

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

Іванчук Олег Михайлович

УДК 528.721.287:537.533.35

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ
ПРОСТОРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОПОВЕРХОНЬ ОБ'ЄКТІВ
ЗА ДАНИМИ ЦИФРОВОЇ РЕМ-ФОТОГРАММЕТРІЇ**

Спеціальність 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор **Дорожинський Олександр Людомирович**, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри фотограмметрії та геоінформатики, м. Львів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Войтенко Степан Петрович**, Одеський державний аграрний університет, професор кафедри геодезії та природокористування, м. Одеса;

доктор фізико-математичних наук, професор **Железняк Олег Олександрович**, Національний авіаційний університет, завідувач кафедри аерокосмічної геодезії, м. Київ;

доктор технічних наук, доцент **Кохан Світлана Станіславівна**, Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри геоінформатики і аерокосмічних досліджень Землі, м. Київ.

Захист відбудеться 19 квітня 2019 р. о 10⁰⁰.

на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою:

79013 м. Львів, вул. Степана Бандери, 12, головний корпус, ауд. 226.

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці національного університету «Львівська політехніка», вул. Професорська, 1.

Відгуки на автореферат просимо надсилати за вказаною адресою вченому секретареві спеціалізованої вченої ради.

Автореферат розісланий “ ____ ” березня 2019 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук

Б.Б. Паляниця

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Теоретичні розробки і практичні методи стереофотограмметрії в останні десятиліття отримали надзвичайно широке застосування і високу оцінку у найрізноманітніших галузях науки і виробництва - від досліджень та отримання просторової інформації про об'єкти на макрорівні (Місяць, планети Сонячної системи, земна поверхня) до вивчень поверхонь різноманітних об'єктів на мікрорівні. Потреба в отриманні достовірної інформації про поверхню і структуру об'єктів на мікро і нанорівнях та застосування при цьому растрових електронних мікроскопів, дозволили виокремити новий науково-практичний напрям фотограмметрії – РЕМ-фотограмметрію.

Сучасні високотехнологічні галузі виробництва, насамперед, мікроелектроніка, авіа- та машинобудування, космічна і військова індустрія та багато інших застосовують нанотехнології і потребують достовірної кількісної просторової інформації про поверхні об'єкти досліджень на мікронному і субмікронному рівнях. Ці завдання можна вирішити лише з застосуванням методів РЕМ-стереофотограмметрії.

Характерною особливістю РЕМ-зображень є те, що вони отримуються електронно-оптичним шляхом внаслідок практично ортогонального сканування електронним зондом поверхні дослідного об'єкта. Тому можна вважати, що РЕМ-зображення побудовані в паралельній проекції і до них можна застосувати строгі математичні моделі перспективно-афінного відображення. А знімки, які створені із застосуванням фізичної оптики, побудовані у центральній проекції, тому математичні залежності між просторовими координатами поверхні і відповідними координатами на знімках у класичній фотограмметрії і РЕМ-фотограмметрії зовсім різні. Виконані теоретичні дослідження ряду вітчизняних та зарубіжних вчених дозволили отримати коректні математичні залежності між координатами, які дають можливість отримати просторові кількісні параметри мікроповерхні об'єктів з високою достовірністю та точністю.

Найбільш вагомий вклад в розробку теорії та практики РЕМ-стереофотограмметрії внесли як зарубіжні так і вітчизняні вчені, зокрема, в Україні – В.М. Мельник, В.Я. Фінковський, А.Я. Красовський, В.А. Степаненко, А.В. Шостак, О.В. Тумська, В.У. Волошин, Ю.А. Мельник та інші, а за кордоном - А. Boyde, R. Burkhardt, S.K. Ghosh, E. Gotthardt, I.G. Helmeke, P.G. Howel, K. Hubeny, O. Kolednic, D.F. Maune, S. Murray, I.F. Nankivell, H.N. Nagaraja, T. Oshima, В.І.Саркін, І.С.Гарелік, П.П.Гончаров, Є.І. Калантаров, М.Ж. Сагиндикова, В.М. Соколов, Б.Н. Васічев та багато інших.

На сьогодні ще залишилося багато питань, які вимагають подальшого розв'язання. Це, насамперед, розробка і більш ефективного застосування цифрових методів опрацювання РЕМ-зображень, створення автоматизованих методів та програмного забезпечення для опрацювання РЕМ-зображень і отримання цифрових моделей мікроповерхонь дослідних об'єктів з метою контролю за процесами їх створення та підвищення ефективності і надійності в процесі їх експлуатації. Тому дана тематика наукових досліджень залишається актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дана робота є завершеною розробкою прикладного методу стереофотограмметрії в растровій електронній мікроскопії, яка виконана на кафедрі фотограмметрії та геоінформатики Національного університету «Львівська політехніка», відповідає науковому напрямку кафедри і виконана в межах науково-дослідних робіт за темою

«Розробка та дослідження методів фотограмметрії, дистанційного зондування та геоінформаційних технологій для кількісної оцінки явищ, об'єктів і процесів» (державний реєстраційний номер – 0113U005286, 2013-2017 р.р.).

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень є розробка теоретичних та методологічних основ РЕМ-стереофотограмметрії, технологій опрацювання цифрових РЕМ-зображень та отримання просторової кількісної інформації мікроповерхонь об'єктів для розв'язання актуальних науково-інженерних задач у метало- та матеріалознавстві, дослідженні структури і кількісних характеристик мікрорельєфу ґрунтів.

В роботі передбачено формування та розв'язок наступних задач:

- отримання математичної моделі взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхонь об'єктів з відповідними їх координатами на РЕМ-стереознімках для 3-х основних методів РЕМ-знімання в явному вигляді на основі строгої теорії перспективно-афінного відображення;
- встановлення особливостей формування та запису цифрових РЕМ-зображень для визначення головного його метричного параметру – масштабу (збільшення);
- дослідження величин та характеру геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на сучасних РЕМ різних моделей та розробка методів їх апроксимації;
- встановлення і дослідження фрактальної природи РЕМ-зображень тест-об'єкту та їх скейлінгових характеристик з метою використання для калібрування геометричних спотворень зображень;
- розробка автоматизованої технології вимірювання РЕМ-зображень вузлових точок тест-об'єкту з подальшим калібруванням геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень у автоматизованому режимі;
- дослідження ефективності математичних методів побудови цифрових моделей мікроповерхонь дослідних об'єктів, які б дозволили досягнути найвищу точність реконструкції просторової моделі мікроповерхні і визначення її кількісних параметрів з потрібною точністю, в залежності від параметрів РЕМ-знімання, типу поверхні і особливостей її рельєфу;
- розробка та дослідження методу автоматизованої побудови цифрових моделей мікроповерхонь дослідного об'єкту за їх цифровими РЕМ-стереозображеннями;
- отримання графічних матеріалів (мікропланів, 3D візуалізації) мікроповерхонь дослідних об'єктів з використанням найбільш оптимальних математичних моделей для побудови ЦММР;
- розробка алгоритмів та програмного забезпечення для реалізації поставлених завдань.

Об'єктом дослідження є цифрові РЕМ-зображення мікроповерхонь об'єктів.

Предметом досліджень є фотограмметричні методи і технології опрацювання цифрових РЕМ-зображень та просторове моделювання мікроповерхонь об'єктів.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше:

- отримано формули взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхонь об'єктів з відповідними їх координатами на РЕМ-стереознімках для основних методів РЕМ-знімання у явному вигляді на основі строгої теорії перспективно-афінного відображення;

- в Україні проведені метричні дослідження цифрових РЕМ-зображень, отриманих на чотирьох РЕМ провідних фірм світу, які дозволили встановити особливості формування і запису зображень на кожному з них, визначити їх дійсні збільшення (масштаби), величини і характер їх геометричних спотворень та використати ефективний метод їх врахування. Ці дослідження та запропоновані методики дозволяють значно підвищити (у 2-10 разів) точність отримання просторових кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів;

- встановлено, що РЕМ-зображенням при різних масштабах притаманні так звані властивості скейлінга, тобто масштабної самоподібності і до них можна застосувати окремі положення теорії фрактальної геометрії. В результаті виконаних досліджень отримано ряд скейлінгових характеристик, які притаманні виключно конкретному типу РЕМ, і з допомогою яких можна встановити дійсні величини масштабів РЕМ-зображень і тим самим підвищити точність отримання просторових характеристик мікроповерхонь дослідних об'єктів;

- виконано ґрунтовний аналіз та порівняння точності побудови ЦММР дослідних мікроповерхонь з використанням математичних моделей, які базуються на різних аналітичних залежностях і функціях, що враховують статистичні характеристики мікрорельєфу. Встановлено і рекомендовано ті види моделей, які дають найвищу точність моделювання рельєфу в залежності від типу мікроповерхні, характеру мікрорельєфу та масштабу РЕМ-зображень;

- опрацьована методика 3D реконструкції і візуалізації мікроповерхонь дослідних об'єктів з використанням програми Surfer, на основі якої досліджена кінетика розвитку втомних руйнувань металу, деформації мікроповерхні хромованої сталі під дією механічних навантажень, а також просторова структура мікроповерхні лесових ґрунтів;

- опрацьовано методологічні і технологічні основи автоматизації основних процесів опрацювання цифрових РЕМ-зображень (вимірювання, корекція геометричних спотворень, моделювання мікроповерхонь об'єктів, їх візуалізація). Розроблені алгоритми, за якими створено програмний комплекс опрацювання цифрових РЕМ-зображень «Dimicros», що не має аналогів в Україні.

Практичне значення одержаних результатів.

Запропоновані методи і технології використано для досліджень просторових кількісних характеристик мікроповерхонь об'єктів, зокрема, зламів металевих деталей, їх деформацій в процесі експлуатації та під дією механічних навантажень, а також для досліджень структури мікроповерхні лесових ґрунтів. Сфера застосування цих методів може бути поширена на різні галузі науки і виробництва, які потребують кількісної просторової інформації про поверхні об'єктів на мікронному рівні.

Теоретичні та експериментальні результати досліджень впроваджені у навчальний курс для студентів II магістерського рівня підготовки за спеціальністю 8.193 «Геодезія та землеустрій», зокрема у курс «Прикладна фотограмметрія» за спеціалізацією 8.193.002 «Картографія», а також використані в процесі підготовки магістерських кваліфікаційних робіт студентів спеціалізацій 8.193.005 «Геоінформаційні системи і технології» і 8.193.006 «Фотограмметрія та дистанційне зондування».

Методи досліджень.

Робота виконана з використанням фундаментальних положень вищої математики, механіки і фізики твердого тіла, фотограмметрії, растрової електронної мікроскопії, цифрового опрацювання зображень.

Основні положення, що виносяться на захист:

- теорія і технологія методу фотограмметричного опрацювання РЕМ-зображень;
- способи та результати експериментальних досліджень характеру і величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ різних типів та можливість їх апроксимації поліномами;
- методика та результати калібрування збільшень РЕМ провідних фірм світу;
- технологія процесу автоматизованого калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень;
- методика автоматизованої побудови цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за РЕМ-стереопарою;
- практичні рекомендації щодо застосування методів РЕМ-стереофотограмметрії для отримання якісних і кількісних характеристик мікроповерхонь твердих тіл.

Особистий внесок здобувача.

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що всі наукові положення, висновки і рекомендації, які виносяться на захист, одержані автором самостійно. Загалом за темою дисертації опубліковано 25 праць, з них 2 статті у науковому періодичному виданні Польщі, яке включено до міжнародної наукометричної бази даних, 5 статей в наукових періодичних виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних, 16 – у наукових фахових виданнях України і 2 – у збірниках матеріалів конференцій. Особисто здобувачем виконані всі експериментальні дослідження, їх аналіз та інтерпретація.

Одноосібно автором опубліковано 15 праць [1, 4, 7-10, 12, 14, 16-19, 21, 23, 24], 10 – у співавторстві [2, 3, 5, 6, 11, 13, 15, 20, 22, 25].

У публікаціях у співавторстві, здобувачу належать ідеї та алгоритми опрацювання цифрових РЕМ-зображень, технологічні схеми побудови ЦММР мікроповерхонь дослідних об'єктів, вимірювання РЕМ-зображень, встановлення характеру та величин їх геометричних спотворень та визначення кількісних просторових характеристик мікроповерхонь дослідних об'єктів.

Апробація роботи.

Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародних конференціях «Геофорум» (Львів-Яворів-Брюховичі, 2001-2012, 2014-2017 р.р.), «Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку» (Львів-Краків, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2017), «Геоінформатика, геодезія, маркшейдерія» (Донецьк, 2013).

Публікації. Основний зміст дисертації відображений у 25 опублікованих наукових працях, з них 2 статті - у науковому періодичному виданні Польщі, яке включено до міжнародної науково метричної бази даних, 5 - у наукових періодичних виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних, 16 – у наукових фахових виданнях України і 2 – у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація викладена на 304 сторінках і складається зі вступу, 5 розділів, висновку, списку літератури із 275 позицій та додатку. В роботі є 74 рисунки, 48 таблиць, додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, її зв'язок з науковою тематикою кафедри, наукова новизна, сформована мета, основні задачі та об'єкт дослідження, приведені основні положення, що виносяться на захист, практичне значення одержаних

результатів, а також дані про апробацію роботи, кількість публікацій, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі «Аналіз досягнень та проблематики теорії і практики РЕМ-фотограмметрії. Задачі дисертаційної роботи» проаналізовано літературні джерела з даної тематики, розглянуто здобутки теорії і практики застосування методів РЕМ стереофотограмметрії, сучасний стан, нерозв'язані проблеми та перспективи розвитку. Загалом робота містить посилання на 275 літературних джерел.

У другому розділі дисертації «Теоретичні положення моделювання мікроповерхні об'єкта за його цифровими РЕМ-стереозображеннями» застосована математична модель перспективно-афінного відображення, на підставі якої виведені та приведені формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні об'єкта дослідження в РЕМ з їх плоскими координатами на РЕМ-знімках стереопари для трьох основних випадків РЕМ-знімання.

Зокрема, при збільшенні зображення в РЕМ більше 500^x (крат), проекцію, яка формує РЕМ-зображення можна вважати паралельною, тобто перспективно-афінною. Для цієї проекції можна записати співвідношення між координатами точок РЕМ-зображення x, y мікроповерхні дослідного об'єкта і їх просторовими координатами $X, Y, Z(h)$ в загальному у вигляді:

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ 0 \end{pmatrix} = M \cdot A \cdot \left[\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \right], \quad (2.1)$$

де M – збільшення (масштаб) РЕМ-зображення,

A – матриця напрямних косинусів, яка визначає взаємне положення між системами координат РЕМ-знімка і об'єкта.

$$A = A_\alpha \cdot A_\omega \cdot A_\kappa = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}.$$

У практичній РЕМ-фотограмметрії початок систем координат РЕМ-знімка і об'єкта суміщають і ним, як правило, є геометричний центр РЕМ-знімка і відповідна точка на поверхні об'єкта, що відобразилась на знімку. Для отримання стереопар використовують, як правило, лише поздовжні нахили гоніометричного столика на кут α , а кути $\omega = \kappa = \theta^0$. Тоді формула (2.1) прийме вигляд:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = M \cdot A_\alpha \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Виходячи з рівняння (2.2) отримано формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні з відповідними їх координатами на цифрових РЕМ-знімках стереопари для усіх трьох випадків РЕМ-знімання.

Для *рівномірно-нахилоного* випадку РЕМ-знімання, коли лівий знімок стереопари отримують при нахилі гоніометричного столика на кут $-\alpha_n$, а правий – на такий же за величиною кут $+\alpha_n$, формули (2.2) після перетворень набудуть наступного виду:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x_l^o + \Delta p_x^o / 2}{M_x \cdot \cos \alpha} \cdot 10^3 \\ Y &= \frac{y_l^o}{M_y} \cdot 10^3, \\ Z(h) &= \frac{\Delta p_x^o}{2M_x \cdot \sin \alpha} \cdot 10^3. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Відповідно для **нормально-конвергентного** випадку РЕМ-знімання ($\alpha_l = 0^\circ$, $\alpha_n \neq 0^\circ$) формули будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x_l^o \cdot 10^3}{M_x}; \\ Y &= \frac{y_l^o \cdot 10^3}{M_y}; \\ Z(h) &= \frac{x_l^o \cdot (1 - \cos \alpha_n) + \Delta p_x^o}{M_x \cdot \sin \alpha_n} \cdot 10^3. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

А для **конвергентного** ($\alpha_l \neq \alpha_n \neq 0^\circ$):

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{(x_l^o / M_x) \cdot 10^3 - h \cdot \sin \alpha_l}{\cos \alpha_l}; \\ Y &= \frac{y_l^o}{M_y} \cdot 10^3; \\ Z(h) &= \frac{(x_l^o + \Delta p_x^o) \cdot \cos \alpha_l - x_l^o \cdot \cos \alpha_n}{M_x \cdot \sin(\alpha_n - \alpha_l)} \cdot 10^3 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

У формулах (2.3-2.5):

$$\left. \begin{aligned} x_l^o &= x_{лв\text{им}} - \Delta x_l, \\ y_l^o &= y_{лв\text{им}} - \Delta y_l, \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} \Delta p_{x_i}^o &= p_{x_i}^o - p_o, \\ p_{x_i}^o &= x_{лi}^o - x_{пi}^o. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

За наявності калібрувальних тест-сіток можна визначити параметри дійсних збільшень РЕМ-знімка M_x , M_y , а також величини геометричних спотворень його координат Δx , Δy , які найоптимальніше описати поліномом загального вигляду 3-го степеня:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_l &= a_0 + a_1 x_l + a_2 y_l + a_3 x_l y_l + a_4 x_l^2 + a_5 y_l^2 + a_6 x_l^3 + a_7 x_l^2 y_l + a_8 x_l y_l^2 + a_9 y_l^3 \\ \Delta y_l &= b_0 + b_1 x_l + b_2 y_l + b_3 x_l y_l + b_4 x_l^2 + b_5 y_l^2 + b_6 x_l^3 + b_7 x_l^2 y_l + b_8 x_l y_l^2 + b_9 y_l^3 \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

У формулах (2.3-2.7):

$X, Y, Z(h)$ – просторові координати точок мікроповерхні, *мм*;

$x_{лв\text{им}}, y_{лв\text{им}}$ – виміряні на цифровій станції координати точок на лівому РЕМ-знімку,

мм;

x_l^o, y_l^o – виправлені за геометричні спотворення $\Delta x, \Delta y$ координати точок на лівому РЕМ-знімку, *мм*;

a_i, b_i – коефіцієнти полінома загального вигляду ($i = 0, 1, 2, \dots, 9$);

Δp_x^o – різниця паралаксів i -ої точки p_i^o і початкової (центральної) точки РЕМ-знімка p_o ,

мм;

M_x, M_y – збільшення (крат) або масштаб РЕМ-знімка у взаємно перпендикулярних напрямках x, y (вздовж осей x, y);

α_l, α_n – кути нахилу гоніометричного столика навколо осі Y столика (вздовж осі X) при отриманні лівого та правого РЕМ – знімків стереопари.

Для отримання РЕМ-стереопар на практиці переважно застосовується нормально-конвергентний випадок знімання, при якому лівий знімок отримується за горизонтального положення гоніометричного столика ($\alpha_l = 0^\circ$), а правий – за його нахилу на кут α_n від 4° до 12° в залежності від збільшення РЕМ-зображення та мікрорельєфу поверхні дослідного об'єкта.

Отримані у цифровому форматі РЕМ-знімки мають різні розгортки і різні лінійні розміри (в залежності від типу РЕМ), що враховано в процесі їх опрацювання в програмному пакеті «Dimicros» [12].

