

УДК 528.92

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТАТИСТИЧНИХ ТА СКЕЙЛІНГОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ ТЕСТ-ОБ'ЄКТА, ОТРИМАНИХ НА РІЗНИХ ТИПАХ РЕМ

О. Іванчук, О. Тумська

Національний університет "Львівська політехніка"

Ключові слова: цифрові РЕМ-зображення, тест-об'єкт, калібрування, статистичні, фрактальні та скейлінгові характеристики.

Постановка проблеми

У сучасних дослідженнях метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень застосовується фрактальний аналіз [2-7, 18-21, 23-34], але питання, як фрактальні характеристики РЕМ-зображень пов'язані з їх збільшеннями (масштабами), все ще не вивчені. Ці характеристики можна врахувати під час калібрування РЕМ на підставі опрацювання РЕМ-зображень еталонного тест-об'єкта, отриманих на різних РЕМ у різних збільшеннях (масштабах), а також під час дослідження їхніх скейлінгових та фрактальних характеристик.

На основі виконаних досліджень метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень тест-об'єктів [Іванчук, 2013] встановлено, що значення їхніх дійсних збільшень (масштабів) є нецілими і не відповідають збільшенням (масштабам), встановленим на шкалі приладу. Використаний для досліджень тест-об'єкт являє собою скляну пластину, на яку нанесено шар "напівпровідник-метал" у вигляді ґратки (сітки, решітки), що має вигляд кулеподібних напівсфер (див. фото у таблицях і в роботах [9-17]). Роздільна здатність цього тест-об'єкта становить 1425 лін./мм, тобто відстань між його сусідніми вузлами в обох напрямках стала і дорівнює 0,7 мкм. Характер отримання РЕМ-зображень, а також випадкові значення яскравості (струм вторинних електронів) можна вважати причиною фрактальної природи РЕМ-зображень. РЕМ-зображення того самого тест-об'єкта за різних збільшень (масштабів) мають властивість скейлінгу (масштабної інваріантності або самоподібності), але, на відміну від фрактальних множин, які ґрунтуються на понятті метричної розмірності, що строго більша від топологічної розмірності, їх розмірність не пов'язана з метричною [1].

Якщо для різних діапазонів масштабних збільшень РЕМ-зображень тест-об'єкта значення фрактальної розмірності в горизонтальному і вертикальному напрямках є різними, то такі зображення є самоафінними, на відміну від самоподібних, яким притаманна одна фрактальна розмірність [32].

Отже, встановлення і дослідження фрактальних характеристик РЕМ-зображень на підставі опрацювання зображень еталонного тест-об'єкта, отриманих на різних типах сучасних РЕМ у широкому діапазоні збільшень від $M=1000^x$ до $M=27000^x$ (крат), доповнюють класичні методи визначення геометричних спотворень РЕМ-зображень під час їх калібрування і, на наш погляд, цікаві та актуальні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Публікацій, які би стосувались безпосередньо вирішення питань використання скейлінгових та фрактальних характеристик цифрових РЕМ-зображень, які можна використати для їх подальшого калібрування, у літературних джерелах ми не знайшли. Але загалом проблематики використання фрактальності у дослідженнях об'єктів з використанням РЕМ стосується ціла низка робіт.

Зокрема, це роботи, виконані під керівництвом проф. В. М. Мельника, які стосувалися досліджень мікроструктури ґрунтів, механіки деформацій металевих поверхонь, деструктивних змін кісткової тканини тварин під дією радіаційного опромінення на підставі опрацювань їх РЕМ-зображень та деякі інші [22-26].

Визначення змін фрактальної розмірності складних композитних структур розглянуто в роботі А. А. Журби і співавторів [7].

У роботі С. Ю. Тарасова і співавторів [30] виконана оцінка фрактальної розмірності бічної поверхні сталевго зразка, що утворилася під час тертя, із аналізу РЕМ-зображення. Причому кількісна характеристика фрактальних властивостей поверхні зразка визначалась за методикою, згідно з якою профіль досліджуваної поверхні вздовж лінії сканування розглядається як лінія растра з введенням поправки, пов'язаної з яскравістю зображення у кожній точці лінії.

У роботі Н. А. Торхова і співавторів [31] показано, що реальні поверхні металевих, діелектричних шарів, на яких нерівності розподілені випадково, відповідають основним закономірностям поведінки фрактальних броунівських поверхонь, і в локальному наближенні можуть характеризуватись величиною фрактальної розмірності, яка може відрізнитися для різних масштабів вимірювань. В роботі встановлено, що до таких поверхонь, зокрема, належать і поверхні напівпровідників. Для отримання фрактальних характе-

ристик в роботі С. М. Кулькова і Ю. П. Миронова [19] застосовано метод вертикальних перерізів Мандельброта до РЕМ-зображень.

Під час вивчення статистичних геометричних характеристик мікроповерхні пор на основі тривимірних зображень, отриманих за допомогою рентгенівської мікротомографії в роботі А. М. Хлопіна і О. Ю. Дінарівська [32] виявлено, що якщо система на різних масштабах виявляє різні фрактальні властивості, то недостатньо однієї фрактальної розмірності, а доцільно використовувати мультифрактальний аналіз, у якому для опису системи застосовується спектр розмірностей. Також питання застосування фрактальних і мультифрактальних методів для аналізу скейлінгових характеристик бінарних зображень доменних структур сегнетоелектриків розглянуто в роботі А. Г. Масловської та Т. К. Барабаша [21].

Невирішені частини загальної проблеми і постановка завдання

Стохастичний характер отримання РЕМ-зображень та випадкові значення інтенсивності (рівнів сірого тону) можна вважати причиною фрактальної природи РЕМ-зображень. Ми помітили, що для різних збільшень РЕМ-зображення мають властивість *скейлінгу*, тобто масштабної інваріантності або самоподібності. Оскільки дійсні збільшення (масштаби) РЕМ-зображення вздовж осей x та y внаслідок різних спотворень під час його формування, як правило, дещо різняться, то можна вважати, що вони є самоафінними, а не самоподібними [32].

Метою цієї роботи є встановлення статистичних, фрактальних та скейлінгових характеристик РЕМ-зображень, які доцільно враховувати під час їх калібрування та подальшого цифрового опрацювання. Врахування цих характеристик в кінцевому результаті дасть змогу підвищити точність отримання кількісних просторових параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів, які досліджують з використанням растрових електронних мікроскопів.

В роботі описана послідовність виконаних досліджень та наведені результати досліджень статистичних характеристик РЕМ-зображень, які дають змогу встановити тип та характер їх шумової складової. Визначено також дисперсійні фрактальні розмірності, отримані за спектрами яскравостей, та розмірності довжин яскравісних профілів вздовж осей x і y зображень для встановлення ізотропного або анізотропного характеру збільшень.

Виклад основного матеріалу та результати досліджень

1. Оцінка параметрів шуму за РЕМ-зображеннями тест-об'єкта

Для того щоб можна було оцінити вплив шуму на результати подальших досліджень, на першому етапі визначимо тип та характер шуму за зображеннями тест-об'єкта. Для визначення типу просторового шуму

і оцінювання його параметрів знайдемо середнє значення і дисперсію шуму. Одним зі способів оцінювання середнього і дисперсії шуму є використання тестового зображення сталої яскравості. З цією метою ми вибрали на зображенні тест-об'єкта деяку однорідну ділянку між вузлами, на якій немає фонових деталей і розподіл яскравості на якій залежатиме передусім від шуму. Якщо вважати, що шум є гауссовим з нульовим середнім, то середня яскравість зображення з шумом приблизно дорівнює середній яскравості цього зображення без шуму. Зокрема, якщо виділена ділянка – область інтересу (ROI – Region Of Interest) – достатньо однорідна за яскравістю, то можна стверджувати, що дисперсія яскравості на ділянці визначається насамперед дисперсією шумової складової [5]. Дисперсію як міру яскравісного контрасту, зокрема, можна використати для побудови дескрипторів відносної гладкості яскравості z_i . Величина гладкості

$$R = 1 - 1/[1 + s^2(z)] \quad (1)$$

дорівнює нулю для області сталої яскравості та наближається до 1 для великих значень $s^2(z)$.

