

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**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 і картографія

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Науковий консультант – доктор технічних наук,  
професор Дорожинський О.Л.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ О. М. Іванчук

Львів-2019

## АНОТАЦІЯ

*Іванчук О. М.* Теоретичні та методологічні основи просторового моделювання мікроповерхонь об'єктів за даними цифрової РЕМ-фотограмметрії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2018.

Робота містить теоретичні та експериментальні дослідження розробленої технології просторового моделювання мікроповерхонь дослідних об'єктів за їх цифровими РЕМ-зображеннями.

Зокрема, отримано формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні об'єктів з відповідними їх координатами точок на РЕМ-стереопарах на основі загальної теорії перспективно-афінного відображення для трьох практичних випадків РЕМ-стереознімання. Доведена їх коректність та встановлена апостеріорна точність отримання просторових координат точок мікроповерхні дослідних об'єктів.

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

На підставі значної кількості експериментальних робіт встановлено і порівняно метричні параметри цифрових зображень, отриманих на РЕМ провідних фірм світу в широкому діапазоні збільшень (від  $1000\times$  до  $30000\times$  крат), врахування яких дозволило суттєво (у 2-10 разів) підвищити точність отримання просторових координат точок мікроповерхонь дослідних об'єктів.

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 притаманні виключно даному типу РЕМ та використати їх для більш ефективного калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень.

Розроблено та досліджено технологію автоматизації калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень. Вперше виконано порівняльний аналіз їх статистичних і скейлінгових характеристик для різних типів РЕМ. Показана ефективність і доцільність її використання в процесі калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, що

дозволяє суттєво прискорити ці процеси, і головне, уникнути помилок суб'єктивного характеру.

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.

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

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.

Застосовано 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.

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.

**Ключові слова:** растровий електронний мікроскоп (РЕМ), цифрова РЕМ-стереофотограмметрія, геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень, апроксимація, фрактальна геометрія, властивості скейлінга, цифрові моделі мікрорельєфу, мікроповерхня, 3D-модель.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті у науковому періодичному виданні іншої держави,  
яке включено до міжнародної наукометричної бази даних**

1. Іванчук О. Застосування методу фотограмметричного опрацювання РЕМ-стереопар для досліджень мікроповерхонь геологічних об'єктів та ґрунтів / О. Іванчук // *Kataster, fotogrametria, geoionformatyka: nowoczesne technologie i perspektywy rozwoju : materiały trzeciej międzynarod. konf., 26-28 wrześ. 2001, Kraków, Osieczany.* - (Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji). - Kraków, 2001. - Issue 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. - Issue 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-106І (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. Issue 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. - Issue 85. - P. 53-64.

**Статті у наукових фахових виданнях України**

8. Іванчук О. Аналіз точності стереофотogramетричного 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 (NeoScore) 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. Геєр, В. Гегер // 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 (NeoScore) 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.

#### **ABSTRACT**

*Ivanchuk O. M.* Theoretical and methodological foundations of spatial simulation of micro surfaces of objects based on the data of digital SEM photogrammetry. – Qualification scientific paper accepted as monograph.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.24.01 - Geodesy, photogrammetry and cartography. - National University "Lviv Polytechnic", Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

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 microscope (SEM), digital SEM stereo photogrammetry, geometric distortions of SEM digital images, approximation, fractal geometry, *scaling* properties, digital micro relief model, micro surface, 3D model.

#### LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF DISSERTATION

##### **Articles in the scientific periodical publication of another state, which is included in the international science-computer database**

1. Ivanchuk O. Application of the method of photogrammetric processing of SEM stereopairs for investigations of micro-surfaces of geological objects and soils / O. Ivanchuk // Cadastre, photogrammetry, geoinformatics: modern technologies and development prospects: materials of the third international. conf., 26-28 September 2001, Kraków, Osieczany. - (Archive of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing). - Krakow, 2001. - Issue 11. - P. 5.11-5.18.

2. Iwanczuk O. The method of stereophotogrammetric image processing SEM / O. Iwanczuk // Monitoring the environment using methods of remote sensing, photogrammetry and geoinformatics: international materials. conf. science-techn. - (Archive of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing). - Krakow, 2004. - Issue 15. - P. 131-134.

##### **Articles in scientific periodicals of Ukraine that are included in international science-computer databases**

3. Ripetsky E. Research of kinetics of development of fatigue cracking of metal on the basis of a digital 3-D model / E. Ripetsky, T. Rybak, O. Ivanchuk //



Bulletin of the Ternopil National Technical University .- Ternopil, 2013. No. 2 (70). - P. 114-120.

4. Ivanchuk O. M. Investigation of the errors of increasing (scale) of digital REM images obtained on SEM-106I (Sumy, Ukraine) with the help of special test objects / O. M. Ivanchuk, M. V. Chekaylo // Geodesy, cartography and aerial photography: interdepartment. sci.-tech. coll. - Lviv, 2014. Issue. 79. - P. 82-88.

5. Ivanchuk O. M. Investigation of geometrical distortions of digital SEM-images received on SEM JSM-7100F (JEOL, Japan) and accuracy of their approximation / O. M. Ivanchuk // Geodesy, cartography and aerial photography: interdepartment. sci.-tech. coll. - Lviv, 2015. Issue. 81. - P. 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. Issue. 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. - Issue. 85. - P. 53-64.

#### **Articles in scientific professional editions of Ukraine**

8. Ivanchuk O. Analysis of the accuracy of the stereophotogrammetric method of processing SEM-images / O. Ivanchuk // Modern achievements of geodesic science and production.- Coll. sciences works. - Lviv: League Press, 2002. - P. 343-345.

9. Ivanchuk O. Investigation of the accuracy of the setting of the parameter "increase" of SEM images on raster electronic microscopes / O. Ivanchuk // Modern achievements of geodesic science and production. - Coll. of scientific works. - Lviv: League Press, 2003. - P. 246-251.

10. Ivanchuk O. Investigation of the effect of changes in the parameters of the PEM-removal on the magnitude and nature of the geometric distortions of the SEM images obtained on the SEM "Hitachi S-800" / O. Ivanchuk // Geodesy, cartography and aerial photography: interdepartment. sci.-tech. coll. – Lviv: NU “Lviv Polytechnic”. - 2003. - No. 63. - P. 145-152.

11. Ivanchuk O. Investigation of the accuracy of the construction of digital models of microrelief by different mathematical methods based on the measurements of the SEM-stereopair of the surface of the forest soil / O. Ivanchuk // Modern achievements of geodesic science and production. Lviv, 2008. Issue II (16). - P. 111-116.

12. Ivanchuk O. Structure and functions of “Dimicros” software system for processing of SEM images on a digital photogrammetric station / O. Ivanchuk, I. Khrupin // Modern achievements of geodesic science and production. - Lviv, 2012. Issue I (23). - P. 193-197.

13. Ivanchuk O. Investigation of the accuracy of the determination of the actual magnitudes of the increase (scale) of digital REM images obtained on the JCM-5000 (NeoScope) SEM JEOL / O. Ivanchuk // Geodesy, cartography and aerial photography: interdepartment. sci.-tech. coll. - Lviv, 2012. Issue 76. - P. 80-84.

14. Ivanchuk O. Investigation of the values of geometric distortions of digital REM images obtained on the SEM DSM-960A (Carl Zeiss, Germany) and the accuracy of their inclusion / O. Ivanchuk, T. Barfels, J. Heeg, W. Heger // Geodesy, cartography and aerial photography: interdepartment. sci.-tech. coll. - Lviv, 2013. Issue 78. - P. 120-126.

15. Ivanchuk O. M. Investigation of geometric distortions of digital SEM images obtained on SEM JCM-5000 (NeoScope) and their approximation / O.M. Ivanchuk // Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Mining and Geological. - Donetsk, 2013. Issue 1 (18). - P. 91-97.

16. Iwanczuk O. Modeling of surface shape and its projection on the plane: Delaunay triangulation and its applications / O. Iwanczuk, A. Prykarpatskyj // Modern achievements of geodesic science and production. - Lviv, 2014. Issue I (27). - P. 94-97.

17. Ivanchuk O. Investigation of geometric distortions of digital SEM images obtained at the SEM-106 I (Sumy, Ukraine) / O. Ivanchuk // Modern achievements of geodesic science and production. - Lviv, 2014. Issue II (28). - P. 74-77.

18. Ivanchuk O. Features of calibration of geometric distortions of digital REM images obtained at different SEM / O. Ivanchuk // Modern achievements of geodesic science and production. - Lviv, 2015. Issue I (29). - P. 168-173.

19. Ivanchuk O. Investigation of the accuracy of microrelief modeling of surfaces of objects by mathematical methods in terms of measurements of their digital SEM-stereos / O. Ivanchuk // Modern achievements of geodesic science and production. - Lviv, 2015. Issue II (30). - P. 75-81.

20. Ivanchuk O. Mathematical model of the interconnection of spatial coordinates of points of a microsphere of a research object with their corresponding coordinates on SEM-stereoimages / O. Ivanchuk // Modern achievements of geodesic science and production. - Lviv, 2016. Issue I (31). - P. 122-126.

21. Ivanchuk O. The method of automated determination of coordinates of centers of test object nodes for its SEM images using MatLab / O. Ivanchuk, O. Tumska // Modern achievements of geodesic science and production. - Lviv, 2017. Issue I (33). - P. 158-165.

22. Ivanchuk O. M. The technology of processing of digital SEM images of micro-surfaces of solids / O. M. Ivanchuk // Urban Planning and Territorial Planning: Scientific-Technical. coll. / Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv. Nation. Un-ty construction and architecture. - Kyiv: KNUBA, 2017. Issue 63. - P. 170-184.

23. Ivanchuk O. Comparative analysis of statistical and scaling characteristics of REM images of a test object obtained on different types of REM / O. Ivanchuk, O. Tumska // Modern achievements of geodesic science and production. - Lviv, 2017. Issue II (34). - P. 119-131.

#### **Publications in conferences materials**

24. Ivanchuk O. M. Application of stereophotogrammetric method for processing of SEM images for research of biological objects in medicine / O. M. Ivanchuk // Materials of the 2nd International. science-practice conf. "Cadastre, Photogrammetry, Geoinformatics - Modern Technologies and Prospects for Development". October 17-19. 2000 - Lviv, Krakow, 2000. - P. 170-173.

25. Ivanchuk O. Analysis of fractal and metric characteristics of digital SEM images / O. Ivanchuk, O. Tumska // Materials of the 8th ISTC "Environmental monitoring, photogrammetry, geoinformatics - modern technologies and prospects of development", September 14-16, 2017 - Lviv, Skhidnytsya, Ukraine. - Lviv: View of Lviv. Polytechnic, 2017. - P. 26-33.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1. Аналіз досягнень та проблематика теорії і практики РЕМ-фотограмметрії. Задачі дисертаційної роботи	28
1.1. Актуальність тематики	28
1.2. Етапи розвитку РЕМ-фотограмметрії	28
1.3. Аналіз теорії і практики опрацювання РЕМ-зображень з метою отримання просторових кількісних параметрів мікроповерхонь об'єктів	32
1.3.1. Теоретичні дослідження	32
1.3.2. Математичні моделі визначення геометричних спотворень РЕМ-зображень та їх врахування	35
1.3.3. Проблематика цифрового моделювання мікроповерхонь дослідних об'єктів за їх вимірами їх РЕМ-стереозображень	38
1.3.4. Прикладне застосування методів РЕМ-стереофотограмметрії для досліджень кількісних параметрів мікроповерхонь об'єктів	41
1.4. Задачі дисертаційної роботи	42
РОЗДІЛ 2. Теоретичні положення моделювання мікроповерхні об'єкта за його цифровими РЕМ-стереозображеннями	44
2.1. Особливості формування цифрових зображень растровими електронними мікроскопами	44
2.2. Системи координат у цифровій РЕМ-фотограмметрії	50
2.3. Математична модель побудови мікроповерхні об'єкта на базі перспективно-афінного відображення на цифрових РЕМ-стереозображеннях. Формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні з відповідними їх координатами на цифрових РЕМ-стереознімках для різних методів РЕМ-знімання	55
2.4. Апріорна та апостеріорна точність методу	59

2.5. Висновки	65
РОЗДІЛ 3. Теоретичні та експериментальні дослідження геометричних властивостей цифрових РЕМ-зображень	66
3.1. Обґрунтування нових підходів до визначення та врахування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень	66
3.2. Особливості визначення дійсних збільшень (масштабів) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних типах РЕМ. Точність масштабування цифрових РЕМ-зображень	70
3.3. Дослідження метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень та методики врахування геометричних спотворень	79
3.3.1. Дослідження цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM-5000 (Neoscope) (JEOL, Японія)	79
3.3.2. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A (Carl Zeiss, Німеччина) та точності їх врахування	88
3.3.3. Дослідження метрики цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ РЕМ-106 I (Суми, ВАТ «SELMІ». Україна)	98
3.3.4. Метричні дослідження цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F (JEOL, Японія)	109
3.4. Дослідження фрактальних та метричних властивостей зображень за даними вимірювань різномасштабних цифрових РЕМ-зображень тест-об'єкта, отриманих на різних типах РЕМ	115
3.5. Розробка та дослідження технології автоматизації калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, їх врахування та порівняльний аналіз їх статистичних і скейлінгових характеристик для різних типів РЕМ	133
3.6. Висновки та рекомендації	172
РОЗДІЛ 4. Моделювання рельєфу мікроповерхонь об'єктів за їх цифровими РЕМ-стереозображеннями	174

4.1. Дослідження методів математичного моделювання мікрорельєфу поверхонь об'єктів за їх цифровими РЕМ-стереозображеннями	174
4.1.1. Загальна постановка задачі	174
4.1.2. Оцінка точності цифрового моделювання мікрорельєфу поверхонь об'єктів різними математичними методами за вимірами їх цифрових РЕМ-стереозображень	177
4.2. Дослідження методики автоматизованої побудови цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за стереопарою цифрових РЕМ- зображень	189
4.2.1. Загальний опис досліджуваних моделей	189
4.2.2. Створення <i>тестової моделі</i> мікроповерхні дослідного об'єкта для дослідження автоматизованих методів побудови ЦММР	191
4.2.3. Автоматизована побудова цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за даними вимірювань точок лівого знімка та знайденими кореляційним способом відповідними точками правого знімка стереопари ( <i>модель 1</i> )	198
4.2.4. Автоматизоване створення цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за згенерованими точками (вузлами) регулярної сітки на лівому знімку та знайденими кореляційним шляхом відповідними точками сітки на правому знімку стереопари ( <i>модель 2</i> )	209
4.2.5. Автоматизоване створення цифрової моделі мікроповерхні об'єкта на основі точок, згенерованих за модулем градієнта на лівому знімку і відповідними точками правого знімка стереопари ( <i>модель 3</i> )	218
4.2.6. Оцінка ефективності алгоритму пошуку ідентичних точок стереопари з використанням вікон-пошуку різних розмірів	228
4.3. Висновки та рекомендації	238

РОЗДІЛ 5. Технологія опрацювання РЕМ-зображень та результати її практичного застосування	243
5.1 Узагальнена технологічна схема опрацювання РЕМ-зображень	243
5.2 Технічні характеристики вітчизняних і зарубіжних РЕМ та вимоги до них	244
5.3. Приклади застосування технології опрацювання цифрових РЕМ-зображень на реальних об'єктах	248
5.3.1. Побудова ЦММР поверхні хромованої сталі для подальших досліджень її деформацій в процесі експлуатації	248
5.3.2. Побудова ЦММР поверхонь втомних тріщин деталей металевих конструкцій для досліджень механізмів кінетики їх розвитку під дією механічних навантажень	250
5.3.3. Побудова ЦММР поверхні лесового ґрунту для подальших досліджень її мікроструктури та характеру мікрорельєфу	252
5.4. Висновки	253
Загальні висновки	255
Література	258
Додаток. Структура та функції програмного комплексу «Dimicros» для опрацювання цифрових РЕМ-зображень на ПК та цифровій фотограмметричній станції (ЦФС)	292

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РЕМ – растровий електронний мікроскоп

ЦММР – цифрова модель мікрорельєфу (поверхні об'єкта)



## ВСТУП

### 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- і 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 та, що вони отримуються електронно-оптичним шляхом внаслідок практично ортогонального сканування електронним зондом поверхні дослідного об'єкта. Тому можна вважати, що РЕМ-зображення отримані в паралельній проекції і до них можна застосувати строгі математичні моделі перспективно-афінного відображення. А знімки, які отримані з 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 абсолютно різні. Виконані теоретичні дослідження

низки 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, 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. Murruy, 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, а 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 і інші.

