УДК 528.721.287:537.533.35

О. М. ІВАНЧУК[1*], О. В. ТУМСЬКА[2]

[1*]Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна,79013, тел. +38(068)0720575, ел. пошта: ivanchuk@inbox.ru
[2]Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна,79013, тел. +38(050)7455711, ел. пошта: ol.tums@yandex.ru

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ КАЛІБРУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ СПОТВОРЕНЬ ЦИФРОВИХ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ

Мета. Цифровим зображенням мікроповерхонь твердих тіл, отриманим на растрових електронних мікроскопах (РЕМ), притаманні суттєві геометричні спотворення, які необхідно встановити і врахувати під час визначення кількісних параметрів мікроповерхонь твердих тіл з високою точністю. Тому це завдання є важливим і актуальним, особливо під час контролю якості процесів високотехнологічного виробництва з застосуванням нанотехнологій, зокрема, у машинобудуванні, літакобудуванні, під час створення космічної та військової техніки. Важливо також виконувати вимірювання РЕМ-зображень і отримувати кількісні параметри мікроповерхонь у автоматизованому режимі, що дало змогу б їх виконати значно швидше і уникнути похибок оператора. Тому метою цієї роботи є розроблення та дослідження ефективності технології автоматизованого калібрування геометричних спотворень РЕМ-зображень і їх врахування, а також створення пакета програм, які б її реалізували. **Методика** полягає у застосуванні для автоматизації вимірювань методів цифрового опрацювання РЕМ-зображень і різноманітних їхніх перетворень. **Результати**. Розроблену технологію автоматизації вимірів цифрових РЕМ-зображень апробовано і досліджено під час опрацювань РЕМ-зображень еталонного тест-об'єкта з роздільною здатністю r = 1425 лін/мм, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScope) в діапазоні збільшень від M = 1000^x до M = 15000^x крат. Точність вимірів і встановлених кількісних характеристик РЕМ-зображень, зокрема їхніх масштабів уздовж осей знімка, а також геометричних спотворень, співмірні з вимірами, виконаними вручну. Автоматизація цього процесу дає змогу замінити рутинну працю вимірювань цифрових РЕМ-зображень, особливо під час опрацювання РЕМ-зображень у діапазоні порівняно невеликих збільшень M = 1000^x–5000^x, суттєво зменшити час вимірювань, а також уникнути суб'єктивних помилок, які при цьому виникають. **Наукова новизна.** Розроблена технологія автоматизації вимірів цифрових РЕМ-зображень і визначення їх геометричних параметрів виконана вперше в Україні. Запропонована технологічна схема автоматизації вимірювань цифрових РЕМ-зображень та створене для цього авторське програмне забезпечення показали його ефективність і доцільність. **Практична значущість.** Застосування цієї технології дає змогу автоматично і з високою точністю визначати дійсні значення збільшень (масштабів) цифрових РЕМ-зображень, величини їхніх геометричних спотворень, а також враховувати їх під час отримання кількісних просторових параметрів мікроповерхонь твердих тіл з високою точністю, а отже, підвищувати надійність і ефективність виготовлених з них пристроїв, механізмів, матеріалів, тощо.

Ключові слова: растровий електронний мікроскоп; тест-об'єкт; цифрове РЕМ-зображення; геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень; фрактальна розмірність; автоматизація вимірювань.

Вступ

Сучасна високотехнологічна індустрія виробництва, зокрема, в таких галузях, як машинобудування, мікроелектроніка авіабудування, створення військової техніки та в багатьох інших потребує використання нанотехнологій, технологічні процеси яких передбачають застосування для контролю їх якості растрових електронних мікроскопів.

РЕМ широко застосовують і для наукових досліджень мікроповерхонь різноманітних дослідних об'єктів і матеріалів з метою отримання кількісних параметрів цих поверхонь з високою точністю на мікронному і субмікронному рівнях.

У цих дослідженнях важливим є встановлення дійсних масштабів РЕМ-зображень, величин їх геометричних спотворень та їх врахування. Ці дослідження є кропіткими, вимагають високої кваліфікації дослідників і

потребують чимало часу. Тому, автори поставили перед собою завдання розробити технологію автоматизації вимірювань цифрових РЕМ-зображень мікроповерхонь дослідних об'єктів, яка б дозволила з необхідною точністю визначати їх кількісні параметри, а також суттєво зменшити час на їх отримання.

