

# ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

УДК 510.64

DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2023.51.052>

## ВИДІЛЕННЯ ХАЛЬКОПІРИТУ НА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ ЗРІЗІВ ЗРАЗКІВ МІДНОЇ РУДИ

І. Б. Івасенко<sup>1,2</sup>, Р. А. Воробель<sup>1</sup>, В. М. Учанін<sup>1</sup>, О. Р. Берегуляк<sup>1</sup>,  
Т. С. Мандзій<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Національний університет “Львівська політехніка”

E-mail: [ivasenko.iryana@gmail.com](mailto:ivasenko.iryana@gmail.com), [roman.vorobel@gmail.com](mailto:roman.vorobel@gmail.com),  
[vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com), [olena.berehulyak@gmail.com](mailto:olena.berehulyak@gmail.com),  
[teodor.mandziy@gmail.com](mailto:teodor.mandziy@gmail.com)

Запропоновано метод сегментації кольорових зображень зрізів тестових зразків мідної руди для оцінки відсоткового вмісту її компонент у зрізі досліджуваних зразків. Він базується на використанні колірних ознак халькопїриту в моделі HSV. Налаштовано параметри сегментації. Проаналізовано експериментальні результати сегментації кольорових зображень зрізів мідної руди запропонованим методом.

**Ключові слова:** компоненти мідної руди, халькопїрит, сегментація зображень, оброблення зображень, HSV колірний простір.

## DETECTION OF CHALCOPYRITE IN DIGITAL IMAGES OF COPPER ORE SAMPLE SECTIONS

I. B. Ivasenko<sup>1,2</sup>, R. A. Vorobel<sup>1</sup>, V. M. Uchanin<sup>1</sup>, O. R. Berehulyak<sup>1</sup>,  
T. S. Mandziy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv;

<sup>2</sup> Lviv Polytechnic National University, Lviv

Copper ores are mineral formations of natural origin, the concentration of copper or copper compounds in which is sufficient for their commercial mining. Because of this, copper ores are on the list of minerals that are of strategic importance for the sustainable development of the economy and defense capability of Ukraine. In addition, due to the high thermal conductivity, copper and its alloys are widely used for the manufacture of various types of heat exchangers and radiators. The content of copper in ores usually ranges from 1 to 5%; ores containing less than 0.5% copper are unprofitable for processing at the current level of technology. Mining of copper is of strategic importance, as copper is the main material for the production of cable products and other conductive parts in the electrical industry. The efficiency of technological processes in the mining and industry during the production of copper depends on the quality of ores in relation to the content of minerals that contain copper. Copper ore can be considered a heterogeneous material consisting of two homogeneous phases, one phase is host rock, and the other is copper mineral. Modern image processing techniques have allowed as to automate the identification of minerals in ore samples. Automatic recognition and quantification of minerals using X-Ray tomography, scanning electronic microscope, light microscopy, is one of the most important problems in ore processing systems, as the amount of the minerals in the ore must be determined for further processing. A method of segmentation of colour images of sections of test samples of copper ore is proposed to estimate the percentage content of its components in the section of the tested samples. It is based on the use of chalcopryrite colour features in the HSV model. This colour-based segmentation method is proposed to exploit the average value and distribution of HSV colour components of chalcopryrite in an copper ore image. Segmentation parameters are configured. The experimental results of the segmentation of colour images of copper ore slices by the proposed method are analyzed. The effectiveness of the method is checked using synthesized test images. The method provides an absolute error less than 2.5%.

© I. B. Івасенко, Р. А. Воробель, В. М. Учанін, О. Р. Берегуляк, Т. С. Мандзій, 2023

**Keywords:** *copper ore components, chalcopyrite, image segmentation, image processing, HSV colour space.*

**Вступ.** Мідними рудами називають мінеральні утворення природного походження, концентрація міді або мідних сполук в яких є достатньою для її промислового видобування [1]. Видобуток міді має стратегічне значення, оскільки вона є основним матеріалом для виготовлення кабельної продукції та інших струмопровідних частин в електротехнічній промисловості. Це пов'язано з її високою питомою електропровідністю (ПЕП) – від 55,5 до 59,5 МСм/м залежно від ступеня очищення. Через це мідні руди увійшли до переліку корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності України. Крім того, через високу теплопровідність мідь та її сплави широко використовують для виготовлення теплообмінників різного типу та радіаторів. Кількість міді в мідних рудах, зазвичай, коливається від 1 до 5%. За сучасного розвитку технологій вважають нерентабельним використання мідних руд, які містять < 0,5% міді. Загалом мідні руди прийнято поділяти на багаті (> 2% міді), звичайні (1...2% міді) і бідні (< 1% міді). Основними мінералами міді у мідних рудах є халькопірит (~35% міді), борніт (від 52 до 65% міді) і халькозин (~80% міді) [2, 3].

