

УДК 538.911: 004.932.2

PACS number(s): 07.78.+s, 07.05.Pj, 87.64.vt

## ВЕКТОРИЗАЦІЯ КЛАСТЕРІВ НА РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ

**Б. Павлишенко**

*Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Драгоманова, 19, 79005 Львів, Україна*

Запропоновано алгоритми векторизації кластерів на типових растрових зображеннях електронної мікроскопії. Розраховано чисельні характеристики векторизованої кластерної системи.

*Ключові слова:* кластер, електронна мікроскопія.

Електронну мікроскопію застосовують для вивчення широкого класу об'єктів, зокрема, поверхні твердого тіла, у мікробіології – у разі дослідження клітин та вірусів, об'єктів сучасних нанотехнологій. Растрові зображення, отримані за допомогою електронного мікроскопа, дають змогу якісно та кількісно оцінити характеристики мікрооб'єктів. Однак, у сучасних умовах виникають нові завдання щодо аналізу растрових електронних зображень, зокрема, під час дослідження довготривалої динаміки мікрооб'єктів та вивчення відносно великих ділянок поверхні. У певних завданнях є потреби швидкого експрес-аналізу мікроструктури досліджуваних об'єктів. Розв'язок таких завдань пов'язаний із розробкою комп'ютерних алгоритмів розпізнавання мікрооб'єктів із заданою структурою на отриманих растрових зображеннях. Одним із першочергових завдань таких методів є розробка алгоритмів векторизації елементів растрових зображень, отриманих за допомогою електронного мікроскопа. Векторизація полягає у розпізнаванні суттєвих для дослідження елементів точкового зображення і заміні точкових масивів цих елементів векторами, які є параметрами математичної моделі цих елементів. Отримання параметрів заданої моделі дає змогу проведення кількісного теоретичного аналізу структури досліджуваного зображення.

У статті розглянемо алгоритми векторизації кластерів простої форми на типових зображеннях електронної мікроскопії. Загалом кластери пояснюють як сукупності елементів, згрупованих за визначеними класами із заданими параметрами, які змінюються у певних межах, характерних для кожного класу. На растрових зображеннях такими елементами вважатимемо пікселі зображення. Як параметри для групування ми вибрали відстань між пікселями та трьохскладовий вектор яскравості пікселів у триколірному графічному стандарті зображення BMP. Під час формування кластерів постає питання про визначення порогових відстаней між елементами кластера. Вибір метрики для вимірювання відстані між елементами кластерів у фазовому просторі параметрів кластеризації визначає

алгоритми формування кластерів. Найпоширеніші метрики є модифікаціями метрики Мінковського, у якій відстань між елементами визначається так [1]:

$$d_{ij} = \left( \sum_{k=1}^p |x_{ik} - x_{jk}|^r \right)^{\frac{1}{r}},$$

де  $d_{ij}$  – відстань між елементами кластера;  $x_{ik}, x_{ij}$  – параметри елементів. Частковим випадком цієї метрики при  $r=2$  є евклідова метрика. Формування кластерів також визначається додатковими умовами, що накладаються на складові елементи кластерів. Зокрема, такою умовою може бути умова обмеження величини дисперсії відстаней елементів кластера до його центра [2].

Першим етапом у векторизації кластерів у запропонованому алгоритмі є бінаризація зображення, яка полягає у виділенні елементів зображення, що відповідають заданим межах параметру яскравості [3]. Цей параметр визначає кількість елементів, які входять у кластер та кількість утворених кластерів. Залежність яскравості пікселів від кількості утворених кластерів та їх об'єднання відображається за допомогою графіків, які називаються дендрограмами. Поріг яскравості при бінаризації зображення обирали таким, при якому відбувався візуальний стрибок у кількості утворених кластерів. З метою апробації запропонованих алгоритмів було вибрано зображення атомної структури поверхні природного дисульфіда молібдена [4], показане на рис. 1.