Мета

Дослідженнями метричних характеристик РЕМ-зображень, тобто встановлення величин їх масштабу і геометричних спотворень, а також методів їх подальшого врахування займалися і продовжують займаються науковці як за кордоном, так і в Україні. Зокрема, [Boyde A., 1975; Burkhardt R., 1980; Ghosh S. K., 1975; Nagaraja, 1976; Howell P., 1975; Калантаров Є. І., Сагиндикова М. Ж., 1983; Соколов В. М., Шебатінов М. П., 1984], в Україні – [Мельник В. М., 1984, 2009; Фінковський В. Я., 1984; Шостак А. В., 2009, 2012] та інші.

Проблемам автоматизації вимірів у практиці РЕМ-фотограмметрії, судячи з огляду літературних джерел, достатньої уваги в минулому не приділялось.

Тому, метою даної роботи й була розробка технології автоматизованого опрацювання цифрових РЕМ-зображень еталонного тест-об'єкту з роздільною здатністю r=1425 лін/мм, яка б дозволила автоматично розпізнавати необхідні елементи зображень, отримувати величини їх дійсних масштабів, геометричні спотворення та враховувати їх при визначенні кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів. Для досліджень ми використали цифрові РЕМ-знімки, отримані на РЕМ JCM-5000 (NeoScope) в діапазоні збільшень від 1000^x до 15000^x (крат).

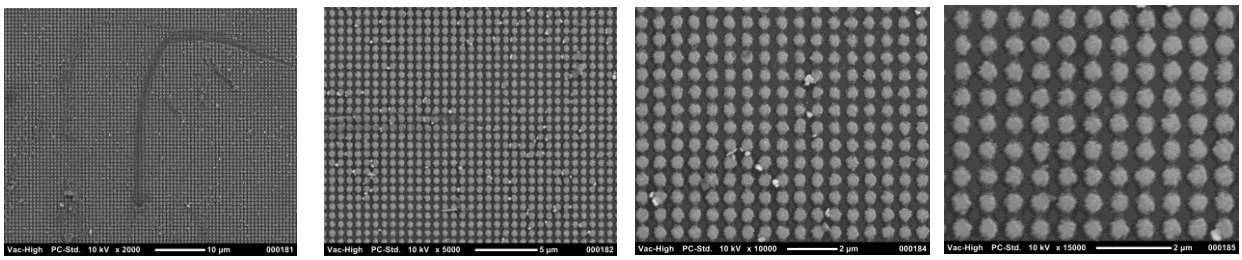
Методика

Коротка характеристика тест-об'єкта

Для визначення дійсних значень збільшень (масштабів) цифрових РЕМ-зображень та їх геометричних спотворень необхідно мати тест-об'єкт з еталонними віддалями між його елементами (лініями, вузлами). Такий тест-об'єкт був вперше створений в Україні у 80-х роках минулого століття. Він являє собою скляну пластину, на яку нанесено шар «напівпровідник-метал» у вигляді гратки (сітки, решітки), що має вигляд кулеподібних напівсфер (рис. 1). Технологія отримання матеріалу «напівпровідник-метал» була вперше запропонована у Київському інституті фізики напівпровідників НАНУ в лабораторії проф. М. Т. Костишина і к.т.н. П. Ф. Романенка, і використовувалась для запису голограм просторових об'єктів [Костишин, 1982]. Іванчук О. М. запропонував ідею створення еталонних тест-об'єктів на цьому технологічному матеріалі для калібрування збільшень РЕМ і визначення геометричних спотворень РЕМ-зображень. Використовуючи дію пучків лазерного випромінювання на напилені шари срібла і напівпровідника, к.т.н. Романенко П. Ф. отримав еталонні тест-об'єкти у вигляді регулярної матриці, яка складалась з кулеподібних напівсфер (вузлів) сплавлених між собою шарів срібла з напівпровідником арсеном сірки ($Ag\text{-}As_2S$). Використовуючи декілька типів лазерів з різними довжинами хвиль, він отримав тест-об'єкти з різною щільністю (роздільною здатністю): 1370 лін/мм, 1425 лін/мм і 3530 лін/мм. РЕМ-знімки голографічного тест-об'єкту з розділенням 1425 лін/мм ми використали для експерименту.