**Сучасний стан оцінювання вмісту халькопіриту в руді методами цифрової обробки зображень.** Для посилення ефективності збагачувальних підприємств гірничої галузі ведеться пошук фізичних безконтактних методів визначення вмісту міді в мідних рудах, яку, зазвичай, вважають гетерогенним матеріалом, який складається з двох однорідних складників: уміщальна порода та мідний мінерал, наприклад, халькопірит ( $\text{CuFeS}_2$ ). Ці складники мають виражені поверхні розділу і суттєво відрізняються за властивостями. Один із можливих підходів будують на відмінності компонент мідної руди за ПЕП. Це дозволяє розглядати можливість створення систем електромагнетного (вихрострумове) контролю якості мідно-колчеданної мідної руди, в якій халькопірит суттєво (на декілька порядків) перевищує уміщальну породу за ПЕП [4]. Як перспективний напрям для вирішення задачі оцінювання якості мідно-колчеданної мідної руди розглядаємо метод, побудований на аналізі оптичного зображення зламів або розпилів мідної руди.

Для кількісного аналізу вмісту мінералів у геології досліджують поліровані зрізи зразків руд. Це вимагає розроблення спеціалізованої системи для інтелектуального аналізу даних, які формуються набором зображень поверхонь зрізів зразків руд. У праці [4] для реалізації такої задачі описано побудовану оригінальну згорткову нейромережу. При цьому створено базу високоякісних геологічних зображень з відповідними масками рівнів сірого для семантичної сегментації. Побудована нейромережа є згорткового типу з U-Net архітектурою. На її базі реалізовано спеціалізовану систему, яку можуть використовувати геологи як експертну для ідентифікації мінералів за зображеннями полірованих поверхонь зрізів. Описано особливості навчання мережі для задачі багатокласової сегментації. Проаналізовано результати сегментації базових складників мінералів досліджуваних зрізів. Показано практичну ефективність розробленої системи.

Рентгенівська мікрокомп'ютерна томографія є сучасним знаряддям неруйнівного дослідження складу мінералів для їх тривимірного подання. Для кількісного аналізу мінералів формують зрізи досліджуваних зразків руд і сегментують їх поверхні. Раніше описано [5] застосування методів машинного навчання для класифікації мінералів та їх фаз. При цьому розглянуто застосування навчання з учителем і без нього для даних, отриманих на сканувальному електронному мікроскопі (СЕМ) та мікрокомп'ютерному томографі (μСТ), який реєстрував відбиті електрони, формуючи зображення зрізів. З них обчислювали карти узгоджених ознак, які формували дані навчальної вибірки. За ознаки вибирали краї, ядра та

області пікселів, детермінант Гессіана. Як метод машинного навчання без учителя вибрали кластеризацію K-середніх та нечітких K-середніх. За навчання з учителем обрали методи випадкового лісу і K-найближчих сусідів. В цілому за розробленим підходом вдалося досягнути для даних, отриманих на СЕМ, при використанні навчання з учителем ідентифікацію 50...60% халькопїриту та 99% пїриту. Дослідження показали, що класифікація без учителя дає добрі результати і є швидшою, бо не вимагає навчання. З другого боку, класифікація з учителем дає добре розділення для халькопїриту та пїриту, але тривалість навчання є велика. Водночас застосування машинного навчання в  $\mu$ СТ для сегментації халькопїриту та пїриту ускладнене перекриттям рівнів сірого пікселів для цих мінералів. Оскільки ці ускладнення зумовлені умовами реєстрації зображення  $\mu$ СТ, то аби посилити контраст між фазами, які перекриваються, ці умови сканування треба змінити. Такий підхід забезпечить точнішу ідентифікацію халькопїриту та пїриту.

