

УДК 528.721.287:537.533.35

## ОСОБЛИВОСТІ КАЛІБРУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ СПОТВОРЕНЬ ЦИФРОВИХ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ НА РІЗНИХ РЕМ

О. Іванчук

Національний університет "Львівська політехніка"

**Ключові слова:** тест-об'єкт, растровий електронний мікроскоп (РЕМ), геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень, калібрування, апроксимація.

### Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Проблемі встановлення величин геометричних спотворень зображень, отриманих на растрових електронних мікроскопах (РЕМ-зображень) та способам їх урахування з метою підвищення точності отримання просторових кількісних параметрів дослідних мікроповерхонь твердих тіл завжди приділяли багато уваги як вітчизняні, так і зарубіжні науковці [1–17], оскільки РЕМ-зображенням, зафіксованим в минулому на фотоплівку, були притаманні значні геометричні спотворення. Сучасні РЕМ дають змогу отримувати РЕМ-зображення у цифровому форматі. Однак досліджень спотворень цифрових РЕМ-зображень в зарубіжній літературі ми не виявили. Водночас останніми роками ми провели достатньо великий обсяг досліджень геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних типах сучасних зарубіжних і вітчизняному РЕМ. Результати цих досліджень виявили особливості визначення та врахування спотворень цифрових РЕМ-зображень, які будуть викладені нижче. Врахування цих особливостей дає змогу отримувати коректні кількісні метрологічні параметри цифрових РЕМ-зображень і тим самим в кінцевому результаті суттєво підвищувати точність отримання кількісних просторових характеристик мікроповерхонь досліджуваних об'єктів. А це своєю чергою дає змогу виробникам забезпечувати високу якість і ефективність виготовленої продукції, насамперед у тих галузях виробництва, які застосовують сучасні нанотехнології, зокрема, у машинобудуванні, мікроелектроніці тощо.

### Невирішені частини загальної проблеми

Цифрові РЕМ-зображення, отримані на різних РЕМ, мають свої технічні особливості отримання і запису, від яких великою мірою залежить точність отриманих вимірів. Тому важливо їх встановити, дослідити і дати рекомендації щодо їх врахування під час дослідження метричних параметрів цифрових РЕМ-зображень.

### Постановка завдання

Проаналізувати особливості отримання цифрових РЕМ-зображень на різних сучасних РЕМ та дослідити величини і характер їх геометричних спотворень на підставі вимірювань зображень спеціальних еталонних тест-об'єктів з роздільними здатностями  $r = 1370$  лін/мм,

$r = 1425$  лін/мм, отриманих на чотирьох типах РЕМ: JCM-5000 (NeoScope), JSM 7100F (оба фірма JEOL, Японія), DSM-960A (фірма Carl Zeiss Jena, Німеччина) і РЕМ 106I ("SELMIP", Суми, Україна) в діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $30000^x$ .

Встановити точність урахування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень за допомогою їх апроксимації поліномом загального виду третього степеня та точність отримання просторових координат дослідних мікроповерхонь.

### Виклад основного матеріалу та результати досліджень

#### 1. РЕМ-знімання.

РЕМ-знімання тест-об'єктів (сіток) на кожному з чотирьох РЕМ виконувалось з фіксованими значеннями збільшень:  $1000^x$ ,  $2000^x$  ( $2500^x$ ),  $5000^x$ ,  $8000^x$ ,  $10000^x$ ,  $15000^x$ ,  $20000^x$ ,  $25000^x$ ,  $30000^x$ . Кожен РЕМ має притаманні лише йому формати запису цифрових зображень, кількість пікселів їх розгортки, технічні параметри, головні з яких наведено в табл. 1.