Важливим показником для порівняння інформативності зображень тестових об'єктів є співвідношення сигнал–шум. Якщо зображення однорідне, то варіації сигналу невеликі й значення співвідношення сигнал–шум також малі, й навпаки, якщо коливання сигналу значні, то і дисперсія сигналу більша, отже, і значення співвідношення сигнал–шум велике [4].

Виконаємо оцінку енергетичного співвідношення сигнал–шум (signal – to – noise power ratio, SNPR), використовуючи середню енергію шуму і зображення [6]:

$$R = \frac{f_A}{h_A}, \quad (2)$$

де $f_A = \frac{1}{MN} \sum_u \sum_v S_f(u, v)$,

$$h_A = \frac{1}{MN} \sum_u \sum_v S_h(u, v), \quad (3)$$

причому $S_f(u, v)$ – енергетичний спектр неспотвореного зображення, $S_h(u, v)$ – енергетичний спектр шуму, $M \times N$ – розмір зображення.

Допускаючи, що шум адитивний і вважаючи, що СКО шуму значно менше від СКО зображення (табл. 2), для оцінки зверху під час розрахунків використаємо енергетичний спектр вхідного зображення.

Наведемо алгоритм розрахунку статистичних параметрів та оцінки співвідношення сигнал–шум за тестовим РЕМ-зображенням, програмна реалізація якого виконана у середовищі MatLab:

1. Введення зображення тест-об'єкта.
2. Вибір області ROI між вузлами тест-об'єкта.
3. Побудова бінарної маски K для ROI.
4. Вимір координат вершин маски K в інтерактивному режимі.

5. Обчислення середнього значення, СКВ яскравості та кількості пікселів ROI.
6. Обчислення дескриптора відносної гладкості яскравості (1).
7. Генерування гауссового шуму за обчисленими параметрами.
8. Побудова гістограм зображення під маскою K та теоретичної гістограми.
9. Генерування шумового зображення, що має розмір вхідного зображення, із середнім значенням яскравості, що дорівнює нулеві, та СКВ, обчисленим за ROI.
10. Обчислення енергетичного спектра за шумовим зображенням.
11. Обчислення середнього значення енергії шуму.
12. Обчислення енергетичного спектра за вхідним зображенням.

13. Обчислення середнього значення енергії зображення.

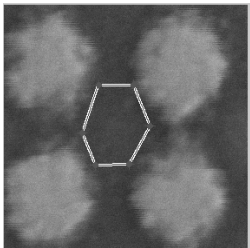
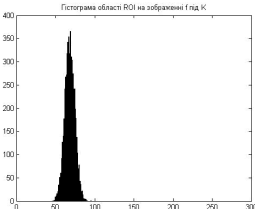
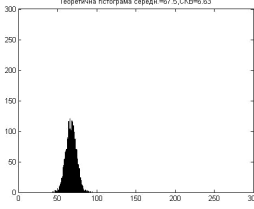
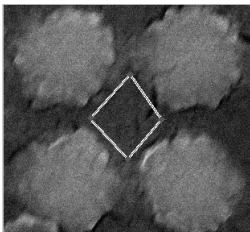
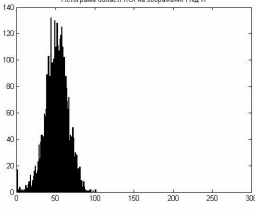
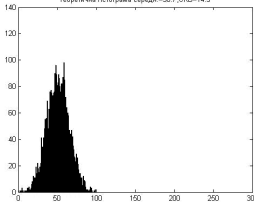
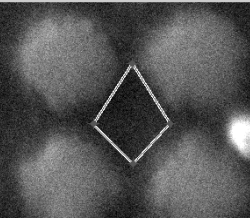
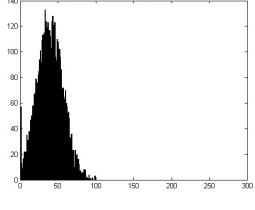
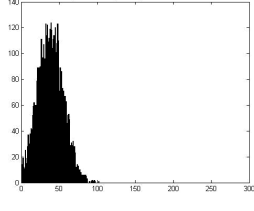
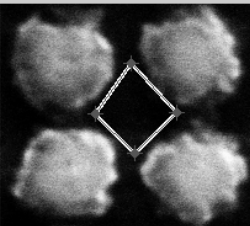
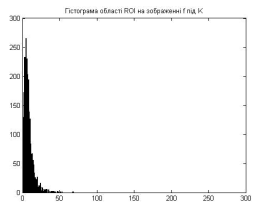
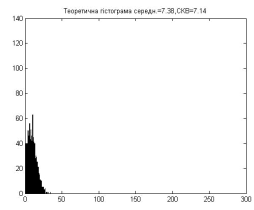
14. Обчислення співвідношення сигнал–шум за середніми значеннями енергії шуму і зображення.

У табл. 1 подано фрагменти РЕМ-зображень тест-об’єкта М 20000^x з виділеними областями інтересу для чотирьох типів РЕМ. За областю інтересу побудована гістограма (друга колонка) й визначено середнє значення, СКВ і кількість пікселів ROI. У третій колонці наведено гістограми, побудовані за згенерованим масивом (розмір якого дорівнює кількості пікселів ROI) випадкових гауссових величин з визначеним середнім значенням і СКВ.

Результати обчислень середніх значень, СКВ та дескрипторів гладкості для всього зображення і області ROI подано у табл. 2.

Таблиця 1

Порівняння гістограм однорідних ділянок (областей інтересу-ROI) та згенерованих гістограм шуму РЕМ-зображень тест-об’єкта

Область ROI на фрагменті РЕМ зображення (M=20000 ^x)	Гістограма ROI	Гістограма шуму, згенерована функцією MatLab
<p>JCM-5000</p> 		 <p>$m=67,5; S = 6,6$</p>
<p>JSM 7100F</p> 		 <p>$m=50,7; S = 14,5$</p>
<p>1061</p> 		 <p>$m=38,7; S = 17,3$</p>
<p>DSM 960A</p> 		 <p>$m=7,38; S = 7,1$</p>

Таблиця 2

Статистичні параметри РЕМ-зображень тест-об'єкта й області ROI

Тип РЕМ	Середнє значення яскравості		СКВ		Дескриптор гладкості		Сигнал-шум
	Все зображ.	ROI	Все зображ.	ROI	Все зображ.	ROI	SNPR
JCM-5000	93,8	67,5	39,8	6,6	0,024	0,0006	21,8
JSM 7100F	77,9	50,7	40,8	14,5	0,024	0,0032	8,5
106 I	93,4	38,7	42,9	17,3	0,027	0,0041	8,7
DSM 960A	84,01	7,4	75,46	7,1	0,081	0,0003	25,9

Подібність гістограм для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM 7100F, показує, що на зображенні є шум, який добре апроксимується гауссовим розподілом із середнім значенням яскравості шуму $m=50,7$ та СКВ $s = 14,5$. Такі самі зауваження стосуються і графіків для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ 106 I (середнє значення яскравості шуму $m=38,7$ та СКВ $s = 17,3$).

Для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000, гістограма ROI та теоретична гістограма, побудована за значеннями $m=67,5$ та СКВ $s = 6,6$, відрізняються за висотою майже утричі, що вказує на наявність в області значної кількості пікселів з близькими значеннями яскравості (смуга посередині гістограми).

Такі самі висновки впливають із аналізу гістограм для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM 960A ($m=7,4$ та СКВ $s = 7,1$). Тут смуга пікселів з близькими значеннями яскравості розташована на початку відліку. Також дескриптори гладкості для РЕМ-зображень, отриманих на JCM-5000 ($R=0,0006$) і DSM 960A ($R=0,0003$), свідчать, що шум на цих зображеннях практично відсутній.

Наведені результати обчислень статистичних параметрів та оцінки співвідношення сигнал-шум показують, що за характеристиками шуму подібні між собою JCM-5000 і DSM 960A і JSM 7100F і РЕМ 106I.