Під час дослідження еволюції стародавньої гідросфери джерелом багатьох халькофільних слідів елементів та їх індикатором виступає пїрит. Встановити, які мікроелементи входять до складу пїриту в осадових породах складно. Це зумовлено тим, що розміри його зерен дуже малі. Окрім того, ці зерна зазвичай зрощені з силікатною матрицею та іншими сульфідними мінералами. Тому одним з напрямків оцінювання вмісту пїриту є застосування мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою з лазерною абляцією (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, LA-ICP-MS) та подальше опрацювання даних, отриманих за її допомогою. Раніше описано [6] метод для розрахунку мікроелементного складу осадового пїриту за методом регресії за LA-ICP-MS даними. Метод полягає в аналізі пїритної та вільної від пїриту матриць осадових порід. За отриманими результатами сегментують спектр LA-ICP-MS, нормалізують його до суми спектральних компонент та здійснюють регресійний аналіз залежностей між елементами компонент матриць осадових порід. Після цього розраховують нормований склад корисної копалини. Такий алгоритм дає змогу ефективно визначати концентрації множинних халькофільних мікроелементів у пїриті в широкому діапазоні проб та може дати нове розуміння геохімії осадових порід. Але недоліком такого підходу є складність реалізації.

У праці [7] запропонували автоматизований метод статистичної сегментації мікрографічних зображень руди і оцінювання розміру та кількості мінералів у ній. Метод реалізовано в RGB колірному просторі. Точність сегментації заявлено > 90%.

Фандріх та ін. [8] розглянули сучасний стан виділення мінералів (MLA – mineral liberation analysis) на основі СЕМ. Зазначено, що сучасні інструменти не тільки підвищують швидкість і точність аналізу, а й збільшують автоматизацію вимірювань. Зроблено висновок, що розумне використання як Backscattered Electron Image (BSE), так і рентгенівських сигналів від СЕМ, разом із вдосконаленим розпізнаванням зображень і образів є ключем до успіху для сучасної автоматизованої системи аналізу та ідентифікації мінералів на основі СЕМ.

Ціллю дослідження [9] було порівняння різних методів оброблення зображень, отриманих за різних масштабувань та розмірності за реєстрації бурових кернів з порфірового Cu–Au родовища. Методи реєстрації зображень такі: фотофіксація з низькою та високою роздільною здатністю, СЕМ та рентгенівська мікрокомп'ютерна томографія. Зазначено, що вміст халькопїриту можна недооцінити за двовимірним зображенням зрізу аж до половини кількості, присутньої у зразку. Тому слід застосовувати стереологічні поправки під час використання методу двовимірного аналізу такого як СЕМ.

У праці [10] застосовано рентгенівську комп'ютерну томографію високої роздільної здатності, неруйнівний метод, який дає змогу досліджувати тривимірний розподіл мінералів і простір пор у зразках природних і синтетичних порід.

Поєднання рентгенівської комп'ютерної томографії з кількісним аналізом тривимірних зображень забезпечує краще розуміння мінералогії руди, рудоутворення та параметрів, необхідних для мінеральної або металургійної обробки, з перевагами як для академічних досліджень, так і для застосування в мінеральній промисловості. Цей метод дає змогу отримати тривимірне зображення в мікронному масштабі різних фаз, які входять до складу матеріалу. Сегментація полягає в приписуванні діапазону значень градації сірого певній фазі за допомогою різних етапів обробки зображень. Точність сегментації перевіряють за допомогою мікрофотографій або зображень розсіяних електронів на ділянці зразка, що відповідає певному зрізу. Після того, як різні цікаві фази визначені та точно розмежовані, їх можна розфарбувати для поліпшення візуалізації.

Кан та Мано [11] досліджували зображення у поєднанні з аналізом енергетичної дисперсійної спектрометрії на сканувальному електронному мікроскопі. Відібрані розмірні фракції мінеральних частинок були встановлені на полірованих тонких зрізах і пізніше проаналізовані. Вони формували два зображення – розсіяних електронів і багатоелементне рентгенівське точкове зображення, та застосовували апарат математичної морфології. Результати використали для кількісного визначення та аналізу вивільнення двох цінних мінералів у руді – сфалериту та галеніту.

Для петрографічного аналізу руд Березуєта та ін. використали сегментацію та обробку кольорових і мультиспектральних зображень. Серію мультиспектральних зображень отримали за допомогою низки оптичних фільтрів [12]. На основі прикладів експертної сегментації формували ознаки для автоматизованої сегментації нових зображень.

У праці [13] використовували мультиспектральні металографічні зображення для автоматичної ідентифікації фаз на основі класифікації найближчих сусідів. За мультиспектральні приймали звичні кольорові зображення у колірній моделі RGB. Для усунення значного перекриття спектральних характеристик кожної з компонент R, G і B, використали додаткові оптичні фільтри. Також дослідили чотири методи сегментації даних зображень.

