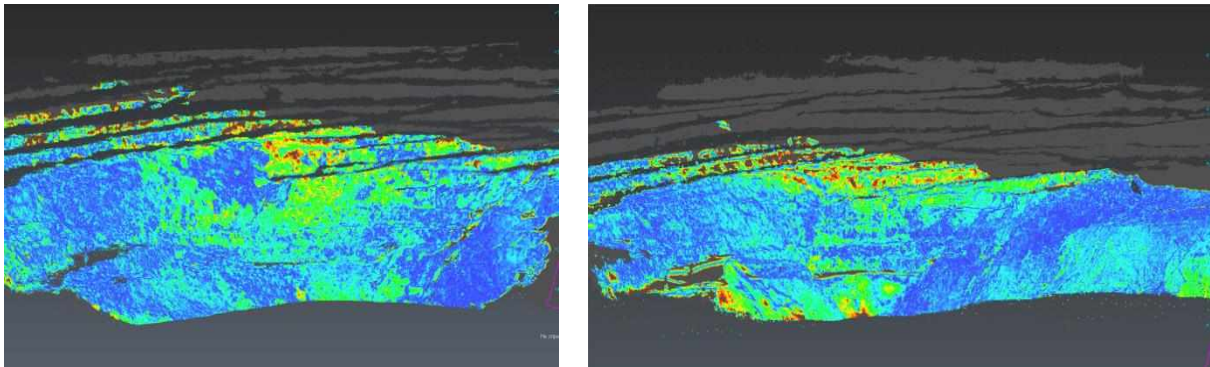


Рис. 7. Візуальна характеристика цифрових моделей

**Висновки та напрям подальших досліджень.** Виконані дослідження доводять необхідність ретельного підходу до питання вибору програмного забезпечення для вирішення задачі визначення об'ємів гірничих мас. Основним напрямом вдосконалення процесу автоматизації робіт з визначення об'ємів за допомогою спеціальних програм є розробка і впровадження програмних комплексів, які б включали можливість розпушену масу приводити до цілика та на-впаки, тобто враховувати різноманітність об'ємів гірничих мас.

#### Список літератури

1. Carvajal, F. Surveying a landslide in a road embankment using unmanned aerial vehicle photogrammetry / F. Carvajal, F. Agüera, M. Pérez // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. - 2011. - № XXXVIII-1/C22. - pp. 201-206.
2. Peterman, V. Landslide activity monitoring with help of unmanned aerial. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. - 2015 - Volume XL-1/W4, 215-218.
3. Pollefeys, M. Visual 3d modeling from images-tutorial notes: technical report. *University of North Carolina*. - pp. 55-65. <http://www.cs.unc.edu/~marc/tutorial.pdf>
4. S. Pysmennyi, N. Shvager, O. Shepel, K. Kovbyk, O. Dolgikh. Development of resource-saving technology when mining ore bodies by blocks under rock pressure. *E3S Web of Conferences* 166, 02006 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016602006>
5. Carlà, P. Farina, E. Intrieri, H. Ketizmen, N. Casagli. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. *Eng. Geol.* - 2018 - **235**, 39–52. [doi:10.1016/j.enggeo.2018.01.021](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.01.021).
6. J. Goetz, A. Brenning, M. Marcer, X. Bodin. Modeling the precision of structure-from-motion multi-view stereo digital elevation models from repeated close-range aerial surveys. *RSE* **210(208)** (2018). [doi:10.1016/j.rse.2018.03.013](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.013)
7. Dolgikh O., Dolgikh L. The study of the collapse zone by remote methods. *E3S Web of Conferences* 166, 03002 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016603002>
8. Kalinichenko V., Dolgikh O., Dolgikh L. Digital survey in studying open pit wall deformations. *E3S Web of Conferences* 123, 0 1047 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301047>
9. Dolgikh O., Dolgikh L., Kuchnerov I. Research into harmful effect of underground mining operations on the state of buildings and structures located in the displacement area. *E3S Web of Conferences* 201, 01029 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101029>
10. Kalinichenko, V., Dolgikh O., Dolgikh, L., Pysmennyi, S. Choosing a camera for mine surveying of mining enterprise facilities using unmanned aerial vehicles. *Mining of Mineral Deposits*, 14(4), 2020, 31-39. <https://doi.org/10.33271/mining14.04.031>
11. Lutz, S., Davey M., Smolic A. Deep Convolutional Neural Networks for Estimating Lens Distortion Parameters. - 2019.
12. Deep Single Image Camera Calibration With Radial Distortion / M. Lopez [and others] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2019, 11817-11825
13. Blind Geometric Distortion Correction on Images Through Deep Learning / X. Li [and others] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2019, 4855-4864
14. A Simple and Efficient Method for Radial Distortion Estimation by Relative Orientation / Y. Duan [and others] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. - 2017. - V. 55, № 12, 6840—6848