2. Дослідження роздільної здатності цифрових РЕМ-зображень різних масштабів (збільшень) для різних типів РЕМ

Ці дослідження ми виконали на підставі опрацювання цифрових РЕМ-зображень еталонного тест-

об'єкта з роздільною здатністю 1425 ліній/мм, отриманих на чотирьох типах сучасних РЕМ за таких фіксованих на шкалах приладів збільшень (масштабів):

– 1000^x, 2000^x, 5000^x, 8000^x, 10000^x, 15000^x, 20000^x, 24000^x, 27000^x для РЕМ JCM-5000 (NeoScope) (JEOL, Японія);

– 2000^x, 5000^x, 7500^x, 10000^x, 15000^x, 20000^x, 25000^x для РЕМ JCM-7100F (JEOL, Японія);

– 1000^x, 2000^x, 3000^x, 5000^x, 10000^x, 20000^x для РЕМ DSM-960A (Zeiss, Німеччина);

– 1000^x, 2500^x, 5000^x, 8000^x, 10000^x, 15000^x, 20000^x, 25000^x для РЕМ 106I (Суми, Україна).

У табл. 3 наведено результати вимірювань кількості пікселів, які відобразились між першим і п'ятим вузлами тест-об'єкта вздовж осі x (горизонталі) й y (вертикалі) у центральній частині вищеперелічених РЕМ-зображень. Ця відстань на нашому еталонному тест-об'єкті становить приблизно 2,8 мкм, тобто чотири інтервали між його сусідніми вузлами, оскільки один інтервал становить приблизно 0,7 мкм (1000 мкм/1425). Таку відстань вибрано тому, що за збільшення 27000^x (РЕМ JCM-5000) на РЕМ-знімку відображаються лише 6×5 вузлів тест-об'єкта. Отже, ці числа певною мірою характеризують роздільну здатність (ступінь розрізнення деталей) зображення вздовж горизонтальних та вертикальних напрямів знімка в цьому масштабі, яка дорівнює 2,8 мкм, поділених на кількість пікселів між першим і п'ятим вузлами тест-об'єкта.

Таблиця 3

Результати вимірювань кількості пікселів між вузлами еталонної відстані тест-об'єкта на РЕМ-знімках різних масштабів і різних типів РЕМ

РЕМ	1000 ^x	2000 ^x	2500 ^x	3000 ^x	5000 ^x	7500 ^x	8000 ^x	10000 ^x	15000 ^x	20000 ^x	24000 ^x	25000 ^x	27000 ^x
JCM-5000	31	61	-	-	152	-	243	305	458	608	731	-	822
	31	61	-	-	152	-	245	305	458	607	727	-	816
JSM 7100F	-	60	-	-	150	234	-	309	458	611	-	764	-
	-	60	-	-	150	235	-	310	459	610	-	750	-
106I	31	-	45	-	152	-	236	297	445	588	-	736	-
	30	-	44	-	152	-	235	297	443	582	-	726	-
DSM 960A	20	41	-	61	104	-	-	208	-	414	-	-	-
	20	40	-	61	100	-	-	202	-	390	-	-	-

У верхньому рядку таблиці – значення довжин у пікселях вздовж осі x знімка (горизонтальні проміжки), у нижньому – вздовж осі y (вертикальні).

Неоднакова кількість пікселів між вузлами еталонної відстані тест-об'єкта для різних РЕМ за фіксованого збільшення зумовлена різними розмірами РЕМ-зображень для різних РЕМ (розгортками у пікселях), геометричними спотвореннями зображень і похибками вимірювань, особливо у разі великих збільшень ($M \geq 10000^x$).

Порівнюючи ці величини, можна зробити висновок, що роздільна здатність зображень перших трьох РЕМ одного порядку для всіх масштабів збільшень і відповідає масштабу, встановленому на шкалі приладу.

Поряд з тим із попередніх досліджень випливає, що метричні характеристики зображень РЕМ 106I відповідають масштабам, збільшеним майже утричі (2,8213), порівняно із встановленими на шкалі приладу. Це можна пояснити тим, що реальний розмір пікселя більший, ніж вказано в технічних характеристиках (0,26450 мм замість 0,09375 мм), але зазначимо, що інформативність зображень, отриманих на РЕМ 106I, відповідатиме масштабам, встановленим на шкалі приладу.

Що стосується РЕМ DSM 960A, то роздільна здатність зображень відповідає масштабам, меншим приблизно у 1,5 разу порівняно з масштабами, встановленими на шкалі приладу, оскільки розгортка під час отримання РЕМ-зображення у цьому приладі становить 800×600 пікселів, а в інших типах мікроскопів 1280×1080 (JCM-5000), 1280×1024 (JSM 7100F), 1280×960 (РЕМ 106I). Водночас метричні характеристики відповідають масштабам, збільшеним майже удвічі (1,9310).

Наочно підтверджує попередні міркування кількість вузлів тест-об'єкта, які відобразились на РЕМ-зображеннях одного збільшення (масштабу), наприклад, для $M=20000^x$, отриманих на різних типах РЕМ (див рис. у роботах). Зокрема, для JCM-5000 це 17×13 вузлів, JSM 7100F – $16 \times 12,5$, 106I 17×12 , DSM 960A $15,5 \times 12$. Отже, для всіх РЕМ розміри тест-об'єкта відповідають збільшенню (масштабу) 20000^x , встановленому на шкалі приладу.

3. Фрактальний аналіз цифрових РЕМ-зображень

3.1. Визначення дисперсійної розмірності

Для оцінювання дисперсійної фрактальної розмірності визначимо спектр потужності як одновимірне перетворення Фур'є від значень яскравості послідовності проміжків (a_i, b_i) , що зростає, вибраних у центральній частині одного рядка (стовпця) РЕМ-

зображення тест-об'єкта в різних масштабах. Для одновимірного випадку дисперсійну розмірність визначимо за формулою [28]:

$$D_s = 1 + \frac{3 - D'}{2}, \quad (4)$$

де D' – оцінка фрактальної розмірності, що визначається як

$$D' = 1 - \frac{\log S_1^2 - \log S_2^2}{\log m - \log n}, \quad (5)$$

де S_1^2 – дисперсія, визначена за спектром потужності профілю яскравості на проміжку (a, b) в масштабі m , відповідно S_2^2 – дисперсія, визначена за спектром потужності на проміжку (a, b) в масштабі n . Дисперсію D_s визначаємо в горизонтальному та вертикальному напрямках.

3.2. Визначення розмірностей за величинами яскравостей вздовж еталонних проміжків

Цю розмірність визначаємо за величинами яскравостей вздовж вибраних нами у центральній частині РЕМ-зображень постійних інтервалів між центрами першого і п'ятого вузлів еталонного тест-об'єкта вздовж його осей x і y , використовуючи формулу:

$$D_L = 1 - \frac{\log L_1 - \log L_2}{\log m - \log n}, \quad (6)$$

де L_1 – сума різниць яскравостей на проміжку (a, b) в масштабі m , відповідно L_2 – сума різниць яскравостей на проміжку (a, b) в масштабі n . Суму різниць яскравостей в горизонтальному напрямку визначаємо за формулою:

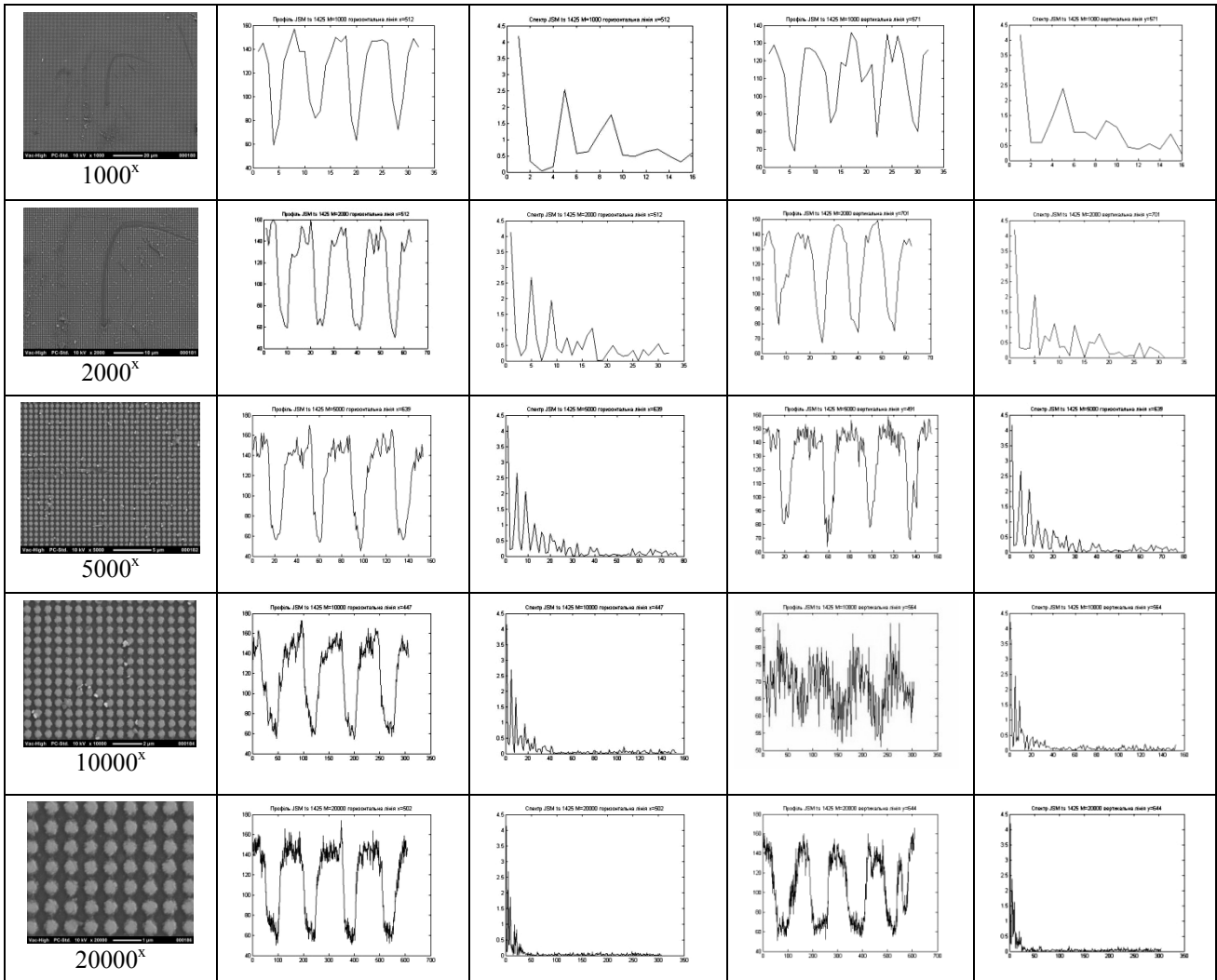
$$L_x = \sum_{x=x_a}^{x_b} |z_x - z_{x+1}| \quad (7)$$

де z – значення яскравості на проміжку (x_a, x_b) . Так само визначається сума різниць яскравостей у вертикальному напрямку L_y на проміжку (y_a, y_b) .

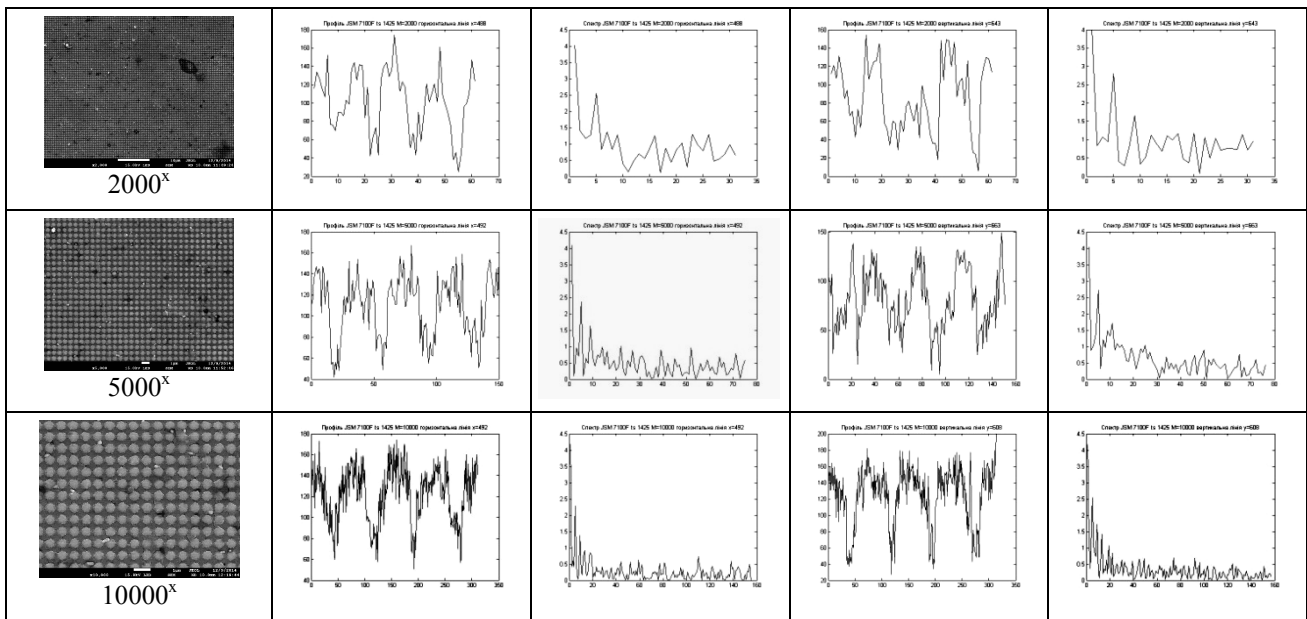
Перша колонка табл. 4 містить зображення тест-об'єкта; друга колонка містить горизонтальний профіль яскравостей, а третя його спектр; відповідно четверта і п'ята колонки містять профіль яскравостей і його спектр у вертикальному напрямку. Як бачимо, спектральна крива є самоподібною функцією, тобто має властивості скейлінгу. Наприклад, особливості, що містить один масштаб, повторюються і на інших масштабах. Зокрема, можна помітити, що максимуми за більших збільшень менші від максимумів за менших збільшень, що є однією із властивостей подібної функції