У праці [14] досліджували самонавчальну семантичну сегментацію зразків руди на основі графів. Для її навчання використали навчальну вибірку зображень зразків руди. Зробили висновок, що запропонована ними сегментація ефективна для задач петрографії. Самонавчання дало змогу уникнути трудомісткого процесу створення анотованої навчальної вибірки експертом.

Мета роботи – розробити метод сегментації кольорових зображень зрізів тестових зразків мідної руди для оцінювання відсоткового вмісту халькопіриту у зрізі досліджуваних зразків.

**Колірна модель HSV.** Широко використовують колірну модель RGB для отримання зображень за допомогою цифрових камер або смартфонів. Це адитивна модель, в якій червоне, зелене та синє світло поєднуються разом для відтворення масиву кольорів. Ця колірна модель не завжди підходить для обробки зображень, оскільки вона розроблена для відображення зображень. Тому зареєстровані зображення перетворюють з RGB в кольоровий простір HSV для подальшої обробки.

Колірна модель HSV популярна в робототехнічних системах. Вона базується на зоровій системі людини. Складова H означає колірний тон, S – насичення, а V – значення. Зазначимо, що значення колірного тону починаються з червоного, потім зеленого, синього і знову червоного кольору (рис. 1).

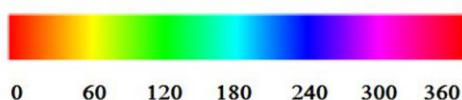


Рис. 1. Палітра колірного тону H.

Якщо припустити, що  $H \in [0,360)$ ,  $S, V, R, G, B \in [0,1]$ ,  $\text{Max} = \max \{R, G, B\}$ ,  $\text{Min} = \min \{R, G, B\}$ , то перетворення від колірному простору RGB до HSV можна виконати за допомогою формул

$$H = \begin{cases} 0, & \text{if Max} = \text{Min} , \\ 60 \frac{G - B}{\text{Max} - \text{Min}}, & \text{if Max} = R \text{ and } G \geq B , \\ 60 \frac{G - B}{\text{Max} - \text{Min}} + 360, & \text{if Max} = R \text{ and } G < B , \\ 60 \frac{B - R}{\text{Max} - \text{Min}} + 120, & \text{if Max} = G , \\ 60 \frac{G - B}{\text{Max} - \text{Min}} + 240, & \text{if Max} = B , \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{if Max} = 0 , \\ 1 - \frac{\text{Min}}{\text{Max}}, & \text{otherwise} , \end{cases} \quad (2)$$

$$V = \text{Max} . \quad (3)$$

Зазвичай компоненту колірному тону використовують у кольоровій сегментації, але невідомий колір руди та рівень освітленості може впливати на її результати. Точкову діаграму областей халькопїриту та мідної руди в колірному просторі HSV подано на рис. 2.

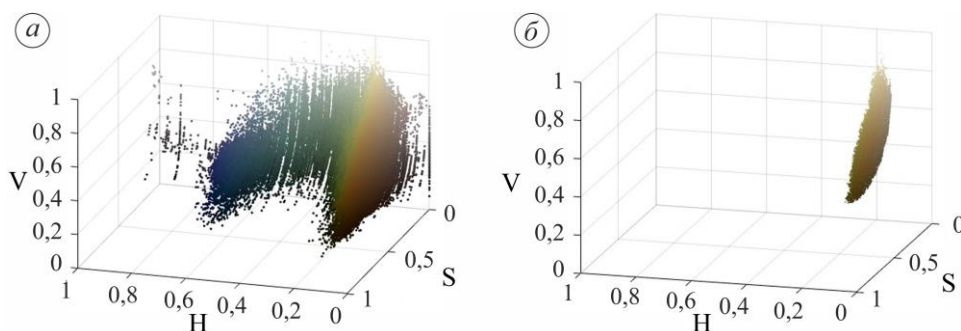


Рис. 2. Точкова діаграма ділянок руди (а) та халькопїриту (б) в просторі HSV для тестових зображень.

**Експериментальні результати.** Компоненти зображення колірному тону  $H$  та значення кольору  $V$  є найрелевантнішими щодо виявлення ділянок халькопїриту, тому їх використовували для подальшої обробки (рис. 3).

