

<sup>1</sup> Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +38(068)0720575, ел. пошта: ivanchuk\_oleh@ukr.net

<sup>2</sup> Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +38(050)7455711, ел. пошта: ol.tums@gmail.com

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.91.041>

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕКСТУР РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ МІКРОПОВЕРХОНЬ ОБ’ЄКТІВ ТА ЇХНЯ СЕГМЕНТАЦІЯ

**Мета.** Мета роботи – розробити і дослідити методи класифікації текстур РЕМ-зображень мікроповерхонь об’єктів на основі статистичних та спектральних характеристик текстурних фрагментів, а також порівняльного аналізу методів сегментації РЕМ-зображень. **Методи.** Визначення характеристик текстури РЕМ-зображень ґрунтувалось на статистичних моментах, розрахованих за гістограмою яскравості. Спектральні міри текстури обчислювались за спектром Фур’є. Для визначення спектральних текстурних характеристик вибрано параметри амплітудної та осьової функцій. Сегментацію РЕМ-зображень мікроповерхонь об’єктів виконано чотирма способами, а саме: методом глобальної порогової сегментації, методом нарощування області, методом поділу та злиття і методом вододілу з використанням маркерів. **Результати.** Опрацювання серії РЕМ-зображень ґрунтів показало найкращий результат класифікації текстур за мірою однорідності, ніж за іншими статистичними характеристиками. Обчислення спектральних характеристик РЕМ-зображень металів виявило періодичність або майже періодичність і спрямованість присутніх у зображенні елементів текстур і разом із результатами класифікації за мірою однорідності дає змогу отримати узагальнену характеристику текстури зображення. Порівняльний аналіз чотирьох методів сегментації показав, що найкращий результат визначення меж об’єктів на РЕМ-зображенні отримано методом вододілу з використанням маркерів. Програмну реалізацію методів класифікації текстур та їхню сегментацію виконували в системі MatLab. **Наукова новизна.** Запропоновано метод класифікації РЕМ-зображень на основі спектральних текстурних характеристик за параметрами амплітудної та осьової функцій. Показано, що сегментація РЕМ-зображень методом поділу і злиття дає змогу задати умови для виділення на зображенні областей із певними характеристиками текстури. **Практичне значення.** Узагальнена характеристика текстури РЕМ-зображення, що визначається за статистичними і спектральними мірами, корисна для автоматизованого розпізнавання текстур і аналізу РЕМ-зображень. Вибір ділянок із певними характеристиками текстури є важливим етапом попередньої обробки зображень під час знаходження точок інтересу, що придатні для зіставлення РЕМ-зображень і розпізнавання об’єктів.

**Ключові слова:** растровий електронний мікроскоп (РЕМ), статистичні та спектральні характеристики текстури РЕМ-зображення, класифікація, сегментація.

### Вступ

Текстура є важливим джерелом інформації про зображення. Автоматизований аналіз і розпізнавання текстур широко застосовують під час досліджень металографічних та фрактографічних зображень, мікрофотографій біологічних структур, зразків ґрунтів тощо. Особливості текстури відіграють важливу роль під час аналізу медичних зображень [Мельник, 2012; Rangaayan, 2005], зображень напівпровідникових гетероструктур [Номан та ін, 2014], для виявлення поверхневих дефектів (сталі, текстилю, плитки, дерева та ін.) [Цапаев, Кретинин, 2012; Neogi, et al., 2014], для оцінки якості продуктів харчування [Przybyl et al., 2019; Gonzales-Barron & Butler, 2006]. Текстура зображення є основою для

створення цифрових текстурованих моделей мікрорельєфу [Khokhlov, et al., 2012].

Під текстурою розуміють ділянку зображення, яка має однорідні статистичні характеристики і яку можна описати за допомогою деяких ознак. Під ознаками текстур, зазвичай, розуміють характерні властивості, спільні для всіх текстур цього класу [Haralick, 1979]. Ознаки текстур використовують для їх класифікації та під час поділу зображення на окремі області (текстурна сегментація) [Завалишин, 1975, Колоднікова, 2004; Полякова та ін., 2008]. До опису текстур застосовують статистичний, структурний, спектральний і фрактальний підходи [Мельник, Шостак, 2009; Потапов, 2003; Фисенко, Фисенко, 2008; Haralick, 1979; Ну,

2017; Rangayuan, 2005]. Серед статистичних характеристик (моментів) текстурних фрагментів інформативнішими вважають міри ентропії, однорідності й яскравості [Форсайт, Понс, 2004; Shapiro & Stockman., 2001].