Характеристика РЕМ-зображень

Всього на РЕМ JCM-5000 (NeoScope) отримано 12 знімків тест-об'єкта з роздільною здатністю r = 1425 лін/мм у цифровому форматі TIFF з фіксованими значеннями збільшень, встановлених на шкалі приладу: 1000^x, 2000^x, 5000^x, 8000^x, 10000^x, 15000^x, 20000^x, 24000^x, 27000^x, 30000^x, 34000^x і 40000^x. Для експерименту відібрані перші 6 з них. Умовні розміри отриманих цифрових РЕМ-зображень при їх опрацюванні на ПК за програмою "Test-Measuring" складають 116,95 мм x 98,67 мм (1280 x 1080 пікселів). Роздільна здатність РЕМ-зображення 277,571 dpi, розмір піксела – 0,09136 мм.



а) M = 2000^x б) M = 5000^x в) M = 10000^x г) M = 15000^x

Рис. 1. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкту з роздільною здатністю r = 1425 лін/мм при різних M^x.

Послідовність автоматизованих операцій перетворень і опрацювань РЕМ-зображень

Експериментальні роботи за розробленою авторами автоматизованою технологією опрацювання РЕМ-зображень виконувались для 6 РЕМ-знімків зі збільшенням від M=1000^x до M=15000^x (крат).

Задача автоматизованого опрацювання РЕМ-зображень зводиться до трьох основних операцій:

1 Автоматизоване розпізнавання вузлів голографічного тест-об'єкту.

2. Вимірювання плоских координат вузлів та визначення за цими вимірами дійсних значень збільшень РЕМ-зображення вдовж осей ***x***, ***y*** знімка та величин їх геометричних спотворень.

3. Апроксимація геометричних спотворень поліномом загального виду 3-ї степені.

Послідовність автоматизованих процесів буде нами нижче проілюстровано рисунками, отриманими під час опрацювань РЕМ-зображення зі збільшенням M=10000^x.

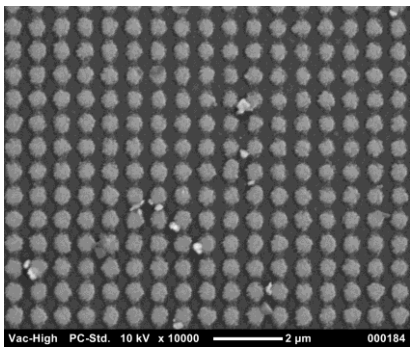


Рис. 2. РЕМ-зображення еталонного тест об'єкта при збільшенні M=10000^x

1. Задача автоматизованого розпізнавання вузлів тест-об'єкту полягає у знаходженні координат центрів зображень вузлів тест-об'єкту для різних масштабів збільшення. Для розв'язку проблеми нами використані методи цифрової обробки зображень (зокрема фільтрація, сегментація, морфологічна обробка). Задача ускладнюється наявністю дефектів на зображеннях тест-об'єкту, тому виникає необхідність розробки універсального алгоритму відбракування пошкоджених вузлів. Частина дефектів (перемички між вузлами, плями від пилу, порожнини та ін.) усувається під час морфологічної обробки, а для таких утворень як зліплені разом декілька вузлів запропоновано алгоритм відбракування за значеннями середнього радіуса кіл, наближених до контурів зображених вузлів.

В результаті роботи програми, складеної в системі MatLab визначаються центри кіл та центроїди (інерційні центри мас) зображень вузлів.

Алгоритм розв'язку складається із наступних кроків:

1. Обчислення кроку еталонного тест-об'єкту в мкм.

2. Обчислення кроку еталонного тест-об'єкту в пікселах для масштабного ряду 1000^x, 2000^x, 5000^x, 8000^x та 15000^x.

3. Завантаження зображення тест-об'єкта.

4. Згладжування зображення (крім M=1000^x) з використанням низькочастотного фільтра «гауссіан». (Для масштабів 1000^x - 8000^x розмір вікна фільтра: *hsize* = 3 піксела, СКВ *sigma*=1, для 10000^x, 15000^x - *hsize* = 15 пікселів, *sigma* = 5). Зображення підготовлено до бінаризації [Гонсалес, 2005].