На рис. 1 подано цифрові знімки тест-об'єкта, отримані на різних типах РЕМ за збільшення  $M = 10000^x$ . Особливістю цифрових РЕМ-зображень є те, що їх реальний масштаб (збільшення) не завжди відповідає встановленому значенню на шкалі РЕМ. Так, у РЕМ 106I і РЕМ DSM-960A масштаб (збільшення) лише тоді приблизно відповідає встановленому значенню на шкалі РЕМ, коли їх розмір на екрані монітора становить  $120 \times 90$  мм. Фізичний розмір піксела у цьому випадку для РЕМ 106I дорівнює **0,09375 мм**, а для РЕМ DSM-960A – **0,13698 мм**. А у разі фотограмметричного опрацювання цифрових РЕМ-зображень за допомогою спеціального програмного пакета "Dimicros", їх "реальний" (умовний) розмір на екрані монітора значно більший і становить для РЕМ 106I  $338,56 \times 253,92$  мм, а для РЕМ DSM-960A –  $211,60 \times 158,70$  мм за розміру піксела **0,2645 мм**. Коефіцієнт переходу для визначення дійсного масштабу цифрового знімка становить для РЕМ 106I приблизно  $k = 2,8213$ , а для DSM-960A –  $k = 1,931$ . У двох РЕМ японського виробництва розміри пікселів такі: у РЕМ JCM-5000 (NeoScope) – **0,09132 мм**, а у РЕМ JSM 7100F – **0,09375 мм**. За допомогою масштабних шкал, які вдруковуються в кожен РЕМ-знімок, ми підраховували кількість пікселів на фіксовану одиницю шкали і визначали фактичні розміри піксела цифрового знімка і величину  $k$  (див. рис. 2).

#### 2. Вимірювання РЕМ-зображень тест-об'єкта

Для фотограмметричного опрацювання цифрових РЕМ-зображень у дослідженнях всіх чотирьох РЕМ використано комплекс програм під загальною назвою

“Dimicros”. Цю програму створив спеціально для опрацювання РЕМ-зображень магістр з геоінформатики І. В. Хрупін за алгоритмом автора і аналогів їй в Україні сьогодні немає [4]. Перша програма комплексу “Test-Measuring” дає змогу вимірювати цифрові РЕМ-зображення спеціального тест-об’єкта (сітки), результатом якого є встановлення дійсних значень збільшень вздовж осей  $x$  і  $y$  знімка, а також величин геометричних спотворень рівномірно по всьому полю знімка. Наступна програма “Polyscale” за результатами обчислень, виконаних програмою “Test-Measuring” і з використанням полінома загального

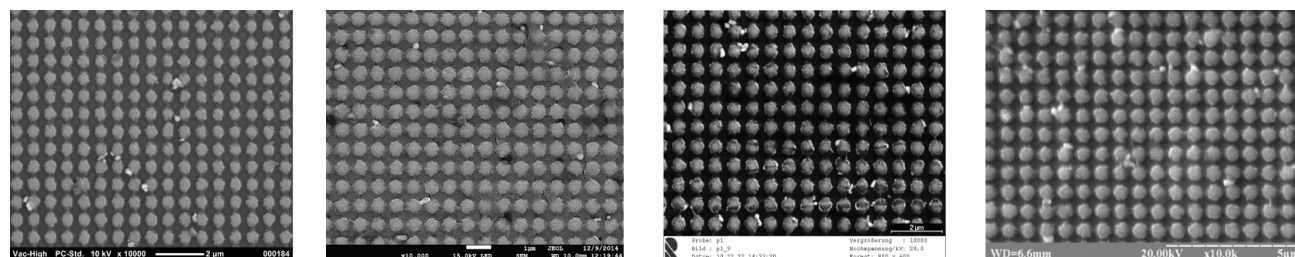
виду третього степеня обчислює поправки у виміряні координати точок (перехресть) тест-об’єкта (сітки), а також середньоквадратичні похибки величин залишкових спотворень та визначає точність апроксимації геометричних спотворень поліномом (табл. 2).

На кожному РЕМ-знімку тест-об’єкта вимірювалась (рівномірно по всьому полю знімка) різна кількість точок: від 35 точок (для  $M = 30000^x$ ) до близько 200 точок (для  $M$  від  $1000^x$  до  $10000^x$  крат). На рис. 2. і 3 наведено векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ – знімків до і після їх апроксимації поліномом для  $M = 10000^x$ .