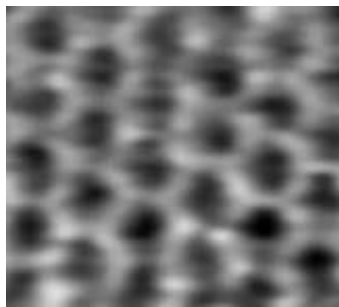


Рис. 1. Атомна структура поверхні природного дисульфіда молібдена (розмір 24 А)

Перед процедурою бінаризації важливо провести згладження растрового зображення для уникнення шумових ефектів у вигляді окремих бінаризованих пікселів. Процедuru згладження проводили шляхом усереднення яскравості пікселя за величинами яскравості сусідніх пікселів, а також шляхом реалізації дискретної згортки растрового зображення із гаусіаном [3]. На рис. 2 показано бінаризовані зображення при різних величинах порогу бінаризації. Величини яскравості  $I_p$  наведені у графічному стандарті BMP і можуть змінюватись у межах від 0 до 255.

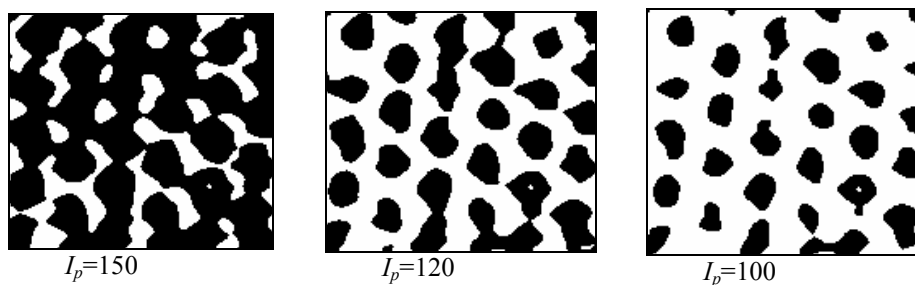


Рис. 2. Бінаризовані зображення при різних значеннях порогової яскравості пікселів

На рисунках проявляється ефект об'єднання бінаризованих елементів зображення залежно від порогу бінаризації. Для подальшої кластеризації було обрано зображення з порогом 100.

Для кластеризації елементів бінаризованого зображення було реалізовано один із агломеративних алгоритмів [1, 2], який полягає у таких кроках: на першому кроці кожен активний піксель (на наведених бінаризованих зображеннях активні пікселі показані чорним кольором) вважається окремим кластером. Якщо відстань між двома кластерами не перевищує заданого порогового значення, тоді такі кластери об'єднуються. Цей крок повторюється до тих пір, поки не завершиться процес об'єднання кластерів. У результаті реалізованого алгоритму кластеризації отримані масиви пікселів для кожного кластера були апроксимовані геометричними кругами. Координати центрів кругів визначались як середні значення координат пікселів масиву кожного кластера. Лінійні розміри кожного пікселя були вибрані одиничними. Радіус круга кластера розраховували керуючись площею кластера, яка дорівнює сумі пікселів масиву кластера. Векторизоване зображення атомної структури поверхні природного дисульфіда молібдена наведене на рис. 3.

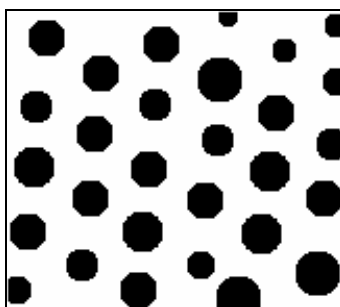


Рис. 3. Векторизоване зображення атомної структури поверхні природного дисульфіда молібдена

Як кількісні характеристики кластерної структури можна розглядати розподіл густини кластерів за радіусом кластера та середній радіус кластерів. Для характеристики однорідності розглядають відношення середньоквадратичного відхилення до середнього значення для мінімальної відстані між двома кластерами. Міру впорядкованості можна охарактеризувати відхиленням координаційного числа для деякого околу, тобто скільки сусідніх кластерів потрапляє в окіл заданого радіуса одного кластера. Для аналізованого прикладу отримано наступні чисельні характеристики кластерної структури: розмір растрового зображення 163X144 пікселів; кількість розпізнаних кластерів  $N_{cl}=29$ ; середній радіус кластерів  $R_{cl}=8,62 \pm 1,47$  пікселів;  $V_{cl}=0,17$ ; координаційне число для околу радіусом 40 пікселів  $N_{crd}=5,5 \pm 1,4$ ;  $V_{crd}=0,26$ . Величини  $V_{cl}$   $V_{crd}$  є відносними похибками і можуть характеризувати неоднорідність кластерної структури.