У сучасних японських РЕМ, які найбільш часто використовуються в наукових лабораторіях держав Східної Європи (JSM 7100F, JCM-5000 фірми JEOL та ін.) розгортка РЕМ-зображення складає переважно 1280×1024 піксела. Масштаб цифрового РЕМ-зображення, як правило, відповідає встановленому збільшенню в РЕМ у випадку, коли його розміри складають 120×96 мм. Розмір піксела при цьому складає $0,09375$ мм, тобто приблизно $0,1$ мм.

За цими параметрами можна встановити теоретичну точність отримання просторових координат X, Y, Z мікроповерхонь об'єктів за отриманими формулами. Для прикладу, з формул (2.4) *нормально-конвергентного* випадку РЕМ-знімання, який переважно застосовується на практиці, отримані наступні вирази для обчислення середніх квадратичних похибок, за умови $M = \text{Const}, \alpha = \text{Const}$:

$$\begin{aligned} m_{X(Y)} &= m_{x(y)} / M, \\ m_{Z(h)} &= m_{\Delta p(x)} / 2M \cdot \text{Sin}(\alpha_n / 2). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Відповідно для *рівномірно-відхиленого* РЕМ-знімання формули будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} m_{X(Y)} &= m_{x(y)} / M, \\ m_{Z(h)} &= m_{\Delta p(x)} / 2M \cdot \text{Sin} \alpha \end{aligned} \quad (2.9)$$

а для *конвергентного*:

$$\begin{aligned} m_{X(Y)} &= m_{x(y)} / M, \\ m_{Z(h)} &= m_{\Delta p(x)} / 2M \cdot \text{Sin}((\alpha_l - \alpha_n) / 2). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Безумовно, точність визначення масштабів РЕМ-знімків M і кутів його нахилів α має суттєвий вплив на точність вимірів і, відповідно, на точність отримання просторових координат точок X, Y, Z . Однак у сучасних РЕМ, за наявності калібрувальних тест-сіток з високою розрізняючою здатністю (від 200 до 3500 лін/мм) є можливість встановлювати дійсний масштаб цифрових РЕМ-зображень з точністю $\pm 1\%$. Гоніометричні столики сучасних РЕМ дають можливість встановлювати фіксовані значення кутів нахилів з точністю не меншою, ніж $0,1^\circ$ (як правило, $1-3'$), тому впливом цих параметрів за таких умов можна знехтувати.

Таким чином, точність отримання просторових координат точок мікроповерхні об'єкта $m_{X(Y)}$ залежить лише від точності вимірів координат точок $m_{x(y)}$ і масштабу РЕМ-зображень M , а точність отримання висот точок $m_{Z(h)}$ залежить від точності вимірів їх паралаксів $m_{\Delta p(x)}$, а також від їх масштабу M і кута нахилу гоніометричного столика α . Наявність калібрувальних тест-сіток і використання поліноміальної апроксимації вимірів дозволяє суттєво зменшити (від 2-х до 10-ти разів) дисторсійні спотворення РЕМ-зображень, які навіть у сучасних РЕМ можуть досягати на краях знімків до $1,5-3$ мм.

Велика кількість проведених нами експериментальних робіт [4, 5, 10, 13-15, 17] дозволила встановити залишкові середні квадратичні похибки цифрових вимірів РЕМ-зображень в залежності від їх масштабу (збільшення) $m_{\delta x(\delta y)}$, середні значення яких за даними по 4-х РЕМ знаходяться приблизно в межах від 0,08 мм при $M=750^x$ до 0,23 мм при $M=25000^x$. Ці дані використані нами для розрахунку апріорної точності визначення просторових координат точок мікроповерхні дослідних об'єктів, яка приведена у табл. 2.1. Зазначимо також, що початок системи координат РЕМ-знімка доцільно встановлювати у його геометричному центрі, відносно якого вимірюються координати x, y і паралакси p точок.

Тоді точність вимірів можна обчислити за формулою:

$$m_{x(y, \Delta p)} = m_{\delta x(\delta y)} \sqrt{2}, \quad (2.11)$$

де $m_{\delta x(\delta y)}$ – середні квадратичні похибки вимірів координат точок після їх апроксимації поліномом загального виду 3-го степеня.

Приведемо розрахунок апріорної точності методу за формулами (2.9) для різних збільшень M^x і кутів нахилу гоніометричного столика, які впливають лише на точність отримання висот точок: чим більший кут нахилу, тим вища точність (табл. 2.1):

Таблиця 2.1

Апріорна точність визначення просторових координат точок мікроповерхні дослідних об'єктів для різних збільшень M^x і кутів нахилу гоніометричного столика α

M^x	$m_{x(y, \Delta p)}$ мм	$m_{x(y)}$ мкм	$m_{z(h)}$, мкм				
			$\pm 2^\circ$	$\pm 3^\circ$	$\pm 4^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 6^\circ$
750^x	0,12	0,160	2,29	1,53	1,15	0,92	0,77
2000^x	0,15	0,075	1,08	0,72	0,54	0,43	0,36
5000^x	0,20	0,040	0,57	0,38	0,29	0,23	0,19
10000^x	0,24	0,024	0,34	0,23	0,17	0,14	0,12
25000^x	0,32	0,013	0,18	0,12	0,09	0,07	0,06

Для підтвердження апріорної точності методу проведено наступний експеримент.

На РЕМ JSM 7100F (JEOL, Японія) були відзняті тест-сітка з розрізняючою здатністю 1425 лін/мм та мікроповерхня хромованої сталі при збільшенні РЕМ $M=750^x$ і кутах нахилу гоніометричного столика $\alpha = 0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ (рис. 2.1, 2.2).

Опрацювання цифрових РЕМ-зображень велось за допомогою комплексу програм «Dimicros». Спочатку визначались величини геометричних спотворень РЕМ-зображень за програмою «Test-Measuring». Середня квадратична похибка геометричних спотворень за вимірами 111 контрольних точок склала $m_{\Delta x} = 85,4$ мкм, $m_{\Delta y} = 95,2$ мкм (приблизно 1 піксел) при максимальних $\Delta x = 280,4$ мкм, $\Delta y = 179,1$ мкм.

За програмою «Polycalc» була виконана їх апроксимація поліномом загального виду 3-го степеня (2.7). Середня квадратична похибка залишкових спотворень склала $m_{\delta x} = 41,2$ мкм, $m_{\delta y} = 42,0$ мкм, а максимальні значення $\delta x_{max} = 102,4$ мкм, $\delta y_{max} = 106,7$ мкм, тобто приблизно 1 піксел (93,7 мкм). Векторні діаграми спотворень до і після апроксимації приведені на рис. 2.1, б, в.

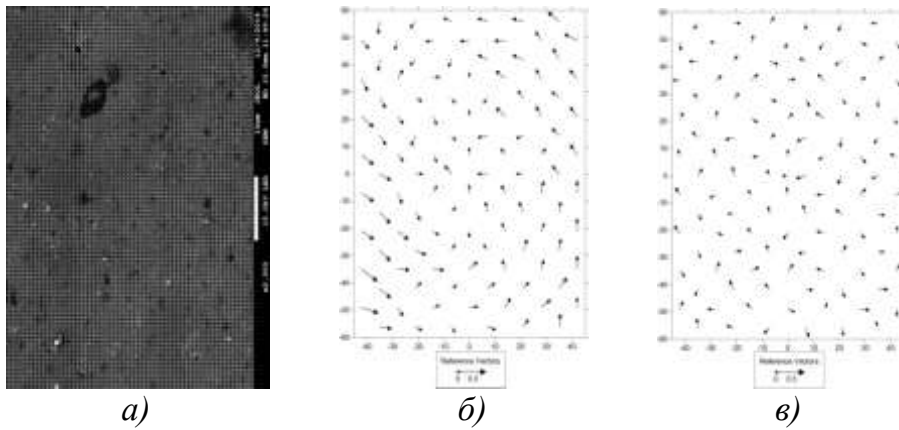


Рис. 2.1. а) цифровий РЕМ-знімок тест сітки, б), в) вектори геометричних спотворень РЕМ-знімка до і після апроксимації поліномом

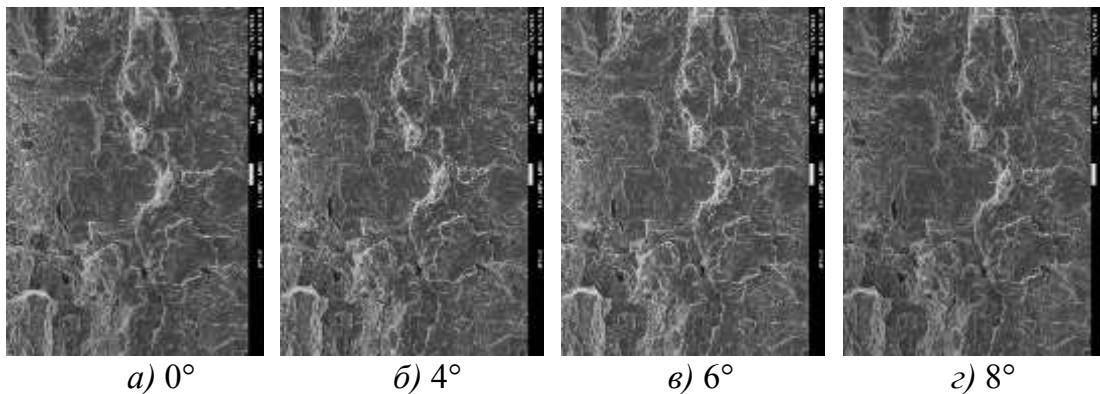


Рис. 2.2. Цифрові РЕМ-знімки мікроповерхні хромованої сталі, отримані при $M=750\times$ і кутах нахилу гоніометричного столика $0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$

Для встановлення реальної точності вимірів просторових координат точок мікроповерхні хромованої сталі нами було сформовано 3 стереопари ($0^\circ-4^\circ, 0^\circ-6^\circ, 0^\circ-8^\circ$) і на кожній із них за програмою «StereoSEM» було виміряно одні і ті ж характерні 51 точка та визначено їх просторові координати X,Y,Z. Контрольні точки рівномірно розміщались по всьому полю РЕМ-знімка.

Оцінка точності була виконана наступним чином:

1) обчислення середніх значень координат точок $X_{icp}, Y_{icp}, Z(h)_{icp}$ з кожної із k комбінацій стереопар (в нашому випадку $k=3, i$ – номер кожної з 51 точок):

$$\left. \begin{aligned} X_{icp} &= \frac{\sum_{i=1}^k X_i}{k}, & Y_{icp} &= \frac{\sum_{i=1}^k Y_i}{k}, & Z(h)_{icp} &= \frac{\sum_{i=1}^k Z_i}{k} \end{aligned} \right\}; \quad (2.12)$$

2) обчислення відхилень координат точок $\Delta X_i^k, \Delta Y_i^k, \Delta Z_i^k$, отриманих з кожної окремої стереомоделі від їх середніх значень, отриманих з усіх комбінацій моделей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_i^k &= X_i^k - X_{icp}, \\ \Delta Y_i^k &= Y_i^k - Y_{icp}, \\ \Delta Z_i^k &= Z_i^k - Z_{icp}. \end{aligned} \right\}; \quad (2.13)$$

3) знаходження середніх квадратичних значень відхилень $m_{\Delta X}, m_{\Delta Y}, m_{\Delta Z}$:

$$\left. \begin{aligned} m_X = m_{\Delta X} &= \frac{\sum_1^n \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta X_i^k)^2}{k}}}{n-1}, \\ m_Y = m_{\Delta Y} &= \frac{\sum_1^n \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta Y_i^k)^2}{k}}}{n-1}, \\ m_{Z(h)} = m_{\Delta Z} &= \frac{\sum_1^n \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta Z_i^k)^2}{k}}}{n-1}. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Таким чином остаточно отримано наступні середні квадратичні похибки просторових координат точок мікроповерхонь об'єктів за вимірами трьох комбінацій стереопар:

$$m_X = 0,10 \text{ мкм}, m_Y = 0,12 \text{ мкм}, m_{Z(h)} = 0,74 \text{ мкм}.$$

Ступінь довіри до отриманих значень m_X , m_Y , $m_{Z(h)}$ обчислено за відомими

виразами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_X &= \frac{m_{\Delta X}}{\sqrt{2kn}}, \\ \sigma_Y &= \frac{m_{\Delta Y}}{\sqrt{2kn}}, \\ \sigma_Z &= \frac{m_{\Delta Z}}{\sqrt{2kn}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

де n – кількість контрольних точок, а k – кількість комбінацій стереопар, за вимірами яких визначались просторові координати точок мікроповерхні об'єкта.

Для наших даних ($k = 3$ стереопари, $n = 51$ точка) ступінь довіри наступна:

$$\sigma_X = 0,006 \text{ мкм}, \sigma_Y = 0,007 \text{ мкм}, \sigma_Z = 0,042 \text{ мкм}.$$

У випадку, коли дослідники мають РЕМ випуску 80-90-х років минулого століття з фіксацією РЕМ-зображень на фотоплівку, то останні необхідно перевести у цифрову форму, відсканувавши їх на фотограмметричному сканері з розрізненням 600 dpi.

Дослідження РЕМ-знімків, отриманих на японських РЕМ типу «Hitachi S-800», і зафіксованих на фотоплівку показали, що вони мають достатньо високі метричні і фотографічні якості, зокрема, розрізнення їх складає 0,03-0,05 мм. Тому сканування їх на фотограмметричному сканері з розрізненням 600 dpi дає можливість отримати цифрові РЕМ-зображення з розміром піксела приблизно 0,04 мм, а це трохи більше, ніж у 2 рази вище розрізнення, яке можна отримати на сучасних РЕМ, де розмір 1 піксела цифрових РЕМ-зображень складає приблизно 0,09 мм. Тому і точність отримання просторових координат точок мікроповерхонь дослідних об'єктів за їх відсканованими РЕМ-зображеннями також приблизно у 2 рази вища, ніж за отриманими на сучасних РЕМ. А отже використання РЕМ минулих років також є доцільним.

За результатами досліджень, виконаних у розділі 2 можна зробити наступні висновки:

1. Запропонована нами технологія опрацювання РЕМ-стереопар з попереднім встановленням і врахуванням геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень підтвердила свою доцільність і ефективність.

2. Встановлення дійсних масштабів цифрових РЕМ-зображень, величин геометричних спотворень знімків з подальшим їх врахуванням, а також отримання

просторових координат точок мікроповерхонь дослідних об'єктів доцільно виконувати з використанням калібрувальних тест-сіток, ЦФС «Дельта» та спеціального пакету програм «Dimicros».

3. Виконані експериментальні дослідження точності отримання координат X, Y, Z мікроповерхні хромованої сталі за вимірами стереопар, які отримані на PEM JSM 7100F при збільшенні $M=750^x$ і кутах нахилу гоніометричного столика в діапазоні від 0° до 8° підтвердили коректність приведених формул, теоретичну точність методу і доцільність його використання в PEM-фотограмметрії.

У третьому розділі роботи «Теоретичні та експериментальні дослідження геометричних властивостей цифрових PEM-зображень» приведені численні дослідження величин і характеру геометричних спотворень цифрових PEM-зображень на підставі кількісної обробки цифрових PEM-знімків тест-об'єктів, отриманих на 4-х типах PEM провідних фірм світу в широкому діапазоні збільшень від 1000^x до 30000^x та експериментально підтверджена ефективність їх апроксимації поліномами.

Зокрема, виконані детальні дослідження метричних характеристик цифрових PEM-зображень спеціального тест-об'єкту з розрізненням 1425 лін/мм, які були отримані на PEM JCM-5000 (Neoscope), JSM 7100F (обидва фірми JEOL, Японія), DSM-960A (фірма «Carl Zeiss» Оберкохен, Німеччина) і вітчизняному PEM 106 I (ВАТ «SELMІ» Суми, Україна). Для кожного з цих PEM встановлено особливості отримання і цифрового запису PEM-зображень, величини їх дійсних збільшень, характер і величини їх геометричних спотворень та точність їх апроксимації.

На рис. 3.1 наведено цифрові знімки тест-об'єкту, отримані на різних типах PEM за збільшення $M=10000^x$. Особливістю цифрових PEM-зображень є те, що їх реальний масштаб (збільшення) не завжди відповідає встановленому значенню на шкалі PEM. Коли їх розмір на екрані монітора складає 120x90 мм, фізичний розмір пікселя у цьому випадку для PEM 106I рівний **0,09375 мм**, а для PEM DSM-960A – **0,13698 мм**.

При фотограмметричному ж опрацюванні цифрових PEM-зображень за допомогою спеціального програмного пакету «Dimicros», їх «реальний» (умовний) розмір на екрані монітора значно більший і складає для PEM 106I 338,56x253,92 мм, а для PEM DSM-960A – 211,60x158,70 мм при розмірі пікселя **0,2645 мм**. При цьому, коефіцієнт переходу для визначення дійсного масштабу цифрового знімка складає для PEM 106I приблизно $k=2,8213$, а для DSM-960A - $k=1,931$. У двох PEM японського виробництва розміри пікселів наступні: у PEM JCM-5000 (NeoScore) – **0,09132 мм**, а у PEM JSM 7100F – **0,09375 мм**. За допомогою масштабних шкал, які вдруковуються в кожен PEM-знімок, ми підраховували кількість пікселів на фіксовану одиницю шкали і визначали фактичні розміри пікселя цифрового знімка і величину k (див. рис. 3.2).

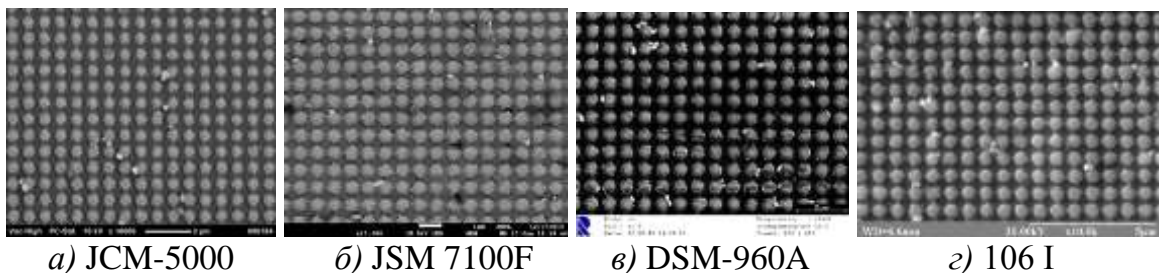
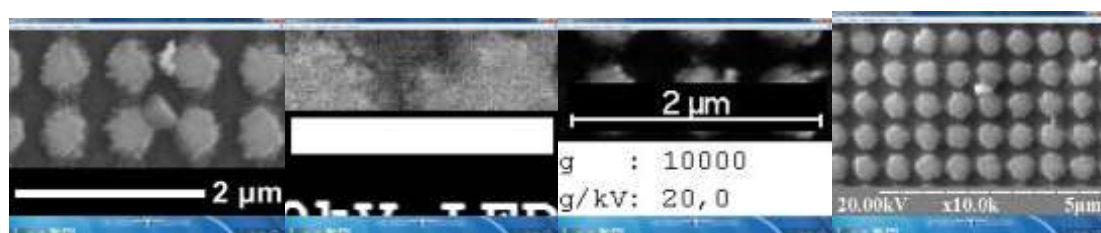


Рис. 3.1. Цифрові PEM-знімки тест-об'єкта з розрізнявальною здатністю $r = 1425$ лін/мм, отримані на різних PEM за збільшення $M=10000^x$



а) JCM-5000 б) JSM 7100F в) DSM-960A г) 106 I

Рис. 3.2. Збільшені фрагменти цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта з зображенням масштабної шкали, за якою визначається коефіцієнт переходу до дійсного масштабу знімка k

У таблиці 3.1 приведені основні технічні характеристики досліджених РЕМ. До них ми додали ще ряд додаткових характеристик РЕМ, які не містяться в їх описах, і які були нами встановлені в процесі досліджень, зокрема таку важливу характеристику для встановлення дійсних масштабів цифрових РЕМ-зображень, як коефіцієнт k . Додаткові характеристики виділені жирним шрифтом.