Таблиця 1

Основні технічні характеристики РЕМ і цифрових РЕМ-зображень

	JCM-5000 (NeoScope)	JSM 7100F	DSM-960A	РЕМ 106 I
Режим роботи	високовакуумний	високовакуумний	високовакуумний	високовакуумний
Прискорювальна напруга	від 5 до 15 кВ	від 0,5 до 40 кВ	від 1 до 30 кВ	від 0,5 до 30 кВ
Діапазон збільшень	від $10^x$ до $40000^x$	від $10^x$ до $300000^x$	від $10^x$ до $100000^x$	від $15^x$ до $300000^x$
Макс. розмір зразка, мм	діам. до 70, h до 50	діам. до 70, h до 50	діам. до 70, h до 50	діам. до 50, h до 30
Макс. розділ. здатність	10 нм	1,2 нм	5 нм	2 нм
Розгортка, пікселів	1280×1080	1280×1024	800×600	1280×960
Розмір пікселя, мм	0,09132	0,09375	0,13698	0,09375
Розм. пікс. при вимірах	0,09132	0,09375	0,26450	0,26450
Коеф. перех. до М факт	1,0	1,0	1,9310	2,8213
Розмір РЕМ-знімка, мм	116,9×98,6	120,0×96,0	211,6×158,7	338,6×253,9
Формат запису файлів	JPEG, TIFF	BMP, JPEG, TIFF	JPEG, TIFF	BMP
Об’єм РЕМ-знімка, Мб	1,32	1,25	0,47	1,17



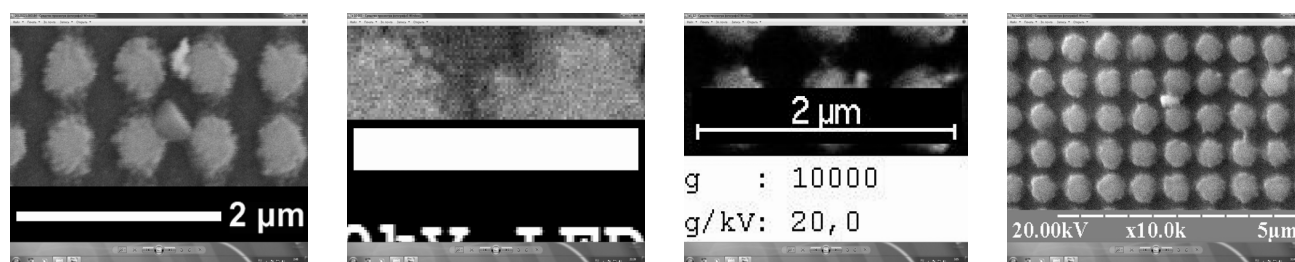
а) JCM-5000

б) JSM 7100F

в) DSM-960A

г) 106 I

Рис. 1. Цифрові РЕМ-знімки тест-об’єкта з роздільною здатністю  $r = 1425$  лін/мм, отримані на різних РЕМ за збільшення  $M = 10000^x$



а) JCM-5000

б) JSM 7100F

в) DSM-960A

г) 106 I

Рис. 2. Збільшені фрагменти цифрових РЕМ-знімків тест-об’єкта із зображенням масштабної шкали, за якою визначається коефіцієнт переходу до дійсного масштабу знімка  $k$