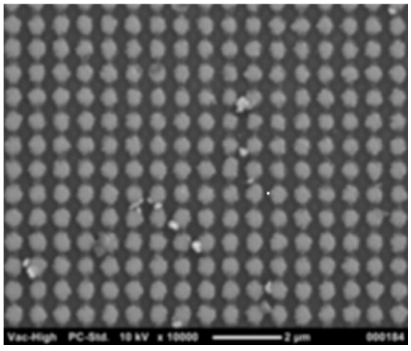


Рис. 3. Згладжене РЕМ-зображення тест-об'єкта

5. Бінаризація зображення з автоматичним вибором порогу методом Отсу [Otsu, 1979].

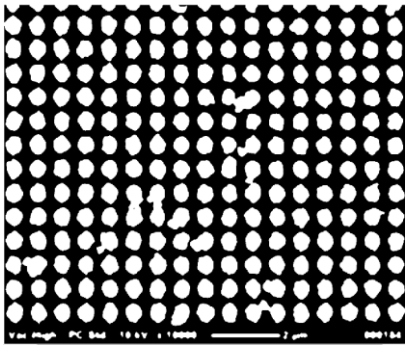


Рис. 4. Бінарне РЕМ-зображення тест-об'єкта

6. Виконання морфологічної операції розкриття (close-open) з структурним елементом (примітивом) у формі круга [Гонсалес, 2006]. (Для масштабів 1000^x, 2000^x радіуси кругів R=2-3; 5000^x, 8000^x- R=7-8; 10000^x, 15000^x - R=20-25 пікселів;)

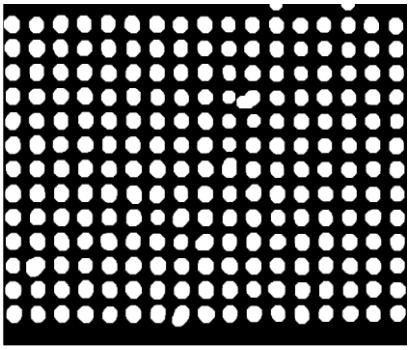


Рис. 5. Морфологічно перетворене РЕМ-зображення тест-об'єкта, радіус круга R=20.

7. Визначення координат центроїдів та контурів зображень вузлів тест-об’єкту. [Гонсалес, 2006].

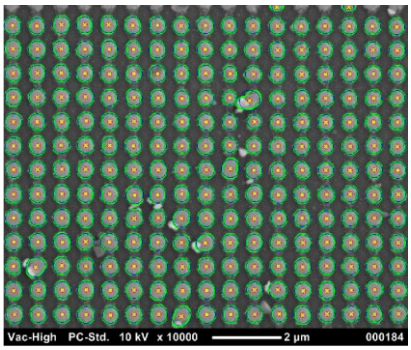


Рис. 6. РЕМ-зображення з виділеними контурами вузлів тест-об'єкта (зелений колір) та колами навколо них (синій колір).

8. Підбір кола для виділених контурів зображень вузлів тест-об’єкта. Визначення координат центра кола та радіуса методом найменших квадратів [Електронний ресурс, Журавель]. Відбракування вузлів для яких $\left|r_i - r_{сер}\right| \geq e$, r_i – величина радіуса i-го кола; $r_{сер}$ – середній радіус; e – допуск. (Для масштабів: 1000^x, 2000^x- e = 1-2; 5000^x, 8000^x- e = 3; для 10000^x, 15000^x - e = 5- 6 пікселів).

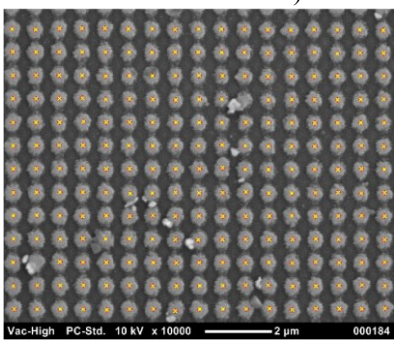


Рис. 7. РЕМ-зображення з позначеними центрами вузлів тест-об’єкта («хрестиком» жовтого кольору – центри кіл, а кружечком червоного кольору – центроїди

9. Порівняння координат розпізнаних та виміряних вручну центрів зображень вузлів за значенням середньої відстані між розпізнаними та виміряними вузлами (табл. 1).