#### **Короткий огляд публікацій, пов'язаних із метою досліджень**

Огляд методів аналізу текстур зображень за 2001–2014 роки наведено в [Bagalkote & Vibhute, 2015]. Різні аспекти і методи аналізу текстури також розглянуто в [Баврина и др., 2002; Богучарский и др., 2014; Визильгер и др., 2011; Гулаков и др., 2011; Gray, et al., 2006]. За минулі роки підходи до аналізу текстур зображень можна знайти в оглядах [Tuceryan, 1998] за 1962–1993 та в [Materka & Strzelecki, 1998] за 1965–1998 роки.

Огляд методів класифікації можна знайти в [Асатрян и др., 2014; Jing та ін., 2009; Cavalin, et al., 2017; Cord, et al., 2010; Lu, 2007]. Текстурні ознаки для класифікації зображень висвітлено в огляді [Колодникова, 2004].

Методи аналізу зображень на основі сегментації наведено в роботах [Голдуева и др., 2015; Куприянов, 2008; Сизов, Паламарь, 2011; Bhosle & Pawar, 2013; Liu & Wang, 2006; Madasu, Yarlagaadda, 2007; Manjunath, et al., 2005; Sparavigna, 2016; Szumilas, et al., 2006].

В інших роботах, пов'язаних із темою досліджень, розглянуто питання впливу різних типів шумів на процес сегментації зображень [Аль-Джанаби Акил Бахр Таркхан, Шувалова, 2014; Lee & Yoo, 2008] та аналіз типів шумів, що виникають на РЕМ-зображеннях [Іванчук, Тумська, 2017]. У [Haindl & Mikeš, 2016] запропоновано адаптивну стратегію для вибору більшої кількості точок інтересу в текстурованих областях для знаходження відповідних точок на парі зображень.

Теоретична база всіх аспектів обробки зображень висвітлена в роботах вчених: Gonzalez, & Woods, 2005; Форсайт, Понс, 2004; Shapiro & Stockman, 2001. Теорію і приклади розв'язання конкретних завдань обробки зображень із використанням функцій MatLab та Image Processing Toolbox (IPT) можна знайти в [Gonzalez, et al., 2006].

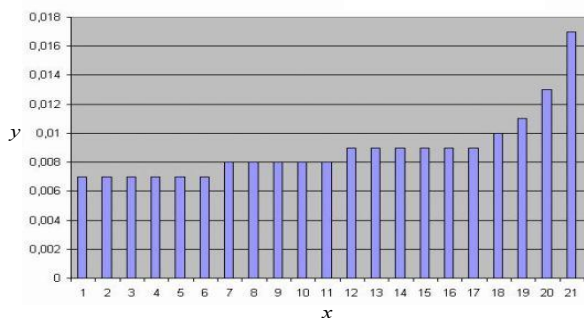
У цьому дослідженні розглянено питання класифікації РЕМ-зображень на основі статистичних та спектральних характеристик та порівняння різних методів сегментації.

#### **Класифікація РЕМ-зображень зразків ґрунтів за статистичними характеристиками**

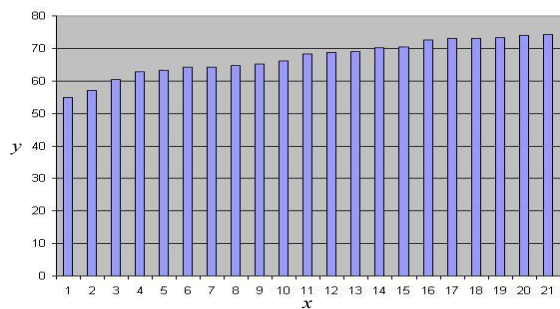
Дослідження виконували на серії РЕМ-знімків ґрунтів, металевих поверхонь і еритроцитів, отриманих за допомогою РЕМ “Hitachi” S-800, РЕМ JCM (JEOL, Японія) і РЕМ “Stereoscan S4-10” у діапазоні збільшень від  $1000\times$  до  $3000\times$ ; розміри кадру становили  $55\times 55$  мм. Знімки (плівки) були відскановані з роздільною здатністю 300 dpi і збережені у форматі JPEG із розмірами зображення порядку  $650\times 650$  пікселів.

Визначення статистичних характеристик текстури РЕМ-зображень ґрунтувалось на статистичних моментах, розрахованих за гістограмами текстурних мір: яскравості, однорідності й ентропії [Gonzalez, et al., 2005]. Зображення ґрунтів належать до змішаного типу текстури, що складається з фрагментів різних типів. У цьому разі неможливо виділити окремо об'єкти і фон. Для класифікації та розпізнавання такого типу зображень виділяємо на зображенні фрагменти різного типу текстур (див. рисунки у табл. 1) [Смеляков, 2008]. Для покращення РЕМ-зображень ґрунтів застосовано процедуру еквалізації гістограм зображень. Класифікацію фрагментів РЕМ-зображень за типом ґрунтів виконано на основі гістограм розподілів статистичних характеристик текстур до і після еквалізації гістограм. Порівняно з вхідним РЕМ-зображенням середні значення яскравості, контрастності та однорідності значно змінилися в еквалізованому зображенні. Однак після процедури еквалізації ці характеристики стали більш подібними для різних РЕМ-зображень одного і того самого типу ґрунту.