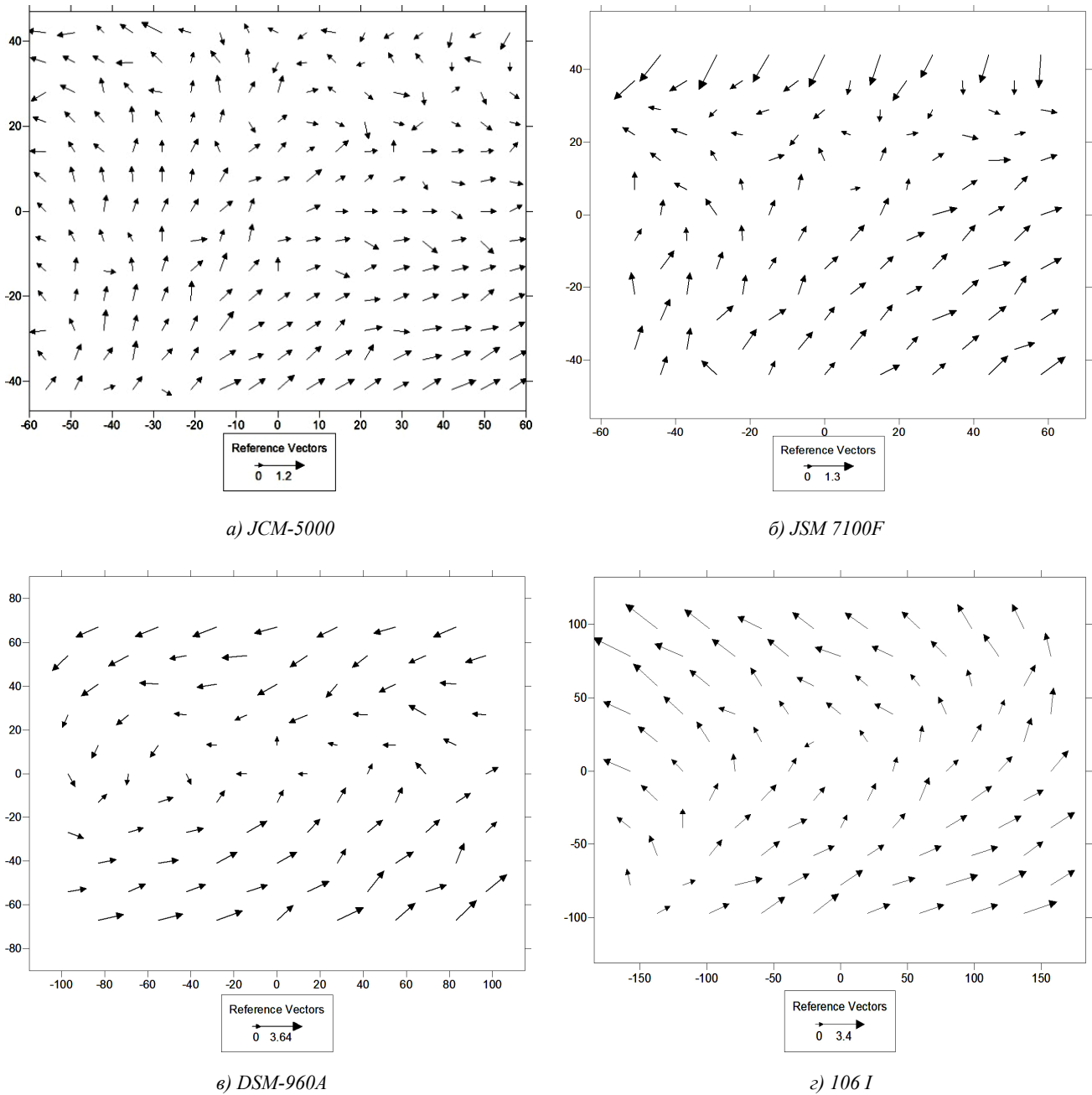


Рис. 3. Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових PEM-знімків тест-об'єкта до апроксимації поліномом для різних PEM за збільшення  $M = 10000^x$

Таблиця 2

Результати апроксимації геометричних спотворень PEM-зображень тест-сітки з  $r = 1425$  ліній/мм

PEM	$M_{PEM}$	Дійсні знач. збільшень		$\Delta M_x, \%$	$\Delta M_y, \%$	До апроксимації		Після апроксим.	
		$M_{x\text{cp}}$	$M_{y\text{cp}}$			$m_{\Delta x}, \text{MM}$	$m_{\Delta y}, \text{MM}$	$m_{\delta x}, \text{MM}$	$m_{\delta y}, \text{MM}$
JCM-5000	$1000^x$	1005,16	1006,97	+0,52	+0,70	0,105	0,054	0,037	0,036
	$10000^x$	9997,27	10055,22	-0,03	+0,55	0,203	0,160	0,049	0,041
JSM 7100F	$2000^x$	1982,12	2002,10	-0,18	+0,02	0,184	0,254	0,091	0,095
	$10000^x$	9935,87	10007,11	-0,64	+0,07	0,293	0,370	0,138	0,136
DSM-960A	$1000^x$	1010,41	994,16	+1,04	-0,58	0,251	0,744	0,112	0,100
	$10000^x$	10185,63	9941,57	+1,85	-0,58	1,087	0,355	0,147	0,135
PEM 106I	$1000^x$	1017,11	1005,58	+1,71	+0,56	1,254	0,525	0,134	0,122
	$10000^x$	9940,43	9892,07	-0,60	-1,08	1,289	0,906	0,211	0,219