Таблиця 3.1

Основні технічні характеристики РЕМ і цифрових РЕМ-зображень

Параметри	JCM-5000 (NeoScope)	JSM 7100F	DSM-960A	РЕМ 106 I
Режим роботи	високоваку- умний	високоваку- умний	високоваку- умний	високоваку- умний
Прискорююча 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 зобр., пікселів	1280x1080	1280x1024	800x600	1280x960
Розмір піксела при вимірах, мм	0,09132	0,09375	0,26450	0,26450
Коеф. перех. до М факт., k	1,0	1,0	1,9310	2,8213
Розмір піксела з врах. k , мм	0,09132	0,09375	0,13698	0,09375
Розмір РЕМ- знімка, мм	116,9x98,6	120,0x96,0	211,6x158,7	338,6x253,9
Формат запису файлів	JPEG, TIFF	BMP, JPEG, TIFF	JPEG, TIFF	BMP
Об'єм РЕМ- знімка, Мб	1,32	1,25	0,47	1,17

Для фотограмметричного опрацювання цифрових РЕМ-зображень у дослідженнях всіх 4-х РЕМ використовувався створений нами (за участю І. В. Хрупіна) комплекс програм «Dimicros». За допомогою програми «Test-Measuring» виконувались вимірювання цифрових РЕМ-зображень спеціальних тест-об'єктів (сітки) з розрізненням 1425 лін/мм і 3530 лін/мм, результатом яких було встановлення дійсних значень

збільшень вздовж осей x і y знімка, а також величин геометричних спотворень. Програма «Polycalc» за результатами обчислень, виконаних за програмою «Test-Measuring» і з використанням поліному загального виду 3-го степеня обчислювала поправки у виміряні координати точок (перехресть) тест-об'єкта (сітки), величини залишкових спотворень та визначала точність апроксимації геометричних спотворень поліномом (табл. 3.2).

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. 3.2. і рис. 3.3 наведені векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ – знімків до і після їх апроксимації поліномом для $M=10000^x$.

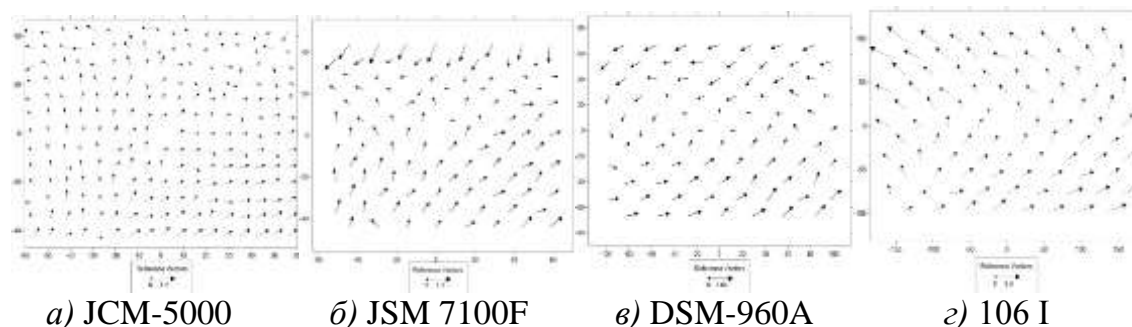


Рис. 3.3. Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта до апроксимації поліномом для різних РЕМ за збільшення $M=10000^x$.

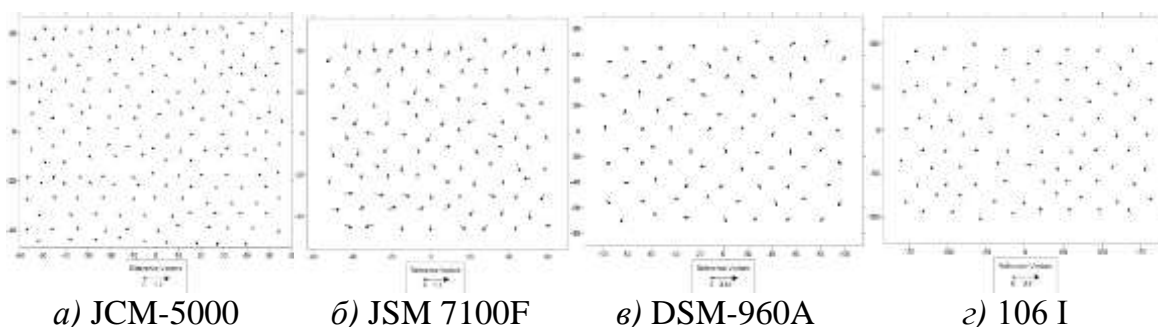


Рис. 3.4. Векторні діаграми залишкових геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта після апроксимації поліномом для різних РЕМ за збільшення $M=10000^x$

Таблиця 3.2

Результати апроксимації геометричних спотворень РЕМ-зображень тест-об'єкта з $r = 1425$ лін/мм

РЕМ	$M_{РЕМ}$	Дійсні значення збільшень		$\Delta M_x, \%$	$\Delta M_y, \%$	До апроксимації		Після апроксим.	
		$M_{x\text{cp}}$	$M_{y\text{cp}}$			$m_{\Delta x}, \text{мм}$	$m_{\Delta y}, \text{мм}$	$m_{\delta x}, \text{мм}$	$m_{\delta y}, \text{мм}$
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
РЕМ 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

За результатами досліджень метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень, отриманих на 4-х типах РЕМ можна зробити наступні висновки:

1. Сучасні РЕМ дозволяють отримувати високоякісні цифрові зображення мікроповерхонь твердих тіл з лінійними (масштабними) спотвореннями в межах $\pm 1-3\%$ і нелінійними (дисторсійними) – максимально до $\pm 1,5 \text{ мм}$ (до 15 пікселів). Встановлено, що величини геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень для конкретного типу РЕМ, як правило, мають систематичний характер незалежно від величини збільшення і їх легко врахувати. Дійсні масштаби РЕМ-зображень встановлюють за допомогою тест-об'єкту, а дисторсійні спотворення - шляхом використання для їх апроксимації поліному загального виду третього степеня, використання якого є ефективним і дозволяє зменшити величини спотворень у 2-10 разів.

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

У цьому ж розділі приведені дослідження фрактальних властивостей цифрових РЕМ-зображень, отриманих на 4-х різних типах РЕМ, встановлено їх статистичні та скейлінгові характеристики, використання яких дозволяє виконати калібрування метричних характеристик РЕМ-зображень і тим самим підвищити точність вимірювань.

Стохастичний характер процесу отримання РЕМ-зображень в режимі вторинних електронів та випадкові значення інтенсивності (рівнів сірого тону) окремих його елементів можна вважати причиною фрактальної природи РЕМ-зображень. Нами виявлено, що для різних збільшень РЕМ-зображення мають властивість *скейлінга*, тобто масштабну інваріантність або самоподібність. Оскільки дійсні збільшення (масштаби) РЕМ-зображення вздовж осей x та y внаслідок різного роду спотворень в процесі його формування, як правило, дещо відмінні між собою, то можна вважати, що вони є самоафінними, а не самоподібними. Різномасштабні РЕМ-зображення можна віднести до типу статистично подібних фрактальних множин, які ґрунтуються на понятті метричної розмірності, що строго більше топологічної розмірності. Прикладом природних фракталів такого типу є фрагмент берегової лінії.

Як показано в роботах [4, 5, 13-15, 17] значення дійсних масштабів РЕМ-зображень є нецілими і відрізняються від встановлених на шкалі приладу. Збільшення РЕМ-зображення M_x і M_y визначаються за 8 вимірними центрами вузлів тест-об'єкта (тест-сітки) в центральній частині знімка. Значення відстаней обчислюються за координатами центрів вузлів в масштабі збільшення. Дійсні масштаби визначаються як середнє значення відношень відстаней між центрами вузлів в масштабі збільшення до відповідних відстаней між вузлами тест-об'єкта.

В результаті проведених досліджень отримані значення серій дійсних масштабів для різних РЕМ у діапазонах фіксованих значень збільшень, встановлених на шкалі приладу [4, 5, 13-15, 17]:

- $1000^x, 2000^x, 5000^x, 8000^x, 10000^x, 15000^x, 20000^x, 24000^x, 27000^x, 30000^x$ для РЕМ JCM-5000 (NeoScope), (JEOL, Японія);

- $2000^x, 5000^x, 7500^x, 10000^x, 15000^x, 20000^x, 25000^x, 30000^x$ для РЕМ JSM 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).

Аналіз отриманих результатів показує, що при зміні масштабу відстані між вузлами тест-сітки не змінюються строго пропорційно масштавному відношенню, встановленому на шкалі приладу, а збільшуються у нецілу кількість разів. Тому було прийнято допущення про фрактальну природу збільшень РЕМ-зображень. На основі емпіричного співвідношення встановлено масштабне співвідношення між фіксованим на шкалі приладу цілочисельним масштабом M і «фрактальним» масштабом M_f [Іванчук, Тумська, [7]]

$$M_f = A_f \cdot M^{2-D_f} \quad (3.1)$$

де A_f – коефіцієнт пропорційності; D_f – експоненціальний показник. Обчислений за формулою (3.1) масштаб M_f будемо називати *фрактальним* масштабом. Якщо крок істинної тест-сітки позначимо як r , то при збільшенні у M разів дійсна довжина кроку, згідно (3.1), дорівнює

$$M_f \cdot r = A_f \cdot (M \cdot r) \cdot M^{1-D} \quad (3.2)$$

В роботі [Mandelbrot, 1983] показано, що величина D представляє фрактальну розмірність.

Величини A_f та D_f визначено за набором пар значень цілих і дійсних масштабів (M , M_{xr}), (M , M_{yr}) вздовж осей x і y відповідно. На рис. 3.5 для різних типів РЕМ наведено графіки залежностей величин $\log M \rightarrow \log M_{xr}$ та $\log M \rightarrow \log M_{yr}$, які представляють пряму лінію.

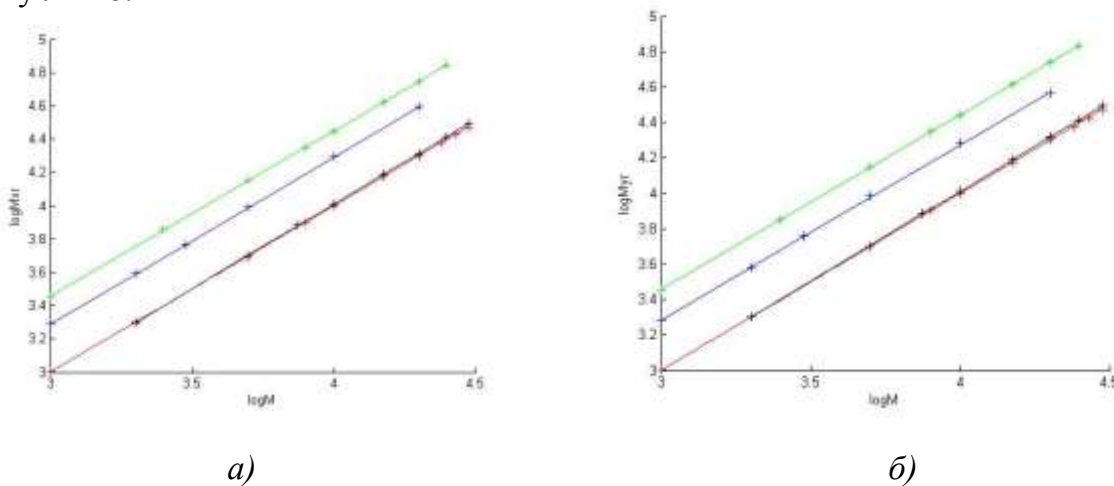


Рис. 3.5. Графіки залежностей $\log M \rightarrow \log M_{xr}$ (а) та $\log M \rightarrow \log M_{yr}$ (б) для JCM-5000 (червоний), JSM 7100F(чорний), DSM-960 A (синій), PEM 106 I (зелений)

Зауважимо, що графіки для JCM-5000 та JSM 7100F майже співпадають, а графіки для DSM-960A та PEM 106I (Суми) зсунуті по логарифмічній осі у на величини 0,3 та 0,45 і відповідно відрізняються від масштабів, встановлених на шкалі приладу, приблизно у 2 та в 3 рази. Параметри прямих (рис. 3.5) визначено з рівнянь регресії, які приведено у роботі відповідно для масштабів M_{xf} вздовж осі x та M_{yf} вздовж осі y .

За наведеним в роботі алгоритмом у системі MatLab виконано розрахунок коефіцієнтів A_f та показників степенів D_f для фрактальних масштабів вздовж осей x та y (табл. 3.3). Для обчислень використано виміряні значення дійсних масштабів для 4-х типів РЕМ, отриманих в роботі [18]. Відзначимо, що зображення тест-об'єкта в різних масштабах, отриманих на одному РЕМ мають однакові коефіцієнти A_f та розмірність D_f у заданому діапазоні збільшень.

Значення коефіцієнтів A_{xf} (A_{yf}) та показників степенів D_{xf} (D_{yf}) фрактальних масштабів M_{xf} (M_{yf})

№	Назва PEM	Діапазон M^x	A_{xf}	D_{xf}	A_{yf}	D_{yf}
1	JCM-5000 (NeoScope) (JEOL, Японія)	1000 ^x -30000 ^x	1,02868436	1,00399655	1,05475106	1,00625075
2	JSM 7100F (JEOL)	2000 ^x -30000 ^x	0,86324953	0,98177745	0,89896265	0,98569637
3	DSM-960A (Carl Zeiss)	1000 ^x -20000 ^x	1,92949231	0,99933573	2,08935202	1,01200954
4	PEM 106I (BAT Selmi)	1000 ^x -25000 ^x	3,04724281	1,00869793	3,10717019	1,01240569

Можна відзначити, що дійсні і фрактальні масштаби для PEM JCM-5000 та PEM JSM 7100F несуттєво відрізняються від масштабів, встановлених на шкалі PEM. Для PEM DSM-960A та PEM 106I спостерігаються значні відхилення від масштабів, встановлених на шкалі приладів, як для дійсних так і для фрактальних масштабів. Виконані розрахунки дали уточнені значення коефіцієнтів пропорційності A_{xf} (A_{yf}) для PEM DSM-960A та PEM 106 I (див. табл. 3.3).

Отже, без врахування знайдених масштабних коефіцієнтів результати вимірювань для PEM DSM-960A та PEM 106I будуть некоректними і приведуть до значних помилок у визначенні кількісних характеристик дослідних мікроповерхонь. Результати досліджень цих PEM і дійсні масштаби цифрових PEM-зображень були отримані раніше в роботах [4, 14, 17].

Відомо, що фрактальна розмірність теоретично знаходиться в межах $1 < D < 2$ для одновимірного випадку. Зауважимо, що для JSM 7100F та PEM DSM-960A отримані експериментально значення експоненціальних показників є меншими ніж 1. Тому величину A_f будемо інтерпретувати як коефіцієнт подібності (пропорційності), а експоненціальний показник D_f як скейлінговий показник.

В роботі проілюстровано застосування визначених коефіцієнтів пропорційності A_{xf} , A_{yf} і експоненціальних показників D_{xf} , D_{yf} за якими отримано фрактальні масштаби M_{xf} , M_{yf} на прикладі опрацювання цифрового PEM-зображення тест-об'єкта, отриманого на PEM JSM 7100F при фіксованому збільшенні на шкалі приладу $M=10000^x$.

Векторні діаграми на рис. 3.6 а ($M=10000^x$) наочно ілюструють радіальний характер спотворень від центра зображення до країв, а на рис. 3.6 б, після врахування фрактальних масштабів PEM-зображень ($M_{xf}=10207,39^x$, $M_{yf}=10263,96^x$) спостерігаємо картину дисторсійних спотворень. Зауважимо, що після апроксимації з використанням поліному загального виду 3-го степеня двох змінних векторні діаграми на рис. 3.6 в, г демонструють однакову картину залишкових спотворень. Вектори для наочності збільшено у 20 разів.

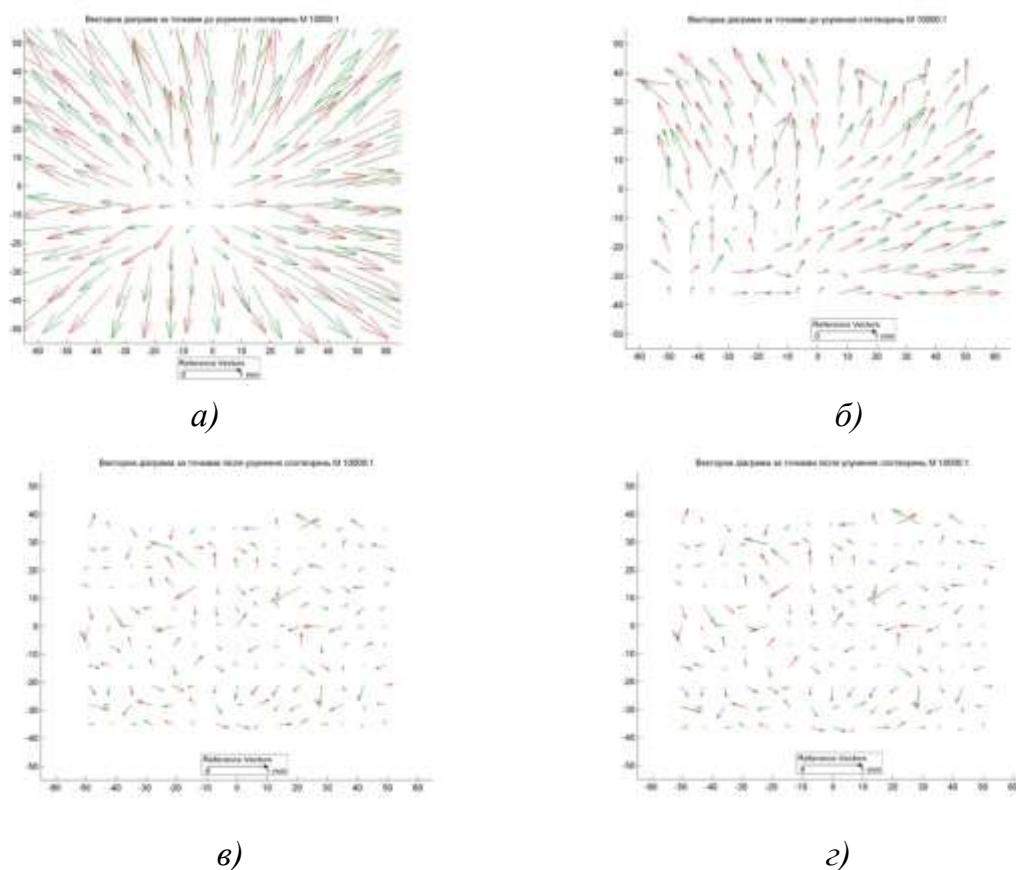


Рис. 3.6. Векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ (JSM 7100F) - зображень до (а, б) і після їх апроксимації (в, з)

Таким чином можна зробити висновок, що коефіцієнти пропорційності A_{xf} , A_{yf} і експоненціальні показники D_{xf} , D_{yf} для кожного типу РЕМ є константами, незалежно від величини збільшення. Отже вони дозволяють отримати так звані «фрактальні» масштаби, які можна вважати дійсними і використовувати разом з коефіцієнтами поліному загального виду третього степеня для врахування геометричних спотворень РЕМ-зображень. За відсутності калібрувальних тест-об'єктів, які складно виготовити і ними не обладнані мікроскопи, ці константи дозволять врахувати наявні спотворення РЕМ-зображень і отримувати просторові координати мікроповерхонь дослідних об'єктів з необхідною точністю.