На рис. 1 подано гістограми розподілу текстурних мір фрагментів зображень ґрунтів за значеннями однорідності та контрастності. На гістограмі розподілу однорідності помітні невеликі стрибки функції в діапазоні значень від 0,007 до 0,010 та більш різке зростання функції від значень 0,011 і вище (рис. 1, а). За аналізом гістограми за мірою однорідності виділено чотири класи фрагментів зображень ґрунтів із візуально близькими значеннями текстур (табл. 1). Що стосується гістограми за мірою контрастності, то неперервне зростання функції контрастності ускладнює знаходження меж класів (рис. 1, б). Зокрема, в табл. 1 наведено діапазони значень контрастності і ентропії, які відповідають класам однорідності.



а

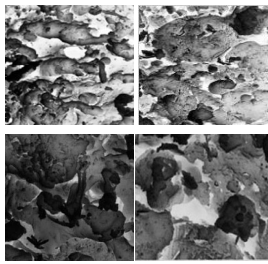
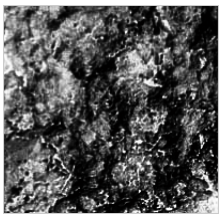

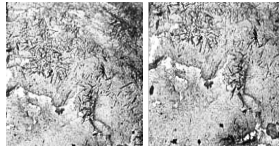


б

Рис. 1. Гістограма розподілу фрагментів РЕМ-зображень (x – номер фрагменту) ґрунтів: а – за мірою середньої однорідності (y); б – за мірою середньої контрастності (y)

Таблиця 1

**Класифікація РЕМ-зображень зразків ґрунтів за текстурною мірою однорідності**

	Клас 1	Клас 2	Клас 3	Клас 4
Статистичні міри				
	Шорстка 1	Шорстка 2	Шорстка 3	Гладка
Однорідність	0,75–0,87	0,88–0,99	1,0–1,19	1,20–1,66
Контрастність	60,53–74,32	64,15–70,21	70,21–72,99	54,83–57,03
Ентропія	7,28–6,99	7,01–6,71	6,67–6,59	6,59–6,13

Із аналізу табл. 1 випливає, що за мірами контрастності клас 1 містить клас 2. Діапазони ентропії відповідають діапазонам однорідності в порядку спадання. У протилежність мірі однорідності міра ентропії характеризує нерівномірність розподілу яскравісних властивостей елементів зображення. (Для зручності сприйняття у табл. 1, 2 значення міри однорідності збільшено у 100 разів).

**Класифікація РЕМ-зображень зразків металів за статистичними текстурними характеристиками**

Як і у попередньому випадку, класифікацію виконуємо для фрагментів РЕМ-зображень металів із різними типами текстур. За аналізом

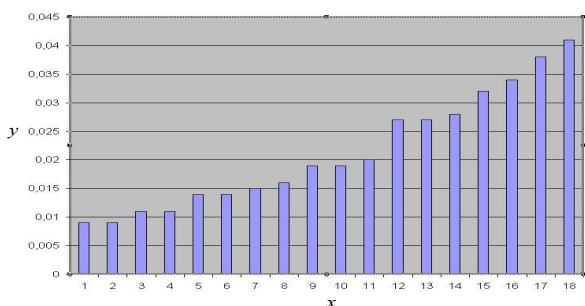
гістограми розподілу текстурних мір за значеннями однорідності (рис. 2, а) нами виділено п'ять класів (табл. 2). Гістограма розподілу текстурних мір за значеннями середньої контрастності має подібні властивості як вище згадана гістограма розподілу текстурних мір фрагментів РЕМ-зображень ґрунтів (рис. 2, б).

**Класифікація РЕМ-зображень зразків металів за спектральними мірами текстури**

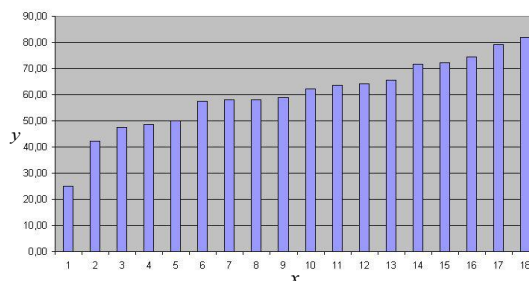
Спектральні міри текстури обчислювали за спектром Фур'є для тих самих зображень металів, що і статистичні міри. Спектральні міри текстури дають змогу виявити на зображенні спрямованість періодичних і квазіперіодичних структур [Hu, 2017].