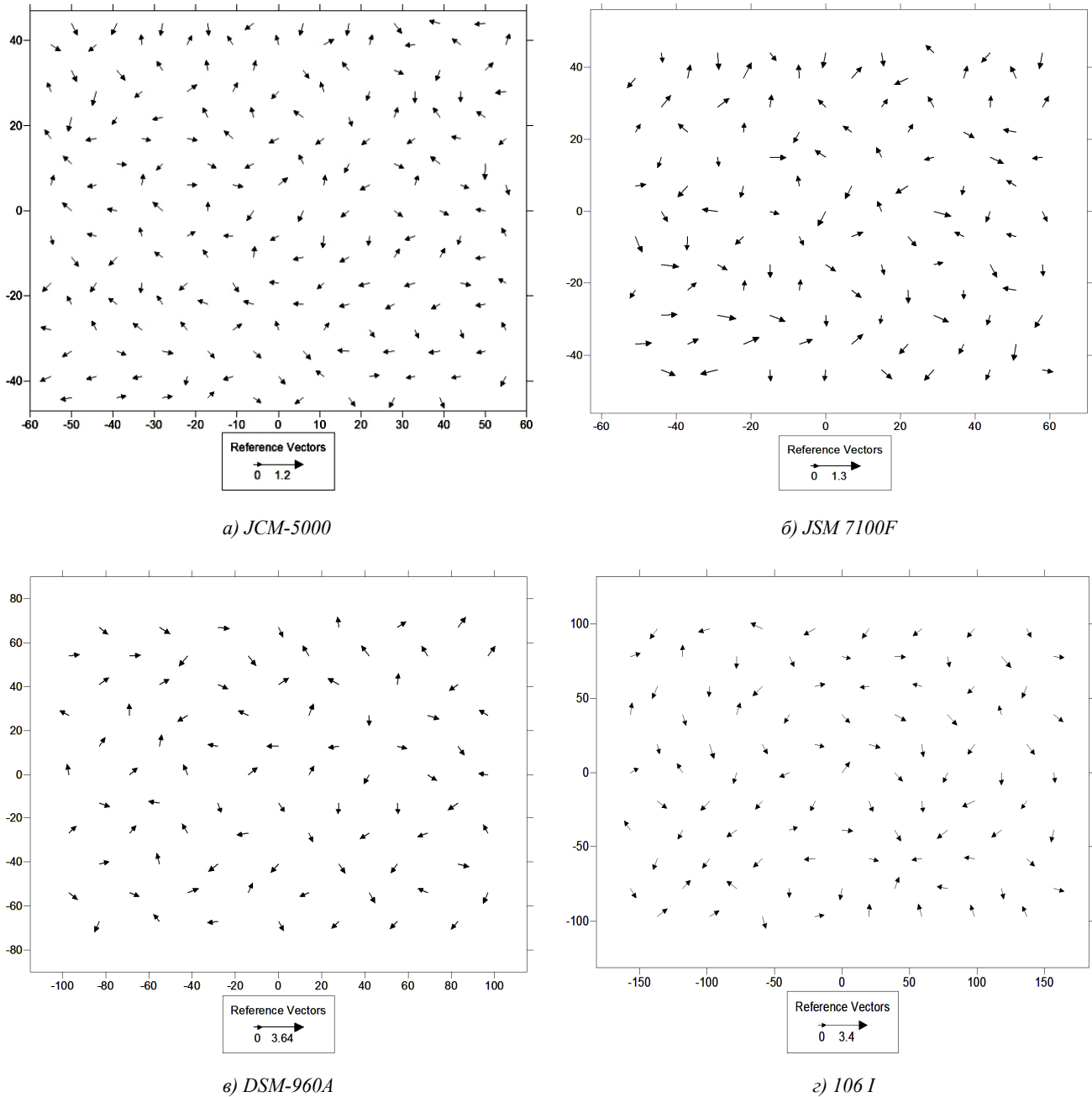


Рис. 4. Векторні діаграми залишкових геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта після апроксимації поліномом для різних РЕМ за збільшення  $M = 10000^x$