Автоматизоване опрацювання РЕМ-зображень зводилось 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-го степеня.

Задача автоматизованого розпізнавання вузлів тест-об'єкту полягає у знаходженні координат центрів зображень вузлів тест-об'єкту для різних масштабів (збільшення). Для розв'язку цього питання 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.) усуваються 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.

Алгоритм розв'язку складається із наступних кроків:

1. Обчислення кроку еталонного тест-об'єкту в мкм.
2. Обчислення кроку еталонного тест-об'єкту в пікселях для масштабного ряду 1000^x , 2000^x , 5000^x , 8000^x та 15000^x .
3. Завантаження зображення тест-об'єкта.
4. Згладження зображення з використанням низькочастотного фільтра «гауссіан».

Першим етапом процесу є відділення вузлів від фону, що містить несуттєві деталі. Для згладження зображення використано просторовий ізотропний фільтр «гауссіан», що має однакове стандартне відхилення вздовж обох вимірів. Це дозволяє уникнути деформації зображення вузлів тест-об'єкта і запобігти зсуву їх центрів.

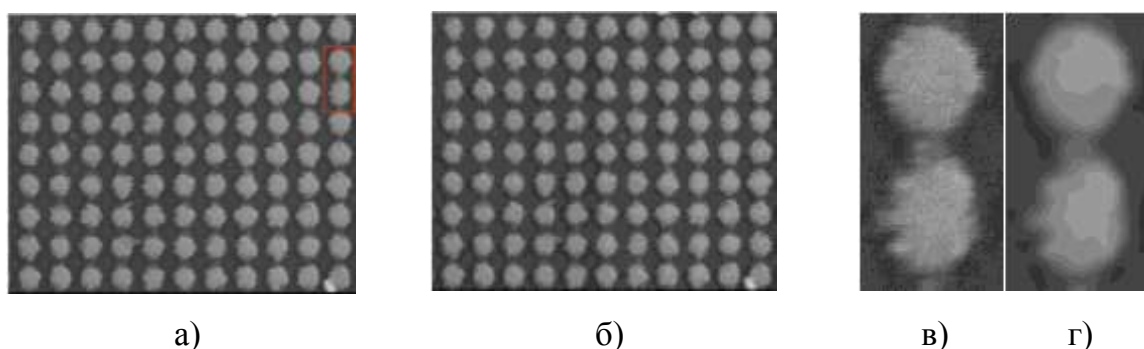


Рис. 3.7. РЕМ (JCM-5000) - зображення тест-об'єкта $M=15000^x$ (а).

Згладжене зображення (б). Фрагмент зображення вузлів (в). Результат згладжування (г) (розмір маски 15×15 пікселів, значення $\sigma = 5$)

В залежності від масштабу (збільшення) ступінь згладження регулюємо зміною розміру маски і значенням σ (рис. 3.7).

5. Бінаризація зображення з автоматичним вибором порогу методом Отсу.

На другому етапі виконано морфологічну фільтрацію бінарного зображення. Вхідними даними для операцій математичної морфології є два бінарних зображення: основне зображення тест-об'єкту і спеціальне, яке називають структурним елементом або примітивом, що значно менше основного зображення.

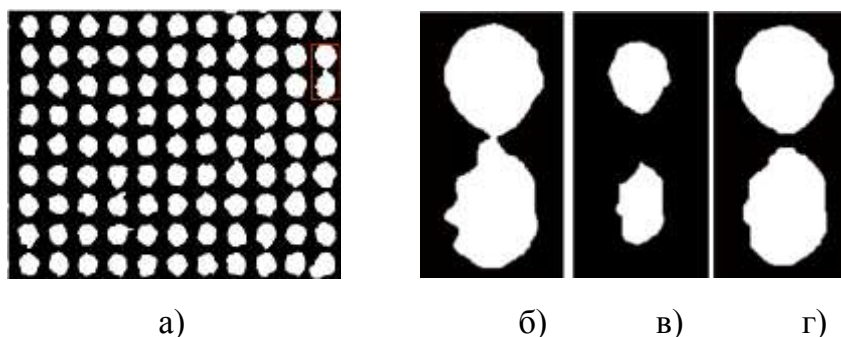


Рис. 3.8. Морфологічна операція розкриття зі структурним елементом у формі кола. Бінарне зображення $M=15000^x$ (а). Фрагмент бінарного зображення (б). Результат ерозії (в). Результат розкриття (г) - операція діляції застосована до зображення (в)

6. Виконання морфологічної операції розкриття (*opening*) з структурним елементом (примітивом) у формі круга. (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).

В результаті виконання морфологічної операції розкриття отримуємо згладжені контури вузлів, видаляємо зруйновані перемички, видалені зубчасті елементи границь (рис. 3.8).

Після морфологічної фільтрації на *третьому* етапі визначаються зовнішні межі вузлів. Далі визначаються зв'язані між собою частини контурів вузлів, їх піксельні координати і координати центрів вузлів.

7. Визначення координат центрів та контурів зображень вузлів тест-об'єкту.

На *четвертому* етапі виконується процедура відбракування зміщених центрів спотворених вузлів. Запропоновано універсальний алгоритм відбракування, який полягає у побудові кіл, наближених до виділених контурів зображень вузлів. Далі визначається середній радіус кіл та видаляються центри вузлів, у яких радіуси кіл відхиляються від середнього значення більше ніж на заданий допуск. Обчислювальна процедура полягає у визначенні координат центра та радіуса кола за координатами точок контуру вузла, що складається із розв'язку системи нормальних рівнянь.

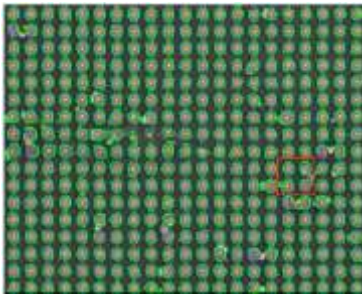


Рис. 3.9. РЕМ (JCM-5000) - зображення тест-об'єкта $M=8000^x$ після морфологічної фільтрації з нанесеними контурами вузлів, побудованими колами, центроїдами та центрами кругів

8. Підбір кола для виділених контурів зображень вузлів тест-об'єкта. Визначення координат центра кола та радіуса методом найменших квадратів. Відбракування вузлів для яких $|r_i - r_{сер}| \geq e$, 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).

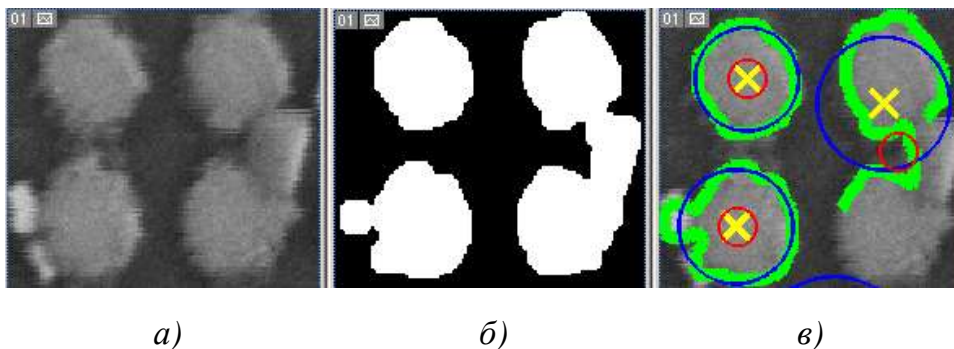


Рис. 3.10. Спотворені вузли на фрагменті вхідного зображення $M 8000^x$ (а). Результат морфологічної фільтрації (б). Побудовані кола - синій колір, контури вузлів – зелений колір, жовті хрестики – центри кіл, червоні кружечки - центроїди (в)

На рис. 3.10 б показано, що після морфологічної фільтрації залишились перемички за розміром більші ніж структурний елемент, завдяки чому центроїд (червоний кружечок) помітно зміщено. Так як радіус відповідного кола більше середнього значення (рис. 3.12 в), то такий центроїд видаляється.

На *n'*тому етапі виконується процедура сортування рядків двовимірного масиву визначених координат центроїдів, центрів кругів та їх радіусів за координатою y , а потім для кожного y впорядкування за зростанням x . Впорядкований масив значень координат центроїдів, центрів кіл та їх радіусів у пікселях записується у файл результатів.

Для контролю роботи програми і оцінки точності результатів нами вручну виміряні координати центрів вузлів тест-об'єктів для масштабного ряду 1000^x , 2000^x , 5000^x , 8000^x , 10000^x , 15000^x крат. На рисунках 3.9, 3.10 (а-в) показано вхідні зображення з нанесеними центрами вузлів (крім відбракованих): позначені жовтим символом “x” – виміряні вручну; центроїди, обчислені програмним шляхом - червоним символом “+”. Візуальний аналіз рисунків 3.9, 3.10 показує, що у більшості випадків, обчислені і виміряні вручну центри збігаються. Розбіжності у місцезнаходженні центрів спостерігаються для вузлів, розташованих на краю зображень і лише частково відображених, де оператор на око визначав розташування центру (див. $M=5000^x$ і $M=8000^x$). Ступінь розсіяності розподілу значень різниць (в пікселях) $\Delta x_i = x_{роз} - x_{вим_i}$, $\Delta y_i = y_{роз} - y_{вим_i}$ між розпізнаними і виміряними центрами вузлів навколо їх середнього центра подано на діаграмах рис. 3.11, 3.12 (в-з).

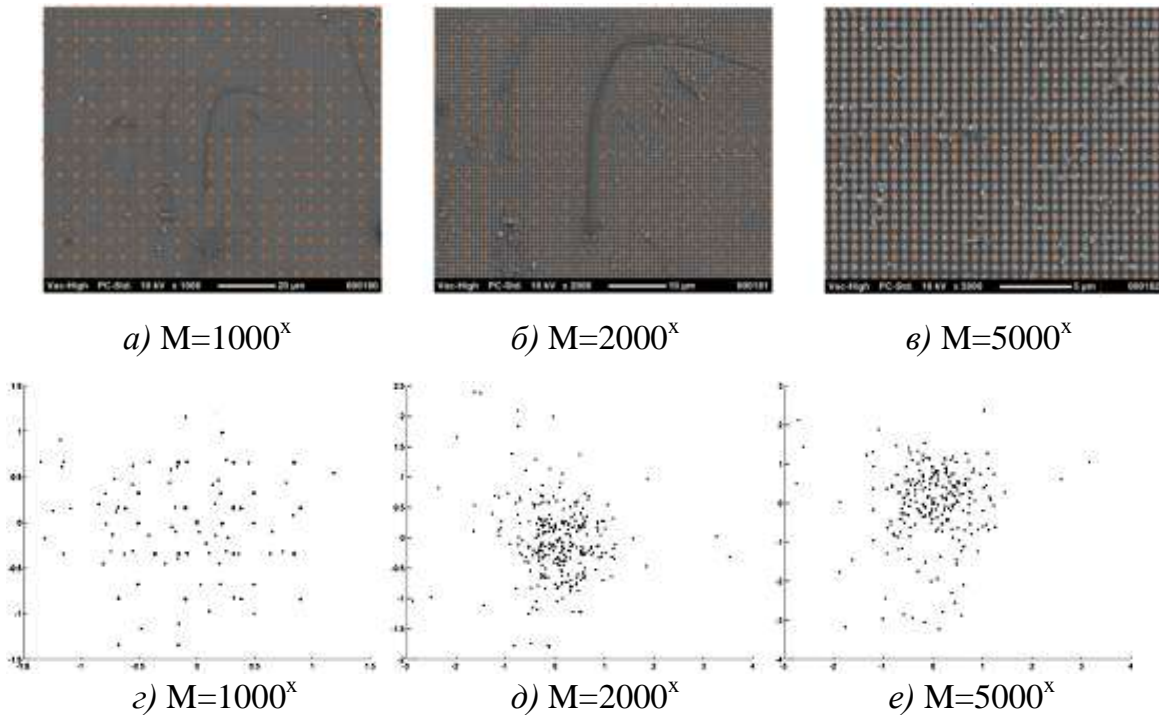
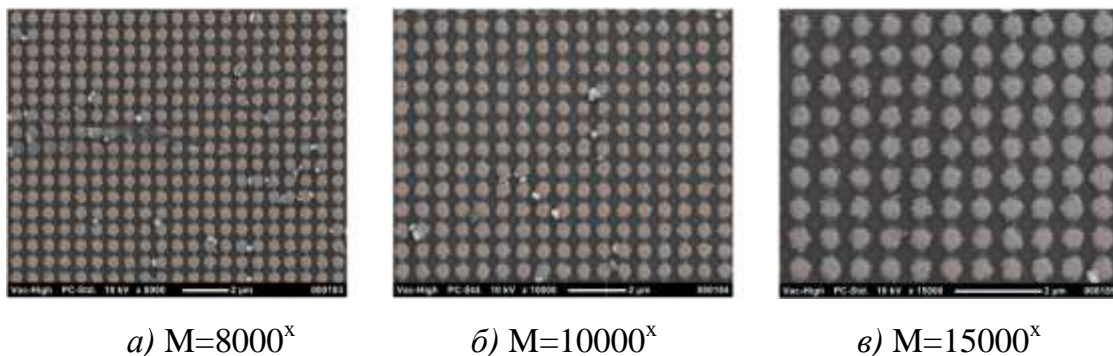


Рис. 3.11. РЕМ (JCM-5000) - зображення тест-об'єкта з нанесеними центрами вузлів (а-в) і діаграми розподілу відхилень (у пкс) (з-е) при $M= 1000^x$, 2000^x , 5000^x



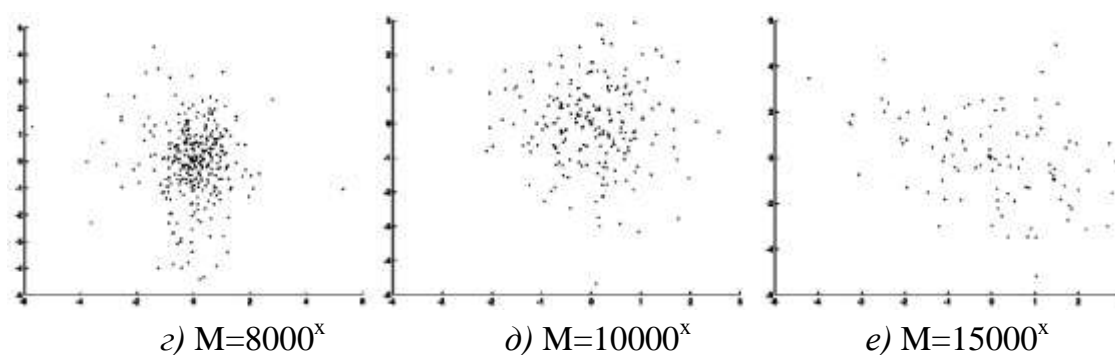


Рис. 3.12. PEM (JCM-5000) - зображення тест-об'єкта з нанесеними центрами вузлів (а-в) і діаграми розподілу відхилень (у пкс) (г-е) при $M=8000^x$, 10000^x , 15000^x

Як бачимо із наведених діаграм розподілів відхилень, основна маса значень різниць згрупована навколо середнього значення і становить для масштабів: $M=1000^x$, $M=2000^x$ - $\Delta x, \Delta y \leq |2|$; $M=5000^x$, $M=8000^x$, $M=10000^x$, $M=15000^x$ - $\Delta x, \Delta y \leq |3|$ пікселів. Лише для окремих центрів вузлів спостерігаються відхилення до 4 пікселів, зокрема для $M=5000^x$, $M=8000^x$, де ряд вузлів розташовані на краю зображення. Додаткову інформацію, що характеризує точкові розподіли надає середня відстань між кожною точкою розподілу і середнім центром. Середню відстань визначаємо як:

$$R_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^N D_{ci}}{N}, \quad (3.3)$$

де N – кількість точок, а D_{ci} – відстань між i -ою точкою і центром.

9. Порівняння координат розпізнаних та вимірних вручну центрів зображень вузлів за значенням середньої відстані між розпізнаними та вимірними вузлами (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Значення середніх відстаней між центрами розпізнаних та вимірних вузлів тест-об'єкта

Масштаб PEM-знімків	Кількість вузлів тест-об'єкта вздовж осей x і y PEM-знімка	Кількість розпізнаних вузлів	Кількість вузлів після відбракування за сер. радіусом	Кількість вимірних вузлів	Сер. відстань між вимір. і розпізн. вузл. 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 вимірних вузлів, що збігаються з розпізнаними після відбракування.

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

10. Запис координат розпізнаних центрів вузлів у файл, встановлення величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень та їх врахування.

Для визначення величин геометричних спотворень за координатами розпізнаного центра вузла тест-об'єкта знаходимо відповідний вузол істинної тест-сітки і його координати.

Аналіз отриманих результатів апроксимації для РЕМ JCM-5000 у діапазоні від 1000^x до 15000^x з використанням вимірних дійсних масштабів та наведених у табл. 3.3 "фрактальних" експериментально підтверджує зв'язок дійсних масштабів з фрактальною розмірністю.

За визначеними автоматично координатами вузлів тест-об'єкта з використанням дійсних масштабів РЕМ-зображень нами було встановлено величини їх геометричних спотворень, які проілюстровані у вигляді векторної діаграми. Вектори для наочності збільшено у 20 разів. (рис. 3.13 а).

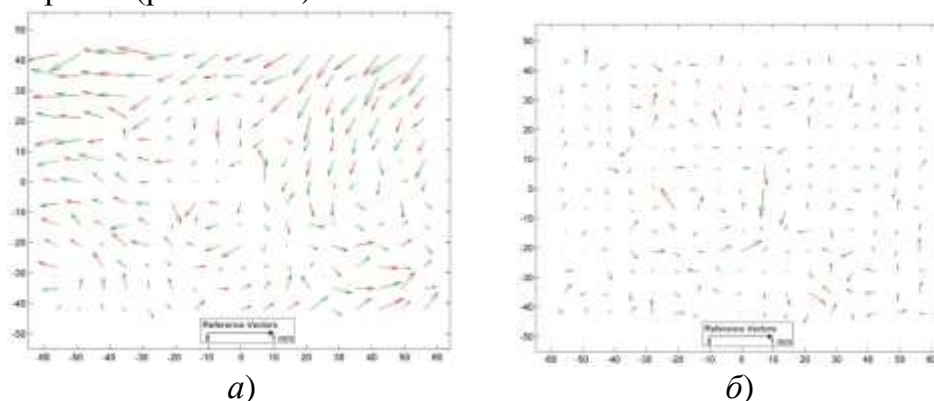


Рис. 3.13. Векторна діаграма спотворень РЕМ (JCM-5000) - зображення до - а) і після - б) їх апроксимації поліномом

Далі геометричні спотворення РЕМ-зображень були нами програмно апроксимовані з використанням поліному загального виду 3-го степеня.

Порівнюючи рис. 3.13 а і рис. 3.13 б 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. 3.5).

Таблиця 3.5

Результати апроксимації геометричних спотворень РЕМ (JCM-5000)-зображень тест-об'єкту з $r=1425$ лін/мм за вимірними вручну точками контролю і розпізнаними автоматично

№ П/П	$M_{РЕМ}$	За вимірними вручну точками				За точк. розпізнаними автоматизовано			
		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

Автоматизована технологія, як і передбачалось, суттєво скорочує час виконання усіх технологічних операцій. Наприклад, на вимірювання і опрацювання цифрового РЕМ-зображення тест-об'єкту при $M=2000^x$ за програмами «Test Measuring» і «Polycalc», а далі на отримання векторних діаграм спотворень з використанням програми Surfer досвідченому оператору необхідно затратити не менше 1-1,5 години. Тоді як в автоматизованому режимі, за розробленою технологією і програмами, складеними в середовищі MatLab к.т.н. Тумською О. В., ця процедура, виконана в режимі інтерпретації, займає 5-10 хвилин. При цьому виключаються і помилки оператора.