Для визначення спектральних текстурних характеристик було вибрано такі параметри амплітудної та осьової функцій, як максимальне значення, розташування максимуму, середнє значення, середнє квадратичне відхилення та різниця між максимальним та середнім зна-

ченнями амплітудної та осьової функцій [Gonzalez, et al., 2006]. Експеримент показав, що параметри амплітудної і осьової функцій відрізняються для зображень різних типів металів і, у такий спосіб, придатні для їх класифікації.



а



б

Рис. 2. Гістограма розподілу фрагментів РЕМ-зображень металів (x – номер фрагменту):  
а – за мірою середньої однорідності (y); б – за мірою середньої контрастності (y)

Таблиця 2

### Класифікація РЕМ-зображень зразків металів за текстурною мірою однорідності

Клас 1	Клас 2	Клас 3	Клас 4	Клас 5
Шорстка 1	Шорстка 2	Шорстка 3	Гладка 1	Гладка 2
0,70–1,19	1,20–1,59	1,60–2,29	2,30–2,79	2,80–4,10

В останньому рядку наведено діапазони класів за значеннями міри однорідності.

Амплітудна функція характеризує поведінку спектра (наявність піків) за напрямком радіуса від початку координат. Осьова функція дає картину поведінки спектра по колу з центром у початку координат. Розподіл класів виконано з урахуванням розташування максимуму осьової функції та візуально за графіками амплітудної та осьової функцій (рис. 3). Клас I призначено для хаотичних текстур шорсткої поверхні. У цьому випадку в околі початку координат амплітудної функції існує тільки один пік, що відповідає сталій складовій перетворення. Поряд із тим, графік осьової функції характеризується мінливістю кривої спектра в діапазонах від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  та від  $90^\circ$  до  $180^\circ$ , що відповідає частій зміні орієнтації елементів текстури. Клас II призначено для зразків із періодичною (квазіперіодичною) горизонталь-

ною або вертикальною текстурою. Така амплітудна функція має ще один пік в околі початку координат. Графік осьової функції характеризується майже гладкою кривою спектра в діапазонах від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  та від  $90^\circ$  до  $180^\circ$ . У III клас увійшли квазіперіодичні текстури, у яких осьова функція спектра має значні піки в діапазоні від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  і майже гладка від  $90^\circ$  до  $180^\circ$ . Така текстура характеризується періодичністю і орієнтацією елементів текстури переважно у напрямку ПнЗх  $\rightarrow$  ПдСх. (Елементи текстури мають напрямок перпендикулярний до напрямку ліній спектра.) IV клас містить квазіперіодичну текстуру, у якій на відміну від III класу, елементи текстури орієнтовані переважно у напрямку ПдЗх  $\rightarrow$  ПнСх. Клас V містить складнішу текстуру, елементи якої можуть бути орієнтовані в обох напрямках (рис. 3).

I 220					2	90
II 214					1	90
III 325					4	11
III 172					2	87
III 223					2	90
IV 330					2	180
IV 332					2	180
V 170					3	180
V 171					2	180
<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>

Рис. 3. Розподіл за класами РЕМ-зображень металів за текстурною спектральною мірою. Класи та номери зразків (а). Зразки зображень металів (б) та їхні спектри (в). Графіки амплітудної (г) та осьової (д) функцій. Розташування максимальних значень функцій амплітудної (е) та осьової (ж) від 0° до 180°

Отже, графіки спектральних функцій РЕМ-зображень металів дають змогу виявити періодичність і спрямованість присутніх у зображенні елементів текстур і разом з результатами класифікації за мірою однорідності дають узагальненішу характеристику текстури зображення.

### Сегментація РЕМ-зображень мікроповерхонь об'єктів

Сегментацію РЕМ-зображень об'єктів виконували чотирма способами, а саме: за методом глобальної порогової сегментації (вибір порога методом Отсу), за методом нарощування області агрегацією пікселів, за методом поділу та злиття областей; за методом вододілу з вибором маркерів [Gonzalez, & Woods, 2005]. Для порівняння методів сегментації обрано РЕМ-зображення зразків кожного типу, а саме: зображення еритроцитів, ґрунтів і металевих поверхонь (рис. 4 а). Сегментація з автоматичним вибором порога за методом Отсу найефективніша в разі бімодальної гістограми (рис. 4, б, верхній рядок, зображення еритроцитів). Автоматичний вибір порогу для унімодального розподілу привів до виділення надлишкової кількості дрібних фрагментів на РЕМ-зображеннях ґрунту і поверхні металу (рис. 4, б, середній та нижній рядки). Результат сегментації методом нарощування областей залежить від вибору початкової точки і вибору критерію подібності для включення точок у різні області в процесі нарощування [Сизов, 2011]. Вибір початкової точки та критерію подібності для методу нарощування області ґрунтувались на аналізі гістограми яскравості й текстурних властивостях РЕМ-зображення. Включення піксела в будь-яку область виконується за умовою, що абсолютна різниця між значенням яскравості цього піксела і значенням яскравості початкового піксела буде меншою за поріг  $T$ . На рис. 4, в показано результати сегментації методом нарощування області з параметрами:  $S = 45$ ,  $T = 25$  для зображень еритроцитів;  $S = 175$ ,  $T = 50$  для зображень ґрунту;  $S = 170$ ,  $T = 50$  для зображень металу. Тут  $S$  – значення яскравості початкової точки;  $T$  – заданий поріг. Для заданих параметрів  $S$  і  $T$  результати сегмента-