Таблиця 3

**Точність вимірювання просторових координат точок мікроповерхонь для різних збільшень  $M^x$**

	$1000^x$	$2000^x$	$5000^x$	$8000^x$	$10000^x$	$15000^x$	$20000^x$	$25000^x$
$3m_x^o = 3m_y^o$ , мм	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280
$M_x = M_y$ , мкм	0,280	0,140	0,056	0,035	0,028	0,019	0,014	0,011
$M_{Z(h)}$ , мкм	1,0–1,5	0,8–1,1	0,5–0,8	0,4–0,6	0,35–0,5	0,3–0,4	0,2–0,3	0,1–0,2

Аналіз результатів досліджень величин геометричних спотворень за вимірами цифрових РЕМ-знімків спеціальних тест-об'єктів (рис. 1), отриманих за допомогою сучасних РЕМ різних країн (Японія, Німеччина, Україна) і наведених в табл. 2, дає змогу зазначити таке. Лінійні спотворення масштабів (збільшень) РЕМ-знімків

$\Delta M$ , % коливаються у межах  $\pm 1-3\%$  з тенденцією до зростання зі зростанням величини збільшення. Найменші вони в японських мікроскопах, дещо більші в німецькому і українському РЕМ. Середньоквадратичні величини нелінійних геометричних спотворень (дисторсії)  $m_{Ax}$ , (мм),  $m_{Ay}$ , (мм) після врахування масштабних спотворень

достатньо великі й досягають максимальних величин до  $\pm 1,5$  мм (до 15 пікселів) відносно центральної точки знімка за приблизних розмірів знімка 120×90 мм.

Характер цих спотворень наочно відображають *векторні діаграми* (рис. 2), які мають різний вигляд залежно від мікроскопа і величини збільшення РЕМ-знімка: від параболічно-гіперболічного до спіралеподібного вигляду, що для конкретного типу РЕМ, як правило, суттєво не змінюється, незалежно від зміни величини збільшення (масштабу) знімка у діапазоні від  $1000^{\times}$  до  $25000^{\times}$ .

Оскільки геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень на краях знімка можуть досягати порівняно значних величин (до  $\pm 1,5$  мм, тобто приблизно 15 пікселів), то необхідно їх враховувати. Результати наших досліджень з використанням програми "Polycalc", які наведено в табл. 2, вкотре підтвердили високу ефективність апроксимації спотворень поліномом загального виду третього степеня, що відображено в колонках значень середньоквадратичних похибок  $m_{\delta_x}$  (мм),  $m_{\delta_y}$  (мм) після їх апроксимації поліномом. Як бачимо, ці величини приблизно на порядок менші від початкових значень спотворень. Графічно залишкові величини геометричних спотворень ми також показали у вигляді векторних діаграм (див. рис. 3). Для знімків розміром 120×90 мм максимальні їхні значення не перевищують  $\pm 0,3$  мм, тобто трьох пікселів. Отже, поліноміальна апроксимація спотворень дає можливість приблизно на порядок підвищити точність визначення просторових координат точок досліджуваних різноманітних мікроповерхонь твердих тіл. У табл. 3 наведено абсолютні значення максимально можливих похибок в отриманні координат  $M_x = M_y = 3m_{\delta_x}^{\circ} / M_x^{\times} = 3m_{\delta_y}^{\circ} / M_y^{\times}$  (мкм). Залежно від збільшення (масштабу) знімка вони мають значення від 0,28 мкм, якщо  $M = 1000^{\times}$  до 0,01 мкм, якщо  $M = 25000^{\times}$ , а також наведені значення точності отримання висот (перевищень) точок  $M_{Z(h)}$  за результатами реальних вимірів мікроповерхонь. Отже, розроблена нами технологія дає можливість отримувати кількісні параметри мікроповерхонь твердих тіл на мікронному і субмікронному рівнях з високою точністю, яка забезпечує вимоги сучасної науки і виробництва.

На підставі виконаних досліджень можна зробити певні висновки.