За результатами проведених знаних за обсягом експериментальних робіт можна зробити висновок, що розроблена нами технологія автоматизованого вимірювання і калібрування цифрових РЕМ-зображень є ефективною і значно скорочує час на виконання цієї важливої і водночас трудомісткої та часозатратної процедури.

У четвертому розділі «**Моделювання рельєфу мікроповерхонь об'єктів за їх цифровими РЕМ-стереозображеннями**» розглянуто теоретичні та практичні аспекти цифрового моделювання мікрорельєфу дослідних об'єктів за їх РЕМ-стереознімками. У цьому ж розділі приведені результати досліджень методики автоматизованої побудови цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за стереопарою цифрових РЕМ-зображень для трьох різних моделей та виконана оцінка точності для кожної з них.

Досліджено доцільність і ефективність використання відомих у практиці методів математичного моделювання і пакетів програм виключно для задач РЕМ-фотограмметрії, в тому числі для побудови ЦММР мікроповерхонь дослідних об'єктів.

Досліджена побудова ЦММР з використанням тих математичних моделей, які реалізовані у програмному пакеті Surfer 10.0, а також у програмному комплексі «Dimicros». В результаті були побудовані цифрові моделі мікрорельєфу дослідних об'єктів: фрагментів поверхонь лесового ґрунту та металевих деталей різними методами математичного моделювання, встановлена їх точність та дано рекомендації щодо доцільності та ефективності їх застосування.

Вхідними матеріалами для досліджень були цифрові РЕМ-стереознімки мікроповерхонь:

а) лесового ґрунту (отримані на РЕМ Hitachi S-800 при збільшенні $M=1000^x$) (рис. 4.1):



Рис. 4.1. Стереопара мікроповерхні лесового ґрунту, отримана на РЕМ «Hitachi» S-800 при $M = 1000^x$ і кутах нахилу гоніометричного столика $\alpha_n = 0^\circ$, $\alpha_n = +8^\circ$

б) зламу металічної деталі внаслідок механічного навантаження (отримані на вітчизняному РЕМ 106I ВАТ «SELMI», м. Суми при збільшенні $M=42^x$) (рис. 4.2 а);

в) деформованій поверхні хромованої сталі (отримані на РЕМ JSM-710F фірми JEOL, Японія при збільшенні $M=750^x$) (рис. 4.2 б).

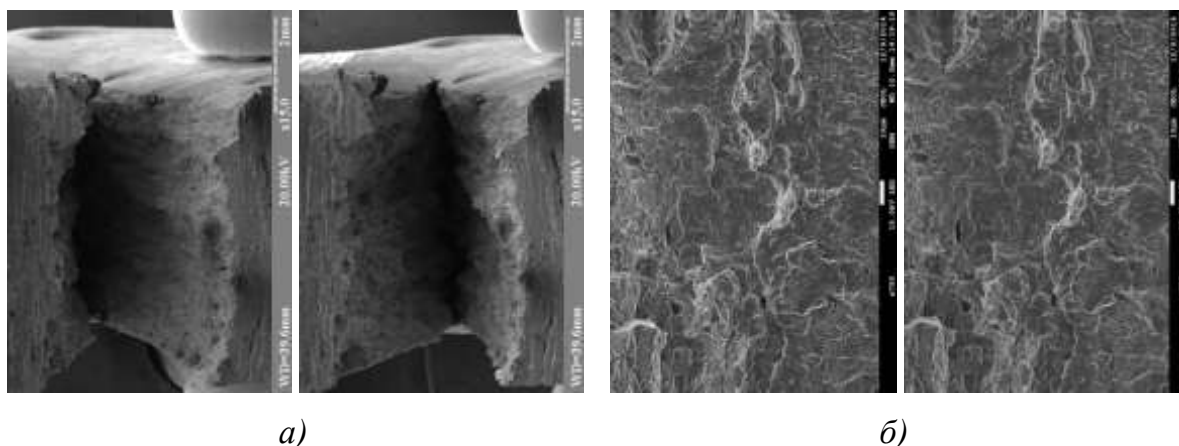


Рис. 4.2. Стереопари: а) мікроповерхні зламу металу (РЕМ 106I, $M=42,7^x$, $\alpha_l = -6^\circ$, $\alpha_n = +6^\circ$), б) мікроповерхні хромованої сталі (JSM-7100F, $M=750^x$, $\alpha_l = 0^\circ$, $\alpha_n = +8^\circ$)

Усі РЕМ-стереопари отримані нормально-конвергентним випадком РЕМ-знімання: лівий знімок при $\alpha_l=0^\circ$, правий - $\alpha_{np}=6^\circ(8^\circ)$.

Вимірювання РЕМ-стереопар виконувались на цифровій фотограмметричній станції «Дельта» з застосуванням комплексу програм «Dimicros» і з врахуванням геометричних спотворень РЕМ-зображень, які були встановлені раніше. Вимірювання стереозображень виконувались рівномірно по всьому полю мікроповерхні у всіх її характерних точках за структурними елементами. Для різних мікроповерхонь вимірювалась різна кількість точок, зокрема для найбільш складного рельєфу мікроповерхні лесового ґрунту загалом виміряно 950 точок, з яких 850 використовувалось для математичного моделювання мікроповерхні і створення ЦММР, а 100 – для оцінки точності використаного методу. На мікроповерхні зламу металу виміряно 500 точок, з яких для моделювання використано 450 і 50 для контролю. І на поверхні хромованої сталі виміряно 300 точок, з яких 250 використовувалось для моделювання поверхні і 50 – для оцінки точності методу моделювання. Просторові умовні координати точок мікроповерхні $X, Y, Z(h)$ визначались за формулами нормально-конвергентного випадку РЕМ-знімання (2.12). Початок просторових координат точок для кожної стереопари вибиралось стереоскопічно в геометричному центрі лівого знімка і їм присвоєно нульові значення. Розміри ділянки знімання мікроповерхні лесового ґрунту склали приблизно 90×100 мкм. Перепад висот в межах ділянки близько 40 мкм.

Для побудови ЦММР використано 14 основних математичних методів програмного пакету Surfer 10.0, наведених у табл. 4.1.

Послідовність побудови ЦММР наступна: після вибору методу моделювання з заданого масиву координат точок (X, Y, Z) будувалась регулярна сітка з кроком приблизно 1 мкм (89×100 перехресть, розширення .grid). За регулярною сіткою (ЦММР) надалі графічно будувались плани мікроповерхонь в горизонталях і 3D зображення мікроповерхні, які представлені на рис. 4.3-4.5.

Оцінка точності побудови ЦММР виконувалась двічі: за висотами точок всього масиву виміряних точок і окремо за контрольними точками, тобто за різницями висот між виміряними координатами $Z(h)$ і отриманими висотами в результаті інтерполювання за побудованою регулярною сіткою тим чи іншим методом.

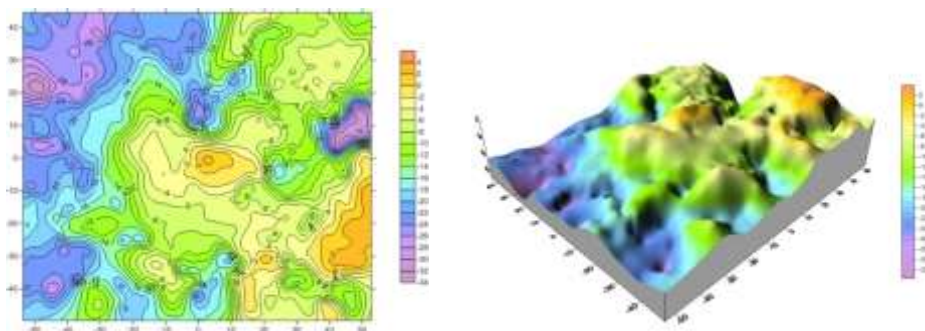
Теоретична точність отримання висот точок мікроповерхні при даних параметрах РЕМ-знімання складає: для поверхні лесу - близько $m_{z, теор} \approx 1,0$ мкм, для поверхні зламу металу - $m_{z, теор} \approx 0,1$ мм, для поверхні хромованої сталі $m_{z, теор} \approx 1,5$ мкм.

В таблиці 4.1 приведені результати оцінки точності моделювання лише мікроповерхні лесового ґрунту різними математичними методами, як поверхні з найбільш складним рельєфом. Нижче на рис. 4.3÷4.5 приведені приклади графічного представлення мікроповерхні лесового ґрунту у вигляді мікропланів та 3D моделей, побудованими різними математичними методами за вимірними точками з використанням програм пакету Surfer.

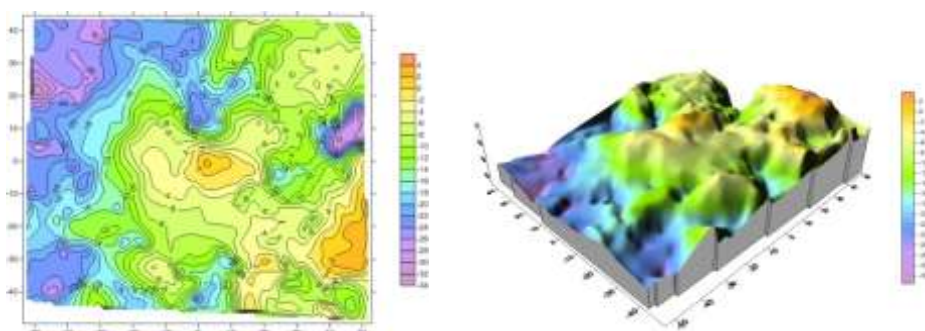
Таблиця 4.1

**Результати оцінки точності побудови мікроповерхні лесу
з використанням різних математичних моделей**

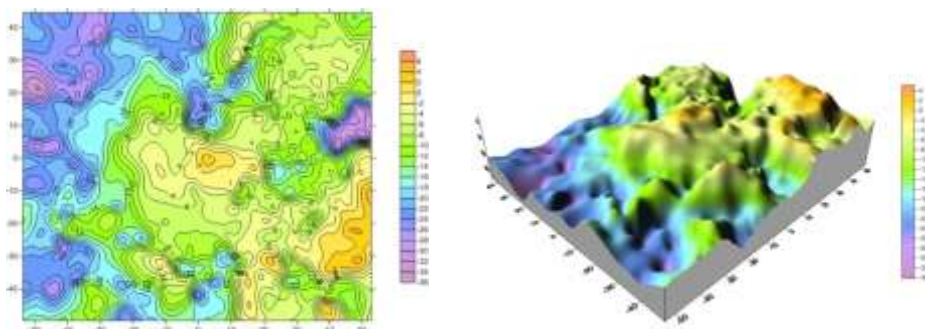
№	Метод моделювання	К-ть т. мод. контр.т.	ΔZ_{\min} , МКМ	ΔZ_{\max} , МКМ	Ср. арифм. знач. $\sum \Delta Z/n$, МКМ	Ср. квадр. відхил. $m_{\Delta Z}$, МКМ
1	Обернено-пропорційний відстані у степені Inverse Distance to a Power	850	-2,6	2,5	0,014	0,86
		100	-4,9	2,2	0,318	1,30
2	Крайгінга (лінійна варіограма) Kriging (linear variogram model)	850	-2,0	2,1	-0,013	0,56
		100	-1,7	2,5	-0,058	0,84
3	Крігінга (лінійна варіограма+ лін. тренд) Kriging (linear variogram + linear drift)	850	-2,0	2,1	-0,013	0,56
		100	-1,7	2,5	-0,057	0,84
4	Крігінга (лінійна варіограма +квдр. тренд) Kriging (linear variogram + quadratic drift)	850	-2,0	2,1	-0,015	0,56
		100	-1,7	2,5	-0,046	0,86
5	Мінімальної кривизни Minimum Curvature	850	-2,1	3,0	0,008	0,54
		100	-2,8	3,0	-0,094	1,14
6	Природних околів Natural Neighbor	850	-4,5	4,1	0,035	0,71
		100	-1,5	1,2	-0,041	0,65
7	Сусідніх околів Nearest Neighbor	850	-1,8	2,4	0,014	0,27
		100	-3,6	3,6	-0,005	1,18
8	Радіальних базисних функцій RBF (Inverse Multiquadric)	850	-2,0	1,6	-0,007	0,53
		100	-2,2	1,5	0,035	0,71
9	Радіальних базисних функцій RBF (Multilog)	850	-1,4	1,4	-0,010	0,36
		100	-1,4	1,6	-0,079	0,73
10	Радіальних базисних функцій RBF (Multiquadric)	850	-1,2	1,1	-0,015	0,27
		100	-2,0	2,2	-0,114	0,89
11	Радіальних базисних функцій RBF (Natural Cubic Spline)	850	-1,0	0,8	-0,023	0,20
		100	-2,3	1,5	-0,311	0,95
12	Радіальних базисних функцій RBF (Thin Plate Spline)	850	-1,0	0,9	-0,020	0,23
		100	-2,0	1,7	-0,189	0,78
13	Триангуляції з лінійною інтерполяцією (Triangulation with Linear Interpolation)	850	-2,3	2,3	-0,036	0,78
		100	-2,0	1,5	-0,083	0,74
14	Шепарда (модифікований) Modif. Sheppard's Method	850	-1,4	1,1	-0,024	0,24
		100	-5,9	4,5	-0,420	1,76



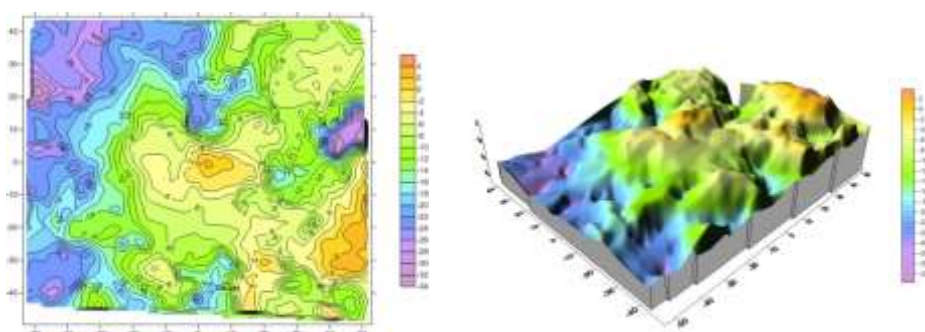
а) Крігінга (лінійна варіограма)



б) природних околів

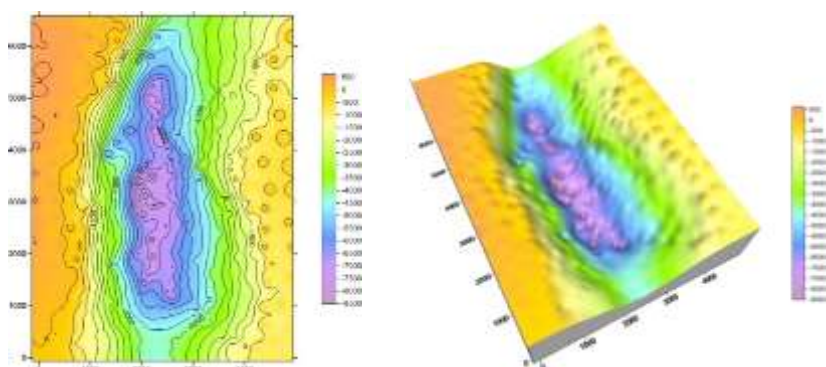


в) РБФ, метод тонкого пластинчастого сплайну

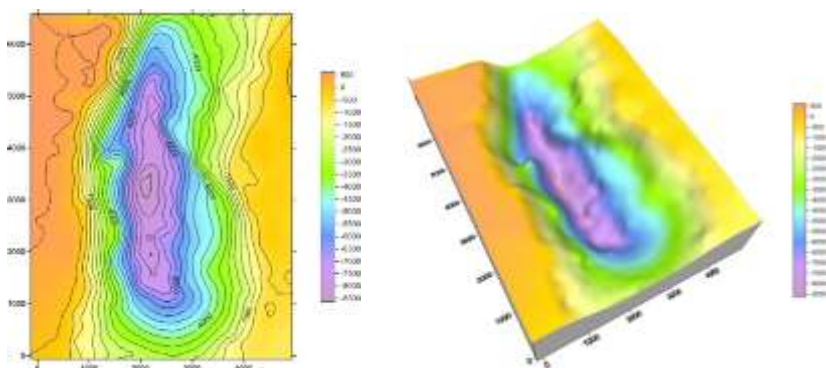


г) триангуляції з лінійною інтерполяцією

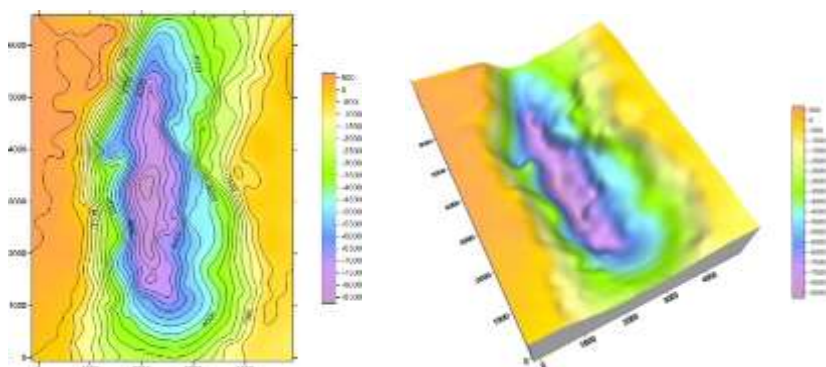
Рис. 4.3. Приклади графічного представлення мікроповерхні лесового ґрунту у вигляді мікропланів та 3D моделей, побудованими різними математичними методами за 850 вимірними точками



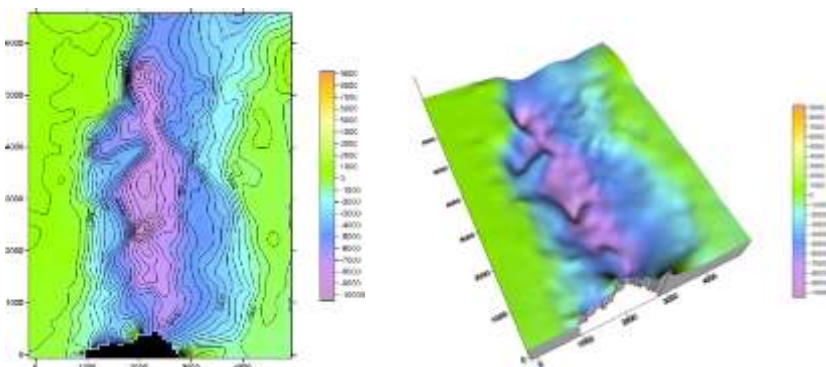
а) обернено-пропорційний відстані у степені



б) Крігінга (лінійна варіограма)