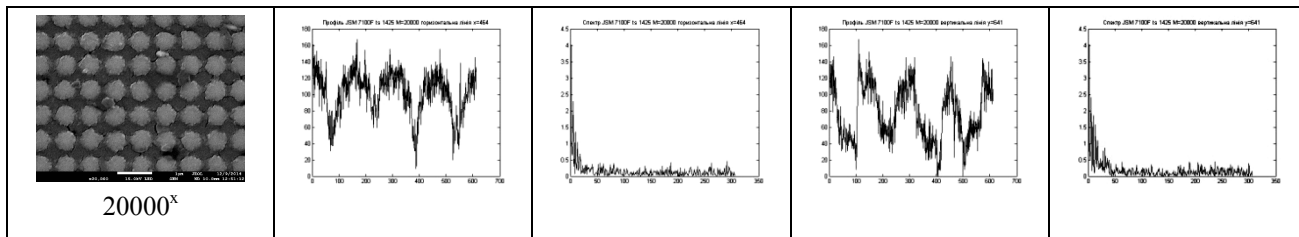
Таблиця 4

**Профілі яскравостей та їхні спектри вздовж осей x і y
PEM JCM 5000, Neoscope**

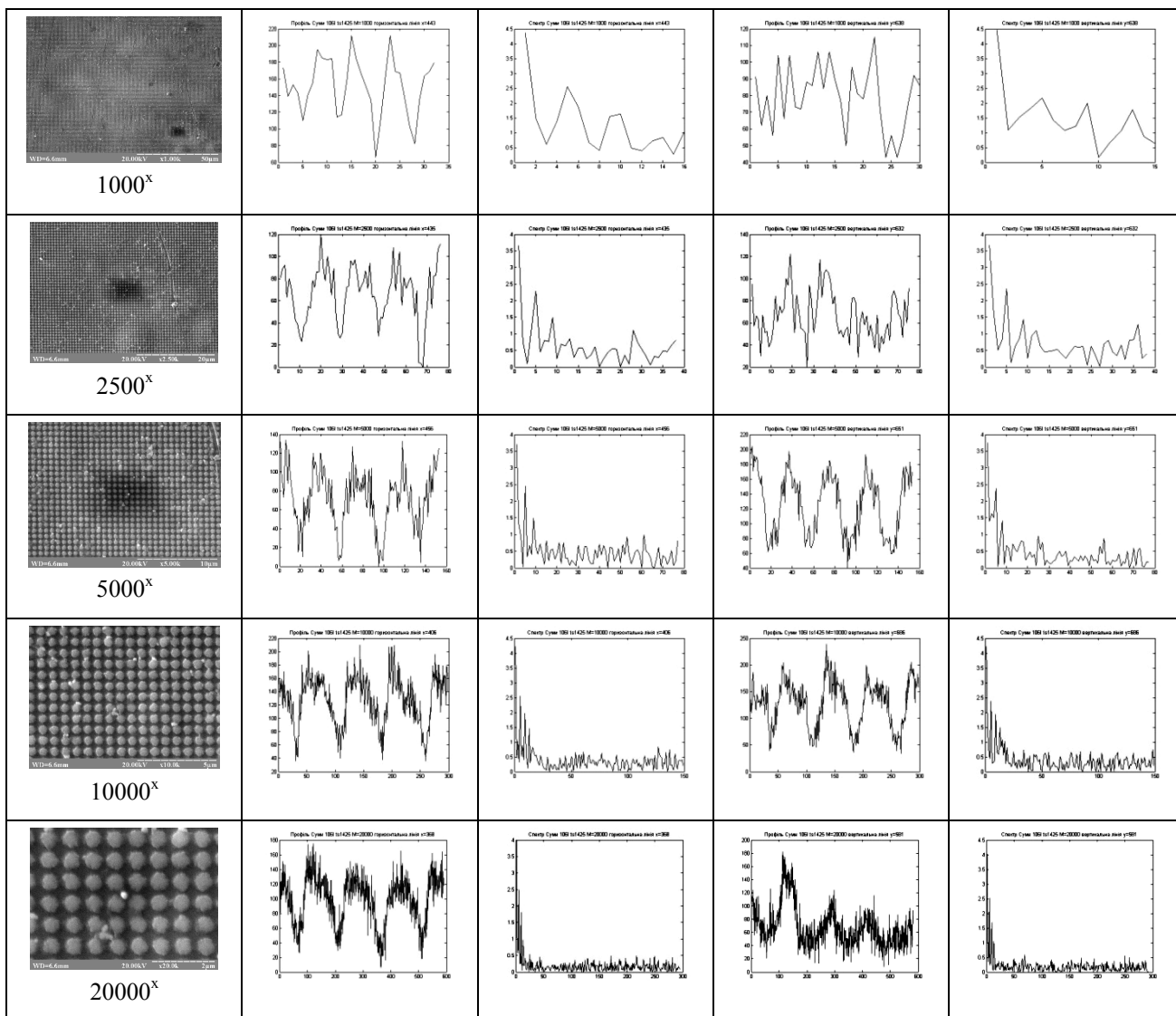


PEM JSM 7100F

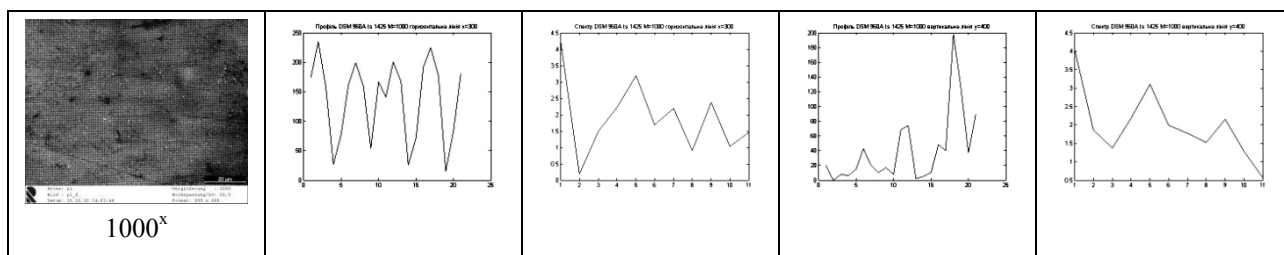


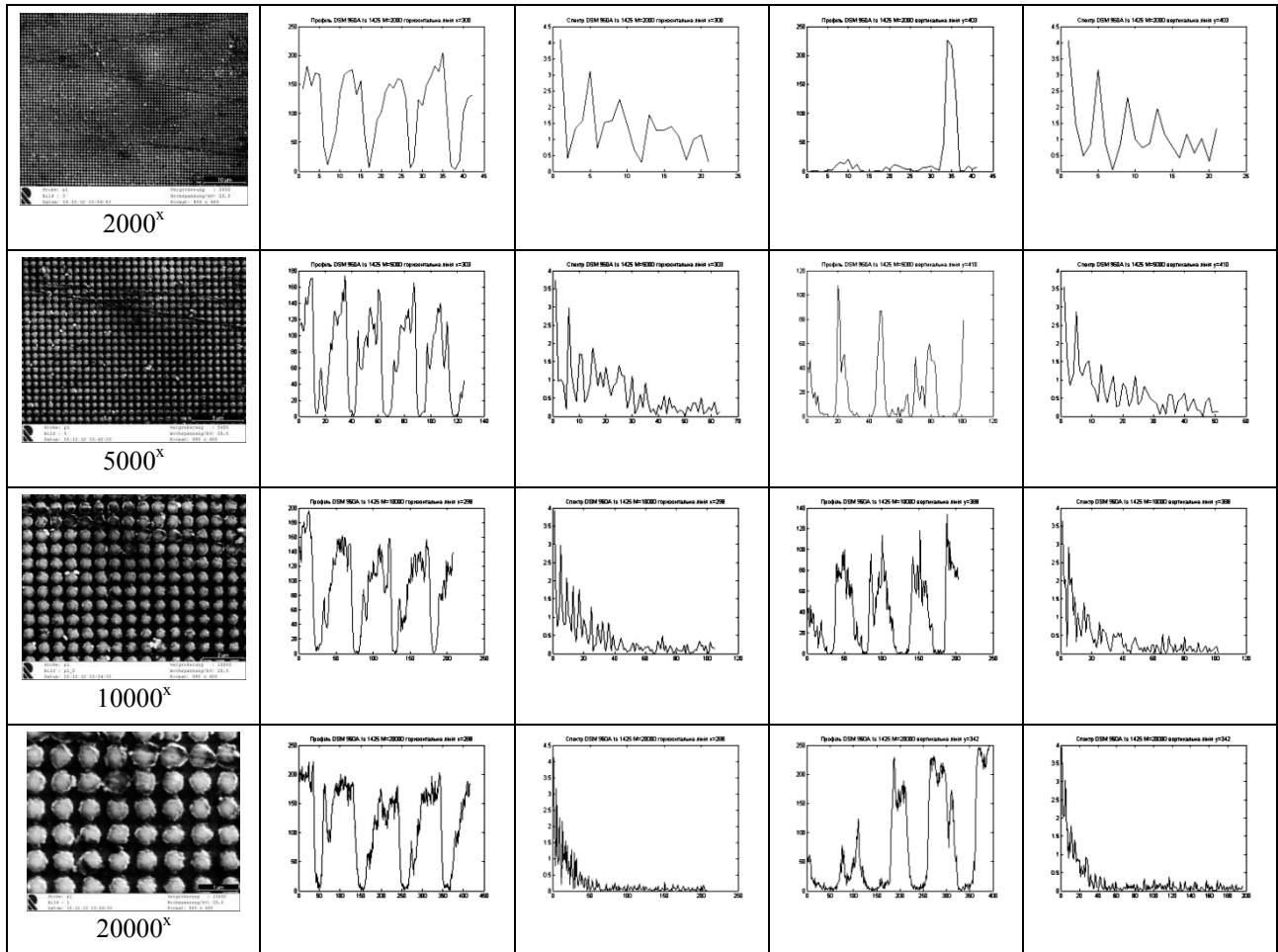


PEM 106I



PEM DSM 960A





2.3. Обчислення розмірностей за значеннями яскравостей та дисперсійних розмірностей за спектром для різних збільшень (масштабів) і різних типів РЕМ