На сьогодні ще залишилося багато питань, які вимагають подальшого розв'язання. Це, насамперед, розробка і більш ефективно 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 відповідає науковому напрямку кафедри фотограмметрії та геоінформатики Національного університету «Львівська політехніка» і виконана в межах науково-дослідних робіт кафедри 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 формул взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхонь об'єктів з відповідними їх координатами на РЕМ-стереознімках для 3-х основних методів РЕМ-знімання у явному вигляді на основі строгої теорії перспективно-афінного відображення;

- встановлення особливостей формування та запису цифрових РЕМ-зображень та розробка методу визначення головного його метричного параметру – масштабу (збільшення);

- дослідження величин та характеру геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на сучасних РЕМ різних моделей та встановлення найбільш ефективного методу їх апроксимації;

- встановлення та дослідження фрактальної природи РЕМ-зображень тест-об'єкту та їх скейлінгових характеристик з метою використання для калібрування геометричних спотворень зображень;

- розробка технології автоматизації вимірів 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 та визначення її кількісних параметрів з найвищою

точністю, в залежності від параметрів РЕМ-знімання, типу поверхні й 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 підходи до 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 3-х 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, що дозволило встановити особливості формування і запису зображень на кожному з них, визначити їх дійсні збільшення (масштаби), величини та 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 низку 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 функціях і функціях, що враховують статистичні характеристики мікрорельєфу. Встановлено та рекомендовано моделі, які дають найвищу точність побудови ЦММР в залежності від типу мікроповерхні, характеру мікрорельєфу та масштабу РЕМ-зображень;

- опрацьовано методику 3D реконструкції і візуалізації мікроповерхонь дослідних об'єктів з використанням програми Surfer та з врахуванням досліджень застосування оптимальних математичних моделей при створенні ЦММР мікроповерхонь дослідних об'єктів. В подальшому ЦММР та 3-D моделі мікроповерхонь об'єктів використовувались в дослідженнях кінетики розвитку втомних руйнувань металу, деформацій мікроповерхні хромованої сталі під дією механічних навантажень і просторової структури мікроповерхні лесових ґрунтів;

- закладено методологічні та технологічні основи автоматизації основних процесів опрацювання цифрових РЕМ-зображень

(вимірювання, визначення і врахування величин їх геометричних спотворень, побудова ЦММР мікроповерхонь об'єктів та їх візуалізація);

- розроблено алгоритм, за яким створено комплекс програм опрацювання цифрових РЕМ-зображень «Dimicros», що не має аналогів в Україні і який дозволяє виконати весь цикл робіт з отримання просторових кількісних параметрів дослідних мікроповерхонь з необхідною для дослідників точністю.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Запропоновані методи та 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. Їх можна застосувати для аналогічних досліджень будь яких твердих тіл.

Теоретичні та експериментальні результати досліджень впроваджено 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 використовувались в процесі підготовки магістерських кваліфікаційних робіт студентів спеціалізацій 8.193.005 «Геоінформаційні системи і технології» і 8.193.006 «Фотограмметрія та дистанційне зондування».

Сфера застосування цих методів може бути поширена на різні галузі науки та виробництва, які потребують кількісної просторової інформації про поверхні об'єктів на мікронному рівні.

### **Методи досліджень.**

Робота виконана з використанням фундаментальних положень теорії і практики вищої математики, механіки і фізики твердого тіла, фотограмметрії, растрової електронної мікроскопії.

### **Основні положення, що виносяться на захист:**

- теорія та технології методу фотограмметричного опрацювання РЕМ-зображень;

- способи та результати експериментальних досліджень характеру й 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 стереопарою цифрових РЕМ-зображень;

- практичні рекомендації щодо застосування методів РЕМ-стереофотограмметрії для якісних і кількісних досліджень 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 науково метричної 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, геоінформатики – 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 наукометричної 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.

У другому розділі дисертації «Теоретичні положення моделювання мікроповерхні об'єкта за його цифровими РЕМ-стереозображеннями» обґрунтована 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. В цьому ж розділі виконані розрахунки теоретичної точності методу для різних параметрів РЕМ-знімання, а також викладені постановка та результати експериментальних досліджень, які підтвердили коректність виведених формул та розробленого методу.

У третьому розділі роботи «Теоретичні та експериментальні дослідження геометричних властивостей цифрових РЕМ-зображень» приведені численні дослідження величин і характеру геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень на підставі кількісної обробки цифрових РЕМ-знімків тест-сіток, отриманих на 4 типах РЕМ провідних фірм світу в широкому діапазоні збільшень від  $1000\times$  до  $40000\times$  та

експериментально підтверджена ефективність їх апроксимації поліномами.

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

Завершує розділ опис та дослідження розробленої технології автоматизації вимірів цифрових РЕМ-зображень еталонних тест-об'єктів, яка дозволяє отримати їх метричні характеристики та врахувати геометричні спотворення.

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. Зокрема, за допомогою програми Surfer проаналізовано низку сучасних математичних методів цифрового моделювання мікрорельєфу, які реалізовані у цьому програмному пакеті. Дано практичні рекомендації щодо застосування найбільш ефективних математичних моделей для створення ЦММР поверхонь об'єктів, які дозволяють отримати найвищу точність їх кількісних просторових параметрів в залежності від типу, складності і структури рельєфу.

У цьому ж розділі приведені результати досліджень методики автоматизованої побудови цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за стереопарою цифрових РЕМ-зображень для 3 різних моделей та виконана оцінка точності для кожної з них.

У п'ятому розділі дисертації «Технологія опрацювання РЕМ-зображень та результати її практичного застосування» приведена

узагальнена технологічна схема опрацювання РЕМ-зображень, дано технічні характеристики вітчизняних та зарубіжних РЕМ, а також описано приклади практичного застосування розробленої технології опрацювання РЕМ-зображень, зокрема, в машинобудуванні – для визначення кількісних параметрів мікроповерхні зламу металеві деталі під дією навантажень, які дозволяють досліджувати кінетику розвитку втомних тріщин металу, в матеріалознавстві - для дослідження кількісних параметрів шорсткості та деформацій (ерозій) металевих поверхонь різноманітних деталей, в геології - для отримання кількісних характеристик просторової структури мікроповерхні, зокрема, лесових ґрунтів.

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»).

## РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ ДОСЯГНЕНЬ ТА ПРОБЛЕМАТИКИ ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ РЕМ-ФОТОГРАММЕТРІЇ. ЗАДАЧІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Роль і значення РЕМ-стереофотограмметрії в дослідженні мікроповерхонь об'єктів

### 1.1. Актуальність тематики

Сучасні технології у таких галузях виробництва, як мікроелектроніка, машинобудування, приладобудування, виробництво авіаційної та військової техніки і багатьох інших потребують високоточної кількісної інформації про поверхню об'єктів на мікронному та субмікронному рівнях. Фізичними чи рентгенівськими методами отримати цю інформацію практично неможливо. Тому застосування методів, які ґрунтуються на опрацюванні зображень, отриманих з допомогою електронно-мікроскопічних приладів, дозволяє розв'язати цю проблему. Оскільки об'єкти досліджень у вищеперелічених галузях виробництва є твердими і непрозорими, то застосування саме сучасних растрових електронних мікроскопів (РЕМ) дозволяє отримувати якісне у фотографічному сенсі зображення різноманітних мікроповерхонь дослідних об'єктів.

### 1.2. Етапи розвитку РЕМ-фотограмметрії

Перші наукові роботи, які використовували фотограмметричні методи в електронній мікроскопії з'явилися наприкінці 40-х років минулого століття. Це, насамперед, роботи німецьких вчених Е. Gotthardt [238], К. Hubeny [243], В.І.Саркіна [162] та ін.

У 50-60-х роках ці дослідження продовжили О. Lasmann [253], I.G. Helmeke [239]. К. Hubeny [244, 245], I.F. Nankivell [261, 262], I.B. Гарелік [28]. Ці роботи стосувались теорії та практики фотограмметричних методів опрацювання зображень, отриманих, насамперед, на просвічуючих електронних мікроскопах.

Першими ж роботами в РЕМ-стереофотограмметрії в 70-90-х роках були наукові праці зарубіжних вчених, зокрема, американських А. Boude [225-227, 241], S.K. Ghosh [234-237], P.G. Howel [241, 242], М. Maune [255], S. Murray [259], німецьких R. Burkhardt [228-230, 240], I.G. Helmeke [240] австрійця P.Waldhausl [272], японця H.Nagaraja [260], колишніх радянських вчених П.П. Гончарова [32], В.П. Голубєва [29], Б.Н. Васічева [20-22], Л.М. Утевського [221], В.М. Соколова [166-174], М.П. Шебатінова [105-107, 109-111, 116], Є.І. Калантарова [77, 78], М.Ж. Сагиндикової [77, 78], в Україні В.Я. Фінковського [190-192, 233], В.М. Мельника [100-139, 171, 173, 175-177, 190-192, 219, 220, 233, 257, 258, 268, 269], А.Я. Красовського [90-91], В.А. Степаненка [90, 91, 180-184].

Починаючи з кінця 1990-х років в Україні була створена фотограмметрична школа проф. В.М. Мельника, яка успішно працює і в даний час, і яка зробила надзвичайно вагомий внесок у розвиток теорії та практики РЕМ-фотограмметрії. Це, насамперед, фундаментальні теоретичні та експериментальні роботи самого проф. В.М. Мельника, а також вагомі дослідження його учнів, зокрема, А. В. Шостак, які були узагальнені нею в кандидатській і докторській дисертаціях [120, 121, 126, 135-139, 202-220], роботи О.В. Тумської [72, 74, 75, 187, 188, 247, 248], В.У. Волошина [26, 128-131, 133], Ю.А. Мельник [140-145, 158, 216-220] та інших. Достатньо вагомий внесок у розвиток методів РЕМ-фотограмметрії у цей період внесли і вчені кафедри фотограмметрії та геоінформатики НУ «Львівська політехніка», виконані під керівництвом проф. О.Л. Дорожинського [40, 41].

Застосування фотограмметричних методів дозволяє отримати тривимірну оцінку довільних поверхонь і, отже, значно розширити можливості РЕМ. Фотограмметричні методи є прецизійними, достовірними і оперативними.

Необхідно відмітити значний внесок у розробку теорії й практики методів прикладної фотограмметрії, які базувались на опрацюванні аерота наземних знімків таких вчених як О.М. Лобанов, Ф.В. Дробішев, М.Д. Коншин, В.Я. Фінковський, А.С. Скірідов, В.М. Сердюков, Б.С. Пузанов, В.М. Дубіновський, І.Т. Антіпов, С.Г. Могильний, О.Л. Дорожинський, Х.В. Бурштинська, В.М. Глотов, Тумська О.В. та ін.

До числа тих, які внесли найбільш вагомий вклад в розробку теорії та практики застосування стереофотограмметричних методів в мікроскопії необхідно відмітити: 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. Саркіна, І.С. Гареліка, П.П. Гончарова, Є.І. Калантарова, М.Ж. Сагиндикову, В.М. Соколова, Б.Н. Васічева та багатьох інших, а в Україні – В.М. Мельника, В.Я. Фінковського, А.Я. Красовського, В.А. Степаненка, А.В. Шостак, О.В. Тумську, В.У. Волошина, Ю.А. Мельник та інших.

Зображенням, отриманим з допомогою РЕМ притаманна висока роздільна здатність, значна глибина різкості, тому можливість безпосередньо вивчати мікроповерхні різноманітних об'єктів з допомогою РЕМ на мікрорівні отримала широке застосування в різних галузях науки й техніки.

Водночас говорити про широке впровадження в практику растрової електронної мікроскопії мікростереофотограмметричних методів, зокрема в Україні, поки що зарано, оскільки дійсний стан економіки, відсутність сучасних РЕМ у наукових лабораторіях і підготовлених фахівців, гальмують ці процеси. Значно краща ситуація в розвинених країнах світу, зокрема в Японії, США, Німеччині та багатьох інших країнах, фахівці і науковці яких забезпечені сучасними РЕМ з цифровим записом зображень, відповідним програмним забезпеченням і

широко застосовують стереофотограмметричні методи. Зокрема, при фрактографічному дослідженні металів, сплавів, порошкових матеріалів [27, 48, 50, 95, 158, 161, 164, 205, 208], в машинобудуванні при дослідженні мікроповерхонь різноманітних деталей і механізмів, процесів їх обробки, тертя, зношення, деформацій, руйнування в процесі експлуатації [5-8, 17, 18, 34, 49, 79, 89-91, 98, 110, 121, 132, 156, 180, 181, 183, 184, 201, 203, 206, 218, 219], в приладобудуванні при визначенні чистоти шліфованих поверхонь, матеріалознавстві [32, 54, 105, 107, 116, 120, 140, 162, 198, 220], в процесах досліджень гірських порід та ґрунтів [57, 128, 172, 175, 195], в кристалографії при дослідженні структури мікрокристалів [19, 165, 178, 179], при дослідженнях біологічних об'єктів [28, 56, 115, 123, 127, 130, 196], в медицині при дослідженнях судин і крові [94] та в багатьох інших [4, 34, 35, 45, 222].

Фотограмметричне опрацювання електронно-мікроскопічних зображень має ряд суттєвих особливостей на відміну від обробки зображень, отриманих за допомогою приладів з фізичною оптикою. Головна з них та, що до електронно-мікроскопічних зображення при збільшеннях більших  $500\times$  можна застосовувати лише паралельну проекцію на відміну від аеро- чи наземних зображень, які отримують в центральній проекції. У РЕМ-зображень порівняно низька метрична якість, а також недостатньо досліджені фотограмметрично строго обґрунтовані алгоритми опрацювання таких зображень. Ці питання потребують подальших як теоретичних так і експериментальних досліджень. Актуальність і важливість проведення таких досліджень неодноразово відзначалась в роботах вітчизняних і закордонних авторів, а також в рішеннях Міжнародного товариства фотограмметрії та дистанційного зондування.

Характерною рисою сучасного розвитку фотограмметрії є використання цифрових методів опрацювання зображень, які знайшли своє застосування і в процесах опрацювання цифрових РЕМ-зображень.

Цифрове опрацювання зображень, на відміну від аналогового чи аналітичного, дозволяє проводити різні перетворення над зображенням і успішно застосовувати в цих процесах сучасні програмні продукти. Однак практична реалізація цифрової обробки РЕМ-зображень на даний час перебуває ще у відносно початковій стадії і в цьому напрямку є багато питань, які ще не досліджені.