Зображення сегментували за правилом

$$\frac{(H(i, j) - 0,13)^2}{0,04^2} + \frac{(S(i, j) - 0,5)^2}{0,4^2} + \frac{(V(i, j) - 0,7)^2}{0,4^2} < 1 , \quad (4)$$

де  $H(i, j)$ ,  $S(i, j)$ ,  $V(i, j)$  – компоненти зображення колірному тону, насичення та значення кольору в пікселі з координатами  $(i, j)$ . Подано (рис. 4) експериментальні результати та сегментацію методом К-середніх для порівняння. Принцип алгоритму полягає в пошуку центрів кластерів та наборів елементів кожного

кластера так, щоб сумарне квадратичне відхилення елементів кластерів від їх центрів було найменшим.

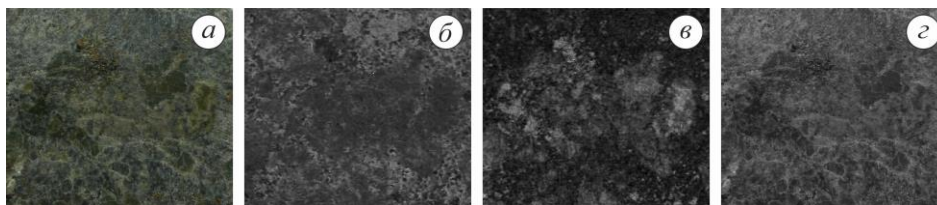
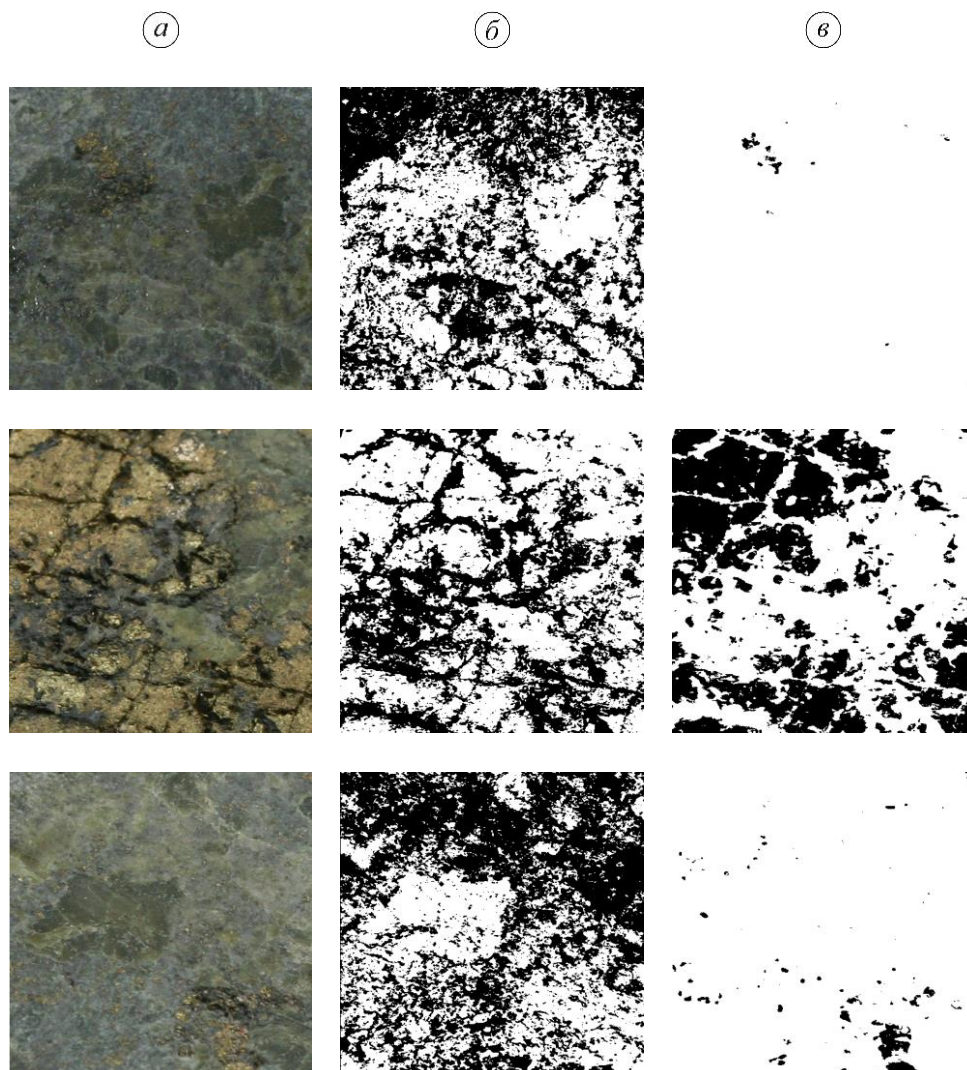


Рис. 3. Зображення поверхні зразка руди (а) та компонент H (б), S (в), V (г) колірної моделі HSV.