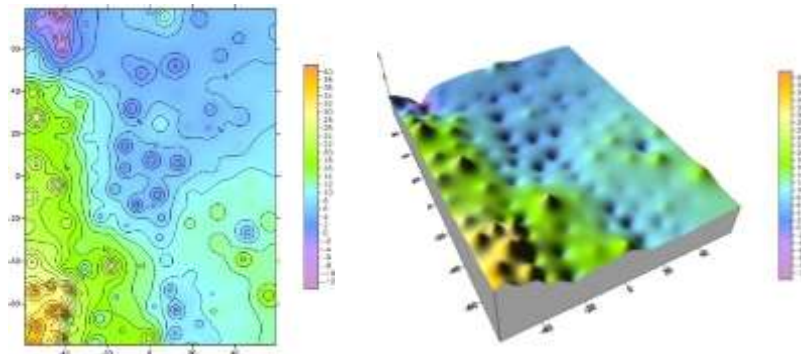


в) РБФ, мультіквадрикковий метод

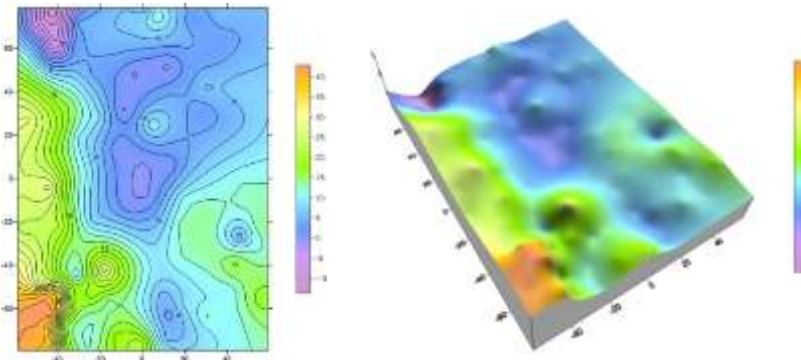


г) Шепарда (модифікований)

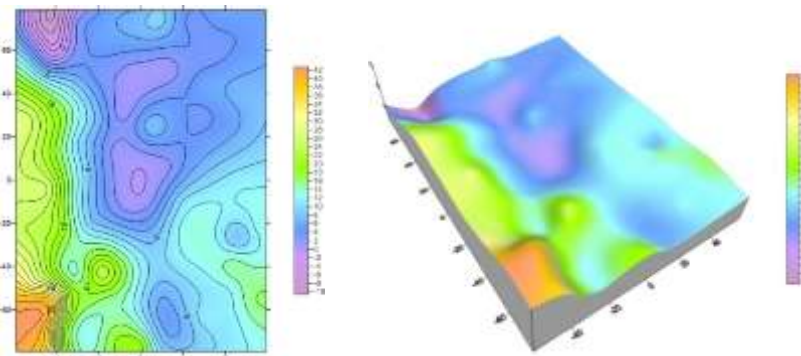
Рис.4.4. Приклади графічного представлення мікроповерхні зламу металу у вигляду мікропланів та 3D моделей, побудованими різними математичними методами за 450 вимірними точками



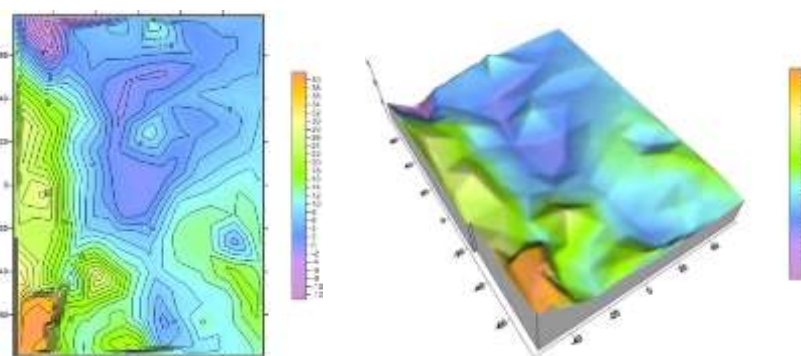
а) обернено-пропорційний відстані у степені



б) Крігінга (лінійна варіограма)



в) РБФ, мультіквадриковий метод



г) триангуляції з лінійною інтерполяцією

Рис. 4.5. Приклади графічного представлення мікроповерхні хромованої сталі у вигляді мікропланів та 3D моделей, побудованими різними математичними методами за 250 вимірними точками

На підставі виконаних досліджень нами запропоновано класифікацію типів мікрорельєфу дослідних об'єктів, рекомендовано оптимальну кількість вимірних точок для кожного з них та запропоновано найбільш ефективні математичні методи для побудови цифрових моделей мікрорельєфу поверхонь об'єктів з необхідною точністю, які подано у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Рекомендації щодо оптимальної кількості точок і вибору математичної моделі для побудови ЦММР ($M=1000^x$)

№	Тип рельєфу мікроповерхні	min к-ть точок	Оптим. к-ть т.	Вид мат. моделі (методи)
1	Плоский, мікрорівнинний, перепад висот $\Delta h = \pm 2,5$ мкм	100	250	Радіальних базисних функцій (РБФ) Крігінга Мін. кривизни
2	Мікрогорбистий, $\Delta h = \pm 5$ мкм	200	500	РБФ, Крігінга Природних околів
3	Мікрогористий, без різких перепадів висот, $\Delta h = \pm 10$ мкм	400	1000	РБФ, Крігінга Трианг. з лін. інт.
4	Складний, мікрогористий, зі значними перепадами висот, $\Delta h = \pm 20$ мкм	800	2000	РБФ Крігінга Трианг. з лін. інт.
5	Складний, мікрогірський, з різкими перепадами висот, $\Delta h = \pm 30$ мкм	1200	3000	Комплексні методи

Оптимальним вважаємо вимірювання характерних точок мікроповерхні для плоских мікроповерхонь за регулярною сіткою з кроком 3-5 мм (для РЕМ-знімків, приведених до розміру 120x90 мм), а для складного рельєфу - за структурними лініями та характерними точками мікроповерхні об'єкта з подальшим їх математичним згущенням у вигляді регулярної сітки з кроком 1 мм в масштабі цифрового РЕМ-знімка.

Оптимальна кількість точок – 1-3 точки на 10-20 мм² РЕМ-знімка розміром 120x90 мм (1280x960 пікселів) або 500-3000 точок на весь знімок площею $S=10800$ мм², в залежності від складності мікрорельєфу поверхні об'єкта.

У цьому ж розділі приведені дослідження методики автоматизованої побудови цифрових моделей мікрорельєфу (ЦММР) поверхонь дослідних об'єктів за їх цифровими РЕМ-стереопарами.

Для дослідження впливу параметрів, що використані під час кореляційного ототожнення та оцінки точності при побудові ЦММР використано *тестову модель* фрагменту мікроповерхні хромованої сталі (рис. 4.2 б), яка побудована в пакеті Surfer за результатами вимірів РЕМ (JSM-7100F) - стереопари, виконаних вручну з використанням програми «Dimicros» та *три типи* автоматизованої побудови моделей:

- *модель 1* побудована за вимірними точками лівого знімка та знайденими за кореляцією відповідними точками правого знімка РЕМ - стереопари. Оцінка точності виконувалась за різницями між висотами *тестової моделі* та *моделі 1* безпосередньо в точках вимірів;

- *модель 2* побудована за програмно згенерованими точками (вузлами) регулярної сітки на лівому знімку та відповідними точками правого знімка, знайденими

за кореляцією. Оцінка точності виконувалась за різницями відповідних висот вузлів сіток регулярних моделей (*тестової* та *моделі 2*), побудованих в пакеті Surfer з однаковими параметрами. Перед оцінкою точності для усунення аномальних точок – викидів до моделі 2 застосовувалась адаптивна медіанна фільтрація;

- *модель 3* створено на основі точок, згенерованих за модулем градієнта на лівому знімку стереопари, відповідні точки правого знімка, знаходились за кореляційним підходом. Оцінка точності та усунення викидів виконувалось способом аналогічним для моделі 2.

Обчислення нормованого коефіцієнта кореляції під час кореляційного ототожнення точок виконувалось за формулою:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w_{i,j} - \bar{w})(w'_{i,j} - \bar{w}')}{\left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w_{i,j} - \bar{w})^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w'_{i,j} - \bar{w}')^2 \right]^{1/2}}, \quad (4.1)$$

де w (w') – значення яскравості у кореляційному вікні лівого та його образу на правому зображенні; \bar{w} , (\bar{w}')- відповідні середні значення яскравостей; $N = m \times n$ - розмір кореляційного вікна. Коефіцієнт кореляції визначався між кореляційним вікном на лівому зображенні, який нами встановлено однаковим для всіх моделей, а саме 17x9 пікселів (далі – пкс) та відповідним вікном, локалізованим у кожному пікселі пошукового вікна на правому зображенні. З метою прискорення обчислень визначався квадрат коефіцієнта кореляції.

Важливим параметром успішного виконання кореляційного ототожнення є правильний підбір розміру пошукового вікна. Розмір пошукового вікна залежить від значення поздовжнього паралаксу, тобто від перепаду висот мікроповерхні. Якщо задати можливі межі значень поздовжніх паралаксів та кути нахилу знімків, то для випадку нормально-конвергентного РЕМ-знімання за формулами (2.4) визначимо очікуваний горизонтальний розмір вікна-пошуку для відповідного діапазону значень висот (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Розмір вікна-пошуку в залежності від діапазону значень висот

№ п/ п	Значення паралаксів від p_1 до p_2 , (пкс)	Розмір вікна пошуку вздовж осі x , (пкс)	Значення висот від Z_1 до Z_2 , мкм ($M=750^x$)
Кути нахилу знімків $\alpha_s = 0^\circ$, $\alpha_n = 8^\circ$			
1	1 - 20	41x15	5,0 – 22,0
2	21 - 40	81x17	22,1 – 40,0
3	41 - 65	131x21	40,1 – 65,0

Горизонтальний розмір вікна пошуку приблизно в 2 рази більший, ніж верхня границя паралаксу у вибраному діапазоні. Вертикальний розмір вікна пошуку вибираємо в діапазоні 11-25 пікселів, так як зміщення вздовж осі у під час нахилу правого знімка, як правило, незначні.

Для *моделі 1* для 250-ти вимірних точок на лівому знімку за кореляцією визначено відповідні точки на правому знімку. Оцінку точності (табл. 4.4) виконувалось

за точками, для яких значення коефіцієнта кореляції задовольняли допуску (варіант 1 допуск $R_c=0,5$, варіант 2 – $R_c=0,6$, варіант 3 – $R_c=0,7$).

Таблиця 4.4

Оцінка точності цифрового моделювання мікроповерхні зразка сталі порівнянням тестової моделі та моделі 1

Параметри моделі 1		Масштаб знімання 750^x ; кути нахилу знімків: $\alpha_l = 0^\circ$, $\alpha_n = 8^\circ$, кількість вимірних точок: 250					
№ п/п	Розмір корел. вікна, пкс (лів. знімок)	Розмір вікна пошуку, пкс (прав. знімок)	К-сть точок, для яких $r_{кор} \geq R_c$ n (%)	Сер. знач., $\Delta Z = Z_{вим} - Z_{кор}$ мкм	СКВ $m_{\Delta Z}$, мкм	К-сть аномальних точок	СКВ без аномальних точок $m_{\Delta Z}$, мкм
Допуск для коефіцієнта кореляції $R_c = 0,5$							
1	17x9	41x15	221(88,4)	3,42	11,74	24	2,74
2	17x9	81x17	244(97,6)	0,38	8,02	11	2,11
3	17x9	131x21	248(99,2)	-0,41	11,47	15	1,43
Допуск для коефіцієнта кореляції $R_c = 0,6$							
1	17x9	41x15	203(81,2)	1,67	9,01	14	1,79
2	17x9	81x17	236(94,4)	0,27	7,66	7	1,92
3	17x9	131x21	241(96,4)	-0,32	11,33	12	1,42
Допуск для коефіцієнта кореляції $R_c = 0,7$							
1	17x9	41x15	178 (71,2)	-0,44	3,7	2	1,26
2	17x9	81x17	212 (84,8)	-0,60	3,1	2	1,36
3	17x9	131x21	220 (88,0)	-0,92	9,76	8	1,20

Аналіз таблиці 4.4 показує, що основна кількість точок, у яких висоти містяться в межах від -5 до 20 мкм розпізнаються за пошуковим вікном 41x15 пкс (71-88%). Точки, які мають висоти більше ніж 20 мкм, краще розпізнаються за пошуковими вікнами 81x17 пкс та 131x21 пкс. При виключенні точок, які мали значні розходження у висотах (так звані викиди), середньоквадратичні похибки розходжень висот $m_{\Delta Z}$ при $R_c = 0,6$ $R_c = 0,7$ менші встановленого нами допуску $m_{\Delta Z} \leq 2$ мкм. Однак ті 250 точок були характерними точками моделі і чітко виділялись на поверхні дослідного об'єкту. І такої кількості точок часто недостатньо для відображення мікроформ мікроповерхні об'єкта. Тому нами досліджені були і моделі 2 та 3, зазначені вище.

Модель 2 побудована за програмно згенерованими точками (вузлами) регулярної сітки на лівому знімку та відповідними точками правого знімка, знайденими за кореляцією. Генерування відбувалось з 3 різними кроками сітки: $\Delta x = \Delta y = 15, 20$ і 25 пкс, відповідно кількість вузлів: 5440, 3072 і 1938 точок.

На рис. 4.6 проілюстровано процес визначення кореляційним способом точок на правому знімку за відповідними точками згенерованої регулярної сітки ($\Delta x = \Delta y = 20$ пкс) на лівому знімку стереопари з використанням двох пошукових вікон (41x15, 131x21 пкс).

Як бачимо поріг кореляції $R_C = 0,6$ з використанням послідовно двох вікон пошуку 41×15 пкс і 131×24 пкс пройшло і ідентифіковано загалом 2759 точок з 3072 (89,8%), що є дуже добрим показником. При збільшенні порогу кореляції до $R_C = 0,7$ цей показник залишався в межах 90%.

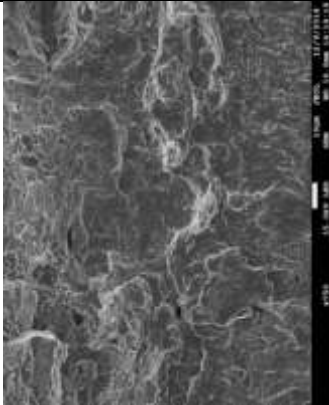
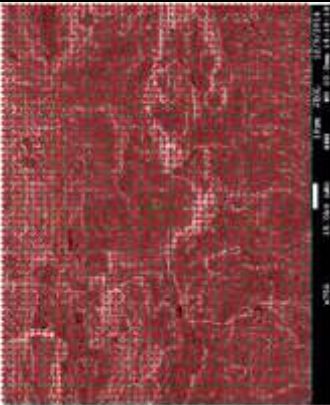
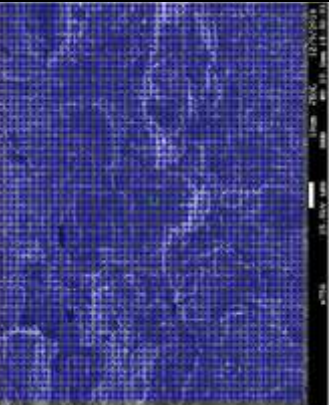
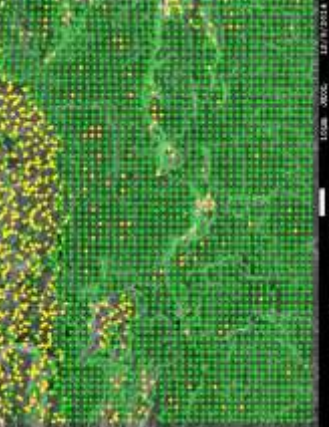
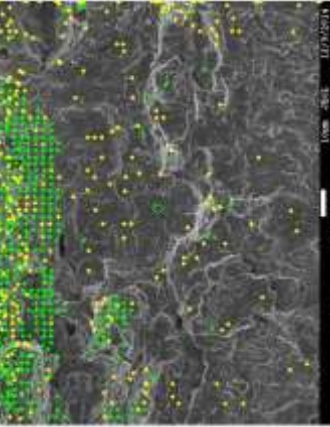
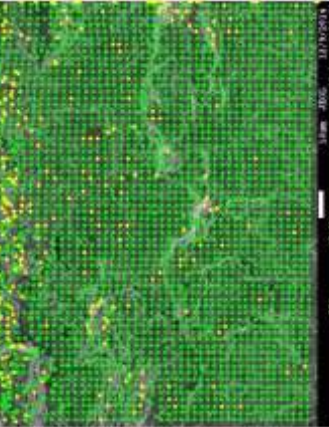
		
а) Вхідне зображення (РЕМ JSM-7100F)	б) Сітка, створена на лівому знімку.	в) Центри пошукових вікон на правому знімку, обчислені за координатами лівого та кутом нахилу 8°
Допуск для коефіцієнта кореляції $R_C = 0,6$; кореляційне вікно 17×9 пкс		
		
г) Точки, обчислені за кореляцією (зелені в допуску, жовті - ні). Вікно пошуку 41×15 пкс	д) Точки, обчислені за кореляцією (зелені в допуску, жовті - ні). Вікно пошуку 131×21 пкс	е) Об'єднані точки

Рис. 4.6. Ілюстрація процесу визначення відповідних точок на правому знімку РЕМ (JSM-7100F) - стереопари кореляційним способом з використанням двох пошукових вікон різних розмірів

Оцінка точності побудови ЦММР виконана за різницями відповідних висот вузлів сіток регулярних моделей (тестової та моделі 2), побудованих в пакеті Surfer з однаковими параметрами і проілюстрована у вигляді карт (рис. 4.7).

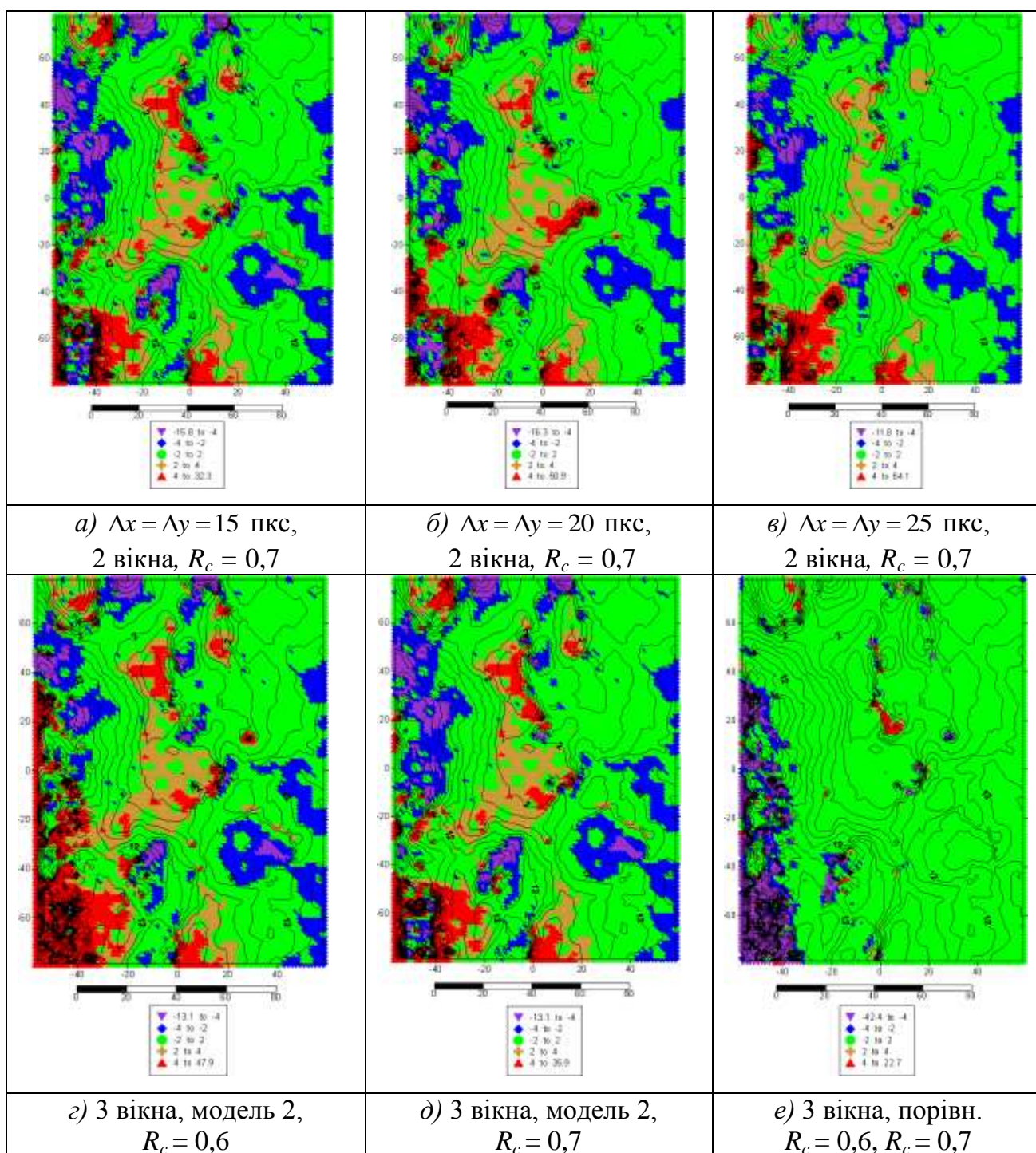


Рис. 4.7. Карти розподілу різниць між тестовою та згенерованою моделлю 2 після застосування адаптивної медіанної фільтрації. а-в) з використанням 2-х пошукових вікон (41×15 , 131×21 пкс) для $\Delta x = \Delta y = 15$ пкс, $\Delta x = \Delta y = 20$ пкс, $\Delta x = \Delta y = 25$ пкс, $R_c = 0,6$; г, д) з використанням 3-х пошукових вікон (41×15 , 81×17 , 131×2 пкс) для $\Delta x = \Delta y = 15$ пкс. Допуски для коефіцієнта кореляції г) $R_c = 0,6$, д) $R_c = 0,7$, е) розподіл різниць між моделями 2 для $R_c = 0,6$ (г) і $R_c = 0,7$ (д)

У всіх проілюстрованих на рис. 4.7 моделях загальна кількість точок, висоти яких визначено автоматично і вони знаходяться в межах допуску (± 2 мкм) від висот, отриманих за тестовою моделлю, складає приблизно 60-65%. На рисунках вони показані зеленим кольором. Ще приблизно 25% мають похибки ($\pm 2 \div \pm 4$ мкм, синій і коричневий кольори). Таким чином близько 90% точок знаходяться в межах $2m_{\Delta Z}$. Отримання такої

кількості точок в автоматизованому режимі, які знаходяться в межах допуску, значно скорочує час на їх визначення оператором вручну безпосередньо на ЦФС. Ті ж ділянки, де виявились значні розходження необхідно доміряти вручну.