ції зображень ґрунту та металу подібні до порогової сегментації методом Отсу (рис. 4, в). Порівняння рисунків 4, в і 4, б для зображення еритроцитів показує, що, змінюючи параметри  $S$  і  $T$ , можна виділити додаткові деталі в результаті сегментації методом нарощування області.

Процедура поділу і злиття полягає в тому, щоб спочатку поділити зображення на набір довільних, розрізнених областей, а потім об'єднати сусідні області, які задовольняють заданим умовам Gonzalez, & Woods, 2005, Haindl, 2016]. Для визначення умов поділу і злиття областей використано статистичні показники текстури, а саме: середню яскравість, середню контрастність та їх комбінації. На рис. 4, г подано результати сегментації зображень методом поділу і злиття областей за умовами:

$(t_2 > 50)$  або  $(t_1 > 15)$  і  $(t_1 < 130)$  – для зображень еритроцитів),

$(t_2 > 34)$  і  $(t_1 > 0)$  і  $(t_1 < 175)$  – для зображень ґрунту;

$(t_2 > 13)$  або  $(t_1 > 70)$  і  $(t_1 < 140)$  – для зображень металу,

де  $t_1$  – середня яскравість,  $t_2$  – середня контрастність. Розмір мінімального блоку становив 4x4 пікселів, після чого подальший поділ зображення припинявся.

Експеримент підтвердив, що процедура поділу і злиття придатна для вибору на зображенні областей із заданими характеристиками текстури.

Застосування методу вододілу з маркерами дало змогу найчіткіше виявити на РЕМ-зображеннях межі еритроцитів та темних фрагментів поверхні металу (рис. 4, д, верхній та нижній рядки). Під час застосування вищевказаного методу до РЕМ-зображення зразка ґрунту зі складною структурою поверхні виникла надмірна сегментація (рис. 4, д, середній рядок).

*Публікацію фінансує Польське національне агентство з питань академічного обміну за Програмою Міжнародних академічних партнерств з проекту “Організація 9 Міжнародної науково-технічної конференції “Інженерія довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку”.*