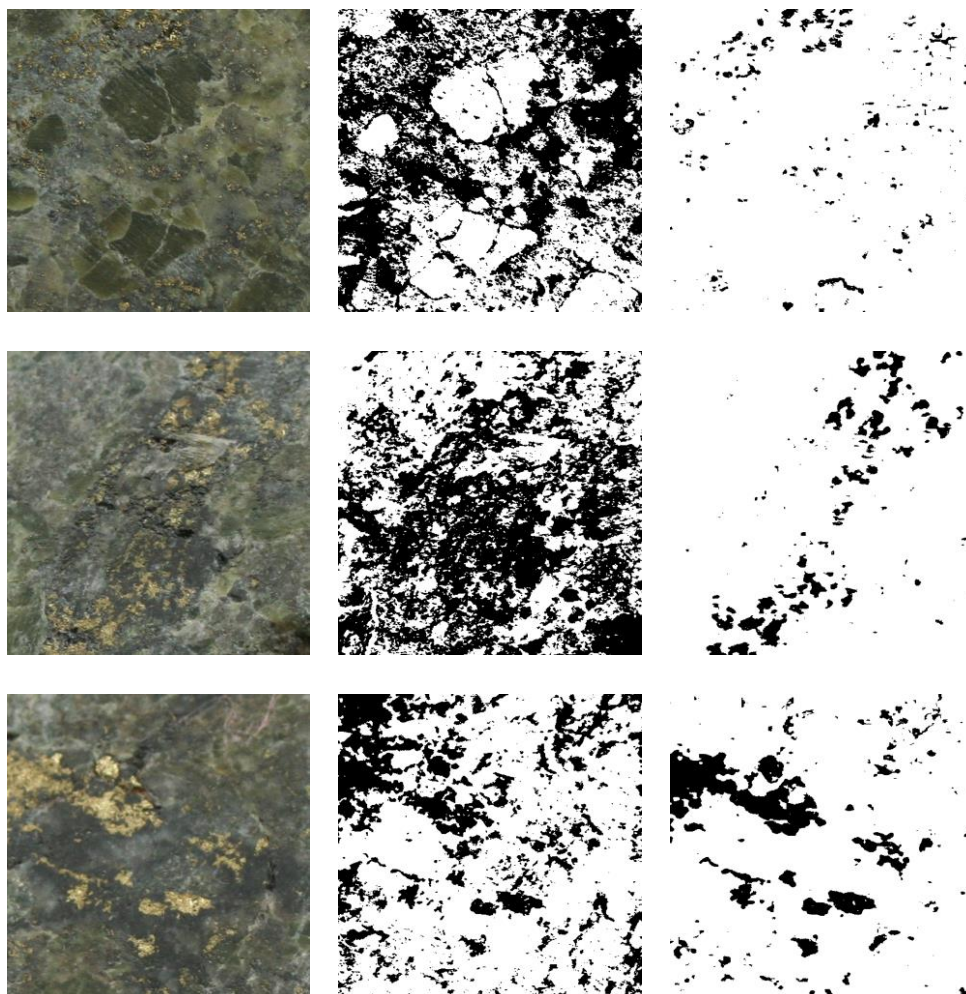


Рис. 4. Фрагменти вхідних зображень з включеннями халькопіриту (а), сегментації методом К-середніх (б) та запропонованим методом (в).

Проаналізовано шість тестових зразків мідної руди. Для кожного зразка за зображенням кожної грані обчислювали відсоток руди запропонованим методом та визначали їх зрізане середнє значення як інтегральну характеристику зразка.

Зрізане середнє – це метод усереднення без певного відсотка найбільших і найменших значень перед обчисленням середнього. Після вилучення зазначених випадкових спостережень зрізане середнє знаходять за допомогою стандартної арифметичної формули усереднення. Використання зрізаного середнього допомагає усунути вплив викидів на оцінку:

$$E_{tr} = \frac{1}{N - 2K} \cdot \sum_{i=K+1}^{N-K} e_i, \quad (5)$$

де  $N$  – це загальна кількість спостережень;  $K$  – кількість спостережень, яка відкидається з початку і кінця впорядкованого ряду;  $e_i, i=1, N$  – спостереження. Для цієї задачі обрали  $K = 1$ . Результати наведено в табл. 1.