Модель 3 отримано наступним чином: на лівому зображенні стереопари за модулем градієнта згенеровано 8550 точок, а відповідні точки на правому знімку знайдені з використанням двохвіконного та тривіконного кореляційного алгоритмів (кореляційне вікно – 17x9 пкс, у двохвіконного - перше вікно-пошуку 41x15 пкс, друге - 131x21 пкс, а у тривіконного - перше вікно-пошуку 41x15 пкс, друге – 81x17 пкс і третє - 131x21 пкс, рис. 4.8).

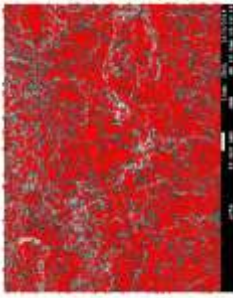
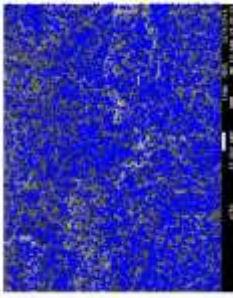
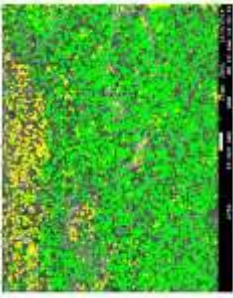
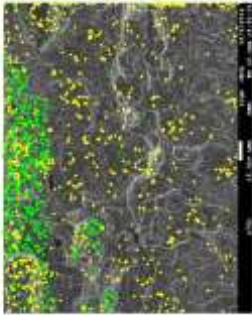
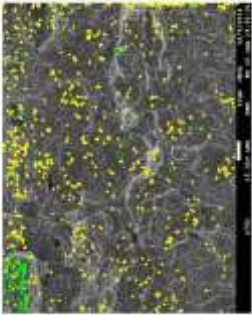
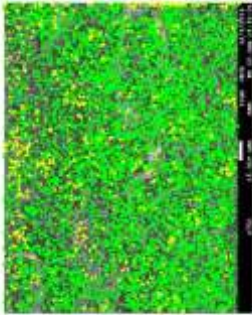
		
<p>а) точки на лівому знімку, побудовані за модулем градієнта</p>	<p>б) точки на правому знімку, обч. за корд. лівого та кутом нах. 8°</p>	<p>в) перше вікно-пошуку 41x15 пкс</p>
<p>Кореляція 0,6; кореляційне вікно 17x9 пкс</p>		
		
<p>г) друге вікно-пошуку 81x17 пкс</p>	<p>д) третє вікно-пошуку 131x21 пкс</p>	<p>е) об'єднані вікна</p>

Рис. 4.8. Ілюстрація процесу генерування точок на лівому знімку за модулем градієнта та визначення відповідних точок на правому знімку стереопари кореляційним способом з використанням трьох пошукових вікон різних розмірів

Як і у випадку *моделі 2*, результати досліджень *моделі 3* також показали високий рівень ідентифікації точок кореляційним шляхом з заданим високим порогом кореляції $R_C=0,7$ та з використанням послідовно трьох вікон пошуку 41x15 пкс, 81x17 пкс і 131x24 пкс. Тут ідентифіковано загалом 6531 точок з 8550 згенерованих за модулем градієнта (76,4%), що також є достатньо добрим показником. На рис. 4.8 проілюстрований процес генерування точок на лівому знімку і пошуку відповідних точок на правому знімку з використанням трьох пошукових вікон при $R_C = 0,6$.

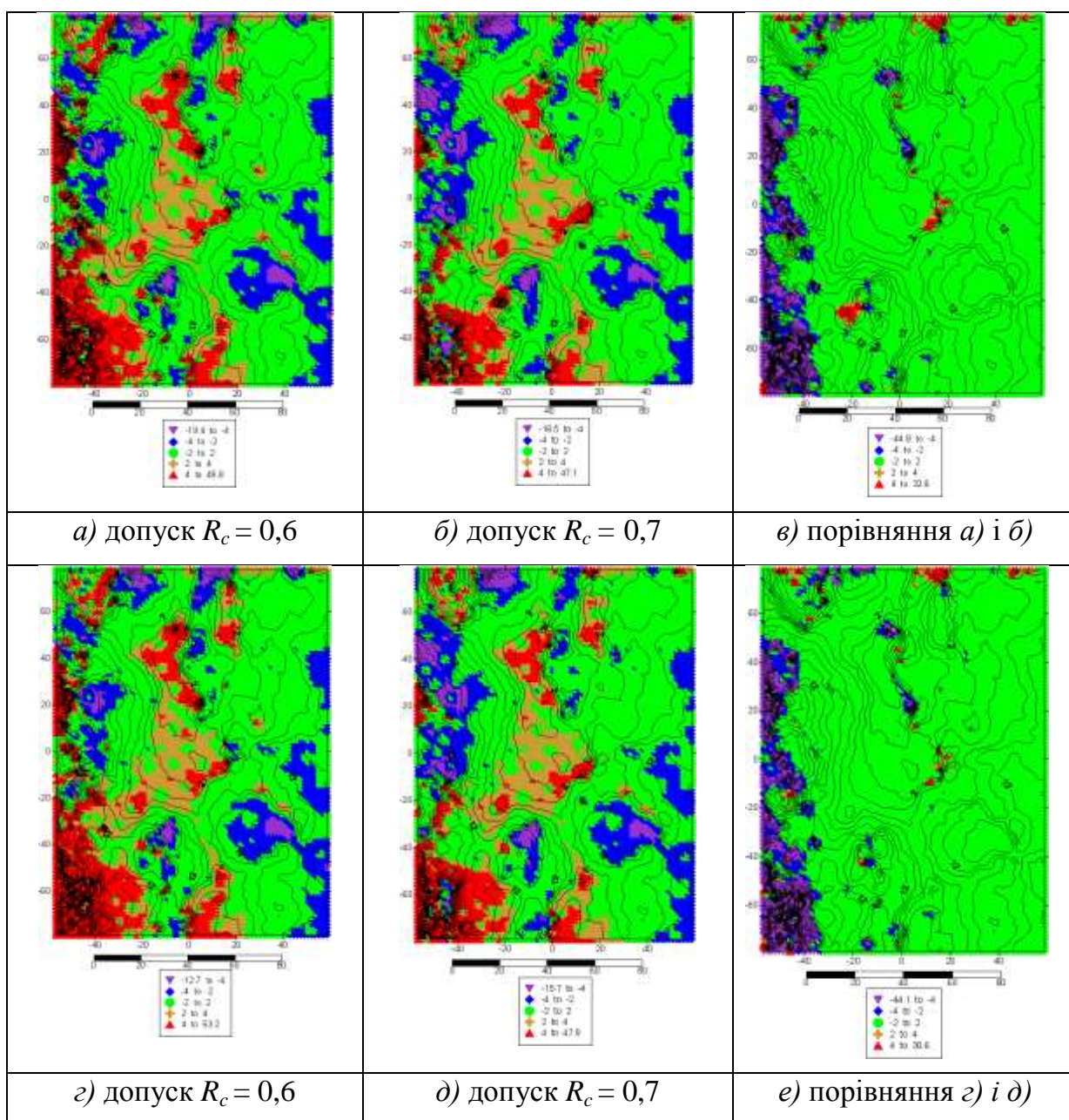


Рис. 4.9. Карти розподілу різниць ΔZ між тестовою та згенерованою за модулем градієнта моделлю 3 з використанням 2-х а), б) (41×15 , 131×21 пкс) та 3-х з), д) (41×15 , 81×17 , 131×21 пкс) пошукових вікон після застосування адаптивної медіанної фільтрації. Лівий стовпчик - допуск для коефіцієнта кореляції $R_c=0,6$; середній - $R_c=0,7$; правий - розподіл різниць ΔZ між моделями $R_c=0,6$ та $R_c=0,7$

У проілюстрованих на рис. 4.9 моделях кількість визначених автоматично висот точок в межах допуску (± 2 мкм) відносно висот точок, отриманих за тестовою моделлю, складає приблизно 56-60%. На рисунках вони показані зеленим кольором. Ще приблизно 27-30% мають похибки ($\pm 2 \div \pm 4$ мкм, синій і коричневий кольори). Отже, як і в дослідженнях моделі 2, тут також близько 90% точок знаходяться в межах $2m_{\Delta Z}$.

Із порівняння моделей на рис. 4.9 для допусків $R_c=0,6$ та $R_c=0,7$ видно, що достатньо суттєві похибки в отриманих автоматично висотах точок понад допуск

зосереджені на ділянках складної форми мікроповерхні, де кореляційні підходи дають нестабільні результати.

Таким чином, на реальних прикладах показана ефективність запропонованих підходів автоматизованої побудови ЦММР поверхонь дослідних об'єктів.

У п'ятому розділі дисертації «Технологія опрацювання РЕМ-зображень та результати її практичного застосування» приведена узагальнена технологічна схема опрацювання РЕМ-зображень (рис 5.1), дано технічні характеристики вітчизняних та зарубіжних РЕМ.

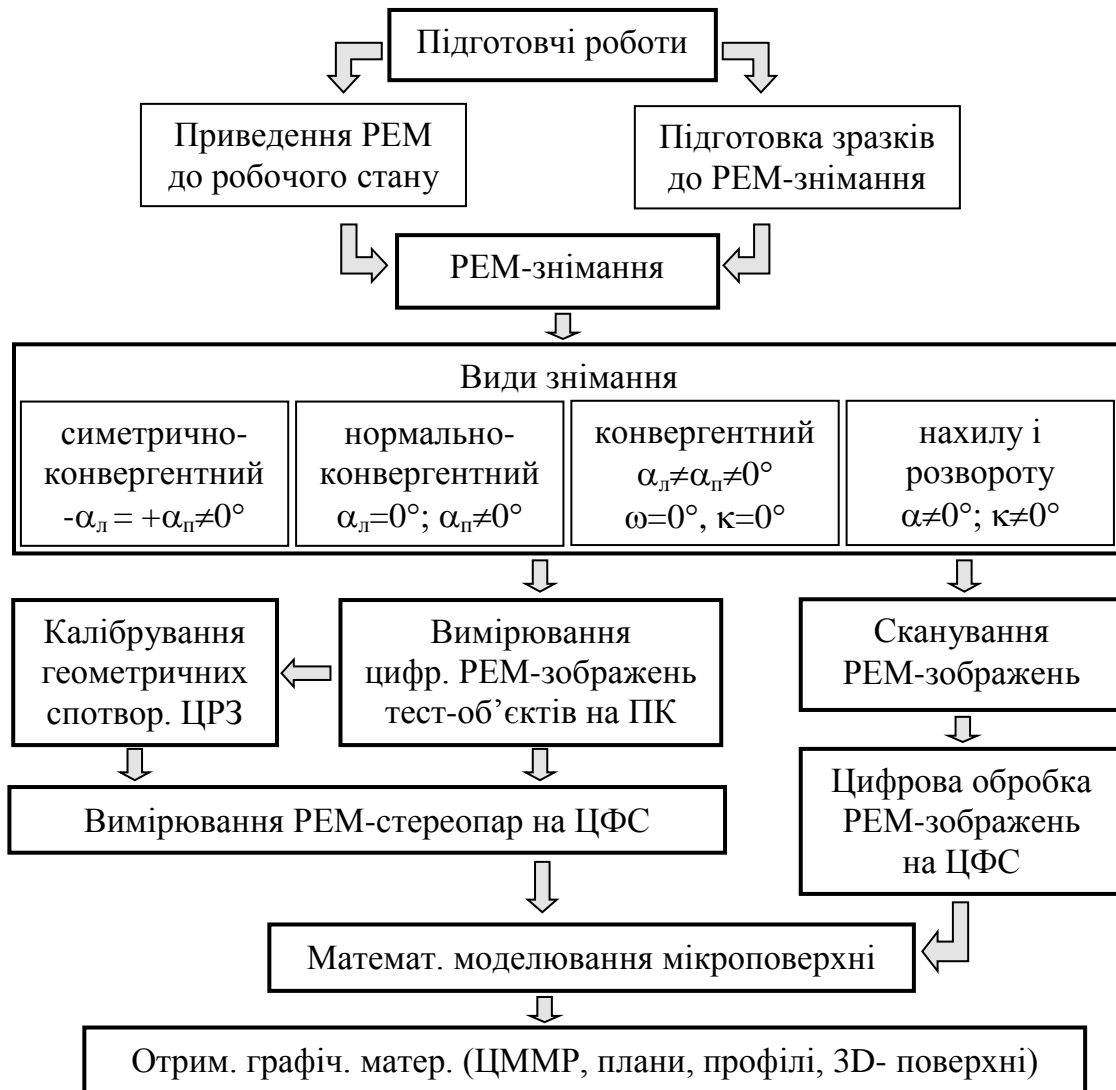


Рис 5.1. Технологічна схема методу

В розділі приведені приклади практичного застосування розробленої технології опрацювання РЕМ-зображень. зокрема, в машинобудуванні, де за стереопарою дослідного зразка (рис. 4.2 а) отримано ЦММР мікроповерхні зламу металеві деталі. Це дозволило вивчити кінетику розвитку втомних тріщин металу під дією навантажень. В процесі побудови ЦММР для даного типу рельєфу найбільш доцільно застосовувати метод Крігінга з лінійною варіограмою (рис. 5.2). Практична точність отриманих висот точок - $m_{Z(h)} = 0,05$ мм.

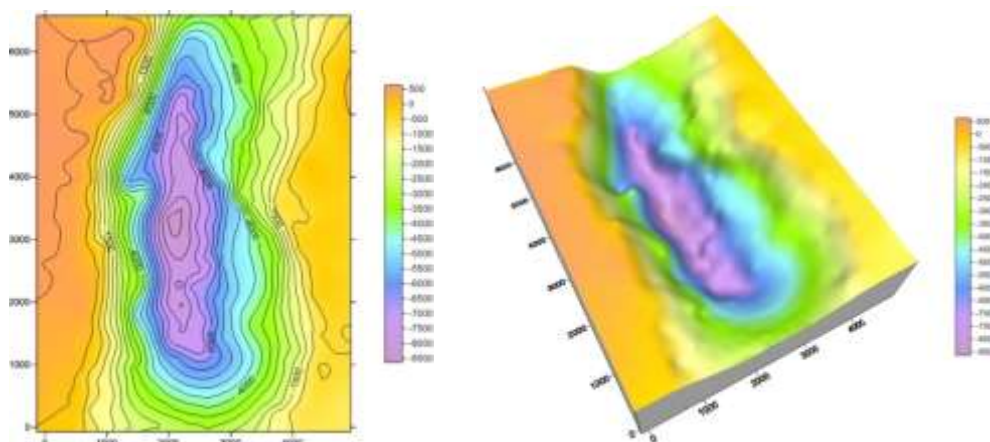


Рис. 5.2. Мікроповерхня тріщини (зламу) металевої деталі. Зліва – зображення рельєфу горизонталлями, справа – просторова модель. Перетин рельєфу горизонталлями 0,5 мм, перепад висот – 9 мм

Запропоновану технологію рекомендовано застосовувати у матеріалознавстві для досліджень кількісних параметрів шорсткості та деформацій (ерозій) металевих поверхонь різноманітних деталей. Стереопара мікроповерхні дослідного зразка (хромованої сталі) приведена на рис. 4.2 б. ЦММР тут побудована з використанням методу Крігінга з лінійною варіограмою (рис. 5.3). Практична точність отриманих висот точок склала $m_z \approx 0,75$ мкм.

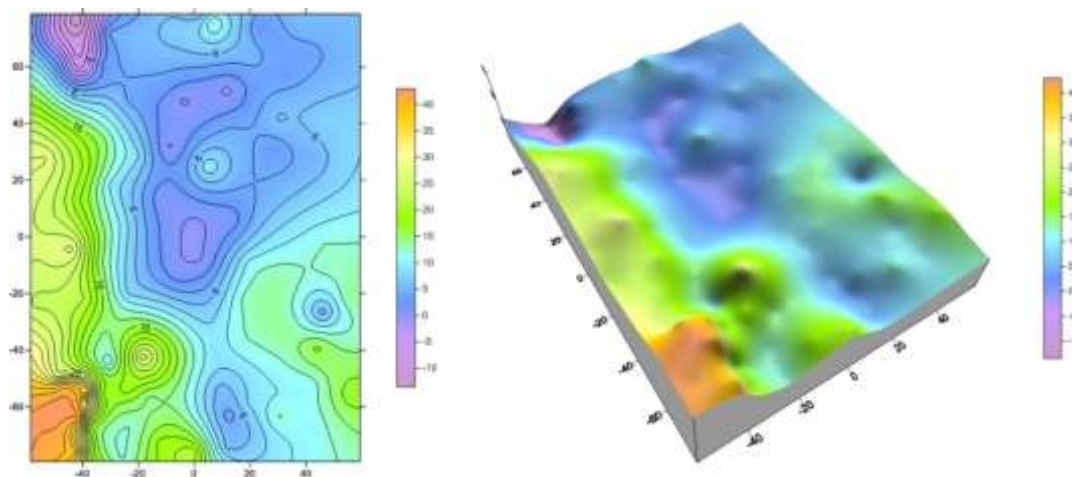


Рис. 5.3. Мікроповерхня хромованої сталі. Зліва – зображення рельєфу горизонталлями, справа - просторова модель. Перетин рельєфу горизонталлями 2 мкм, перепад висот 60 мкм

В цьому розділі також приведений приклад отримання кількісних характеристик просторової структури мікроповерхні лесових ґрунтів (рис. 5.4), за якими можна встановити їх різноманітні фізичні властивості, необхідні для використання у ґрунтознавстві, будівництві та ін.