### Висновки

1. Сучасні растрові електронні мікроскопи дають змогу отримувати високоякісні цифрові зображення мікроповерхонь твердих тіл з порівняно незначними спотвореннями, зокрема, лінійними (масштабними) в межах  $\pm 1-3$  % і нелінійними (дисторсійними) – максимально до  $\pm 1,5$  мм (до 15 пікселів).

2. Для калібрування (встановлення) дійсних масштабів (збільшень) з точністю  $\pm 1$  % та величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень у діапазоні збільшень від  $100^{\times}$  до  $50000^{\times}$  (крат) важливо мати набір еталонних тест-об'єктів (сіток) з високою роздільною здатністю: від  $r = 100$  лін/мм до  $r = 5000$  лін/мм.

Крім того, необхідно враховувати специфіку запису цифрових РЕМ-зображень різними РЕМ, їх реальні

фізичні розміри та особливості методики встановлення їх дійсних геометричних спотворень: лінійних (масштабів) і нелінійних (дисторсії).

3. Апроксимація геометричних спотворень РЕМ-зображень поліномом загального вигляду третього степеня є ефективною і дає змогу зменшувати їх у 5–10 разів.

4. Розроблений автором метод фотограмметричного опрацювання цифрових РЕМ-стереопар дослідних мікроповерхонь твердих тіл з урахуванням їх геометричних спотворень та із застосуванням цифрової стереофотограмметричної станції (ЦФС) дає змогу отримувати їх просторові кількісні параметри з високою точністю:

– від  $m_x = m_y = 0,1-0,3$  мкм,  $m_{h(z)} = 1-1,5$  мкм, якщо  $M = 1000^{\times}$ ;

– до  $m_x = m_y = 0,005-0,01$  мкм,  $m_{h(z)} = 0,1-0,2$  мкм, якщо  $M = 25000^{\times}$ .

### Література

1. Іванчук О. М. Методи оперативного фотограмметричного опрацювання знімків, отриманих на растрових електронних мікроскопах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів, 2000. – 18 с.
2. Іванчук О. М. Дослідження точності встановлення параметру "збільшення" РЕМ-зображень на растрових електронних мікроскопах // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. – 2003. – С. 246–251.
3. Іванчук О. М. Дослідження впливу змін параметрів РЕМ-знімання на величини та характер геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ "Hitachi S-800" // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2003. – № 63. – С. 145–152.
4. Іванчук О. Структура та функції програмного комплексу "Dimicros" для РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції / Іванчук О., Хрупін І. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2012. – Вип. I(23). – С. 193–197.
5. Іванчук О. Дослідження точності визначення дійсних величин збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) фірми JEOL // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2013. – Вип. 76. – С. 80–84.
6. Іванчук О. Дослідження величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A (Carl Zeiss, Німеччина) та точності їх врахування / Іванчук О., Барфельс Т., Геєр Я., Герер В. // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2013. – Вип. 78. – С. 120–126.
7. Іванчук О. М. 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. 78. – С. 91–97.
8. Іванчук О. Дослідження похибок збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106I (Суми, Україна) за допомогою

- спеціальних тест-об'єктів / Іванчук О., Чекайло М. // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2014. – Вип. 79.
9. Іванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106 І (Суми, Україна) // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2014. – Вип. II(28). – С. 74–777.
  10. Калантаров Е. И. Фотограмметрическая калибровка электронных микроскопов / Калантаров Е. И., Сагындыкова М. Ж. // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1983. – № 4. – С. 76–80.
  11. Мельник В. Н. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков / Мельник В. Н., Соколов В. Н., Іванчук О. М., Тумская О. В., Шебашинов М. П. // Рук. деп. в ВИНТИ. – 1984. – № 528. – С. 18.
  12. Мельник В. М. Растрово-електронна стереомікрофракторафія: монографія / Мельник В. М., Шостак А. В. – Луцьк: Вежа, 2009. – 469 с.
  13. Шостак А. В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2012. – 28 с.
  14. Boyde A., Ross H. F. Photogrammetry and Scanning electron microscopy // Photogrammetric Record. – 1975. – Vol. 8. – № 46. – P. 408–457.
  15. Burkhardt R. Untersuchungen zur kalibrirung eines Elektronen mikroskopes // Mitt. geod. Inst. Techn. Univ. Graz. – 1980. – № 35.
  16. Ghosh S. K. Photogrammetric calibration of a scanning electron microscope // Photogrammetria. – 1975. – V. 31. – № 31. – P. 91–114.
  17. Ghosh S. K., Nagaraja H. Scanning Electron Micrography and Photogrammetry // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1976. – Vol. 42. – № 5. – P. 649–657.