Отже, подальший розвиток цифрової РЕМ-стереофотограмметрії має важливе науково-практичне значення в дослідженнях різноманітних об'єктів на мікронному й субмікронному рівнях. Це особливо важливо в сучасних умовах з розвитком нанотехнологій.

1.3. Аналіз теорії і практики опрацювання РЕМ-зображень з метою отримання просторових кількісних параметрів мікроповерхонь об'єктів

#### 1.3.1. Теоретичні дослідження

Найбільш фундаментальними теоретичними роботами РЕМ-фотограмметрії є праці А. Boude, R. Burkhardt, В.М. Мельника, Є.І. Калантарова, А.В. Шостак.

В РЕМ зображення формується електронно-оптичним шляхом внаслідок сканування дослідної ділянки мікроповерхні об'єкта пучком електронів за растровим принципом зліва-направо, зверху-вниз і його подальшим виведенням на екрани моніторів РЕМ та записом у цифрову форму. Відмінність РЕМ-зображень від зображень, отриманих з допомогою ПЕМ або світлових мікроскопів полягає в тому, що при його формуванні тут не існує променів, які йдуть безпосередньо від об'єкта до його зображення, а РЕМ-зображення формується з окремих точок різної



оптичної щільності, пропорційно кількості відбитих чи вибитих (вторинних) електронів з мікроповерхні, які вловлюються детекторами.

В процесі опрацювання РЕМ-зображень найважливішим завданням є визначення виду проекції за якою здійснюється його формування, а також встановлення відповідної математичної моделі зв'язку просторових координат точок мікроповерхні об'єкта з відповідними точками його РЕМ-зображення.

Процес формування зображення в РЕМ описаний в роботах [34, 55, 83, 138, 139], де відмічено, що при малих збільшеннях (до 500 крат) РЕМ-зображення можна розглядати як отримане у центрально-афінній проекції. А при великих збільшеннях електронні промені, що формують РЕМ-зображення, перетинаються в умовному центрі проекції під дуже малими кутами (порядку 1-5'), тобто має місце майже паралельне відображення об'єкта із умовного центра проекції. Тому при збільшеннях більше 500 крат замість центрально-афінної необхідно використовувати перспективно-афінну проекцію.

Відповідно до цих міркувань, в роботах [107, 191, 192] була показана правомірність використання теорії колінеарності для опису геометрії РЕМ-зображень. У відповідності з цією теорією передбачається, що РЕМ-зображення є перспективно-афінне, а стереомодель формується послідовно із множини центрів проекцій, що відповідають множині точок, які відображаються.

Отримання стереопар в РЕМ полягає в повторній зйомці однієї і тієї ж ділянки досліджуваного зразка, нахиленого під різними кутами ( $5^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ) по відношенню до електронного зонда [55, 137]. Кут нахилу змінюють механічно за допомогою спеціального гоніометричного столика. При цьому можливе застосування двох способів: нахилу, при якому досліджуваний зразок нахиляють навколо однієї з двох взаємно перпендикулярних осей столика або нахилу і обертання, при якому

об'єкт нахиляють навколо горизонтальної осі і обертають в площині об'єктотримача гоніометричного столика. Останній спосіб практично не використовується, оскільки отримані таким чином РЕМ-зображення дуже важко стереоскопічно розглядати, складно вимірювати і опрацьовувати. Найбільш часто використовуються способи нахилу зразка навколо осі Y столика на кути  $\alpha$ . На практиці застосовуються 3 випадки РЕМ-знімання: *рівномірно-відхилений*, коли лівий знімок отримують при куті нахилу  $-\alpha$ , а правий - при  $+\alpha$ , *нормально-конвергентний*, коли лівий знімок отримують при горизонтальному положенні столика  $\alpha_n = 0^\circ$ , а правий – при куті  $\alpha_n \neq 0^\circ$  (як правило  $\alpha_n = 4^\circ \div 12^\circ$  в залежності від складності мікрорельєфу поверхні об'єкта та величини збільшення), а також *конвергентний*, коли обидва знімки нахилені на кут  $\alpha$  і різниця між ними  $4^\circ \div 12^\circ$ . Найбільш доцільно використовувати нормально-конвергентний випадок РЕМ-знімання.

Отримані таким чином РЕМ-стереозображення мають деякі відмінності, викликані як різною освітленістю ділянок зразка, так і їх зміщеннями за рахунок нахилу зразка під час зйомки. При цьому напрямком таких зміщень залежить від напрямку осі, відносно якої нахиляється зразок. Якщо вказані зміщення відбуваються в горизонтальному напрямку, тобто паралельно очному базису людини, то дослідник буде спостерігати стереоефект. Як правило, в сучасних РЕМ, в процесі отримання стереопар і нахилу об'єктів на кут  $\alpha$  відбувається їх зміщення вздовж вертикалі, тому для отримання стереоефекту обидва зображення необхідно повернути на  $90^\circ$ .

На підставі аналізу літературних джерел нами встановлено, що виходячи з теорії перспективно-афінного проектування на даний час не було отримано аналітично формул зв'язку просторових координат точок мікроповерхні об'єкта з відповідними його координатами на РЕМ-зображеннях для 3 основних видів РЕМ-знімання у явному вигляді.

Цей розв'язок нами виконаний і висвітлений у другому розділі дисертації. Раніше нами були отримані аналогічні формули на підставі геометричних побудов, а зараз вони підтверджені аналітично. Тобто теоретична модель підтвердила попередню гіпотезу, яка базувалась на геометричних побудовах. У цьому ж розділі рекомендовано і описано системи координат, які доцільно використовувати у цифровій РЕМ-стереофотограмметрії, і які в літературі не були у повній мірі висвітлені.

### 1.3.2. Математичні моделі визначення геометричних спотворень РЕМ-зображень та їх врахування

З численних досліджень відомо, що РЕМ-зображенням притаманні значні геометричні спотворення, причинами яких є, насамперед, недосконалість роботи відхиляючих котушок РЕМ при скануванні зразка, нестабільність електромагнітних полів та недостатній рівень вакууму у колоні РЕМ, похибки цифрового запису РЕМ-зображень та ряд інших. Тому однією з основних проблем опрацювання РЕМ-зображень є необхідність встановлення величин і характеру цих спотворень та подальше їх врахування в процесі отримання просторових координат точок мікроповерхні дослідного об'єкту.

Врахування впливу окремих факторів, що впливають на спотворення РЕМ-зображень майже неможливий, оскільки чисельна характеристика їх або невідома, або відома лише наближено. Тому є зміст здійснювати математичне моделювання сумарних геометричних спотворень РЕМ-знімків, базуючись на аналітичному порівнянні відомих («істинних») координат  $x_{ict}$  і  $y_{ict}$  вузлових точок тест-об'єкта (перехресть сітки) та поміряних координатах  $x$  і  $y$  зображень цих перехресть на РЕМ-знімку.

Для калібрування геометричних спотворень РЕМ-зображень вирішальним є наявність спеціальних тест-об'єктів з відомою

розрізняючою здатністю, тобто числом вузлів чи ліній на 1 мм тест-об'єкта. Серед відомих тест-об'єктів в Україні – тест-сітка з розрізняючою здатністю 200 лін/мм, виготовлена в Німеччині на замовлення проф. В.М. Мельника, а також так звані голографічні тест-об'єкти (решітки), з розрізняючими здатностями 1370 лін/мм, 1425 лін/мм і 3530 лін/мм, які виготовлялись в Інституті напівпровідників АН України. Процес виготовлення таких тест-об'єктів є технологічно складним. Колишні і сучасні РЕМ не обладнані тест-об'єктами. Сучасні РЕМ японського виробництва фірм JEOL, HITACHI з пристроями цифрового запису зображень вважають свої РЕМ каліброваними і допускають наявність геометричних спотворень в межах  $\pm 3\%$ , яка переважно влаштовує користувачів.

З часу появи у 50-х роках РЕМ дослідники намагались встановлювати величини спотворень РЕМ-зображень і їх враховувати. Для встановлення масштабу РЕМ-знімків подеколи користуються напиленими на поверхню зразка каліброваними полістирольними латексними кульками з діаметрами від декількох десятих до декількох мкм. Однак їх застосування більш-менш ефективно лише при незначних збільшеннях і дуже нетривалий час, оскільки під дією пучка електронів вони швидко «плавляться», тобто втрачають свою форму і калібровані розміри. Крім того точність визначення реального збільшення (масштабу) РЕМ-знімків з їх допомогою не завжди недостатня - в межах 3-10%. Однак у 60-90- роках минулого століття не відюстовані РЕМ могли давати розбіжність реального масштабу з встановленим на шкалі приладу в межах  $\pm 25-50\%$ , тому їх застосування було доцільним. Крім того визначити геометричні спотворення нелінійного характеру, так звані дисторсійні спотворення, які достатньо значні, особливо на краях РЕМ-зображень (до 3 мкм) за допомогою латексних кульок неможливо.

Вагомі дослідження геометричних спотворень РЕМ-зображень та їх врахування (апроксимацію) поліномами, калібрування збільшень РЕМ були виконані S.K. Ghosh [234], Brown, R. Burkhardt [230], В.М. Мельником [103, 105, 111, 136- 138], Шостак А.В [136, 137] та ін. Проте їх неможливо було б виконати, якщо б не були створені калібрувальні тест-об'єкти, велику увагу створенню яких присвятили Б.Н. Васічев [21, 163], С.А. Діцман [39], Л.Н. Невзорова [39, 149], Ю.С.Смірнов [163], В.М. Мельник [137], М.Т. Костишин, П.Ф. Романенко [88] та інші.

Геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень, які отримують на сучасних РЕМ практично не досліджувались, за винятком РЕМ Hitachi, які виконала Шостак А.В. [136, 215], однак ці дослідження виконані у відносно не великому діапазоні збільшень РЕМ ( $500^x$ - $3000^x$ ).

Тому перед нами постало завдання дослідити якомога більше типів сучасних РЕМ, найбільш відомих зарубіжних фірм і вітчизняного РЕМ 106I, виробництва Сумського ВАТ «SELMІ» у максимально можливому діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $40000^x$  (крат). А також розробити технологію автоматизованого вимірювання цифрових РЕМ-зображень вузлів тест-об'єкта в процесі їх калібрування, з метою значно скоротити час на виконання рутинних і відносно значних за часом вимірювань за програмою «Dimicros». Ці численні дослідження і розроблена автоматизована технологія калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень приведена нами у третьому розділі дисертації.

В процесі роботи над питаннями цього розділу було встановлено, що цифрові РЕМ-зображення досліджуваних тест-об'єктів мають т. з. властивості *скейлінга*, тобто масштабної інваріантності (самоподібності) і до них може бути застосована теорія і принципи фрактальної геометрії. Отримані в результаті досліджень числові фрактальні характеристики цифрових РЕМ-зображень тест-об'єктів для кожного з досліджених типів РЕМ є унікальними і постійними лише для конкретного типу РЕМ і не

залежать від величини збільшення. Тому за відсутності тест-об'єктів ці характеристики можна використовувати для визначення дійсних збільшень (масштабу) РЕМ-зображень в залежності від встановлених на шкалі РЕМ, що вкрай важливо. Дані дослідження приведені у 3 розділі дисертаційної роботи.

Важливими також є питання автоматизації вимірів цифрових РЕМ-зображень в процесі калібрування їх метричних параметрів з метою пришвидшення цього доволі рутинного процесу і зменшення помилок суб'єктивного характеру. Нами розроблено і запропоновано оригінальний метод автоматизації вимірювань РЕМ-стереозображень тест-об'єкта з метою отримання кількісних параметрів геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень та їх апроксимації, який базується на теоретичних і практичних напрацюваннях к.т.н. Тумської О.В. і використовує складені нею авторські програми з використанням пакету MatLab. Експериментальні дослідження з цієї проблематики виконано за вимірами цифрових РЕМ-стереозображень тест-об'єкта з розрізняючою здатністю 1425 лін/мм і приведені у другому розділі дисертаційної роботи.

### 1.3.3. Проблематика цифрового моделювання мікроповерхонь дослідних об'єктів за їх РЕМ-стереозображеннями

Дослідженнями проблематики пошуку оптимальних методів математичного моделювання рельєфу земної поверхні займалися і продовжують займатися відомі вчені в Україні та за кодоном, зокрема Черваньов І.Г., Поздняков О.В., Руденко Л.Г., Малявський Б.К., Жарновський О.О., Журкін І.Г., Бурштинська Х.В. [9-16], Рудий Р.М. [157], Шинкаренко Г.А., Бойко О.В., Заяць О.С. [11, 12, 14], Z. Miller, R. Torlegard, M. Baranowski, R. Finsterwalder та інші.

Першим в Україні, хто взявся за розв'язання проблем математичного моделювання мікрорельєфу поверхонь на мікронному і субмікронному рівнях за їх РЕМ-стереозображеннями і продовжує сьогодні успішно їх проводити в Україні є професор Мельник В.М. [134, 137]. Над цією проблематикою також працювали Разгуліна О.В., Соколов В.М., Юрковець Д.І. (усі МНУ ім. М.Д. Ломоносова, Росія) [170, 173-176], Шостак А.В. [202, 204, 206, 215], Тумська О.В. [188], Волошин В.У. [132], Мельник Ю.А. [144] та ряд інших.

В теорії моделювання рельєфу земної поверхні математичні методи, що застосовуються при цьому умовно поділяють на дві групи [16]: до першої групи відносять методи, які базуються на різноманітних аналітичних функціях (степеневих і ортогональних поліномів, сплайнів, радіальних базисних функцій, триангуляції, скінчених елементів, R-функцій, рядах Фур'є, тощо), а до другої групи – методи, які враховують статистичні характеристики рельєфу (Крігінга, середнього вагового, вагових функцій, випадкових функцій, колокації, тощо).

Встановлено [16], що найкращі результати моделювання отримано при використанні обох груп методів, коли систематична складова виключається за допомогою аналітичних функцій, а у відмітки точок вводяться поправки, які встановлюються на основі статистичних методів. При побудові цифрових моделей мікрорельєфу (ЦММР) на мікронному рівні застосовувались лише декілька найбільш відомих математичних методів, зокрема, метод Крігінга.

Перед нами було поставлено завдання виконати дослідження значно більшої кількості відомих математичних моделей і встановити ефективність їх використання для побудови ЦММР мікроповерхонь дослідних об'єктів, використовуючи програмний пакет Surfer 10.0 та дані вимірів РЕМ-стереопар на ЦФС «Дельта» з використанням програмного комплексу «Dimicros». Об'єктом досліджень були цифрові РЕМ-

стереозображення фрагментів мікроповерхні лесового ґрунту, отримані на РЕМ Hitachi S-800, поверхні хромованої сталі, отримані на РЕМ JSM 7100F та поверхні руйнування металевої деталі, отримані на РЕМ 106 I.

В результаті численних досліджень побудовані цифрові моделі мікрорельєфу дослідних об'єктів різними математичними методами, виконана оцінка їх точності в залежності від параметрів РЕМ-знімання і характеру мікрорельєфу та дано рекомендації щодо доцільності та ефективності їх застосування.

Важливим залишається проблема автоматизації процесу побудови ЦММР мікроповерхонь об'єктів. Цю проблематику розглянуто доволі детально на теоретичному рівні проф. Мельником В.М. [124, 136, 137] та частково експериментально досліджено в роботах Шостак А.В. [203, 208, 215], Тумської О.В. [9, 188] та ряду інших авторів.