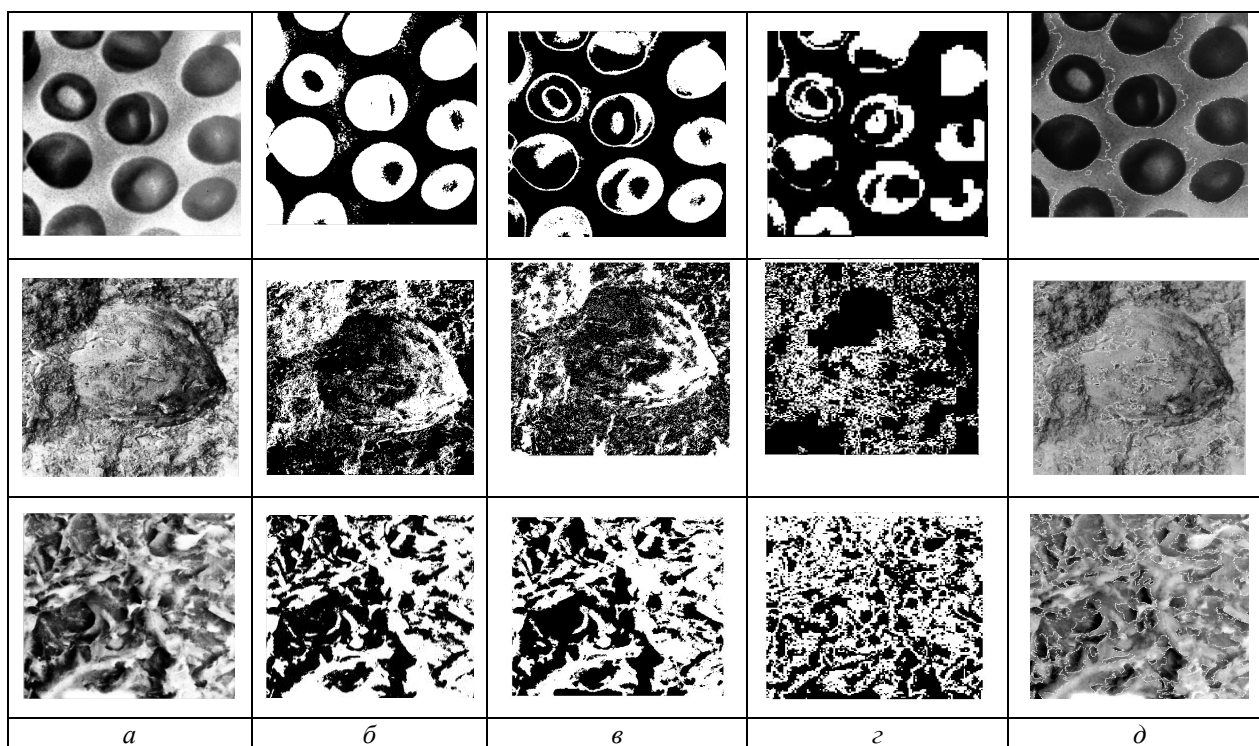


Рис. 4. Результати сегментації РЕМ-зображень. (а) Вхідні РЕМ-зображення: верхній рядок – еритроцити; середній рядок – поверхня ґрунту; нижній рядок поверхня металу. (б) Порогова сегментація за методом Отсу. (в) Метод нарощування області. (г) Метод поділу і злиття областей. (д) Метод вододілу з маркерами (межі вододілів нанесені на вхідні зображення). У стовпцях б–г) наведено бінарні маски, де білі ділянки відповідають об'єктам, а чорні – фону

### Висновки

Встановлено можливість класифікації РЕМ-зображень мікроповерхонь об'єктів за їх характеристиками текстури з використанням статистичних і спектральних мір. Обчислення спектральних характеристик РЕМ-зображень металів виявило періодичність і спрямованість присутніх у зображенні елементів текстур.

Результати класифікації за мірою однорідності та спектральними мірами дають змогу отримати узагальненішу характеристику текстури РЕМ-зображення, що сприяє розв'язку задач розпізнавання та автоматизації аналізу зображень.

Порівняльний аналіз чотирьох методів сегментації показав, що найкращий результат визначення меж об'єктів на РЕМ-зображенні отримано методом вододілу з використанням маркерів. Показано, що сегментація РЕМ-зображень методом поділу і злиття дає змогу виділяти області за певними умовами з заданими характеристиками текстури.

Перспективним напрямом досліджень є вибір точок інтересу в областях із заданими

характеристиками текстури, що підвищує ймовірність розпізнавання ідентичних точок у парах РЕМ-зображень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Аль-Джанаби Акил Бахр Таркхан, Шувалова Л. А. Улучшение изображения при помощи алгоритма watershed. *Системы обработки информации*, 2014. 8(124). С. 3–7.
- Асатрян Д. Г., Куркчян В. В., Харатян Л. Р. Метод классификации текстур с использованием структурных характеристик изображения. *Компьютерная оптика*, 2014. Т. 38, № 3. С. 574–579.
- Баврина А. Ю., Н. Ю. Ильясова. Исследование фотограмметрических изображений с помощью матриц вероятности распределения яркости. *Компьютерная оптика*, 2002. Т. 23. С. 62–65.
- Богучарский С. И., Машталир С. В. Анализ текстур в последовательности изображений на основе векторного квантования. *Радиоэлектроника, информатика, управління*, 2014. № 2. С. 94–99.
- Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах. С. 11–44 в трудах: Техническое зрение в системах управления мобильными объектами 2010: Труды научно-технической конференци-