Обчислення значень розмірностей виконувалось за парами значень масштабів (m_i, m_j) . У результаті ми сформуваємо матриці виду (8) для дисперсійної розмірності D_σ (4), обчисленої за спектром потужності, та розмірності, розраховані за значеннями яскравостей D_L (6) у горизонтальному та вертикальних напрямках.

$$D_{m_i, m_j} = \begin{bmatrix} 0 & m_1, m_2 & m_1, m_3 & \dots & m_1, m_n \\ 0 & 0 & m_2, m_3 & \dots & m_1, m_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{n-1}, m_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Нижче наведено приклад матриці дисперсійної розмірності для яскравісних профілів у горизонтальному напрямку для пар значень масштабів РЕМ JCM 5000 (NeoScope) (JEOL, Японія):

$$m_1=1000^x, m_2=2000^x, m_3=5000^x, m_4=8000^x, m_5=10000^x, m_6=15000^x, m_7=20000^x, m_8=24000^x, m_9=27000^x.$$

$$D_S = \begin{bmatrix} 0 & 1.58 & 1.59 & 1.51 & 1.55 & 1.51 & 1.53 & 1.55 & 1.53 \\ 0 & 0 & 1.61 & 1.48 & 1.53 & 1.50 & 1.51 & 1.55 & 1.51 \\ 0 & 0 & 0 & 1.23 & 1.44 & 1.41 & 1.45 & 1.51 & 1.46 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.88 & 1.54 & 1.55 & 1.63 & 1.55 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.35 & 1.45 & 1.57 & 1.47 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.59 & 1.76 & 1.56 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.02 & 1.53 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.76 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Для кожного рядка матриці для ненульових елементів обчислено середнє значення дисперсійної розмірності:

$$D_{S \text{ середн}} = \{1.54 \ 1.53 \ 1.42 \ 1.63 \ 1.46 \ 1.63 \ 1.77 \ 0.76\}$$

та середнє квадратичне відхилення:

$$D_{S \text{ СКВ}} = \{0,03 \ 0,04 \ 0,10 \ 0,14 \ 0,09 \ 0,10 \ 0,35 \ 0\}.$$

Програма обчислення розмірностей складена в середовищі MatLab. Вхідними даними для програми слугували: перелік масштабів РЕМ-зображень; виміряні значення проміжків (у пікселях) між центрами i -го та $i+4$ -го вузлів у горизонтальному та вертикальному напрямках на РЕМ-зображенні тест-об'єкта для кожного заданого масштабу; набір РЕМ-зображень у заданих масштабах.

Обчислювальна процедура визначення розмірностей дисперсійної D_σ та за значеннями яскравостей

D_L у горизонтальному та вертикальному напрямках складалась із таких кроків:

1. Введення РЕМ-зображення.
2. Формування масиву значень яскравостей профілю за координатами початкової та кінцевої точок проміжку.
3. Обчислення сум різниць яскравостей $L_{x,y}$ (7).
4. Обчислення спектра потужності Фур'є за яскравісним профілем.
5. Оцінка фрактальної розмірності за значеннями дисперсії спектра потужності D' (5).
6. Обчислення розмірностей дисперсійних D_σ (4) та за значеннями яскравостей D_L (6).
7. Формування матриць розмірностей (8) дисперсійних D_σ та за значеннями яскравостей D_L .
8. Обчислення середніх значень та СКВ розмірностей дисперсійних D_σ та значеннями яскравостей D_L .

Результати обчислень середніх значень розмірностей за значеннями яскравостей D_L , дисперсійних

розмірностей D_σ та відповідні середні квадратичні відхилення для послідовностей горизонтальних та вертикальних пар масштабів для різних типів РЕМ наведено у табл. 5.

Для JSM 7100F задано такі послідовності масштабів:

$$m_1=2000^x, m_2=5000^x, m_3=7500^x, m_4=10000^x, m_5=15000^x, m_6=20000^x, m_7=25000^x.$$

Для РЕМ 106I задано такі послідовності масштабів:

$$m_1=1000^x, m_2=2500^x, m_3=5000^x, m_4=8000^x, m_5=10000^x, m_6=150000^x, m_7=20000^x, m_8=25000^x.$$

Для РЕМ DSM 960A задано такі послідовності масштабів:

$$m_1=1000^x, m_2=2000^x, m_3=3000^x, m_4=5000^x, m_5=10000^x, m_6=20000^x.$$

У табл. 5 ввійшли результати обчислень середніх значень і СКВ з першого по третій рядки матриць виду (8).

Таблиця 5

Результати обчислень розмірностей за значеннями яскравостей D_L та дисперсійних розмірностей за спектром потужності D_σ для РЕМ-зображень різних збільшень (масштабів), отриманих на різних РЕМ

РЕМ	JCM-5000 (NeoScope)		JSM 7100F		РЕМ 106 I		DSM-960A	
	горизонт.	вертикал.	горизонт.	вертикал.	горизонт.	вертикал.	горизонт.	вертикал.
Збільшення (масштаби)	1000 ^x -2000 ^x ,..., 1000 ^x -27000 ^x		-		1000 ^x -2500 ^x ,..., 1000 ^x -25000 ^x		1000 ^x -2000 ^x ,..., 1000 ^x -20000 ^x	
Розмірність за значеннями яскравостей, D_L	1,55 ± 0,06	1,59 ± 0,21	-	-	1,75 ± 0,19	1,83 ± 0,10	1,16 ± 0,16	1,21 ± 0,15
Дисперсійна розмірність, D_σ	1,54 ± 0,03	1,55 ± 0,03	-	-	0,90 ± 0,57	0,82 ± 0,62	0,89 ± 0,42	1,03 ± 0,49
Збільшення (масштаби)	2000 ^x -5000 ^x ,..., 2000 ^x -27000 ^x		2000 ^x -5000 ^x ,..., 2000 ^x -25000 ^x		2500 ^x -5000 ^x ,..., 2500 ^x -25000 ^x		2000 ^x -3000 ^x ,..., 2000 ^x -20000 ^x	
Розмірність за значеннями яскравостей, D_L	1,55 ± 0,10	1,58 ± 0,03	1,78 ± 0,06	1,75 ± 0,06	2,16 ± 0,10	1,95 ± 0,13	1,33 ± 0,21	1,16 ± 0,32
Дисперсійна розмірність, D_σ	1,53 ± 0,04	1,51 ± 0,03	1,59 ± 0,15	1,61 ± 0,15	1,95 ± 0,26	1,97 ± 0,23	1,02 ± 0,63	1,37 ± 0,22
Збільшення (масштаби)	5000 ^x -8000 ^x ,..., 5000 ^x -27000 ^x		5000 ^x -7500 ^x ,..., 5000 ^x -25000 ^x		5000 ^x -8000 ^x ,..., 5000 ^x -25000 ^x		3000 ^x -5000 ^x ,..., 3000 ^x -20000 ^x	
Розмірність за значеннями яскравостей, D_L	1,76 ± 0,06	1,85 ± 0,07	1,95 ± 0,10	1,87 ± 0,05	2,29 ± 0,53	2,23 ± 0,12	1,67 ± 0,20	1,53 ± 0,14
Дисперсійна розмірність, D_σ	1,42 ± 0,10	1,44 ± 0,08	1,54 ± 0,34	1,68 ± 0,39	1,94 ± 0,14	2,28 ± 0,48	1,83 ± 0,24	1,93 ± 0,12

Аналізуючи дані табл. 5, можемо зробити висновок, що дисперсійна розмірність РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000, стабільна для масштабного ряду від 1000^x до 27000^x у

горизонтальному і вертикальному напрямках і становить: $D_s = 1.54 \pm 0.03$ – для горизонтальних пар значень масштабів від (1000^x-2000^x) до (1000^x-27000^x);

$D_s = 1.55 \pm 0.03$ – для вертикальних пар значень масштабів від (1000^x-2000^x) до $(1000^x-27000^x)$;

$D_s = 1.53 \pm 0.04$ – для горизонтальних пар значень масштабів від (2000^x-3000^x) до $(2000^x-27000^x)$;

$D_s = 1.51 \pm 0.03$ – для вертикальних пар значень масштабів від (2000^x-3000^x) до $(2000^x-27000^x)$.