Для апробації запропонованого методу синтезовано зображення з фрагментами халькопіриту (рис. 5а), наведено їх маски (б) та результати сегментації (в). Це дало змогу обчислити хибно позитивний ( $FPR$ ) та хибно негативний ( $FNR$ ) рівні для тестових зображень, а також діагностичну ефективність ( $ACC$ ) (табл. 2).

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}, \quad (6)$$

$$FNR = \frac{FN}{FN + TP}, \quad (7)$$

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (8)$$

де  $FP$  – хибно позитивний результат;  $FN$  – хибно негативний;  $TP$  – істинно позитивний;  $TN$  – істинно негативний.

**Таблиця 1. Відсоток руди, обчислений запропонованим методом для зображень граней тестових зразків, та зрізане середнє значення для кожного зразка**

№ зразка мідної руди	Параметри MRE-3 (кількість халькопїриту / міді)	Відсоток руди, обчислений запропонованим методом за гранями зразка	Зрізане середнє значення, %
1	560 / 200	4,05	7,73
		13,00	
		7,46	
		6,76	
		8,98	
2	1530 / 1340	5,48	5,13
		0,89	
		5,35	
		4,57	
		12,83	
3	1860 / 1760	38,73	6,06
		4,56	
		8,46	
		5,46	
		8,15	
4	4820 / 3370	9,00	5,48
		4,68	
		2,30	
		6,95	
		4,81	
5	5970 / 4710	3,34	3,85
		3,86	
		2,26	
		4,36	
		5,82	
6	8000 / 6150	3,50	4,41
		20,33	
		2,16	
		2,20	
		7,53	



Результати свідчать про низьку похибку оцінювання площі халькопіриту на зрізі зразка мідної руди.

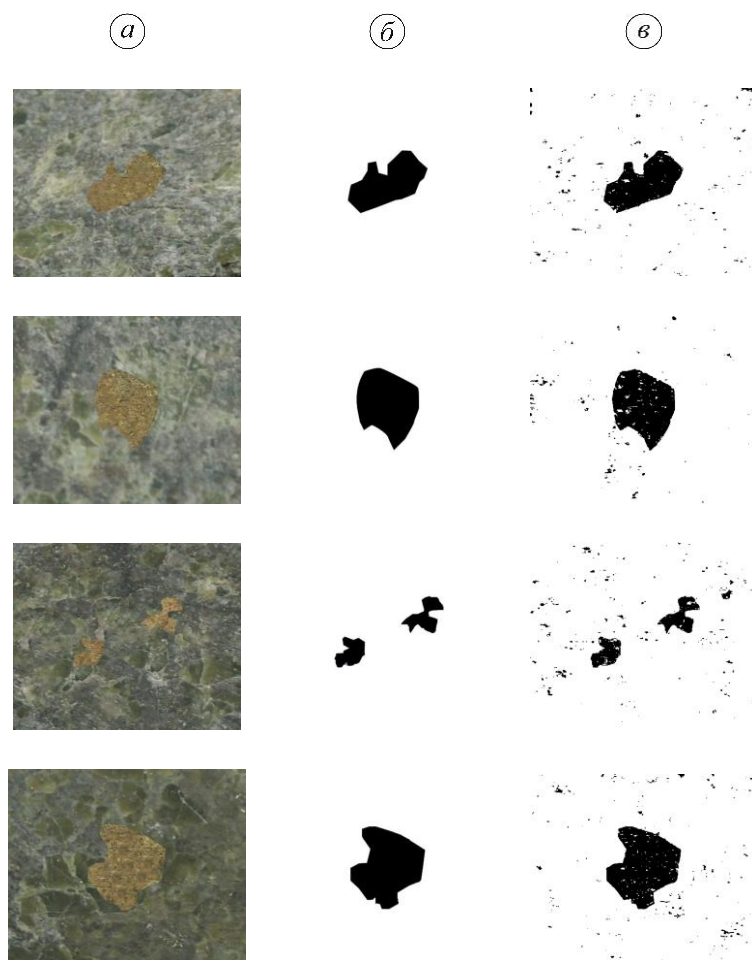


Рис. 5. Синтезовані зображення з фрагментами халькопіриту (а), їх маски (б) та результат сегментації запропонованим методом (в).