Ґрунтуючись на напрацюваннях к.т.н. Тумської О.В. та використовуючи складені нею програми для автоматичної побудови ЦММР об'єктів за вимірами цифрових РЕМ-стереозображень, нами виконані оригінальні дослідження з цієї проблематики, виконано аналіз запропонованих методик та дано практичні рекомендації. Експериментальні дослідження з проблематики автоматичних методів побудови ЦММР мікроповерхонь об'єктів виконані нами за вимірами цифрових РЕМ-стереозображень фрагментів мікроповерхні хромованої сталі і лесового ґрунту та приведені у четвертому розділі дисертації.

Однак проблема остаточно не вирішена і потребує подальших досліджень.



1.3.4. Прикладне застосування методів РЕМ-стереофотограмметрії для досліджень кількісних параметрів мікроповерхонь об'єктів

За останні 50-60 років растрові електронні мікроскопи використовувались для досліджень великої кількості різноманітних мікроповерхонь у багатьох галузях науки та виробництва.

Це, насамперед, дослідження різноманітних металічних шліфованих мікроповерхонь, зокрема, внутрішніх поверхонь циліндрів згоряння двигунів, деталей і механізмів автомобілів у автомобілебудуванні [55, 110, 218], поверхонь деталей конструкцій сільськогосподарських машин [219], поверхонь зношування та злому дробометальних лопаток турбін у машинобудуванні [8], поверхонь різноманітних деталей у мікроелектроніці [179] та поверхонь багатьох інших матеріалів в процесах їх виготовлення, експлуатації, деформації, ерозійних явищ, зламів тощо.

Важливими є дослідження з допомогою РЕМ мікроструктур різноманітних типів ґрунтів (глин, лесів) з метою встановлення їх фізико-хімічних та механічних властивостей і характеристик [55, 128, 166, 174]. Ці дослідження важливі в інженерній геології та будівельній індустрії, оскільки 70-80% усіх капітальних споруд будуються на глинистих ґрунтах.

У літературі також висвітлені різноманітні дослідження у біології та медицині, зокрема, дослідження особливостей будови, росту, формоутворення і регенерації скелету людини під дією різних факторів, дослідження важливих для медиків кількісних характеристик порового простору кістки в різні періоди її онтогенезу [123], спостереження за змінами у гістоструктурі кісткових тканих тварин під дією радіації [130], дослідженнях структури тканин судин та форми і розмірів еритроцитів крові [56, 94] та багатьох інших.

Безумовно, спектр застосування РЕМ надзвичайно широкий, особливо в сучасній індустрії, яка широко застосовує нанотехнології в процесах створення різноманітних пристроїв.

#### 1.4. Задачі дисертаційної роботи

У підрозділах 1.1. – 1.2. нами виконано аналіз літературних джерел у сфері РЕМ-фотограмметрії, виявлені проблеми теоретичного і практичного характеру, вирішення яких сприятиме подальшому застосуванню РЕМ-фотограмметрії в дослідження мікрооб'єктів.

З цією метою нами були сформульовані наступні задачі для розв'язання у дисертаційній роботі:

- отримання формул взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхонь об'єктів з відповідними їх координатами на РЕМ-стереознімках для 3-х основних методів РЕМ-знімання у явному вигляді на основі строгої теорії перспективно-афінного відображення;

- розробка методу визначення дійсних масштабів (збільшень) зображень мікрооб'єктів на основі аналізу особливостей формування і запису цифрових РЕМ-зображень різних типів РЕМ;

- опрацювання методики оцінки метрики і спотворень цифрових зображень, отриманих на сучасних, раніше не досліджуваних РЕМ різних моделей, а також вибір найбільш ефективного методу 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 технології автоматизації вимірів вузлових точок тест-об'єктів на цифрових РЕМ-зображеннях і автоматизоване калібрування їх геометричних спотворень;

- дослідження ефективності математичних методів побудови цифрових моделей мікроповерхонь дослідних об'єктів з метою оптимальної реконструкції просторової моделі рельєфу мікроповерхонь та їх структури;

- розробка і дослідження методу автоматизованої побудови цифрової моделі мікроповерхні 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 і створення програм, які б забезпечили практичну реалізацію основних теоретичних і практичних напрацювань.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОПОВЕРХНІ ОБ'ЄКТА ЗА ЙОГО ЦИФРОВИМИ РЕМ-СТЕРЕОЗОБРАЖЕННЯМИ

### 2.1. Особливості формування цифрових зображень растровими електронними мікроскопами

Аналіз сучасного стану растрової електронної мікроскопії показав (див. розділ 1), що перехід на цифровий запис образів мікрооб'єктів суттєво розширяє можливості отримання його кількісних параметрів. Для повного розуміння та обґрунтування прийнятих нами теоретичних підходів необхідно пояснити особливості формування таких зображень і коротко описати сутність цього процесу.

Зображення поверхні дослідного об'єкту (метал, мінерали, геологічні породи, ґрунти, тощо) на екрані монітору растрового електронного мікроскопу (РЕМ) формується за растровим принципом, внаслідок сканування поверхні твердого тіла вузьким пучком електронів у двох взаємно перпендикулярних напрямках від точки до точки зліва направо зверху вниз. Послідовність цього процесу у спрощеному варіанті наступна. Джерелом електронів є розжарений під дією високої напруги (25-30 кВ) вольфрамовий катод. Під дією прискорюючої напруги електрони стискаються у щільний пучок електромагнітними лінзами РЕМ, далі за допомогою блоку розгортки здійснюють сканування поверхні зразка, вибиваючи при цьому з його верхнього шару вторинні електрони, які в свою чергу «вловлюються» детектором, підсилюються помножувачем і власне формують точкове зображення на моніторі РЕМ. Сила яскравості кожної точки пропорційна кількості «вибитих» вторинних електронів у відповідній точці поверхні досліджуваного об'єкту і, в свою чергу, залежить від матеріалу об'єкта, мікрорельєфу його поверхні та кута під

яким ми його спостерігаємо по відношенню до скануючого пучка електронів. Оператор рухами гоніометричного столика вздовж осей  $x$  і  $y$  монітора РЕМ проглядає дослідну поверхню твердого тіла (зразка), далі встановлює відповідне збільшення (масштаб), вибирає характерну ділянку мікроповерхні об'єкта і для отримання РЕМ-стереопари фотографує її при 2-х кутах нахилу гоніометричного столика. На практиці, як правило, використовується нормально конвергентний випадок знімання ( $\alpha_n=0^\circ$ ,  $\alpha_n \neq 0^\circ$ ,  $\omega=\kappa=0^\circ$ ). При нахилі гоніометричного столика на кут  $\alpha_n$  зображення на екрані монітора рухами вздовж осей  $x$  і  $y$  необхідно утримувати у початковому положенні таким чином, щоби отримати 100% перекриття знімків, тобто базис фотографування при цьому  $b_x=0$ . Електронні системи запису перетворюють зображення на моніторі РЕМ у цифрову форму, яка може бути записана у сучасних РЕМ у форматах .jpg., .bmp чи .tif. У РЕМ попередніх моделей, в яких не було можливості запису РЕМ-зображення у цифрову форму, виконувалось фотографування зображення з екрану монітора РЕМ звичайним фотоапаратом на фотоплівку (як правило, шириною 65 мм з розміром знімка 60x60 мм). Для подальшого фотограмметричного опрацювання такі РЕМ-знімки необхідно перевести у цифрову форму, тобто відсканувати їх на фотограмметричному сканері з розділенням 600 - 1200 dpi. Результатом опрацювання цифрових РЕМ-зображень стереофотограмметричним методом є різноманітні кількісні просторові параметри мікроповерхні дослідного об'єкту в абсолютних величинах (як правило, у мікрометрах) представлених у вигляді ЦМР, мікропланів з горизонталями, профілів, 3D моделей, аксонометричних проєкцій і т.п.

Для отримання кількісних параметрів мікроповерхні твердого тіла важливо встановити аналітичний зв'язок між просторовими координатами

точок об'єкта і відповідними їх координатами на РЕМ-знімку в залежності від параметрів РЕМ-знімання. Для цього, насамперед, розглянемо геометрію отримання РЕМ-зображення.

Якщо допустити, що вершина сканування пучком електронів об'єкта незмінно знаходиться в центрі котушки розгортки РЕМ, а мінімальна відстань до об'єкта складає 100 мм, то при збільшенні ділянки сканування розміром 0,1x0,1 мм у  $1000\times$  (крат) на моніторі РЕМ отримаємо зображення мікроповерхні розміром 100x100 мм. Кут розгортки електронного пучка при цьому складатиме лише  $2'$ , що дає нам підстави твердити про сканування поверхні об'єкта практично ортогональними променями при збільшеннях зображення  $M > 1000\times$ . А це означає, що РЕМ-зображення є збільшеною у  $M$  крат ортогональною проекцією ділянки сканування на умовну горизонтальну площину, паралельну до положення гоніометричного столика при  $\alpha=0^\circ$ . Йому властиві геометричні спотворення, що виникають внаслідок цілого ряду факторів (похибок сканування об'єкта, різномасштабності розгортки зображення вздовж взаємно-перпендикулярних осей  $x$  і  $y$  на екрані монітора, його кривизни, спотворень системи: об'єктив фотоапарата - плівка при аналоговому методі отримання зображень і т.п.). Ці спотворення можна врахувати за допомогою спеціальних калібрувальних тест-об'єктів, використовуючи методи поліноміальної апроксимації, ефективність яких нами доведена результатами експериментальних досліджень (див. розділ 3).

Таким чином, якщо межі об'єкта сканування у вигляді, наприклад, квадрата (при горизонтальному положенні гоніометричного столика) позначити буквами  $A^0B^0C^0D^0$ , то їм будуть відповідати відповідні точки на РЕМ знімку  $a^0b^0c^0d^0$  (рис. 2.1).

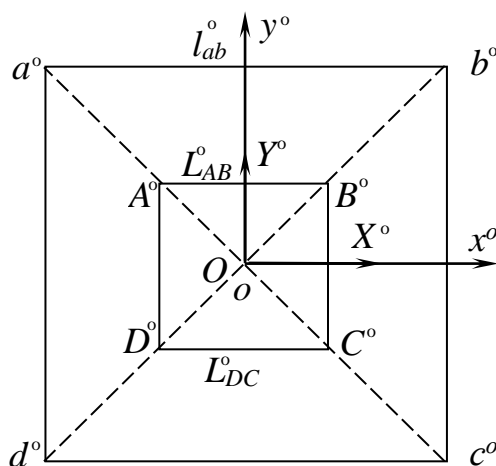


Рис. 2.1. Геометрія відповідності об'єкта та його РЕМ-зображення за умови відсутності спотворень при його формуванні

Тоді справедливим буде співвідношення :

$$M = \frac{l^{\circ}_{a^{\circ}b^{\circ}}}{L^{\circ}_{A^{\circ}B^{\circ}}} = \frac{l^{\circ}_{b^{\circ}c^{\circ}}}{L^{\circ}_{B^{\circ}C^{\circ}}} = \frac{l^{\circ}_{c^{\circ}d^{\circ}}}{L^{\circ}_{C^{\circ}D^{\circ}}} = \frac{l^{\circ}_{a^{\circ}d^{\circ}}}{L^{\circ}_{A^{\circ}D^{\circ}}} \quad (2.1)$$

або в координатній формі для плоских координат:

$$\left. \begin{aligned} X^{\circ} &= x^{\circ} / M \\ Y^{\circ} &= y^{\circ} / M \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Для визначення просторових координат  $Z(h)$  поверхні об'єкта необхідно отримати і обробити два знімки (стереопару). Їх отримують при двох положеннях (кутах нахилу) об'єкта дослідження по відношенню до скануючого пучка променів чи умовної горизонтальної площини гоніометричного столика. Для цього об'єкт поміщають в РЕМ на гоніометричний столик, який можна лінійно переміщати у трьох напрямках  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , нахиляти навколо осей  $Y$  і  $X$ , відповідно, на кути  $\acute{\alpha}$  та  $\omega$ , а також розвертати навколо осі  $Z$  на кут  $\kappa$ . При нахилі об'єкта, наприклад, навколо осі  $Y$  на кут  $\acute{\alpha}$  початкове положення центральної точки об'єкта  $O$  на екрані РЕМ буде зміщуватись вздовж осі  $X$ . Для отримання другого знімка РЕМ–

стереопари, зміщену під впливом кута нахилу точку  $O$  необхідно рухом столика вздовж осі  $X$  перемістити у початкове положення, тобто в центр екрану. Таким чином, стереознімки в РЕМ на відміну від аеро- чи наземних стереопар будуть мати нульовий базис, тобто  $b_{x(y)} = 0$ .

Оскільки нахили об'єкта досліджень навколо осі  $Y$  гоніометра спричиняють зміщення точок на знімках РЕМ-стереопари вздовж осі  $x$ , тобто появу поздовжнього паралаксу, то вимірявши на стереокомпараторі різниці паралаксів точок мікроповерхні відносно точки, взятої за початок відліку просторових координат (як правило, центральної точки знімка або точки в лівому нижньому його куті), можна отримати їх висоти  $Z(h)$ .

Трансформацію зображення, спричинену нахилом об'єкта на різні кути показано на рис. 2.2.

У практиці РЕМ-стереознімання застосовують два основних способи:

- 1) нахилів, при якому об'єкт нахиляється навколо осей  $Y$  або  $X$  гоніометра, відповідно на кути  $\alpha$  або  $\omega$ ;

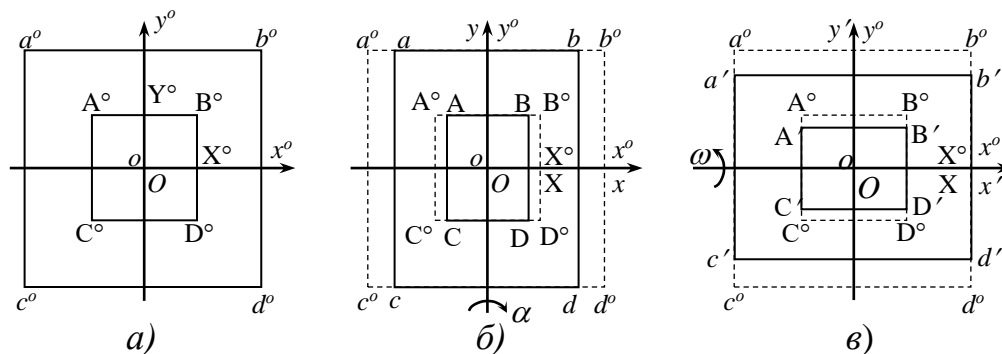


Рис. 2.2. Геометрія відповідності об'єкта сканування в РЕМ та його РЕМ-зображення: а)  $\alpha=\omega=0^\circ$ , б)  $\alpha\neq 0^\circ$ ,  $\omega=0^\circ$ , в)  $\alpha=0^\circ$ ,  $\omega\neq 0^\circ$ .

- 2) нахилу і обертання, коли столик з приклеєним до нього об'єктом спочатку нахиляється навколо однієї з горизонтальних осей  $Y$  або  $X$ , а потім знімки стереопари отримують при двох кутах розвороту нахиленого столика навколо осі  $Z$  на кути  $\kappa$ .



Що стосується першого способу, то він має три випадки РЕМ-знімання:

1) *рівномірно-відхилений*, коли об'єкт нахиляється навколо однієї з горизонтальних осей столика  $Y$  чи  $X$  в різні боки на рівні, але протилежні за знаком кути, відповідно  $-\alpha$  і  $+\alpha$  чи  $-\omega$  і  $+\omega$  (див. рис. 2.3. а);

2) *нормально-конвергентний*, коли один із знімків (наприклад, лівий) отримують при горизонтальному положенні столика ( $\alpha_l = \omega_l = \kappa_l = 0^\circ$ ), а другий при нахилі об'єкта навколо осі  $Y$  столика на кут  $\alpha$ , або навколо осі  $X$  столика на кут  $\omega$  (див. рис. 2.3. б);

3) *конвергентний*, коли об'єкт нахиляють на два різні кути нахилу  $\alpha$  чи  $\omega$  (див. рис. 2.3. в).