- семинара. Вип. 4. Под ред. Р. Р. Назирова. Москва: КДУ, 2011. 328 с.
- Голдуева, Д. А., Мокшанина М. А. Трейс-преобразование как основа метода сегментации полутоновых текстур. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2015. № 3 (15). С. 128–136.
- Гулаков В. К., Трубаков А. О., Огурцов С. Н. Информативная значимость текстурных характеристик на основе матрицы смежности уровней яркости пикселей изображения. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2011. № 2(30), С. 81–85.
- Завалишин Н. В., Мучник И. Б., Шейнин Р. Л., Автоматическая классификация текстурных изображений. *Автомат. и телемех.*, 1975. Вып. 2, С. 95–103.
- Иванчук О., Тумська О. Порівняльний аналіз статистичних та скейлінгових характеристик РЕМ-зображень тест-об'єкта, отриманих на різних типах РЕМ. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, 2017. Вип. II (34). С. 119–131.
- Колодникова Н. В. Обзор текстурных признаков для задач распознавания образов. *Сборник трудов сотрудников ТУСУРа*. Томск, 2004. С. 113–124.
- Куприянов А. В. Сегментация текстурных изображений на основе оценивания локальных статистических признаков. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, № 2, 2008. С. 245–251.
- Мельник В. М., Шостак А. В. Растрово-електронна стереомікрофрактотграфія. Монографія. Луцьк: Вежа, 2009. 469 с.
- Мельник Г. М. Інформаційна технологія аналізу та синтезу структурних текстур в автоматизованих системах опрацювання гістологічних зображень. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Тернопіль, 2012. 27 с.
- Номан А. А., Хорьков К. С., Шамин П. Ю. Методы исследования полупроводниковых гетероструктур: учеб. пособие. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. 80 с.
- Полякова М. В., Волкова Н. П., Иванова О. В. Сегментация зображень стохастичних текстур амплітудно-детекторним методом у просторі вейвлет-перетворення. *Информационно-измерительные системы ААЭКС*, 2008, № 2. С. 81–88.
- Потапов А. А. Новые информационные технологии на основе вероятностных текстурных и фрактальных признаков в радиолокационном обнаружении малоконтрастных целей. *Радиотехника и электроника*, 2003. Т. 48, № 9. С. 1101–1119.
- Сизов П. В., Паламарь И. Н. Способ и система анализа изображений на основе сегментации с помощью методов выращивания и слияния областей [Электронный ресурс]. III Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. III Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 2011. С. 243–244.
- Смеяков К. С. Кореляционный метод распознавания текстуры типа смеси изображений на основе использования гистограмм. *Системи управління навігації та зв'язку*, 2008. Вип. 4(8). С. 18–21.
- Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Фрактальные методы сегментации текстурных изображений. *Приборостроение*, 2013. Т. 56, № 5. С. 63–70.
- Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Дж. Понс Москва: Издательский дом “Вильямс”, 2004, 928 с.
- Цапаев А. П., Кретинин О. В. Методы сегментации изображений в задачах обнаружения дефектов поверхности. *Компьютерная оптика*, 2012. Т. 36, № 3. С. 448–452.
- Bhosle V. V., Pawar V. P. Texture Segmentation: Different Methods. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)* ISSN: 2231-2307, Volume-3, Issue-5, November 2013, pp. 69–74.
- Cavalin, Paulo & Soares de Oliveira, Luiz. (2017). A Review of Texture Classification Methods and Databases. 1-8. 10.1109/SIBGRABI-T.2017.10.
- Cord A., Bach F., Jeulin D. Texture classification by statistical learning from morphological image processing: application to metallic surfaces. *J. Microsc.* 239(2), 159–166 (2010).
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. Book on “Digital image processing”. *Prentice-Hall of India Pvt. Ltd.* 2005.
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E., & Eddins, S. L. Ruan Qiuqi (Translation). *Digital Image Processing Using MATLAB*. Publishing House of Electronics Industry, 2006, 76–77.
- Gonzales-Barron, U. A. and Butler, F. Statistical and spectral texture analysis methods for discrimination of bread crumb images. 2006 pp. 749–759. DOI: 10.1051/IUFoST:20060164.
- Gray A, & Marshall S. & McKenzie J. Modeling of evolving textures using granulometries. Chapter in *Eurasip Book Series on Signal Processing and Communications*, 2006, pp. 240–270.
- Haindl M., Mikeš S., Chap. 9. Unsupervised Texture Segmentation, pp. 227–248. In *Pattern Recognition Techniques, Technology and Applications* by Peng-Yeng Yin (eds), 2016, 626 p.
- Haralick, R. M. (1979). Statistical and structural approach to textures, *Proceedings IEEE*, 67, pp. 786804.