Для визначення дисперсійної розмірності D_σ як еталон (одiniцю) вимірювання використовували сегменти тест-об'єкта 1000^x та 2000^x масштабів. З використанням еталона вимірювання сегмента тест-об'єкта $M=5000^x$ отримано результати, подібні до результатів, отриманих з еталоном з $M=1000^x$. Обчислена розмірність за значеннями яскравостей D_L дає подібні результати для еталонів вимірювання у масштабах 1000^x та 2000^x і зростає для еталона вимірювання в $M=5000^x$.

Подібні результати визначено для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM 7100F. Для масштабного ряду від 1000^x до 25000^x у горизонтальному і вертикальному напрямках дисперсійна розмірність становить:

$D_s = 1.59 \pm 0.15$ – для горизонтальних пар значень масштабів від (2000^x-3000^x) до $(2000^x-25000^x)$;

$D_s = 1.61 \pm 0.15$ – для вертикальних пар значень масштабів від (2000^x-3000^x) до $(2000^x-25000^x)$ з еталоном вимірювання масштабу $M=2000^x$. Розмірність за значеннями яскравостей D_L зростає від 1,75 з еталоном $M=2000^x$ до 1,95 з еталоном $M=5000^x$.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок про *ізотропний характер* значень дисперсійної розмірності для РЕМ-зображень, одержаних на JCM-5000 та JSM 7100F.

Для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ 106I для пар значень масштабів, що починаються з $M=1000^x$, дисперсійна розмірність не стабілізується. Отже, фрактальний характер дисперсії виявляється, починаючи з масштабів, більших за $M=2500^x$. Тільки починаючи з масштабу $M=5000^x$ спостерігається відносна стабільність і для горизонтальних, і для вертикальних масштабів.

$D_s = 1.95 \pm 0.26$ – для горизонтальних пар значень масштабів від (2500^x-5000^x) до $(2500^x-25000^x)$;

$D_s = 1.93 \pm 0.23$ – для вертикальних пар значень масштабів від (2500^x-5000^x) до $(2500^x-25000^x)$;

У результаті вимірювання D_σ з еталонами в $M=2500^x$ і $M=5000^x$ отримуємо для горизонтальних пар результат близько 1,95, а для вертикальних пар значення D_σ зростає з 1,97 до 2,28.

Стосовно розмірності за значеннями яскравостей D_L , то вона зростає від 1,75 (еталон $M=1000^x$) до 2,29 (еталон $M=5000^x$).

Подібні зауваження стосуються і РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM 960A, де відносна стабільність встановлюється для пар масштабів, що починаються з $M=3000^x$.

$D_s = 1.83 \pm 0.21$ – для горизонтальних пар значень масштабів від (3000^x-5000^x) до $(3000^x-20000^x)$;

$D_s = 1.93 \pm 0.12$ – для вертикальних пар значень масштабів від (3000^x-5000^x) до $(3000^x-20000^x)$.

Значення розмірності за значеннями яскравостей D_L зростає від 1,18 (еталон $M=1000^x$) до 1,67 (еталон $M=3000^x$) і не узгоджується величиною D_σ .

Отже, величина дисперсійної розмірності для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ 106I та DSM 960A, не є однозначною, тобто можна виділити дві групи значень, що відповідають різним масштабам збільшень (РЕМ 106I: $M \leq 2500^x$ та $M > 5000^x$; DSM 960A: $M \leq 3000^x$ та $M > 5000^x$).

Для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000, значення D_σ для всього масштабного ряду близько $D=1,5$, що згідно з класифікацією для фрактальної розмірності за Р. М. Кроновером [18] вказує на випадковий ряд, причому функція щільності ймовірностей появи яскравостей відповідає нормальному розподілу. Для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM 7100F, значення D_σ для всього масштабного ряду містяться у діапазоні $(1,5 < D < 2)$. Такий ряд мінливіший, ніж ряд випадковий, оскільки складається із частих реверсів спад-підйом. Стійкість такої поведінки залежить від того, наскільки значення D_σ близьке до $D=1,5$. Для РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ 106I, значення D_σ не стабілізуються у межах досліджуваного масштабного ряду. Такі самі зауваження стосуються і РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM 960A.

Висновки.

1. Обчислені параметри шумової складової РЕМ-зображень, отримані на підставі статистичного опрацювання зображень еталонного тест-об'єкта, окрім калібрувальних характеристик, дають змогу встановити особливості формування цифрових зображень для різних типів РЕМ. Показник відношення сигнал/шум, який є мірою неоднорідності області зображення, можна використовувати для кореляційного ототожнення точок дослідних мікроповерхонь твердих тіл на їх цифрових РЕМ-стереопарах під час побудови ЦММР.

2. З порівняння визначених розмірностей за значеннями яскравостей D_L у горизонтальному та вертикальному напрямках встановлено, що розподіл яскравостей РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 і JSM 7100F, може характеризуватись величиною дисперсійної фрактальної розмірності D_σ , яка має порівняно сталі значення і неістотно змінюється у разі

зміни збільшення (масштабу) РЕМ-зображення, що може бути підставою для фрактального опрацювання цифрових зображень, отриманих на цих типах РЕМ.

3. Отримані значення дисперсійних фрактальних розмірностей D_σ та розмірностей за значеннями яскравостей D_L дають важливу інформацію про анізотропію РЕМ-зображень у різних масштабах і можуть бути додатковими параметрами, які характеризують особливості формування РЕМ-зображень різними типами РЕМ.

Література

1. Анищенко В. С. Лекции по нелинейной динамике: учеб. пособ. для студ. вузов, обучающихся по спец. “Радиофизика и электроника” и “Физика” / В. С. Анищенко, Т. Е. Вадивасова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. – 322 с.
2. Барабаш Т. К. Анализ методом фрактальной параметризации эволюции геометрии доменных структур сегнетоэлектриков при электронном облучении / Т. К. Барабаш, А. Г. Масловская // Сб. тр. 11-й Межд. конф. “Взаимодействие излучений с твердым телом”. – Минск, 2015. – С. 36–38.
3. Бобро Ю. Г. Принципы фрактальности в механике разрушения металлов / Ю. Г. Бобро, В. Н. Мельник, В. У. Волошин, А. В. Шостак // Изв. РАН. Металлы. – 1997. – № 2. – С. 119–122.
4. Визильтер Ю. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, А. В. Бондаренко, М. В. Ососков, А. В. Моржин. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
5. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
6. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
7. Журба А. А. Анализ изменений фрактальной размерности и ее распределения в процессе формирования композитной структуры быстрорежущей стали / А. А. Журба, А. И. Михалев, С. И. Губенко, Е. А. Черноиваненко // Системные технологии. – 2012, 4(81). – С. 155–164.
8. Иванчук О. М. Структура та функції програмного комплексу “Dimicros” для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції / О. М. Иванчук, І. В. Хрупін // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2012. – Вип. I (23). – С. 193–197.
9. Иванчук О. М. Дослідження точності визначення дійсних величин збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) фірми JEOL // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2012. – Вип. 76. – С. 80–84.
10. Иванчук О. М. Дослідження величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A (Carl Zeiss, Німеччина) та точності їх врахування / О. М. Иванчук, Т. Барфельс, Я. Геер, В. Гергер // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2013. – Вип. 78. – С. 120–126.
11. Иванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore), та їх апроксимація // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна. – Донецьк, 2013. – Вип. 1 (18). – С. 91–97.
12. Иванчук О. Дослідження похибок збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106I (Суми, Україна) за допомогою спеціальних тест-об’єктів / О. Иванчук, М. Чекайло // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2014. – Вип. 79. – С. 82–88.
13. Иванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106 I (Суми, Україна) // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2014. – Вип. II (28). – С. 74–77.
14. Иванчук О. Особливості калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних РЕМ // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2015. – Вип. I (29). – С. 168–173.
15. Иванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F (JEOL, Японія), та точність їх апроксимації // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2015. – Вип. 81. – С. 101–109.
16. Иванчук О. Розроблення та дослідження технології автоматизації калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) (JEOL, Японія), і їх врахування / О. Иванчук, О. Тумська // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2016. – Вип. 84. – С. 56–64.
17. Иванчук О. Методика автоматизованого визначення координат центрів вузлів тест-об’єкта за його РЕМ-зображеннями з використанням засобів MatLab / О. Иванчук, О. Тумська // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2017. – Вип. I (33). – С. 158–165.
18. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах / Р. М. Кроновер. – М.: Техносфера, 2006. – 488 с.
19. Кульков С. Н. Фрактальная размерность поверхности при деформационном мартенситном превращении в никелиде титана / С. Н. Кульков,