У всіх трьох випадках знімання  $\kappa_l = \kappa_n = 0^\circ$ .

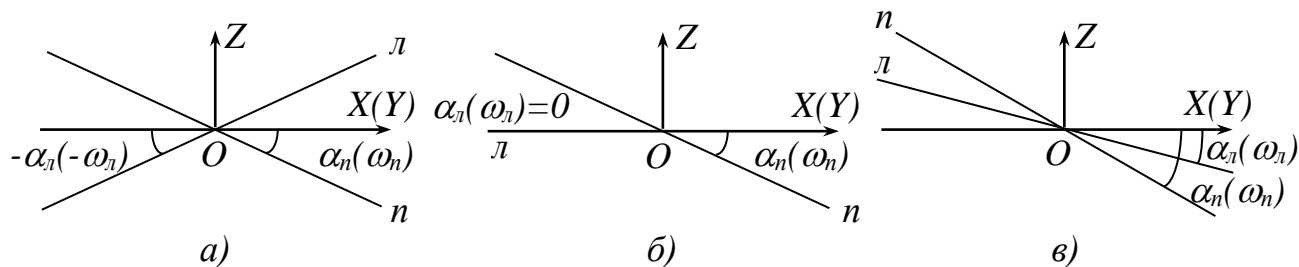


Рис. 2.3. Випадки РЕМ-знімання: а) рівномірно-відхилений; б) нормально-конвергентний; в) конвергентний

Другий спосіб на практиці застосовується дуже рідко, тому ми на ньому не будемо зупинятися.

## 2.2. Системи координат у цифровій РЕМ-фотограмметрії

Цифрове РЕМ-зображення формується в РЕМ за растровим принципом шляхом сканування електронним зондом поверхні об'єкта зліва направо зверху вниз і складається з матриці окремих елементів (пікселів), оптична щільність яких пропорційна кількості відбитих з поверхні окремого елемента об'єкта електронів або вибитих з її поверхні (режим вторинних електронів).

Для вимірювання і опрацювання цифрових РЕМ-зображень з подальшим отриманням кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів важливо встановити системи координат, використання яких буде доцільним.

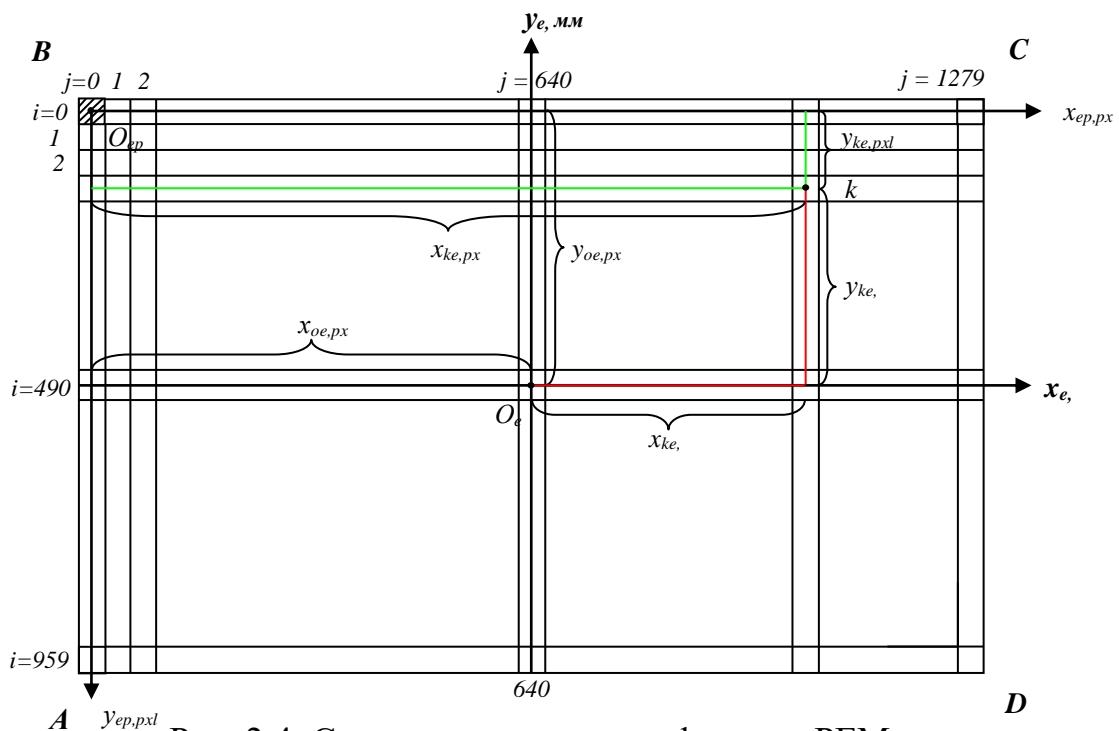


Рис. 2.4. Системи координат цифрового РЕМ-знімка, записаного з екрану монітора

Особливістю цифрових РЕМ-зображень на відміну від аеро- чи наземних є відсутність координатних міток. Тому, найбільш доцільно, на наш погляд, за початок плоскої системи координат обрати геометричний центр знімка, який легко знайти як точку перетину діагоналей  $AC$  і  $BD$  (рис. 2.4, точка (піксел)  $O_e$ ). Традиційно для фотограмметрії

горизонтальна лінія знімка - вісь абсцис  $x_e$ , а вертикальна лінія – вісь ординат  $y_e$ . Індекс  $e$  тут показує на те, що знімок записаний у цифрову форму з екрана монітора РЕМ. Вибір центральної точки знімка в якості початку системи його координат обумовлений ще й тим фактором, що внаслідок ортогонального сканування об'єкта електронним зондом можна вважати, що у точці  $o_e$  відсутні геометричні спотворення і в центральній частині знімка вони незначні. Програма вимірювань цифрових РЕМ-зображень «Test-Mesuring» дозволяє оператору вручну нарисувати діагоналі знімка, встановити точку їх перетину як точку (піксел) початку системи координат і присвоїти їй значення  $x_{oe} = y_{oe} = 0$ . Виміри координат точок у цій системі виконуються у *мм* (приклад на рис. 2.1.1 – т.  $k$  з координатами  $x_{ke}$ ,  $y_{ke}$ ).

У цифровій фотограмметрії традиційно застосовується система координат в якій вимірювання ведуться у *пікселах*. Лінійний розмір піксела, як правило, відомий. Початок координат у цій системі знаходиться у центрі піксела, що міститься у верхньому лівому куті знімка. За аналогією, для цифрової РЕМ-фотограмметрії позначимо цю точку символом  $O_{ep}$  (рис. 2.4). Вісь абсцис тут  $x_{ep}$  – горизонтальна лінія від точки  $O_{ep}$  зліва направо – додатня, вісь ординат  $y_{ep}$  – вертикальна лінія від точки  $O_{ep}$  зверху вниз також додатня.

Сучасні РЕМ формують цифрові РЕМ-зображення у 2-3 форматах: JPG, BMP і TIF. Розмір РЕМ-зображення у кожного типу РЕМ свій, але він має, як правило, співвідношення горизонтальної до вертикальної сторін у пропорції 4:3. Так для прикладу у РЕМ японського виробництва JCM-5000 (NeoScope), JSM 7100 F і у вітчизняного РЕМ 106 I розмір зображення (розгортка) складає 1280x960 пікселів, а у DSM-960A – 800x600 пікселів. А от розмір піксела у РЕМ може бути різним: у JCM-5000 (NeoScope) – 0,09132 мм, JSM 7100 F і у РЕМ 106 I – 0,09375 мм, що відповідає фізичному розміру знімка 120x90 мм, у DSM-960A –

0,13698 мм. На рис. 2.2.1 позначені  $i$ -ві рядки від 0 до 959 і  $j$ -ві стовбці від 0 до 1259 для цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM-5000 (NeoScope), JSM 7100 F і РЕМ 106 I. Для РЕМ DSM-960A, відповідно,  $i$ -ві рядки від 0 до 599 і  $j$ -ві стовбці від 0 до 799. Відповідно, координати точки  $k$  : абсциса -  $x_{ke}$ , ордината -  $y_{ke}$ .

Для цих систем координат цифрового РЕМ-знімка можна записати наступні значення координат точок та співвідношення їх лінійних і піксельних значень для довільної точки  $k$ :

- у пікселях:  $x_{oep} = y_{oep} = 0$ ,  $x_{oe} = 640$ ,  $y_{oe} = 480$ ;

$$x_{ke, pxl} = x_{oe, pxl} + x_{ke, мм} / \Delta x, мм; \quad (2.3)$$

$$y_{ke, pxl} = y_{oe, pxl} - y_{ke, мм} / \Delta y, мм;$$

- у лінійній мірі (мм):  $x_{oe} = y_{oe} = 0$ ;

$$x_{ke, мм} = (x_{ke, pxl} - x_{oe, pxl}) \cdot \Delta x, мм; \quad (2.4)$$

$$y_{ke, мм} = (y_{oe, pxl} - y_{ke, pxl}) \cdot \Delta y, мм.$$

Формули (2.3-2.4) можна використовувати для калібрування поля геометричних спотворень поодиноких цифрових РЕМ-зображень.

У випадку отримання РЕМ-стереопар, наприклад, для нормально-конвергентного випадку РЕМ-знімання, лівий знімок отримуємо при горизонтальному положенні гоніометричного столика  $\alpha_l = 0^\circ$ , а правий – при нахилі столика навколо осі  $x_e$  (рис. 2.4) на кут  $\alpha_n \neq 0^\circ$ .

Для стереоскопічного спостереження знімків на ЦФС «Дельта» їх необхідно розвернути на  $-90^\circ$  (рис. 2.5).

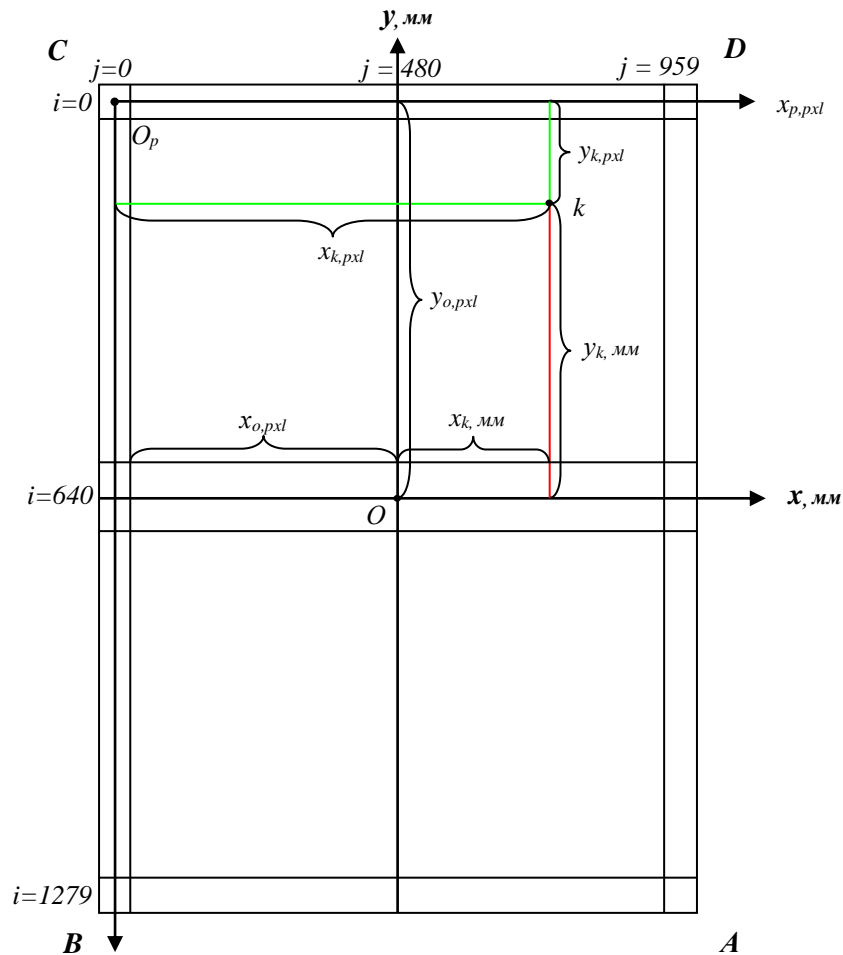


Рис. 2.5. Системи координат РЕМ-знімка при стереоскопічному їх опрацюванні

Таким чином системи координат для РЕМ-стереознімків аналогічні вищеописаним, тобто початок піксельної системи координат  $O_p x_p y_p$  міститься у центрі пікселя, який знаходиться у лівому верхньому куті знімка, а початок лінійної системи координат  $oxy$  у геометричному центрі знімка.

Для цих систем координат цифрових РЕМ-стереопар можна записати наступні співвідношення їх лінійних і піксельних значень координат для довільної точки  $k$ , яка відобразилась на лівому знімку (рис. 2.5):

$$\text{- у пікселях: } x_{op} = y_{op} = 0, x_o = 480, y_o = 640;$$

$$x_{kl, pxl} = x_{o, pxl} + x_{kl, мм} / \Delta x_{, мм}; \quad (2.5)$$

$$y_{kl, pxl} = y_{o, pxl} - y_{kl, мм} / \Delta y_{, мм};$$

- у лінійній мірі (мм):  $x_o = y_o = 0$ ;

$$x_{kl, мм} = (x_{kl, pxl} - x_{o, pxl}) \cdot \Delta x_{, мм}; \quad (2.6)$$

$$y_{kl, мм} = (y_{o, pxl} - y_{kl, pxl}) \cdot \Delta y_{, мм}.$$

При отриманні правого знімка стереопари шляхом його нахилу навколо осі  $y$  точки зміщуються вздовж осі  $x$  під впливом кута нахилу  $\alpha_n$  і різниці висот між  $i$ -товою і центральною точкою знімка на величину паралакса  $p$ , який для точки  $k$  обчислюємо за формулою (2.7):

$$p = x_{kl, мм} - x_{kp, мм} . \quad (2.7)$$

Внаслідок ортогонального сканування під час нахилів ординати точок не змінюються, тому у випадку ідеального суміщення центрів координат лівого і правого знімків ординати точок рівні між собою:

$$y_{il} = y_{in} . \quad (2.8)$$

2.3. Математична модель побудови мікроповерхні об'єкта на базі перспективно-афінного відображення на цифрових РЕМ-стереозображеннях. Формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні з відповідними їх координатами на цифрових РЕМ-стереознімках для різних методів РЕМ-знімання

У теоретичних роботах вище перелічених авторів формули прямої фотограмметричної засічки РЕМ-стереознімання приводяться, як правило, у загальному матричному вигляді, які важко застосувати для практичного використання. Зауважимо, що формули, які подавались у явному вигляді були лише для рівномірно-відхиленого випадку знімання та для випадку знімання методом поворотів, які на практиці застосовуються дуже рідко [137].

Нами раніше вже були отримані формули взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхні дослідних об'єктів з відповідними їх координатами на РЕМ-стереозображеннях у явному вигляді, виходячи з геометричних побудов [55]. Але строгого математичного виведення формул на підставі теорії перспективно-афінного відображення на даний час не було.