Таблиця 1

Значення середніх відстаней між центрами розпізнаних та виміряних вузлів тест-об’єкта

Масштаб РЕМ-знімків	Кількість вузлів тест-об’єкта вздовж осей ***x*** і ***y*** РЕМ-знімка	Кількість розпізнаних вузлів	Кількість вузлів після відбракування за сер. радіусом	Кількість виміряних вузлів	Сер. відстань між вимір. і розпізн. вузлами тест-об., піксел
1000^x	167x141	19434	18492 (95,2%)	357 (301)*	0,58
2000^x	83x67	5343	4699 (88,0%)	357 (298)	0,74
5000^x	33x27	729	729 (100%)	240 (240)	1,19
8000^x	21x17	351	351 (100%)	351 (351)	1,37
10000^x	17x13	221	221 (100%)	221 (221)	1,29
15000^x	11x9	99	99 (100%)	99 (99)	2,15

* В дужках вказано кількість виміряних вузлів, що збігаються з розпізнаними після відбракування.

Як бачимо, значення середніх відстаней між центрами розпізнаних та виміряними вручну вузлів тест-об’єкта знаходиться в діапазоні 1-2 пікселів, що відповідає точності вимірювання у заданому масштабі збільшення.

10. Запис координат розпізнаних центрів вузлів у файл.

Для визначення величин геометричних спотворень необхідно за координатами розпізнаного центра вузла тест-об'єкта знайти відповідний вузол істинної тест-сітки. Як показано у роботі [Іванчук, 2013], значення дійсних масштабів РЕМ-зображень є нецілими і відрізняються від встановлених на шкалі приладу. На підставі проведених досліджень прийнято допущення, що збільшення РЕМ-зображень мають фрактальну природу. На основі емпіричної залежності Річардсона [Richardson, 1961] для дійсного і фіксованого масштабів отримано співвідношення

$$M_f = A \cdot M^{2-D}, \qquad (1)$$

де M_r – дійсний масштаб збільшення; M – масштаб збільшення на шкалі приладу (цілий); A – постійна величина; D – нецілий показник. Якщо крок істинної тест-сітки позначимо як h, то при збільшенні у M разів дійсна довжина кроку, згідно (1), дорівнює

$$M_f \cdot h = A \cdot (M \cdot h) \cdot M^{1-D} \qquad (2)$$

В роботі [Mandelbrot, 1983] показано, що величину D можна вважати фрактальною розмірністю, яку можна визначити за формулою [Cromley, 1992]

$$D = \log(n_2 / n_1) / \log(x_1 / x_2), (3)$$

де x_1 – довжина сегмента під час 1-го вимірювання лінії; x_2 – довжина сегмента під час 2-го вимірювання лінії; n_1 – кількість сегментів під час 1-го вимірювання; n_2 – кількість сегментів під час 2-го вимірювання.

На підставі значень дійсних масштабів, отриманих в роботі [Іванчук, 2013], обчислені значення коефіцієнтів A і показника D для РЕМ JCM-5000 (NeoScope): для збільшень M_x : A_x = 1.042468, D_x= 1.00547185; для M_y : A_y = 1.042589, D_y= 1.00547337.

Аналіз отриманих результатів апроксимації у діапазоні від 1000^x до 15000^x з використанням виміряних дійсних масштабів та обчислених за співвідношенням (1) експериментально підтверджує зв'язок дійсних масштабів з фрактальною розмірністю.

За визначеними автоматично координатами вузлів тест-об’єкта з використанням дійсних масштабів РЕМ-зображень ми встановили величини їх геометричних спотворень, які проілюстровані у вигляді векторної діаграми. Вектори для наочності збільшено у 20 разів. (рис. 8).

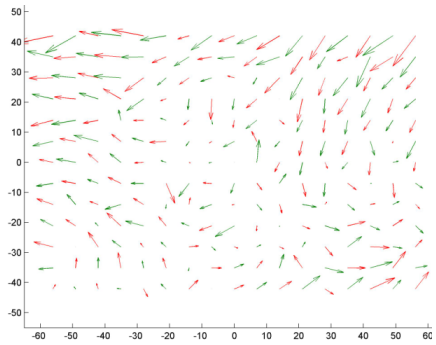


Рис. 8. Векторна діаграма спотворень РЕМ-зображення до їх апроксимації поліномом

Далі геометричні спотворення РЕМ-зображень нами програмно апроксимовані з використання поліному загального виду 3-ї степені. Величини залишкових спотворень також проілюстровані у вигляді векторів (рис.9)