**Особливості калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних РЕМ**

О. Іванчук

Наведено результати досліджень геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на чотирьох різних РЕМ у діапазоні збільшень від  $M = 1000^x$  до  $M = 10000^x$ . Акцентовано увагу на особливостях запису цифрових РЕМ-зображень для різних РЕМ, встановленні їх реальних фізичних розмірів, врахування яких дає можливість коректно визначати та враховувати як лінійні (масштабні) спотворення ( $\Delta M = \pm 3\%$ ), так і нелінійні спотворення геометрії РЕМ-знімків (до  $\pm 1,5$  мм або  $\pm 15$  пікселів) за розмірів зображення  $120 \times 90$  мм. Найефективнішим методом їх врахування є метод поліноміальної апроксимації, після якої їх залишкові значення не перевищують  $\pm 0,3$  мм ( $\pm 3$  піксели). Це дає змогу отримувати

просторові кількісні параметри мікроповерхонь дослідних об'єктів з високою точністю, зокрема у разі збільшення (масштабу) зображень  $M = 1000^x$ :  $m_x = m_y = 0,1-0,3$  мкм,  $m_{h(z)} = 1-1,5$  мкм, а якщо  $M = 25000^x$  –  $m_x = m_y = 0,005-0,01$  мкм,  $m_{h(z)} = 0,1-0,2$  мкм.

**Особенности калибровки геометрических искажений цифровых РЭМ-изображений, полученных на разных РЭМ**

О. Иванчук

Приведены результаты исследований геометрических искажений цифровых РЭМ-изображений, полученных на четырех разных РЭМ в диапазоне увеличений от  $M = 1000^x$  до  $M = 10000^x$ . Акцентировано внимание на особенностях записи цифровых РЭМ-изображений для разных РЭМ, определении их реальных физических размеров, учет которых дает возможность корректно определять как линейные (масштабные) искажения ( $\Delta M = \pm 3\%$ ), так и нелинейные искажения геометрии РЭМ-снимков (до  $\pm 1,5$  мм или  $\pm 15$  пикселей) при размере зображений  $120 \times 90$  мм. Наиболее эффективным методом их учета является метод полиномиальной аппроксимации, после чего их остаточные значения не превышают  $\pm 0,3$  мм ( $\pm 3$  пиксела). Это позволяет получать пространственные количественные параметры микроповерхностей исследуемых объектов с высокой точностью, в частности, при увеличении (масштабе) изображений  $M = 1000^x$ :  $m_x = m_y = 0,1-0,3$  мкм,  $m_{h(z)} = 1-1,5$  мкм, а при  $M = 25000^x$  –  $m_x = m_y = 0,005-0,01$  мкм,  $m_{h(z)} = 0,1-0,2$  мкм.

**Features Calibration of geometric distortion of digital SEM images obtained at different SEM**

O. Ivanchuk

The results of studies of geometric distortion of digital SEM images obtained in 4 different SEM magnification range from  $M=1000h$  up to  $M=10000h$ . The attention is focused on the features of digital recording SEM images for different SEM, to determine their actual physical size, which makes it possible to account defined as linear (large-scale) distortion ( $\Delta M = \pm 3\%$ ), and non-linear distortion geometry SEM pictures (up to  $\pm 1,5$  mm or  $\pm 15$  pixels) The image at the size of  $120 \times 90$  mm. The most effective method is a method of accounting polynomial approximation, after which their residual values does not exceed  $\pm 0,3$  mm ( $\pm 3$  pixels). This allows for quantitative spatial parameters microsurface researched objects with high accuracy, in particular by increasing the (scale) image of  $M = 1000h$ :  $m_x = m_y = 0,1-0,3$  mkm,  $m_{h(z)} = 1-1,5$  mkm, and when  $M = 25000h$  –  $m_x = m_y = 0,005-0,01$  mkm,  $m_{h(z)} = 0,1-0,2$  mkm.