- Ю. П. Миронов; Институт физики прочности и материаловедения СО РАН // Журнал технической физики. – 2004. – 74, вып. 4.
20. Латыпова Н. В. Компьютерная обработка данных. Фракталы: учеб. пособ. / Н. В. Латыпова. – Ижевск: Удмуртский университет, 2012. – 78 с.
 21. Масловская А. Г. Расчёт скейлинговых характеристик РЭМ-изображений доменных структур сегнетоэлектриков методами фрактальной параметризации / А. Г. Масловская, Т. К. Барабаш // Сб. тр. 11-й Междун. конф. “Взаимодействие излучений с твердым телом”. – Минск, 2015. – С. 39–46.
 22. Мельник В. Н. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов, О. М. Иванчук, О. В. Тумская, М. П. Шебатинов // Рук. деп. в ВИНТИ. – М., 1984. – № 528. – 18 с.
 23. Мельник В. Н. Фрактальная и стереометрическая оценки РЭМ-изображений шероховатых поверхностей / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов // Изв. РАН. Серия физическая. – 1993. – № 8. – С. 99–105.
 24. Мельник В. Н. Определение фрактальности поверхностей разрушения по данным РЭМ-стереоизмерений / В. Н. Мельник, Ю. Г. Бобро, А. В. Шостак, В. У. Волошин // Трение и износ. – 1996. – Т. 16, № 6. – С. 38–41.
 25. Мельник В. М. Методи кількісної характеристики мікроструктури ґрунту / В. М. Мельник, В. У. Волошин, Ф. П. Тарасюк, Ю. С. Бліндер // Вісн. Львів. держ. ун-ту. Серія географічна / Львів. держ. ун-т ім. Івана Франка; голов. ред. С. П. Позняк. – Львів, 1999. – № 25. – С. 24–27.
 26. Мельник В. М. Оцінка деструктивних змін кісткової тканини методами структурної функції та фрактального аналізу / В. М. Мельник, В. У. Волошин // Наук. вісн. Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки. – Луцьк, 2002. – № 3. – С. 166–171.
 27. Мельник В. М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія / В. М. Мельник, А. В. Шостак. – Луцьк: Вежа, 2009. – 469 с.
 28. Неижмаков К. П. Особенности калибровки растрового электронного микроскопа РЭМ-106 // Метрология. – Харків, 2012. – С. 468–470.
 29. Потапов А. А. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, А. А. Пахомов, В. А. Герман. – М.: Физматлит, 208. – 496 с.
 30. Тарасов С. Ю. Применение фракталов к анализу процессов трения / С. Ю. Тарасов, А. В. Колубаев, А. Г. Липницкий // Письма в ЖТФ. – 1999. Т. 25. – № 3.
 31. Торхов Н. А. Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального n -GaAs в локальном пределе / Н. А. Торхов, В. Г. Божков, И. В. Ивонин, В. А. Новиков // Физика и техника полупроводников, 2009. – Т. 43, вып. 1.
 32. Федер Е. Фракталы: пер. с англ. / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
 33. Хлюпин А. Н. Фрактальный анализ трехмерной микроструктуры пористых материалов / А. Н. Хлюпин, О. Ю. Динариев // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, вып. 6. – С. 17–22.
 34. Шостак А. В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.24.01 / Шостак Анна Володимирівна; Луцький нац. техн. університет. – К., 2012. – 28 с.
 35. Badii R. Hausdorff dimension and uniformity of strange attractors / R. Badii, A. Politi // Phys. Rev., 1984. – Lett. 52. – P. 1661–1664.
 36. Mandelbrot B. The fractal geometry of nature. – N.Y.: Freeman, 1983. – 469 p.
 37. Meakin P. Scaling properties for the growth probability measure and harmonic measure of fractal structures // Phys. Rev., 1987. – Lett. A35. – P. 2234–2245.

Порівняльний аналіз статистичних та скейлінгових характеристик РЕМ-зображень, отриманих на різних типах РЕМ

О. Іванчук, О. Тумська

Робота містить результати застосування статистичного та фрактального аналізу цифрових РЕМ-зображень, які отримані на різних типах РЕМ у широкому діапазоні збільшень (масштабів) від 1000^x до 27000^x (крат). Зокрема, обчислені параметри шумової складової РЕМ-зображень, отримано їх дисперсійні фрактальні розмірності спектрів та розмірності за значеннями яскравостей вздовж осей x і y зображень. Ці дослідження дають змогу встановити ізотропний або анізотропний характер яскравісних характеристик зображень та тип їх шумової складової.

Показано, що розподіл яскравостей РЕМ-зображень може характеризуватись дисперсійною фрактальною розмірністю D_σ , яка має порівняно сталі значення і неістотно змінюється у разі зміни збільшення (масштабу) РЕМ-зображення. Результати досліджень авторів можна використати під час калібрування та цифрового опрацювання РЕМ-зображень і тим самим підвищити точність отримання кількісних просторових параметрів дослідних мікроповерхонь твердих тіл.

Сравнительный анализ статистических и скейлинговых характеристик РЭМ-изображений, полученных на разных типах РЭМ

О. Иванчук, О. Тумская

Работа содержит результаты применения статистического и фрактального анализа цифровых РЭМ-изображений, полученных на различных типах РЭМ в широком диапазоне увеличений (масштабов) от 1000^x до 27000^x (крат). В частности, вычислены параметры шумовой составляющей РЭМ-изображений, получены их дисперсионные фрактальные размерности спектров и размерности по величинам яркостей вдоль осей x и y изображений. Эти исследования позволяют установить изотропный или анизотропный характер яркостных характеристик изображений и тип их шумовой составляющей.

Показано, что распределение яркостей РЭМ-изображений может характеризоваться величиной дисперсионной фрактальной размерности D_s , которая имеет относительно устойчивое значение и существенно меняется при изменении увеличения (масштаба) РЭМ-изображения. Выполненные авторами исследования можно использовать в процессе калибровки и цифровой обработки РЭМ-изображений и тем самым повысить точность получения количественных пространственных параметров исследуемых микроповерхностей твердых тел.

Comparative analysis of the statistical and scaling characteristics of SEM images, obtained on the different types of SEM

O. Ivanchuk, O. Tumska

This work contains the results of statistical and fractal analysis of digital SEM images obtained on the different types of SEM in a wide range of increases (scales) from 1000^x to 27000^x (multiples). In particular, the parameters of the noise component of SEM images were calculated, their dispersion fractal dimensions of spectra and dimensions were obtained from brightness values of profiles along the x and y axes of the images. These studies make it possible to determine the isotropic or anisotropic nature of the brightness characteristics of images and the type of their noise component.

It is shown that the brightness distribution of SEM images can be characterized by the value of the dispersion fractal dimension D_s , which has a relatively stable value and does not change significantly when the increase (scale) of the SEM image changes. The research carried out by the authors can be used in the process of calibration and digital processing of SEM images, and thereby improve the accuracy of obtaining the quantitative spatial parameters of the investigated microsurfaces of solids.

BERLIN**2017****INTERGEO®****26.–28. SEPTEMBER****WISSEN UND HANDELN
FÜR DIE ERDE*****Міжнародна науково-технічна конференція******«Геофорум 2018»******відбудеться 19–21 квітня 2018 року******у Львові–Брюховичах–Яворові***