Ця методика була апробована також на зображенні атомної поверхні Au(788) (60 nm) із кобальтовими кластерами (рис. 4) [5]. На рис. 5 показано відповідно бінаризоване та векторизоване (із усередненими розмірами кластерів) зображення кобальтових кластерів.

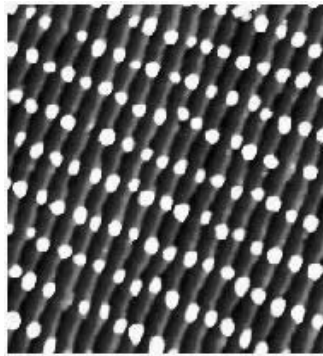


Рис. 4. Атомна поверхня Au(788) (60 nm) із кобальтовими кластерами (в середньому 100 атомів)

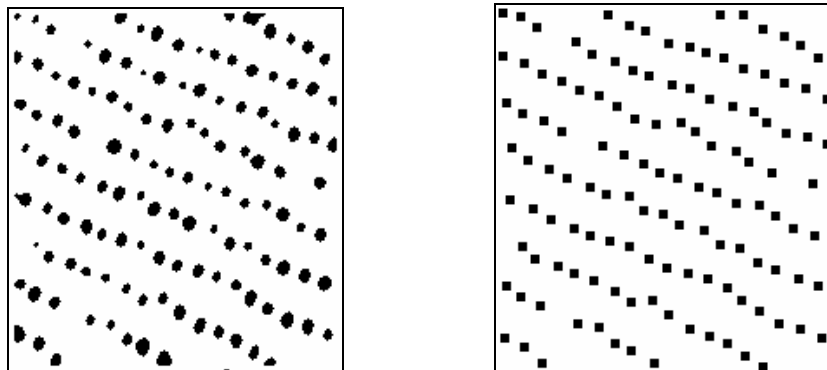


Рис. 5. Бінаризоване та векторизоване (із усередненими розмірами кластерів) зображення кобальтових кластерів

Для цього прикладу отримані такі чисельні характеристики кластерної структури: розмір растрового зображення 192X206 пікселів; кількість розпізнаних кластерів  $N_{cl}=126$ ; середній радіус кластерів  $R_{cl}=3,42 \pm 0,67$  пікселів;  $V_{cl}=0,19$ ; координаційне число для околу радіусом 40 пікселів  $N_{crd}=5,5 \pm 1,4$ ;  $V_{crd}=0,26$ . Знаючи масштаб збільшення електронного мікроскопа та піксельний розмір растрового зображення, можна легко перейти від одиничної піксельної розмірності до реальних розмірів кластерних елементів.

Отже, запропонована у роботі методика та алгоритми векторизації кластерних елементів на растрових зображеннях електронної мікроскопії дає змогу отримувати чисельні параметри математичних моделей кластерних об'єктів та розраховувати на їхній основі низку чисельних характеристик досліджуваної кластерної структури.

1. *Ким Д.О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р.* Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
2. *Жамбю М.* Иерархический кластер-анализ и соответствия: пер. с фр. М.: Финансы и статистика, 1988. 342 с.
3. *Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К.* Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высшая школа, 1983. 295 с.
4. Взгляд в микромир// [http://www.nanoscopy.org/ebook/pag09\\_12.html](http://www.nanoscopy.org/ebook/pag09_12.html).
5. Surface Physics Group// <http://ufrphy.lbhp.jussieu.fr/nano/index.html>.

## VECTORIZATION OF CLUSTERS ON BITMAPPED IMAGES OF ELECTRON MICROSCOPY

**B. Pavlyshenko**

*Ivan Franko Lviv National University,  
Dragomanov Str., 50, Lviv, UA-79005 Ukraine*

Algorithms of clusters vectorization on bitmapped images of electron microscopy have been proposed. Numerical characteristics of vectorized clusters system are calculated.

*Key words:* clusters, electron microscopy.

Стаття надійшла до редколегії 23.11.2006

Прийнята до друку 26.02.2007