Тому було поставлено завдання: використовуючи математичний апарат перспективно-афінного відображення для РЕМ-стереознімання, отримати формули взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхні дослідних об'єктів з відповідними їх координатами на РЕМ-стереозображеннях у явному вигляді для усіх трьох основних способів РЕМ-стереознімання, а також виконати апіорну та апостеріорну оцінки точності отриманих формул.

#### *Теоретичні положення*

При збільшенні зображення в РЕМ більше  $500^x$  (крат), проекцію, яка формує РЕМ-зображення можна вважати паралельною, тобто

перспективно-афінною. Для цієї проєкції 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:

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ 0 \end{pmatrix} = M \cdot A \cdot \left[ \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \right], \quad (2.9)$$

де  $M$  – збільшення (масштаб) РЕМ-зображення,

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

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

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  $\alpha$ , а кути  $\omega = \kappa = 0^\circ$ . Тоді формула (2.9) прийме вигляд:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = M \cdot A_\alpha \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} \text{Cos}\alpha & 0 & -\text{Sin}\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{Sin}\alpha & 0 & \text{Cos}\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

Виходячи з рівняння (2.10) 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-нахиленого* випадку РЕМ-знімання, коли лівий знімок стереопари отримують при нахилі гоніометричного столика на кут  $-\alpha_l$ , а правий – на такий же за величиною кут  $+\alpha_n$ , формули (2.10) після перетворень набудуть наступного виду:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x_l^o + \Delta p_x^o / 2}{M_x \cdot \cos \alpha} \cdot 10^3 \\ Y &= \frac{y_l^o}{M_y} \cdot 10^3, \\ Z(h) &= \frac{\Delta p_x^o}{2M_x \cdot \sin \alpha} \cdot 10^3. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

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

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x_l^o \cdot 10^3}{M_x}; \\ Y &= \frac{y_l^o \cdot 10^3}{M_y}; \\ Z(h) &= \frac{x_l^o \cdot (1 - \cos \alpha_n) + \Delta p_x^o}{M_x \cdot \sin \alpha_n} \cdot 10^3. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

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

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{(x_l^o / M_x) \cdot 10^3 - h \cdot \sin \alpha_l}{\cos \alpha_l}; \\ Y &= \frac{y_l^o}{M_y} \cdot 10^3; \\ Z(h) &= \frac{(x_l^o + \Delta p_x^o) \cdot \cos \alpha_l - x_l^o \cdot \cos \alpha_n}{M_x \cdot \sin(\alpha_n - \alpha_l)} \cdot 10^3 \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

У формулах (2.11-2.13):

$$\left. \begin{aligned} x_l^o &= x_{\text{вим}l} - \Delta x_l, & \Delta p_{x_i}^o &= p_{x_i}^o - p_o, \\ y_l^o &= y_{\text{вим}l} - \Delta y_l, & p_{x_i}^o &= x_{il}^o - x_{in}^o. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_l &= a_0 + a_1 x_l + a_2 y_l + a_3 x_l y_l + a_4 x_l^2 + a_5 y_l^2 + a_6 x_l^3 + a_7 x_l^2 y_l + a_8 x_l y_l^2 + a_9 y_l^3 \\ \Delta y_l &= b_0 + b_1 x_l + b_2 y_l + b_3 x_l y_l + b_4 x_l^2 + b_5 y_l^2 + b_6 x_l^3 + b_7 x_l^2 y_l + b_8 x_l y_l^2 + b_9 y_l^3 \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

У формулах (2.11-2.15):

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

$x_{\text{вим}l}, y_{\text{вим}l}$  – 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 ( $i = 0, 1, 2, \dots, 9$ );

$\Delta p_{x_i}^o$  – 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  $x, y$ );

$\alpha_l, \alpha_n$  – кути нахилу гоніометричного столика навколо осі  $Y$  столика (вздовж осі  $X$ ) при отриманні лівого та правого РЕМ – знімків стереопари.

#### 2.4. Априорна та апостеріорна точність методу

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  $\alpha_n$  від  $4^\circ$  до  $12^\circ$  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) в процесі їх опрацювання в програмному пакеті «Dimicros» [62].

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

Таким чином можна встановити теоретичну точність отримання просторових координат  $X, Y, Z$  мікроповерхонь об'єктів за отриманими формулами. Якщо продиференціювати, для прикладу, формули (2.12) *нормально-конвергентного* випадку РЕМ-знімання, який переважно застосовується на практиці, і перейти до середньоквадратичних похибок, то можна отримати наступні вирази, за умови  $M = \text{Const}$ ,  $\alpha = \text{Const}$ :

$$\begin{aligned} m_{X(Y)} &= m_{x(y)} / M, \\ m_{Z(h)} &= m_{\Delta p(x)} / 2M \cdot \text{Sin}(\alpha_n / 2). \end{aligned} \quad (2.16)$$

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

$$\begin{aligned} m_{X(Y)} &= m_{x(y)} / M, \\ m_{Z(h)} &= m_{\Delta p(x)} / 2M \cdot \sin \acute{\alpha} \end{aligned} \quad (2.17)$$

а для *конвергентного*:

$$\begin{aligned} m_{X(Y)} &= m_{x(y)} / M, \\ m_{Z(h)} &= m_{\Delta p(x)} / 2M \cdot \sin((\acute{\alpha}_n - \acute{\alpha}_l) / 2). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Безумовно, точність визначення масштабів РЕМ-знімків  $M$  і кутів його нахилів  $\acute{\alpha}$  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  $\acute{\alpha}$ . 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 раніше експериментальних робіт [63-69] дозволила встановити залишкові середньоквадратичні похибки цифрових вимірів РЕМ-зображень в залежності від їх масштабу

(збільшення)  $m_{\delta x (\delta y)}$ , середні значення яких за даними по 4 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:

$$m_{x(y, \Delta p)} = m_{\delta x (\delta y)} \cdot \sqrt{2}, \quad (2.19)$$

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

Приведемо розрахунок апріорної точності методу за формулами (2.16) 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  $\alpha$

$M^x$	$m_{x(y, \Delta p)}$ , 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 (теоретичної) точності методу ми провели 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  $M=750^{\times}$  і кутах нахилу гоніометричного столика  $\acute{\alpha} = 0^{\circ}, 4^{\circ}, 6^{\circ}, 8^{\circ}$  (рис. 2.6 - 2.7).

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 складала  $m_{\Delta x} = 85,4$  мкм,  $m_{\Delta y} = 95,2$  мкм (приблизно 1 піксел) при максимальних  $\Delta x = 280,4$  мкм,  $\Delta y = 179,1$  мкм.

За програмою «Polysalc» була виконана їх апроксимація поліномом загального виду 3-го степеня (2.15). Середня квадратична похибка залишкових спотворень складала  $m_{\delta x} = 41,2$  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. 2.6, б, в.

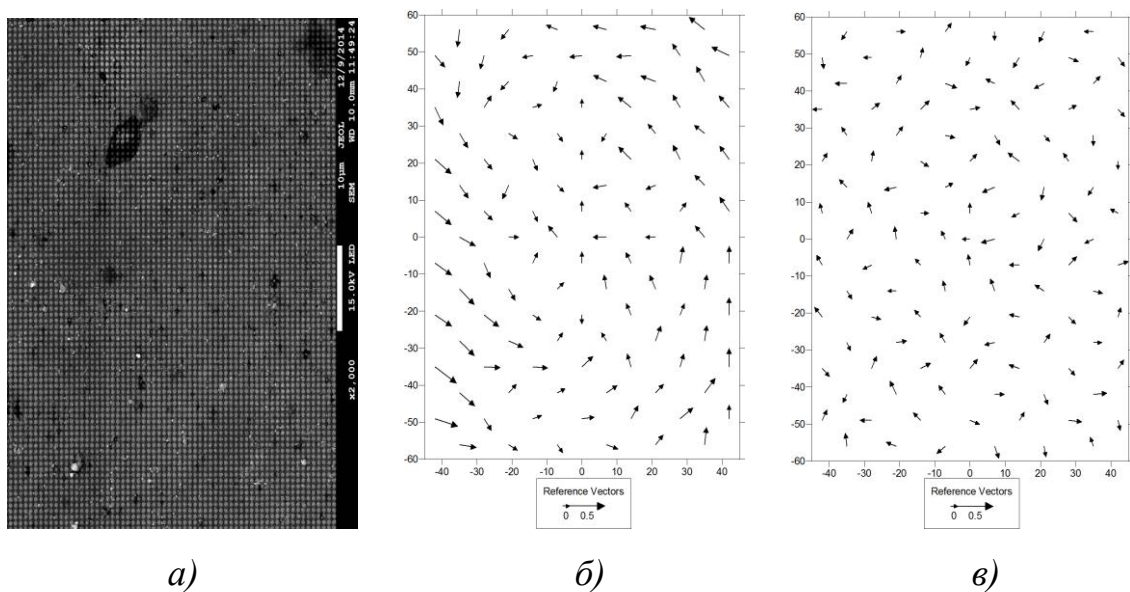
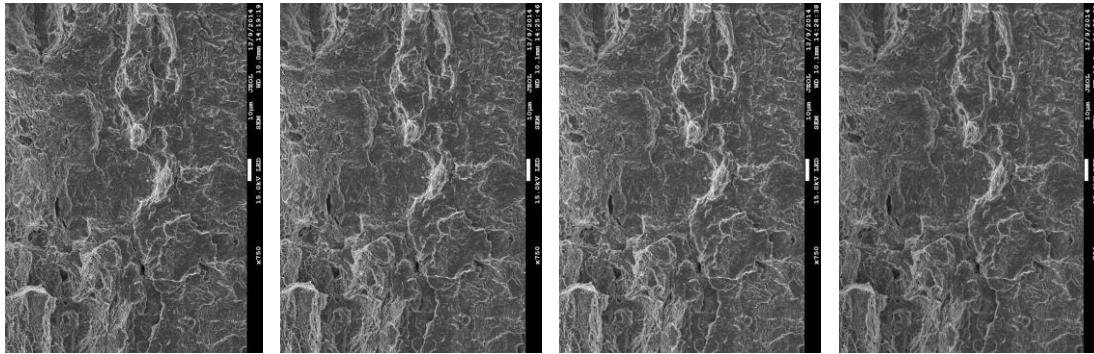


Рис. 2.6. а) цифровий РЕМ-знімок тест сітки, б), в) вектори геометричних спотворень РЕМ-знімка до і після апроксимації поліномом.



а) 0°

б) 4°

в) 6°

г) 8°

Рис. 2.7. Цифрові РЕМ-знімки мікроповерхні хромованої сталі, отримані при  $M=750^x$  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):

$$\left. \begin{aligned} X_{icp} &= \frac{\sum_{i=1}^k X_i}{k}, & Y_{icp} &= \frac{\sum_{i=1}^k Y_i}{k}, & Z(h)_{icp} &= \frac{\sum_{i=1}^k Z_i}{k} \end{aligned} \right\}; \quad (2.20)$$

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:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_i^k &= X_i^k - X_{icp}, \\ \Delta Y_i^k &= Y_i^k - Y_{icp}, \\ \Delta Z_i^k &= Z_i^k - Z_{icp}. \end{aligned} \right\}; \quad (2.21)$$

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

$$\left. \begin{aligned} m_X = m_{\Delta X} &= \frac{\sum_1^n \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta X_i^k)^2}{k}}}{n-1}, \\ m_Y = m_{\Delta Y} &= \frac{\sum_1^n \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta Y_i^k)^2}{k}}}{n-1}, \\ m_{Z(h)} = m_{\Delta Z} &= \frac{\sum_1^n \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta Z_i^k)^2}{k}}}{n-1}. \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

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  $m_X$ ,  $m_Y$ ,  $m_{Z(h)}$  обчислюємо за формулами середніх квадратичних похибок середніх квадратичних похибок:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_X &= \frac{m_{\Delta X}}{\sqrt{2kn}}, \\ \sigma_Y &= \frac{m_{\Delta Y}}{\sqrt{2kn}}, \\ \sigma_Z &= \frac{m_{\Delta Z}}{\sqrt{2kn}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

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:

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



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

## 2.5. Висновки

1. Виконані теоретичні дослідження на підставі перспективно-афінного відображення дозволили отримати строгі формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні з відповідними їх координатами на цифрових РЕМ-знімках стереопари для трьох основних випадків РЕМ-знімання: рівномірно-відхиленого, нормально-конвергентного та конвергентного.

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

3. Експериментальні дослідження підтвердили коректність виведених формул, доцільність та ефективність їх практичного використання для визначення з необхідною точністю кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів.

4. 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».

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

## РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЦИФРОВИХ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ

### 3.1. Обґрунтування нових підходів до визначення та врахування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень

В процесі формування зображення в РЕМ, в результаті цілого ряду факторів, які описані в літературі [34, 137], виникають спотворення його геометрії, які умовно можна розділити на дві групи: лінійні (масштабні) і нелінійні (дисторсійні). Для їх встановлення і врахування використовують різного роду тест-об'єкти - полістирольні латекси, тест-сітки, дифракційні решітки тощо. Для них відомі з високою точністю кількісні характеристики: діаметр кульок для латексів чи параметри тест-сітки з високою розрізнявальною здатністю. З допомогою каліброваних полістирольних латексних кульок, напилених на поверхню дослідного об'єкта, масштаб (збільшення) його РЕМ-зображення можна визначати з точністю 3-5%. В даний час така точність часто не задовольняє дослідників, окрім того процес виготовлення, калібрування і подальшого використання латексних кульок технологічно складний і економічно малоефективний.

За допомогою різного роду тест-сіток і голографічних решіток масштаб (збільшення) РЕМ-зображень можна отримувати з вищою точністю, біля 0,5-2%. Однак виготовлення таких тест-об'єктів також доволі технологічно складний процес. В минулі роки в Україні і колишньому СРСР вони виготовлялись ексклюзивно на персональне замовлення дослідників [137] в одиничних екземплярах. Відносно невисока розрізнявальна здатність тест-сіток (до 200 ліній на 1мм) дозволяє їх використовувати для калібрування збільшень РЕМ-зображень у незначному діапазоні збільшень:  $500^{\times}$ - $3000^{\times}$  (крат).

Використання ж голографічних тест-об'єктів (решіток) з розрізняювальною здатністю від 1370 до 3530 лін/мм дозволяє виконувати калібрування збільшень (масштабу) РЕМ-зображень в значно ширшому діапазоні збільшень - від  $1000^x$  до  $50000^x$ . Технологія виготовлення таких тест-об'єктів була розроблена у 80-х роках минулого століття в Інституті напівпровідників НАН України [88] і за потреби могла б бути відновлена в наш час, як найбільш ефективна.

Сучасні РЕМ обладнані системами запису РЕМ-зображень у цифровому вигляді у форматах JPG, BMP і TIF. Однак масштаб цих зображень невідомий. Відомий лише розмір одного пікселя зображення. Як правило, збільшення (масштаб) цифрових РЕМ-зображень близький до встановленого на шкалі приладу у випадку приведення його до розміру 120x90 мм. При цьому спотворення масштабу у сучасних РЕМ фірм JEOL, Hitachi за їх технічними характеристиками не мали б перевищувати 1-2% в усьому діапазоні збільшень РЕМ.

Однак досліджень метрики цифрових РЕМ-зображень, отриманих на сучасних РЕМ, ми в літературі не знайшли. Тому повстало завдання виконати такого роду дослідження і реалізовані нами детальні метричні дослідження цифрових РЕМ-зображень з використанням спеціальних тест-об'єктів з розрізняювальними здатностями 1425 лін/мм і 3530 лін/мм. Ці дослідження проведені на 4-х типах сучасних РЕМ у діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $40000^x$ . Для опрацювання цифрових РЕМ-зображень, тобто встановлення величин їх геометричних спотворень, аналітичного їх врахування (апроксимації), а також для моделювання мікроповерхонь дослідних об'єктів за РЕМ-стереопарою створено спеціальний комплекс програм «Dimicros». Структура і функціональні можливості комплексу детально описані і приведені в додатку дисертаційної роботи.