**Таблиця 2. Відсоток руди, обчислений запропонованим методом для тестових зображень з рис. 4, та відповідні оцінки похибки**

№ зображення	Відсоток руди, обчислений за маскою	Відсоток руди, обчислений запропонованим методом	<i>FNR</i>	<i>FPR</i>	<i>ACC</i>
			%		
1	7,1	7,11	12,34	0,95	98,24
2	8,74	10,68	6,33	2,73	96,96
3	3,76	13,3	14,80	10,49	89,35
4	9,79	14,98	4,03	6,2	94,01

### ВИСНОВКИ

Подано результати пошукового етапу досліджень з можливості оцінювання якості мідної руди щодо вмісту халькопіриту на основі методів обробки зображень. Побудовано метод сегментації кольорових зображень зрізів тестових зраз-

ків мідної руди на основі колірної моделі HSV, який дає змогу оцінювати відсотковий вміст його компонент (халькопіриту) у зрізі досліджуваних зразків за його зображеннями. Отримані результати вказують на достовірність запропонованого підходу. Проте, враховуючи нерівномірний розподіл халькопіриту в об'ємі зразків мідної руди, цей метод потребує більше зрізів зразків для достовірнішого аналізу. Перспектива подальших досліджень – застосування керованих методів машинного навчання для сегментації досліджуваних зображень та збільшення їх вибірки.

1. Grynchenko, O.V.; Kurylo, M.V. et al. *Metallic minerals of Ukraine*; National University named after T. Shevchenko, 2006. (in Ukrainian)
2. Small mining encyclopedia; Biletskyi, V. S., Ed.; V. 1, Donbas, 2004. (in Ukrainian)
3. Smirnov, V.O.; Bredykhin, V.M.; Manyak, M.O.; Pozhev, V.I.; Chervyn, I.F.; Hrytsai, V.P. *Metallurgy of non-ferrous metals. Part 2. Enrichment of ores of non-ferrous metals*; Chervyn, I.F., Ed.; ZDIA, 2007. (in Ukrainian)
4. Uchanin, V.M.; Rybachuk, V.H. Possibility of eddy current testing of low-conductive heterogeneous media. *Information extraction and processing*, **2022**, 50, 5–12. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.15407/vidbir2022.50.005>
5. Guntoroa, P.I.; Tiub, G.; Ghorbania, Y.; Lunda, C.; Rosenkranz, J. Application of machine learning techniques in mineral phase segmentation for X-ray microcomputed tomography ( $\mu$ CT) data. *Minerals Engineering*. **2019**, 142, 105882. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105882>
6. Stepanov, A.S.; Danyushevsky, L.V.; Large, R.R.; Mukherjee, I.; Zhukova, I.A. Deconvolution of the composition of fine-grained pyrite in sedimentary matrix by regression of time-resolved LA-ICP-MS data. *American Mineralogist*. **2020**, 105, 820–832. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7202>
7. Köse, C.; Alp, I.; İkibaş, C. Statistical methods for segmentation and quantification of minerals in ore microscopy. *Minerals Engineering*. **2012**, 30, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.008>
8. Fandrich, R. et al. Modern SEM-based mineral liberation analysis. *Int. J. Miner. Process.* **2007**, 84, 1–4, 310–320. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.018>
9. Tiu, G.; Lund, C.; Koch, P.-H.; Wanhainen, C. *Extracting Mineralogical and Textural Data Through Multi-Scale and Multi-Dimensional Imaging Techniques*. Book of Tutorials and Abstracts: EMAS 2018; Kearns S.L. Ed.; European Microbeam Analysis Society, 2018, pp. 398–399.
10. Godel B.; High-Resolution X-Ray Computed Tomography and Its Application to Ore Deposits: From Data Acquisition to Quantitative Three-Dimensional Measurements with Case Studies from Ni–Cu–PGE Deposits. *Economic Geology*. **2013**, 108 (8), 2005–2019. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.8.2005>
11. Kahn, H.; Mano E.; Tassinari, M. Image Analysis Coupled with A SEM-EDS Applied to the Characterization of A Zn–Pb Partially Weathered Ore. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. **2002**, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2002.11001>
12. Berrezueta, E.; Ordóñez-Casado, B.; Bonilla, W.; Banda, R.; Castroviejo, R.; Carrión, P.; Puglla, S. Ore Petrography Using Optical Image Analysis: Application to Zaruma-Portovelo Deposit (Ecuador). *Geosciences*. **2016**, 6, 30. <https://doi.org/10.3390/geosciences6020030>
13. Pirard, E.; Bertholet, V. Segmentation of multispectral images in optical metallography. *Rev. Met.* **2000**, 97(2), 219–227. <https://doi.org/10.1051/metal/200097020219>
14. Ferreira, I. E. No Labels Needed: Self-Supervised Semantic Segmentation of Ore Minerals in Thin Section. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4466357>

Одержано 27.07.2023