- Hu X. Frequency Based Texture Feature Descriptors. 2017, 147 p.
- Jing, Y. T., Yong H. T. Phooi Ye. L. Recent Trends in Texture Classification. A Review. Symposium on Progress in Information & Communication Technology. 2009. P. 63–68.
- Khokhlov M., Fischer A., Rittel D. Multi-Scale Stereo-Photogrammetry System for Fractographic Analysis Using Scanning Electron Microscopy. *Experimental Mechanics* (2012) 52: pp. 975–991. DOI 10.1007/s11340-011-9582-0.
- Lee J. H., Yoo S. I. An effective image segmentation technique for the SEM image. Conference Paper May 2008, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIT.2008.4608647, Source: IEEE Xplore.
- Liu X. and Wang D. L. Image and Texture Segmentation Using Local Spectral Histograms. *IEEE transactions on image processing*, VOL. 15, NO. 10, 2006 pp. 3066–3077.
- Lu D., Q. Weng A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, Vol. 28(5), pp. 823–870.
- Madasu V. K., Yarlagadda P. An in depth comparison of four texture segmentation methods. *Digital Image Computing Techniques and Applications*. pp. 366–372. IEEE. DOI 10.1109/DICTA.2007.83.
- Manjunath B. S., Haley G. M., Ma Wei-Ying, Newsam S. D. Multiband Techniques for Texture Classification and Segmentation. Chap. 4.9 in *Handbook of Image and Video Processing*. (Second Edition) by Bovik A. I. (eds), pp. 455–470. Academic Press., 2005.
- Materka A., Strzelecki M. Texture Analysis Methods – A Review, Technical University of Lodz, Institute of Electronics, COST B11 report, Brussels, 1998, pp. 1–33.
- Neogi, N., Mohanta, D.K. & Dutta, P. K. Review of vision-based steel surface inspection systems. *J Image Video Proc*, 2014, 50 (2014), pp. 1–19 doi:10.1186/1687-5281-2014-50.
- Przybyl K., Gawalek J., Koszela K., Przybyl J., Rudzinska M., Gierz L. and Domian E. Neural Image Analysis and Electron Microscopy to Detect and Describe Selected Quality Factors of Fruit and Vegetable Spray-Dried Powders—Case Study: Chokeberry Powder. 2019, pp. 1–14.
- Rangayyan R. M. Chap. 7, Analysis of texture, pp. 1277–1375. In *Biomedical Image Analysis* CRC Press LLC, Boca Raton, FL, 2005.
- Shapiro L. G. and Stockman G. *Computer Vision*, PrenticeHall, 2001, 609 p.
- Sparavigna A. C. A method for the segmentation of images based on thresholding and applied to vesicular textures. *Philica*, 2016 (889). hal-01408383. pp. 1–10.
- Szumilas L., Mičušík B. and Hanbury A. Texture segmentation through salient texture patches. *Computer Vision Winter Workshop*, 2006, pp. 1–6.
- Tuceryan M., Jain A. K. Texture Analysis. Chapter 2.1 in *The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision* (2nd Edition), by C. H. Chen, L. F. Pau, P. S. P. Wang (eds.), pp. 207–248, World Scientific Publishing Co., 1998.
- Vibhute, A. S. Review on: Texture Discrimination Feature Analysis for Visually Similar Texture of Different Fields (IJSRD/Vol. 3/Issue 09/2015/207) pp. 851–856.

O. IVANCHUK<sup>1</sup>, O. TUMSKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>\* Department of “Photogrammetry and Geoinformatics” of Lviv Polytechnic National University, 12, Bandery street, Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38(096)4143409, e-mail: ivanchuk\_oleh@ukr.net

<sup>2</sup> Department of “Photogrammetry and Geoinformatics” of Lviv Polytechnic National University, 12, Bandery street, Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38(050)7455711, e-mail: ol.tums@gmail.com

#### A STUDY OF METHODS FOR TEXTURE CLASSIFICATION OF SEM IMAGES OF MICRO-SURFACES OF OBJECTS AND THEIR SEGMENTATION

**Purpose.** The goal of this work was to develop and study the methods of texture classification of SEM images of micro surfaces of objects based on the statistical and spectral characteristics of texture fragments, as well as a comparative analysis of segmentation methods of SEM images. **Methods.** The determination of the texture characteristics was based on statistical moments computed by the brightness histogram of a SEM- image or its region. The spectral measures of texture of SEM image were based on properties of the Fourier spectrum. To determine the spectral texture characteristics, the parameters of the amplitude and axial functions were chosen. SEM images were segmented using four methods, namely: the global thresholding; the region growing; the region splitting and merging; and the watershed using markers. **Results.** The experiments on texture classification of the SEM series of soils and metals images showed the best result of texture classification by the feature of homogeneity compared to other statistical characteristics. Calculation of the spectral characteristics was used to detect the directionality of periodic or

almost periodic texture elements in the SEM images of metals. Classification results using spectral properties and homogeneity values made it possible to obtain generalized texture characteristics of SEM images of metals. A comparative analysis of the four segmentation methods showed that the best result of finding the boundaries of objects in the SEM image was obtained by the watershed method using markers. Software implementation of texture classification and image segmentation methods were performed in the MatLab system. **Scientific novelty.** The authors proposed a method for classifying SEM-images based on spectral texture characteristics using the parameters of the amplitude and axial functions. It is shown that the segmentation by the splitting and merging method allows you to set the conditions for selecting regions with certain texture characteristics in the SEM-image. **The practical significance.** A generalized characteristic of SEM-image texture, determined by statistical and spectral measurements, is that it would be useful for automatic texture recognition and SEM-images analysis. The selection of regions with certain texture characteristics is the preprocessing step for finding points of interest suitable for the SEM-image matching and objects recognition.

*Key words:* scanning electron microscope (SEM), statistical and spectral texture features of the SEM image, classification, segmentation.

Надійшла 20.12.2019 р.