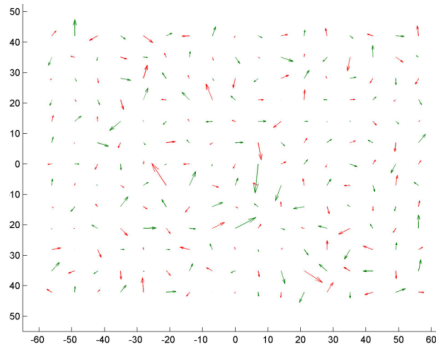


Рис. 9. Векторна діаграма залишкових спотворень РЕМ-зображення після їх апроксимації поліномом

Порівнюючи рис. 8 і рис. 9 бачимо, що величини спотворень після апроксимації поліномом зменшились у 2-10 разів, що підтверджує ефективність цієї дії.

Результати обчислень, які підтверджують ефективність апроксимації зведені нами у таблицю (див. табл. 2).

Таблиця 2

Результати апроксимації геометричних спотворень РЕМ-зображень тест-об'єкту з r=1425 лін/мм за виміряними вручну точками контролю і розпізнаними автоматично

№ п/п	$M_{РЕМ}$	За виміряними вручну точками				За розпізнаними автоматично точками			
		До апроксимації		Після апроксимації		До апроксимації		Після апроксимації	
		$m_{\Delta x}$, мкм	$m_{\Delta y}$, мкм	$m_{\delta x}$, мкм	$m_{\delta y}$, мкм	$m_{\Delta x}$, мкм	$m_{\Delta y}$, мкм	$m_{\delta x}$, мкм	$m_{\delta y}$, мкм
1	1000^x	103,7	52,4	35,4	33,6	106,0	55,3	27,2	29,0
2	2000^x	39,9	21,2	16,2	16,0	47,8	23,2	24,8	19,7
3	5000^x	78,0	82,7	45,6	41,4	89,4	126,7	64,5	80,0
4	8000^x	69,1	331,7	55,9	64,1	101,3	390,7	10,0	115,2
5	10000^x	172,3	94,7	48,9	41,3	184,8	153,3	82,9	107,2
6	15000^x	131,6	106,1	96,4	78,1	209,7	199,3	164,6	121,1

Висновки

1. Розроблена авторами технологія автоматизованого визначення геометричних параметрів РЕМ-зображень (дійсних збільшень та геометричних спотворень) з використанням еталонного тест-об'єкту, показала свою ефективність і високу точність, яка підтверджена численними експериментальними дослідженнями.

2. Встановлена аналітична залежність між дійсними збільшеннями (масштабами) РЕМ-зображень та встановленими на шкалі приладу. Проведені експериментальні роботи підтвердили зв'язок дійсних масштабів з фрактальною розмірністю.

3. Аналіз результатів досліджень, приведених у таблиці 2 показує, що середньо-квадратичні величини геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, які були виміряні оператором вручну і отримані автоматично за розробленою технологією до і після їх апроксимації поліномом загального виду 3-ї степені, одного порядку і близькі між собою.

4. Залишкові середньоквадратичні величини геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень в діапазоні збільшень $M=1000^x$-15000^x знаходяться в межах 0,025-0,165 мм, тобто в межах точності їх вимірювань, яка складає 1-2 піксела (1 піксел = 0,091 мм). А максимальні залишкові значення спотворень не перевищують 3 пікселів.

5. Для виконання вимірів одного РЕМ-знімка тест-об'єкта оператором вручну з метою отримання його дійсних масштабів і геометричних спотворень (за допомогою програми «Dimicros») необхідно від 0,5 до 1 години. Тоді як в автоматизованому режимі за розробленою технологією і складеними програмами лише декілька хвилин.

6. РЕМ JCM-5000 (NeoScope) (JEOL, Японія) можна вважати одним з найкращим в метричному відношенні сучасним мікроскопом, який не потребує постійного калібрування збільшень і визначення геометричних спотворень РЕМ-зображень перед кожним РЕМ-зніманням дослідних зразків. Максимальні геометричні спотворення в діапазоні збільшень від $M=1000^x$ до $M=15000^x$, відносно незначні і, як правило, не перевищують 1 мм на краях РЕМ-знімка розміром 120x90 мм, тобто є не більшими 10 пікселів. Крім того, вони залишаються стабільними впродовж тривалого часу експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс // М., "Техносфера", 2005. – 1072 с.

Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс // М., "Техносфера", 2006, - 616 с.