В процесі досліджень виявлені суттєві особливості цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних типах РЕМ і встановлено, що вони характерні виключно для конкретному типу РЕМ. Зокрема зафіксовано, що під час цифрового запису реальний масштаб РЕМ-зображень не відповідає встановленому на шкалі приладу і може мати значення від 1 до 2,7. Ці дослідження і методика визначення реальних збільшень (масштабу) цифрових РЕМ-зображень приведені у підрозділі 3.3.

Після визначення і врахування реального масштабу цифрових РЕМ-зображень, тобто лінійних спотворень його геометрії, залишаються ще досить суттєві (до 3 мм) нелінійні (дисторсійні) спотворення. Цим питанням у минулі роки займалися багато вчених, посилання на яких приведені у 1 розділі. Як правило, для апроксимації нелінійних геометричних спотворень РЕМ-зображень використовувались різні аналітичні функції поліноміального типу, зокрема поліноми загального виду, поліноми Брауна, поліноми Гоша [55, 137, 234] та ряд інших. Цілий ряд досліджень автора з цього питання показали високу ефективність і доцільність використання для врахування нелінійних спотворень цифрових РЕМ-зображень полінома загального виду 3-го степеня [55, 63-69].

У підрозділі 3.4 приведені детальні дослідження метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень, отриманих на 4-х типах РЕМ. Встановлено величини та характер геометричних спотворень, які притаманні конкретному РЕМ. Досліджено точність та ефективність їх врахування за допомогою полінома загального типу 3-ї степені. Дані дослідження виконані нами вперше в Україні.

В процесі досліджень цифрових РЕМ-зображень нами вперше виявлена і досліджена так звана «фрактальна» їх природа. Показано, що використання принципів фрактальної геометрії дозволяє отримати ряд

нових кількісних характеристик цифрових РЕМ-зображень, так званих *скейлінгових* (масштабних) характеристик. Їх використання дозволяє встановлювати дійсні масштаби цифрових РЕМ-зображень і отримувати ЦММР мікроповерхонь дослідних об'єктів без попереднього калібрування РЕМ-зображень за допомогою спеціальних тест-об'єктів. Дані дослідження приведені нами нижче у підрозділі 3.5

Розділ 3.6 присвячено розв'язанню проблеми автоматизації калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень та їх врахування. На основі цих досліджень розроблена технологія таких процесів, а також виконано порівняльний аналіз статистичних та скейлінгових характеристик цифрових РЕМ-зображень. Дослідження стосувались 4-х різних типів РЕМ, для яких за даною технологією можна враховувати геометричні спотворення зображень.

3.2. Особливості визначення дійсних збільшень (масштабів) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних типах РЕМ. Точність масштабування цифрових РЕМ-зображень

В останні роки нами проведено великий об'єм досліджень геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних типах сучасних зарубіжних і вітчизняному РЕМ. Результати цих досліджень виявили ряд особливостей визначення та врахування спотворень цифрових РЕМ-зображень, які будуть викладені нижче. Врахування цих особливостей дозволяє отримувати коректні кількісні метричні параметри цифрових РЕМ-зображень і тим самим в кінцевому результаті суттєво підвищувати точність отримання кількісних просторових характеристик мікроповерхонь досліджуваних об'єктів. А це в свою чергу дозволяє виробникам забезпечувати високу якість і ефективність виготовленої продукції, насамперед, у тих галузях виробництва, які застосовують сучасні нанотехнології, зокрема, у машинобудуванні, мікроелектроніці та інших.

Цифрові РЕМ-зображення, отримані на різних РЕМ мають свої технічні особливості отримання і запису, від яких у великій мірі залежить точність отриманих вимірів. Тому важливо їх встановити, дослідити і дати рекомендації по їх врахуванню при дослідженнях метричних параметрів цифрових РЕМ-зображень.

Тому нами було поставлено завдання:

- проаналізувати особливості отримання цифрових РЕМ-зображень на різних сучасних РЕМ та дослідити величини і характер їх геометричних спотворень на підставі вимірювань зображень спеціальних еталонних тест-об'єктів з розрізнявальними здатностями  $r=1370$  лін/мм,  $r=1425$  лін/мм, отриманих на чотирьох типах РЕМ: JCM-5000 (NeoScope), JSM 7100F (оба фірма JEOL, Японія), DSM-960A (фірма Carl

Zeiss Jena, Німеччина) і РЕМ 106І (ВАТ «SELMІ», Суми, Україна) в діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $30000^x$ .

- встановити точність врахування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень шляхом їх апроксимації поліномом загального виду третьої степені та точність отримання просторових координат дослідних мікроповерхонь.

### 3.2.1. РЕМ-знімання

РЕМ-знімання тест-об'єктів (сіток) на кожному з 4-х РЕМ виконувалось з фіксованими значеннями збільшень:  $1000^x$ ,  $2000^x$  ( $2500^x$ ),  $5000^x$ ,  $8000^x$ ,  $10000^x$ ,  $15000^x$ ,  $20000^x$ ,  $25000^x$ ,  $30000^x$ . Кожен РЕМ має притаманні лише йому формати запису цифрових зображень, кількість пікселів їх розгортки, технічні параметри, головні з яких приведені в табл. 3.2.1.

На рис. 3.2.1 наведено цифрові знімки тест-об'єкту, отримані на різних типах РЕМ за збільшення  $M=10000^x$ . Особливістю цифрових РЕМ-зображень є те, що їх реальний масштаб (збільшення) не завжди відповідає встановленому значенню на шкалі РЕМ. Так у РЕМ 106І і РЕМ DSM-960А масштаб (збільшення) лише тоді приблизно відповідає встановленому значенню на шкалі РЕМ, коли їх розмір на екрані монітора складає  $120 \times 90$  мм. Фізичний розмір піксела у цьому випадку для РЕМ 106І рівний **0,09375 мм**, а для РЕМ DSM-960А – **0,13698 мм**.

При фотограмметричному ж опрацюванні цифрових РЕМ-зображень за допомогою спеціального програмного пакету «Dimicros», їх «реальний» (умовний) розмір на екрані монітора значно більший і складає для РЕМ 106І  $338,56 \times 253,92$  мм, а для РЕМ DSM-960А –  $211,60 \times 158,70$  мм при розмірі піксела **0,2645 мм**. При цьому, коефіцієнт переходу для визначення дійсного масштабу цифрового знімка складає для РЕМ 106І приблизно  $k=2,8213$ , а для DSM-960А -  $k=1,931$ . У двох РЕМ японського виробництва розміри пікселів наступні: у РЕМ JCM-

5000 (NeoScore) – **0,09132** мм, а у РЕМ JSM 7100F – **0,09375** мм. За допомогою масштабних шкал, які вдруковуються в кожен РЕМ-знімок, ми підраховували кількість пікселів на фіксовану одиницю шкали і визначали фактичні розміри піксела цифрового знімка і величину  $k$  (див. рис. 3.2.2).

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

Для фотограмметричного опрацювання цифрових РЕМ-зображень у дослідженнях всіх 4-х РЕМ використовувався комплекс програм під загальною назвою «Dimicros». За допомогою першої програми комплексу «Test-Measuring» виконувались вимірювання цифрових РЕМ-зображень спеціальних тест-об'єктів (сітки) з різною розрізняючою здатністю (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 рівномірно по всьому полю знімка. Наступна програма «Polycalc» за результатами обчислень, виконаних програмою «Test-Measuring» і з використанням поліному загального виду 3-го степеня, дозволяє обчислити поправки у виміряні координати точок (перехресть) тест-об'єкта (сітки), величини залишкових спотворень та визначає точність апроксимації геометричних спотворень поліномом (табл. 3.2.2).

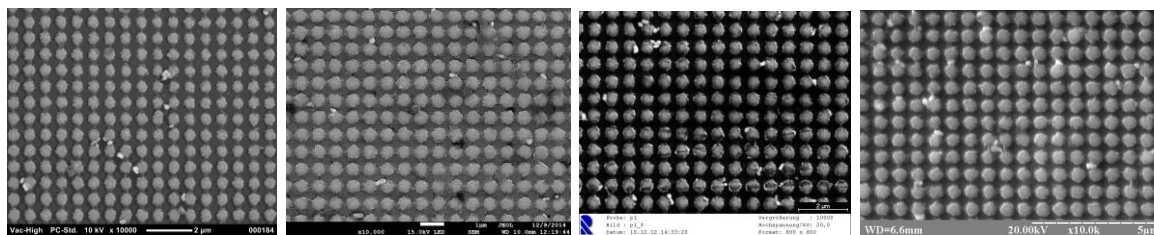
На кожному РЕМ-знімку тест-об'єкта вимірювалась (рівномірно по всьому полю знімка) різна кількість точок: від 35 точок (для  $M=30000^x$ ) до близько 200 точок (для  $M$  від  $1000^x$  до  $10000^x$  крат). На рис. 3.2.2. і рис. 3.2.3 наведені векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ – знімків до і після їх апроксимації поліномом для  $M=10000^x$ .



Таблиця 3.2.1

## 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 <sup>x</sup> до 40000 <sup>x</sup>	від 10 <sup>x</sup> до 300000 <sup>x</sup>	від 10 <sup>x</sup> до 100000 <sup>x</sup>	від 15 <sup>x</sup> до 300000 <sup>x</sup>
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
Розм. пікс. при вимірах, мм	0,09132	0,09375	0,26450	0,26450
Коеф. перех. до <i>M</i> факт., <i>k</i>	1,0	1,0	1,9310	2,8213
Розмір піксела з врах. <i>k</i> , 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



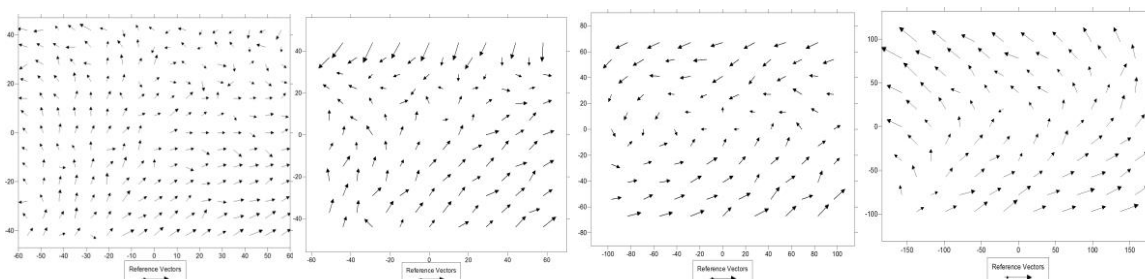
а) JCM-5000      б) JSM 7100F      в) DSM-960A      г) 106 I

Рис. 3.2.1. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкта з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм, отримані на різних РЕМ за збільшення  $M=10000\times$ .



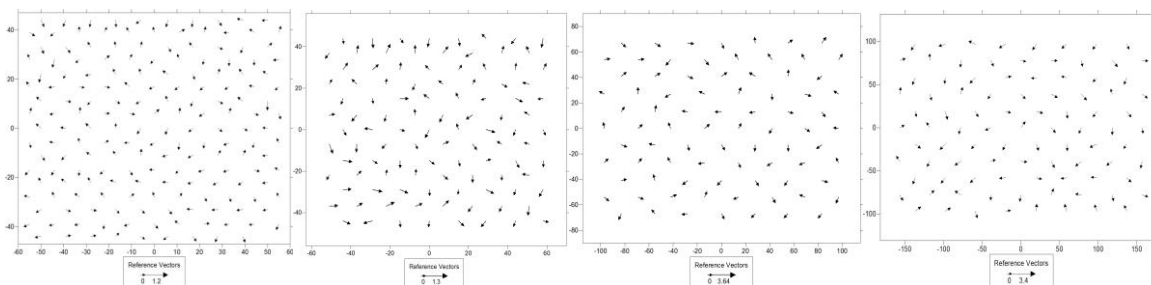
а) JCM-5000      б) JSM 7100F      в) DSM-960A      г) 106 I

Рис. 3.2.2. Збільшені фрагменти цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта з зображенням масштабної шкали, за якою визначається коефіцієнт переходу до дійсного масштабу знімка  $k$ .



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

Рис. 3.2.3. Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта до апроксимації поліномом для різних РЕМ за збільшення  $M=10000\times$ .



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

Рис. 3.2.4. Векторні діаграми залишкових геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта після апроксимації поліномом для різних РЕМ за збільшення  $M=10000\times$ .

Таблиця 3.2.2

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.	
		$M_{x\text{cp}}$	$M_{y\text{cp}}$			$m_{\Delta x}$ , мм	$m_{\Delta y}$ , мм	$m_{\delta x}$ , мм	$m_{\delta y}$ , мм
JCM-5000	1000 <sup>x</sup>	1005,16	1006,97	+0,52	+0,70	0,105	0,054	0,037	0,036
	10000 <sup>x</sup>	9997,27	10055,22	-0,03	+0,55	0,203	0,160	0,049	0,041
JSM7100F	2000 <sup>x</sup>	1982,12	2002,10	-0,18	+0,02	0,184	0,254	0,091	0,095
	10000 <sup>x</sup>	9935,87	10007,11	-0,64	+0,07	0,293	0,370	0,138	0,136
DSM-960A	1000 <sup>x</sup>	1010,41	994,16	+1,04	-0,58	0,251	0,744	0,112	0,100
	10000 <sup>x</sup>	10185,63	9941,57	+1,85	-0,58	1,087	0,355	0,147	0,135
PEM106I	1000 <sup>x</sup>	1017,11	1005,58	+1,71	+0,56	1,254	0,525	0,134	0,122
	10000 <sup>x</sup>	9940,43	9892,07	-0,60	-1,08	1,289	0,906	0,211	0,219

Таблиця 3.2.3

Максимальні похибки визначення просторових координат точок

мікроповерхонь для різних збільшень  $M^x$ 

	1000 <sup>x</sup>	2000 <sup>x</sup>	5000 <sup>x</sup>	8000 <sup>x</sup>	10000 <sup>x</sup>	15000 <sup>x</sup>	20000 <sup>x</sup>	25000 <sup>x</sup>
$3m^o_x = 3m^o_y, \text{ мм}$	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280
$M_X = M_Y, \text{ мкм}$	0,280	0,140	0,056	0,035	0,028	0,019	0,014	0,011
$M_{Z(h)}, \text{ мкм}$	1,0-1,5	0,8-1,1	0,5-0,8	0,4-0,6	0,35-0,5	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2

Аналіз результатів досліджень величин геометричних спотворень за вимірами цифрових РЕМ-знімків спеціальних тест-об'єктів (рис.3.2.1), отриманих за допомогою сучасних РЕМ різних країн (Японія, Німеччина, Україна), і які приведені в табл. 3.2.2 дозволяє відмітити наступне. Так лінійні спотворення масштабів (збільшень) РЕМ-знімків  $\Delta M, \%$  коливаються в межах  $\pm 1-3\%$  з тенденцією до їх зростання при збільшенні величини збільшення. Найменші вони в японських мікроскопах, дещо більші в німецькому і українському РЕМ. Середньо-квадратичні величини нелінійних геометричних спотворень (дисторсії)  $m_{\Delta x}, (мм), m_{\Delta y}, (мм)$  після врахування масштабних спотворень, достатньо великі і досягають максимальних величин до  $\pm 1,5 мм$  (до **15 пікселів**) відносно центральної точки знімка при приблизних розмірах знімка 120x90 мм.