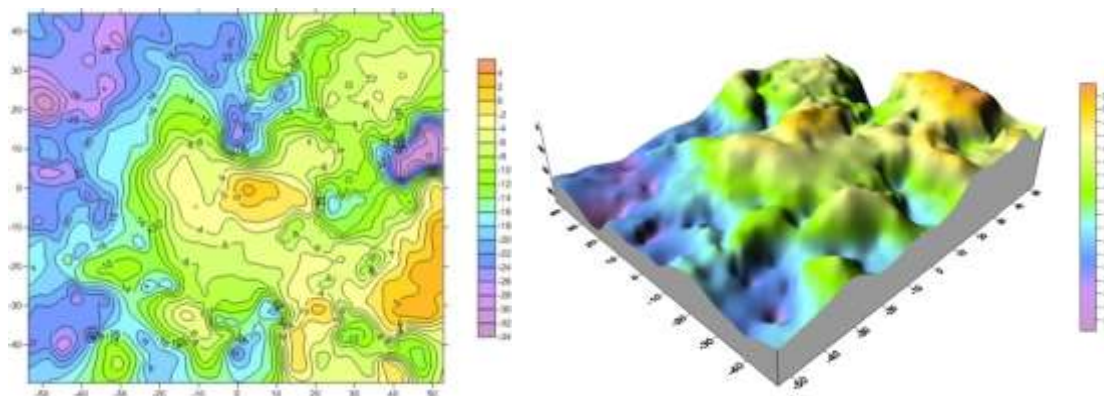


Рис. 5.4. Мікроповерхня лесового ґрунту. Зліва – зображення рельєфу горизонталлями, справа – просторова модель. Перетин рельєфу горизонталлями через 2 мкм, перепад висот – 42 мкм

Запропонована нами технологія опрацювання цифрових РЕМ-зображень показала свою ефективність і доцільність для практичного використання в дослідженнях мікроповерхонь різноманітних об'єктів.

У висновках сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

В додатку роботи приведений опис структури та функцій окремих модулів комплексу програм «Dimicros», які дозволяють виконувати виміри цифрових РЕМ-зображень, встановлювати їх метричні характеристики, зокрема дійсні збільшення (масштаб), геометричні спотворення (програмний модуль «Test-Measuring»); враховувати їх шляхом поліноміальної апроксимації (ПМ «Polycalc») та визначати просторові координати точок мікроповерхонь дослідних об'єктів (ПМ «Stereo-SEM»).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Основними результатами дисертаційної роботи можна вважати:

1. Вперше отримано формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні об'єктів з відповідними їх координатами на РЕМ-стереопарах на основі загальної теорії перспективно-афінного відображення для основних випадків РЕМ-стереознімання.

2. Розроблені і досліджені нові підходи, методика та технологія калібрування цифрових РЕМ-зображень для визначення величин геометричних спотворень та ефективного їх врахування. Зокрема, розроблено метод встановлення дійсних величин збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, за яким можна враховувати масштабні спотворення цифрових РЕМ-зображень і отримувати їх з точністю $\pm 0,5\%$.

3. На підставі теоретико-методологічних досліджень встановлені оптимальні параметри РЕМ-знімання (величина збільшення (масштабу), кути нахилу гоніометричного столика), які дозволяють отримання просторових параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів з необхідною точністю.

4. Вперше, на підставі значної кількості експериментальних робіт встановлено і порівняно метричні параметри цифрових зображень, отриманих на РЕМ провідних фірм світу в широкому діапазоні збільшень (від 1000^x до 40000^x крат), врахування яких дозволило суттєво (у 2-10 разів) підвищити точність отримання просторових координат точок мікроповерхонь дослідних об'єктів. Рекомендовано включити в перелік технічних характеристик приладів дані про їх метрику.

5. Встановлено, що РЕМ-зображенням при різних збільшеннях притаманні властивості *скейлінга*, тобто масштабної інваріантності чи самоподібності. Ці дослідження дозволили обґрунтовано застосувати принципи фрактальної геометрії для опрацювання цифрових РЕМ-зображень і визначити ряд додаткових кількісних показників, які властиві виключно даному типу РЕМ.

6. Вперше виконано порівняльний аналіз статистичних і скейлінгових характеристик для різних типів РЕМ. Показана ефективність і доцільність їх використання в процесі калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, що дозволяє суттєво прискорити ці процеси, і головне, уникнути помилок суб'єктивного характеру.

7. За результатами експериментальних досліджень встановлені найбільш ефективні види математичних моделей побудови цифрової моделі мікрорельєфу дослідних об'єктів в залежності від типу мікроповерхні та характеру рельєфу.

8. Запропонована, розроблена та досліджена методика автоматизованої побудови цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за стереопарами цифрових РЕМ-зображень, яка суттєво скорочує час опрацювання зображень з дотриманням вимог до точності визначення просторових координат мікроповерхні об'єкта. Важливою її складовою є автоматизація калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень.

9. Опрацьовано методику 3D реконструкції і візуалізації мікроповерхонь дослідних об'єктів, яка ефективно апробована при дослідженнях кінетики розвитку втомних руйнувань металу, його деформацій під впливом механічних і термічних чинників, а також при дослідженнях просторової мікроструктури лесових ґрунтів.

10. На підставі теоретичних розробок створено алгоритм технології опрацювання цифрових РЕМ-зображень, за яким вперше в Україні створено комплекс програм «Dimicros», який дозволяє проводити вимірювання РЕМ-знімків, отримувати метричні параметри зображень, ефективно враховувати їх геометричні спотворення та обчислювати просторові координати точок мікроповерхонь дослідних об'єктів з необхідною для дослідників точністю.

11. Запропоновані та апробовані теоретичні і технологічні напрацювання можна використати в різних галузях науки і практики, де мікрооб'єкт та його метрика є головним інформаційним джерелом вивчення явищ і процесів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, які включені до міжнародних наукометричних баз даних

1. Іванчук О. Застосування методу фотограмметричного опрацювання РЕМ-стереопар для досліджень мікроповерхонь геологічних об'єктів та ґрунтів / О. Іванчук // *Kataster, fotogrametria, geoinformatyka: nowoczesne technologie i perspektywy rozwoju* : materiały trzeciej międzynarod. konf., 26-28 wrześ. 2001, Kraków, Osieczany. - (Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji).- Kraków, 2001. - vol. 11. -S. 5.11-5.18.

2. Iwanczuk O. Metoda stereofotogrametrycznego opracowania obrazów REM / O. Iwanczuk // *Monitorowanie środowiska metodami Teledetekcji, Fotogrametrii i Geoinformatyki* : materiały międzynarod. konf. nauk.-techn. - (Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji). - Kraków, 2004. - vol. 15. - S. 131-134.

Статті у наукових фахових періодичних виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних

3. Ріпецький Є. Дослідження кінетики розвитку втомних тріщин металу на основі цифрової 3-D моделі / Є. Ріпецький, Т. Рибак, О. Іванчук // Вісник Тернопільського національного технічного університету. - Тернопіль, 2013. №2 (70). - С. 114-120.
4. Іванчук О. М. Дослідження похибок збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-1061 (Суми, Україна) за допомогою спеціальних тест-об'єктів / О. М. Іванчук, М. В. Чекайло // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідом. наук.-техн. зб. – Львів, 2014. Вип. 79. - С. 82-88.
5. Іванчук О. М. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ - зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F (JEOL, Японія) та точність їх апроксимації / О. М. Іванчук // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідом. наук.-техн. зб. – Львів, 2015. Вип. 81. - С. 112-120.
6. Ivanchuk O. Development and research of technology for automation of the calibration and account of digital SEM images geometric distortion obtained with JCM-5000 (NeoScope) (JEOL, Japan) / O. Ivanchuk, O. Tumska // Geodesy, Cartography and Aerial Photography. - Lviv, 2016. Vol. 84. - P. 56-64.
7. Ivanchuk O. A study of fractal and metric properties of images based on measurements data of multiscale digital SEM-images of a test object obtained / O. Ivanchuk, O. Tumska // Geodesy, Cartography and Aerial Photography. - Lviv, 2017. - Vol. 85. - P. 53-64.

Статті у наукових фахових виданнях України

8. Іванчук О. Аналіз точності стереофотограмметричного методу опрацювання РЕМ-зображень / О. Іванчук // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. - Зб. наук. праць. – Львів : Ліга Прес, 2002. - С. 343-345.
9. Іванчук О. Дослідження точності встановлення параметру «збільшення» РЕМ-зображень на растрових електронних мікроскопах / О. Іванчук // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. - Зб. наук. праць. – Львів: Ліга Прес, 2003. - С. 246-251.
10. Іванчук О. Дослідження впливу змін параметрів РЕМ-знімання на величини та характер геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ “Hitachi S-800” / О. Іванчук // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвід. наук.-техн. зб. - Львів, вид-во НУ «Львівська політехніка». - 2003. - №63. - С. 145-152.
11. Іванчук О. Дослідження точності побудови цифрових моделей мікрорельєфу різними математичними методами за вимірами РЕМ-стереопар поверхні лесового ґрунту / О. Іванчук // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2008. Вип. II (16). - С. 111-116.
12. Іванчук О. Структура та функції програмного комплексу «Dimicros» для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції / О. Іванчук, І. Хрупін // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2012. Вип. I (23). - С. 193-197.
13. Іванчук О. Дослідження точності визначення дійсних величин збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScope) фірми JEOL / О. Іванчук // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвід. наук.-техн. зб. - Львів, 2012. Вип. 76. - С. 80-84.
14. Іванчук О. Дослідження величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A (Carl Zeiss, Німеччина) та точності їх

врахування / О. Іванчук, Т. Барфельс, Я. Геер, В. Герер // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвід. наук.-техн. зб. – Львів, 2013. Вип. 78. - С. 120-126.

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

16. Iwanczuk O. Modelowanie kształtu powierzchni i jej rzutowanie na płaszczyznę: triangulacja Delaunay'a i jej zastosowania / O. Iwanczuk, A. Prykarpatskyj // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2014. Вип. I (27). - С. 94-97.

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

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

19. Іванчук О. Дослідження точності моделювання мікрорельєфу поверхонь об'єктів математичними методами за вимірами їхніх цифрових РЕМ-стереозображень / О. Іванчук // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2015. Вип. II (30). - С. 75-81.

20. Іванчук О. Математична модель взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхні дослідного об'єкта з відповідними їх координатами на РЕМ-стереозображеннях / О. Іванчук // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2016. Вип. I (31). - С. 122-126.

21. Іванчук О. Методика автоматизованого визначення координат центрів вузлів тест-об'єкта за його РЕМ-зображеннями з використанням засобів MatLab / О. Іванчук, О. Тумська // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2017. Вип. I (33). - С. 158-165.

22. Іванчук О. М. Технологія опрацювання цифрових РЕМ-зображень мікроповерхонь твердих тіл / О. М. Іванчук // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. /М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ : КНУБА, 2017. Вип. 63. - С. 170-184.

23. Іванчук О. Порівняльний аналіз статистичних та скейлінгових характеристик РЕМ-зображень тест-об'єкта, отриманих на різних типах РЕМ / О. Іванчук, О. Тумська // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2017. Вип. II (34). - С. 119-131.

Публікації у збірниках матеріалів конференцій

24. Іванчук О. М. Застосування стереофотограмметричного методу опрацювання РЕМ-зображень для досліджень біологічних об'єктів в медицині / О. М. Іванчук // Матеріали 2-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика - сучасні технології і перспективи розвитку». 17-19 жовт. 2000 р. - Львів, Краків, 2000. - С. 170-173.

25. Іванчук О. Аналіз фрактальних та метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень / О. Іванчук, О. Тумська // Матеріали восьмої МНТК «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку», 14-16 вересня 2017 р. – Львів, Східниця, Україна. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2017. - С. 26-33.

АНОТАЦІЯ

Иванчук О. М. Теоретичні та методологічні основи просторового моделювання мікроповерхонь об'єктів за даними цифрової РЕМ-фотограмметрії. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія і картографія. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2019.

Робота містить теоретичні та експериментальні дослідження розробленої технології просторового моделювання мікроповерхонь дослідних об'єктів за їх цифровими РЕМ-зображеннями. В ній приведені формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні об'єктів з відповідними їх координатами точок на РЕМ-стереопарах, які отримані на основі загальної теорії перспективно-афінного відображення для основних випадків РЕМ-стереознімання.

В роботі представлені результати метричних досліджень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на 4 типах РЕМ провідних фірм світу в діапазоні збільшень (від 1000^x до 30000^x крат), визначені характер і величини геометричних спотворень та подано методику ефективного їх врахування, а також приведено розроблену технологію автоматизації калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, що дозволяє суттєво прискорити ці процеси, і уникнути помилок суб'єктивного характеру.

В дисертації встановлено, що РЕМ-зображенням при різних збільшеннях притаманні властивості *скейлінга*, що дозволило застосувати до них принципи фрактальної геометрії і визначити ряд додаткових кількісних показників, які притаманні конкретному типу РЕМ та використати їх для більш ефективного калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень.

В роботі приведені результати експериментальних досліджень різноманітних математичних методів побудови цифрових моделей мікрорельєфу дослідних об'єктів, а також дано рекомендації по їх найбільш ефективному використанні в залежності від типу мікроповерхні та характеру рельєфу.

Розроблена методика автоматизованої побудови цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за стереопарами цифрових РЕМ-зображень, а також наведені приклади використання розроблених методів при дослідженнях кінетики розвитку втомних руйнувань металу, його деформацій під впливом механічних і термічних чинників, а також в дослідженнях просторової мікроструктури лесових ґрунтів.

Ключові слова: растрова електронна мікроскопія (РЕМ), цифрова РЕМ-стереофотограмметрія, геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень, апроксимація, фрактальна геометрія, властивості скейлінга, цифрові моделі мікрорельєфу, мікроповерхня, 3D-модель.

АННОТАЦИЯ

Иванчук О. М. Теоретические и методологические основы пространственного моделирования микроповерхностей объектов за данными цифровой РЭМ-фотограмметрии. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.24.01 – Геодезия, фотограмметрия и картография. – Национальный университет «Львовская политехника», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2019.

Работа содержит теоретические и экспериментальные исследования разработанной технологии пространственного моделирования микроповерхностей

исследовательских объектов по их цифровым РЭМ-изображениям. В ней приведены формулы связи пространственных координат точек микроповерхности объектов с соответствующими их координатами точек на РЭМ-стереопаре, полученные на основе общей теории перспективно-аффинного отображения для основных случаев РЭМ-стереосъемки.

В работе представлены результаты метрических исследований цифровых РЭМ изображений, полученных на 4 типах РЭМ ведущих фирм мира в диапазоне увеличений (от 1000^x до 30000^x крат), определены характер и величины геометрических искажений и представлена методика эффективного их учета, а также приведена разработанная технология автоматизации калибровки геометрических искажений цифровых РЭМ-изображений, что позволяет существенно ускорить эти процессы и избежать ошибок субъективного характера.

В диссертации установлено, что РЭМ-изображениям при различных увеличениях присущи свойства скейлинга, что позволило применить к ним принципы фрактальной геометрии и определить ряд дополнительных количественных показателей, которые присущи конкретному типу РЭМ и использовать их для более эффективной калибровки геометрических искажений цифровых РЭМ-изображений.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований различных математических методов построения цифровых моделей микро рельефа исследовательских объектов, а также даны рекомендации по их наиболее эффективному использованию в зависимости от типа микроповерхности и характера рельефа.

Разработана методика автоматизированного построения цифровой модели микроповерхности объекта по стереопаре цифровых РЭМ-изображений, а также приведены примеры использования разработанных методов при исследованиях кинетики развития усталостных разрушений металла, его деформаций под воздействием механических и термических факторов, а также в исследованиях пространственной микроструктуры лессовых грунтов.

Ключевые слова: растровая электронная микроскопия (РЭМ), цифровая РЭМ-стереофотограмметрия, геометрические искажения цифровых РЭМ-изображений, аппроксимация, фрактальная геометрия, свойства скейлинга, цифровые модели микро рельефа, микроповерхность, 3D-модель.

ABSTRACT

Ivanchuk O. M. Theoretical and methodological foundations of spatial simulation of micro surfaces of objects based on the data of digital SEM photogrammetry. – On the rights of manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in the specialty 05.24.01 “Geodesy, photogrammetry and cartography”. - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The theoretical and experimental studies of the developed technology of spatial modeling of micro surfaces of research objects by their digital SEM images is presented in the thesis.

On the basis of the general theory of the perspective-affine transformation, for three practical cases of SEM stereo imaging, formulas for the relationship of the spatial coordinates of the points of the micro surface of the object with the corresponding coordinates of the points of the SEM stereo pair were obtained. Experimental calculations confirmed the correctness of the obtained formulas and the theoretical accuracy of determining the spatial coordinates of the points of the micro surfaces of research objects.

The method for determining the real magnifications (scales) of SEM digital images was developed. This method makes it possible to calculate the scale distortions of SEM digital images with an accuracy of $\pm 0.5\%$. New approaches, methods and technology for automating the calibration of digital SEM images for determining the values of geometric distortions and their effective registration have been developed and investigated.

There were established that SEM images for various magnifications have inherent *scaling* properties, that is, scale invariance or self-similarity. For the first time, a comparative analysis of their statistical and *scaling* characteristics for different types of SEM is carried out. These studies made it possible to reasonably apply the principles of fractal geometry for the processing of SEM digital images and to determine a number of additional quantitative parameters inherent only in this type of SEM.

There was demonstrated the efficiency and expediency of their use in the process of calibration of geometric distortions of SEM digital images, which allowed to speed up these processes, and, most importantly, to avoid errors of a subjective nature.

On the basis of the theoretical and methodological research, the optimal parameters of SEM imaging (the magnification-scale value, the tilt angles of the goniometric stage) were established, which allowed obtaining spatial parameters of the micro surfaces of research objects with the required accuracy.

Based on a large number of experimental studies, comparisons of the metric parameters of digital images obtained on the SEM of the world's leading companies in a wide range of increases (from 1000x to 40000x) were established and performed.

Taking these parameters into account allowed us to essentially increase (in 2-10 times) the accuracy of obtaining the spatial coordinates of the points of the micro surfaces of research objects.

The most effective types of mathematical methods for constructing digital models of micro relief of research objects, depending on the type of micro surface and the nature of the relief, were established by the results of experimental studies.

There was proposed, developed and studied the technique of automated construction of a digital model of a micro surface of an object by a stereo pair of SEM digital images. This significantly reduced the processing time of images while maintaining the requirements for the accuracy of determining the spatial coordinates of the micro surface of the object.

The technique of 3D-reconstruction and visualization of micro surface of research objects using the software package Surfer was applied. Studies tested the kinetics of fatigue fracture development of metal, its deformations under the influence of mechanical and thermal factors, and also the spatial microstructure of loess soils.

On the basis of theoretical developments, the SEM digital image processing algorithm was developed and for the first time in Ukraine the "Dimicros" software was created and it is possible to perform SEM image measurements, obtain metric image parameters, effectively consider their geometric distortions and calculate the spatial coordinate points of the micro surface objects with accuracy, necessary for researchers.

Key words: scanning electron microscopy (SEM), digital SEM stereo photogrammetry, geometric distortions of SEM digital images, approximation, fractal geometry, *scaling* properties, digital micro relief model, micro surface, 3D model.