Іванчук, О. М. Структура та функції програмного комплексу «Dimicros» для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції / О. М. Іванчук, І. В. Хрупін // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва.- Львів, 2012. Вип. І (23). -С. 193-197.

Іванчук, О. М. Дослідження точності визначення дійсних величин збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScope) фірми JEOL // Геодезія, картографія і аерознімання. Львів, 2012. Вип. 76. - С. 80-84.

Іванчук, О. М. Дослідження величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих

на РЕМ DSM-960A (Carl Zeiss, Німеччина) та точності їх врахування / О. М. Іванчук, Т. Барфельс, Я. Геег, В. Геґєр // Геодезія, картографія і аерознімання. Львів, 2013. Вип. 78. - С. 120-126.

Іванчук, О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScope) та їх апроксимація // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна. – Донецьк, 2013. Вип. 1(18).-С.91-97.

Іванчук, О. Дослідження похибок збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106І (Суми, Україна) за допомогою спеціальних тест-об'єктів /О. Іванчук, М. Чекайло // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2014. Вип. 79.-С.82-88.

Іванчук, О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106 І (Суми, Україна) // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва.- Львів, 2014. Вип. ІІ(28).-С.74-77.

Іванчук О. Особливості калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних РЕМ // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва.- Львів, 2015. Вип. І(29).- С.168-173.

Іванчук 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.

Костышин, М. Т. Квантовая электроника / М. Т. Костышин, К. С. Мустафин // К.,-1982.-Вып. 23. - С. 29-33.

Калантаров, Е. И. Фотограмметрическая калибровка электронных микроскопов / Е. И. Калантаров, М. Ж. Сагындыкова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. М.,-1983.-№4. -С.76-80.

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 ВИНИТИ. М.,-1984.- №528. -18 с.

Мельник, В. М. Растрово-електронна стереомікрофракторафія. Монографія / В. М. Мельник, А. В. Шостак // Луцьк: «Вежа», 2009. - 469 с.

Финковский, В. Я. К теории фотограмметрической обработки РЭМ-снимков / В. Я. Финковский, В.Н. Мельник, О. М. Иванчук // Геодезия и картография.-1984.-№2. -С. 29-33.

Шостак, А. В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: автореф. дис… докт. техн. наук : 05.24.01 / Шостак Анна Володимирівна; Луцький нац. техн. університет. - Київ, 2012.-28с.

Boyde A., Ross H. F. Photogrammetry and Scanning electron microscopy. Photogrammetric Record, 1975, Vol.8, no. 46, pp. 408–457.

Burkhardt R. Untersuchungen zur kalibrirung eines Elektronen mikroskopes. Mitt. geod. Inst. Techn. Univ. Graz. 1980, no. 35.

Cromley R. G. Digital Cartography. Robert G. Cromley, 1992 by Prentice-Hall. 317 p.

Ghosh S. K. Photogrammetric calibration of a scanning electron microscope. *Photogrammetria*, 1975, Vol. 31, no. 31, pp. 91–114.

Ghosh S. K., Nagaraja H. Scanning Electron Micrography and Photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1976, Vol. 42, no. 5, pp. 649–657.

Gonzalez R. C, Woods R. E. *Cyfrovaja obrabotka izobrazhenij* [Digital Image Processing]. Moscow, *Tekhnosfera*, 2005, 1072 p.

Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. *Cyfrovaja obrabotka izobrazhenij v srede MATLAB* [Digital Image Processing using MATLAB]. Moscow, *Technosfera*, 2006, 616 p.

Howell P. A practical method for the correction of distortions in SEM photogrammetry. Proc. Of the Annual Scanning Electron Microscope Symposium. Chicago, Illinois. 1975, pp. 199–206.

Mandelbrot B. The fractal geometry of nature. N. Y.: Freeman, 1983. 469 p.

Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Trans. Sys., Man. 1979. Cyber. 9, pp. 62–66.

Richardson L. The Problem of Contiguity: An Appendix of Statistic of Deadly Quarrels. General Systems Year Book. 196, 6, pp. 139–187.

http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php I. M. Zhuravel. *Kratkij kurs teorii obrabotki izobrazhenij* [A short course of image processing theory].

http://www.imagemagick.org/Usage/morphology/ ImageMagick v6 Examples – Morphology of Shapes

Надійшла 16.10.2016 р.