Характер цих спотворень наглядно відображають *векторні діаграми* (рис. 3.2.2), які мають різний вигляд, в залежності від мікроскопу і величини збільшення РЕМ-знімка: від параболічно-гіперболічного до спіралеподібного вигляду, і який для конкретного типу РЕМ, як правило, суттєво не змінюється, незалежно від зміни величини збільшення (масштабу) знімка у діапазоні від  $1000^{\times}$  до  $25000^{\times}$ .

Оскільки геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень на краях знімка можуть досягати відносно значних величин (до  $\pm 1,5 мм$ , тобто приблизно **15 пікселів**), то необхідно їх враховувати. Результати наших досліджень з використанням програми «Polycalc», які приведені в табл.2 вкотре підтвердили високу ефективність апроксимації спотворень поліномом загального виду третьої степені, що відображено в колонках величин середньоквадратичних похибок  $m_{\delta x} (мм), m_{\delta y} (мм)$  після їх апроксимації поліномом. Як бачимо, ці величини приблизно на порядок менші від початкових значень спотворень. Графічно залишкові величини геометричних спотворень також нами показані у вигляді векторних

діаграм (див. рис. 3.2.3). Для знімків розміром 120x90 мм максимальні їхні значення не перевищують  $\pm 0,3$  мм, тобто 3-х пікселів.

Таким чином поліноміальна апроксимація спотворень дає можливість приблизно на порядок підвищити точність визначення просторових координат точок досліджуваних різноманітних мікроповерхонь твердих тіл. В табл. 3.2.3 приведені абсолютні значення максимально можливих похибок в отриманні координат  $M_X = M_Y = 3m^o_x/M_x^x = 3m^o_y/M_y^x$  (мкм). В залежності від збільшення (масштабу) знімка вони мають значення від **0,28 мкм**, якщо  $M=1000^x$  до **0,01 мкм**, якщо  $M=25000^x$ , а також приведені значення точності отримання висот (перевищень) точок  $M_{Z(h)}$  за результатами реальних вимірів мікроповерхонь. Отже розроблена нами технологія дає можливість отримувати кількісні параметри мікроповерхонь твердих тіл на мікронному і субмікронному рівнях з високою точністю, яка забезпечує вимоги сучасної науки і виробництва.

Таким чином на підставі виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

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

Калібрування РЕМ і встановлення метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень необхідно проводити не рідше одного разу на рік. Тоді, за відсутності тест-об'єктів, ці дані можна використовувати для врахування спотворень достатньо тривалий час, оскільки РЕМ є достатньо стабільно працюючими системами, і це дозволить отримувати просторові кількісні характеристики мікроповерхонь дослідних об'єктів з необхідною точністю.

### 3.3. Дослідження метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень та методики врахування геометричних спотворень

У цьому підрозділі приведені детальні дослідження метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень, отриманих на 4-х типах РЕМ. Встановлено величини та характер геометричних спотворень, які притаманні конкретному РЕМ. Досліджено точність та ефективність їх врахування за допомогою полінома загального типу 3-го степеня. Дані дослідження виконані нами вперше в Україні.

#### 3.3.1. Дослідження цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (Neoscope) (JEOL, Японія)

Подамо основні технічні характеристики РЕМ.

JCM-5000 – сучасний настільний растровий електронний мікроскоп, який широко поширений у наукових лабораторіях та на виробництві в багатьох країнах світу, а тепер і в Україні. РЕМ має високу роздільну здатність, велику глибину фокусування, простий в користуванні, має невеликі габарити, вагу і, відносно, невисоку вартість. Основні характеристики приладу приведені у таблиці



3.3.1.

Рис. 3.3.1. РЕМ JCM-5000 (NeoScope)

Таблиця 3.3.1

<b>Режими роботи</b>	високовакуумний режим, низьковакуумний режим
<b>Прискорююча напруга</b>	5, 10 або 15 кВ
<b>Діапазон збільшень</b>	від $10^x$ до $40\,000^x$ (крат)
<b>Максимальний розмір зразка</b>	діаметр - до 70 мм, висота - до 50 мм
<b>Катод</b>	W (вольфрам), касетного типу

<b>Система відкачування повітря</b>	турбомолекулярний насос + ротаційний насос
<b>Програмне забезпечення</b>	для MS Windows Vista
<b>Формат запису файлів</b>	TIFF або JPEG
<b>Вага приладу</b>	близько 85 кг
<b>Розміри</b>	492 мм x 458 мм x 434 мм
<b>Енергоспоживання</b>	не більше 1,1 кВА

Для встановлення дійсних значень збільшень РЕМ-зображень був використаний тест-об'єкт, який представляє собою так звану «голографічну ґратку» у вигляді кулеподібних напівсфер, рівномірно розміщених на скляній пластині у шарі «напівпровідник-метал» (рис. 3.2.2).

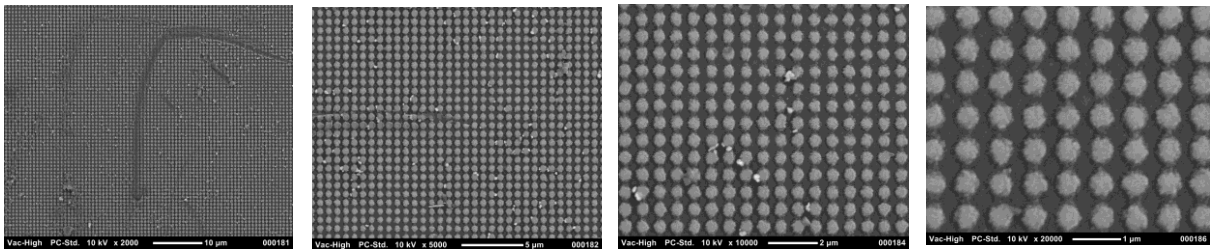
Технологія отримання матеріалу «напівпровідник-метал» була вперше запропонована у Київському інституті напівпровідників НАНУ в лабораторії проф. М.Т. Костишина і к.т.н. П.Ф. Романенка, і використовувалась для запису голограм просторових об'єктів [88]. Нами була запропонована ідея створення даного тест-об'єкту на цьому технологічному матеріалі, оскільки він дає змогу виконувати запис зображення з високою розрізнявальною здатністю – до 5000 елементів на мм. Таким чином і було отримано даний тест-об'єкт під дією пучків лазерного випромінювання у вигляді регулярної матриці - сплаву срібла з напівпровідником - арсеном сірки ( $\text{Ag-As}_2\text{S}$ ) з різними роздільними здатностями, зокрема, 1370 лін/мм, 1425 лін/мм, 3530 лін/мм. Один з цих голографічних тест-об'єктів з розділенням 1425 лін/мм і був нами використаний для експерименту.

На РЕМ JCM-5000 (NeoScope) було отримано 12 знімків тест-об'єкту у цифровому форматі JPEG з фіксованими значеннями збільшень, встановлених на шкалі приладу: 1000<sup>x</sup>, 2000<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 8000<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 15000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup>, 24000<sup>x</sup>, 27000<sup>x</sup>, 30000<sup>x</sup>, 34000<sup>x</sup>, 40000<sup>x</sup>. Розміри



РЕМ-зображень 117,76 мм x 99,36 мм (1280 x 1080 пікселів). Розмір пікселя – 0,092 мм.

Вимірювання РЕМ-зображень тест-об'єкту виконувалось на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) в програмному середовищі «Dimicros» за програмою “Test-Measuring”. Вимірювання величин дійсних збільшень РЕМ-зображень тест-об'єкту виконувались тричі вздовж осей  $x$  і  $y$  знімка у центральній його частині за схемою, приведеною у роботах [53, 55] (рис. 3.3.3). Таким чином були отримані середні значення збільшень і їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ. Результати експерименту приведені в таблицях 3.3.2, 3.3.3.



а)  $M = 2000^x$       б)  $M = 5000^x$       в)  $M = 10000^x$       г)  $M = 20000^x$

Рис. 3.3.2. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкту з розрізняювальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм при різних збільшеннях  $M$ .

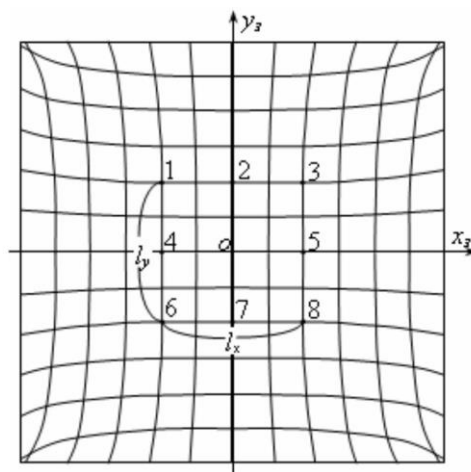


Рис. 3.3.3. Схема розташування точок при калібруванні збільшень РЕМ-зображень

Таблиця 3.3.2

Виміряні збільшення вздовж осі  $x$  РЕМ-знімка та їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ

№ п/п	$M_{x\text{ РЕМ}}$	$M_{x1}$	$M_{x2}$	$M_{x3}$	$M_{x\text{ ср}}$	$\Delta M_x$ ср, %	$\Delta M_x$ min, %	$\Delta M_x$ max, %
1	1000 <sup>x</sup>	1007,88	1005,16	1002,44	1005,16	+0,52	+0,24	+0,79
2	2000 <sup>x</sup>	1994,02	1994,02	1999,45	1995,83	-0,21	-0,03	-0,30
3	5000 <sup>x</sup>	4966,03	4989,94	4966,03	4974,00	-0,52	-0,20	-0,68
4	8000 <sup>x</sup>	7921,74	7954,34	7954,34	7943,47	-0,71	-0,57	-0,98
5	10000 <sup>x</sup>	10019,00	10019,00	9953,80	9997,27	-0,03	+0,19	-0,46
6	15000 <sup>x</sup>	14908,96	14952,43	14887,23	14916,21	-0,56	-0,32	-0,75
7	20000 <sup>x</sup>	19885,86	19842,39	19820,66	19849,64	-0,75	-0,57	-0,90
8	24000 <sup>x</sup>	23863,03	23906,50	23841,30	23870,28	-0,54	-0,40	-0,66
9	27000 <sup>x</sup>	26949,14	26818,74	26949,14	26905,67	-0,35	-0,19	-0,67
10	30000 <sup>x</sup>	29904,85	29861,39	29883,12	29883,12	-0,39	-0,32	-0,46
11	34000 <sup>x</sup>	34142,82	34012,43	34142,82	34099,36	+0,29	+0,04	+0,42
12	40000 <sup>x</sup>	39902,12	40075,98	39989,05	39989,05	-0,03	-0,03	-0,25
Середнє відхилення середніх значень $\Delta M_x$ ср від $M_{РЕМ}$ , %						<b> 0,41 </b>	<b> 0,26 </b>	<b> 0,61 </b>

Таблиця 3.3.3

Виміряні збільшення вздовж осі  $y$  РЕМ-знімка та їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ

№	$M_{y\text{ РЕМ}}$	$M_{y1}$	$M_{y2}$	$M_{y3}$	$M_{y\text{ ср}}$	$\Delta M_y$ ср, %	$\Delta M_y$ min, %	$\Delta M_y$ max, %
1	1000 <sup>x</sup>	1007,88	1005,16	1007,88	1006,97	+0,70	+0,52	+0,79
2	2000 <sup>x</sup>	2004,89	2010,32	2004,89	2006,70	+0,34	+0,24	+0,52

<b>3</b>	<b>5000<sup>x</sup></b>	5020,36	5022,77	5020,36	5021,16	+0,42	+0,41	+0,46
<b>4</b>	<b>8000<sup>x</sup></b>	7997,81	7997,81	7997,81	7997,81	-0,03	-0,03	-0,03
<b>5</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	10062,46	10062,46	10040,73	10055,22	+0,55	+0,41	+0,62
<b>6</b>	<b>15000<sup>x</sup></b>	14974,16	15061,09	14974,16	15003,14	+0,02	+0,12	-0,41
<b>7</b>	<b>20000<sup>x</sup></b>	19907,59	19885,86	19907,59	19900,35	-0,50	-0,46	-0,57
<b>8</b>	<b>24000<sup>x</sup></b>	23754,37	23841,30	23797,83	23797,83	-0,84	-0,66	-1,02
<b>9</b>	<b>27000<sup>x</sup></b>	26797,01	26970,88	26905,68	26891,19	-0,40	-0,11	-0,75
<b>10</b>	<b>30000<sup>x</sup></b>	29904,85	29839,66	29839,66	29861,39	-0,46	-0,32	-0,54
<b>11</b>	<b>34000<sup>x</sup></b>	34099,36	33903,76	34034,16	34012,43	+0,04	+0,10	+0,29
<b>12</b>	<b>40000<sup>x</sup></b>	39945,58	39858,65	39858,65	39887,67	-0,28	-0,14	-0,35
<b>Середнє відхилення середніх значень <math>\Delta M_{y\text{cp}}</math> від <math>M_{PEM}</math>, %</b>						<b> 0,38 </b>	<b> 0,29 </b>	<b> 0,53 </b>

За результатами досліджень масштабних спотворень даного типу PEM встановлено:

- дійсні величини збільшень (масштабу) PEM зображень, отриманих на PEM JCM-5000 (NeoScore) відхиляються від встановлених на шкалі PEM не більше ніж на  $\pm 1\%$  вздовж обох осей знімка, тобто в межах точності їх визначення за тест-об'єктом в усьому робочому діапазоні збільшень мікроскопа від  $1000^x$  до  $40000^x$  (крат);

- PEM JCM-5000 (NeoScore) можна вважати надійним в метричному відношенні приладом, який не потребує постійного калібрування збільшень перед PEM-зніманням дослідних зразків;

- масштабні спотворення PEM-зображень, отриманих на PEM JCM-5000 (NeoScore) не перевищують  $\pm 1\%$  від встановлених на шкалі PEM, незалежно від величини збільшення та осі знімка.

Нами проведено також дослідження геометричних спотворень нелінійного типу цифрових PEM-зображень, отриманих на PEM JCM-5000 (NeoScore) та методу їх апроксимації.

Загалом отримано 12 знімків тест-об'єкту з розрізнявальною здатністю  $r=1425$  лін/мм у цифровому форматі JPEG з фіксованими значеннями збільшень, встановлених на шкалі приладу:  $1000^x$ ,  $2000^x$ ,  $5000^x$ ,  $8000^x$ ,  $10000^x$ ,  $15000^x$ ,  $20000^x$ ,  $24000^x$ ,  $27000^x$ ,  $30000^x$ ,  $34000^x$ ,  $40000^x$ . Розміри РЕМ-зображень 117,76 мм x 99,36 мм (1280 x 1080 пікселів). Розмір піксела – 0,092 мм. Для досліджень геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень було взято 10 знімків в діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $30000^x$ .

Вимірювання РЕМ-зображень тест-об'єкту виконувалось на ПК в програмному середовищі «Dimicros» за програмою «Test-Measuring». Спочатку виконувалось вимірювання РЕМ-зображень тест-об'єкту у центральній, найменш спотвореній частині РЕМ-зображення, і отримані дійсні величини їх збільшень. Точність отримання реальних значень збільшень  $M^x$  складає  $\pm 0,5\%$ . Далі у шаховому порядку зліва направо зверху вниз вимірювались по чергово так звані «точки розв'язку» і «контрольні точки». Загальна кількість точок, які вимірювались складала від 25 при  $M=30000^x$  до 357 при  $M=1000^x$ .

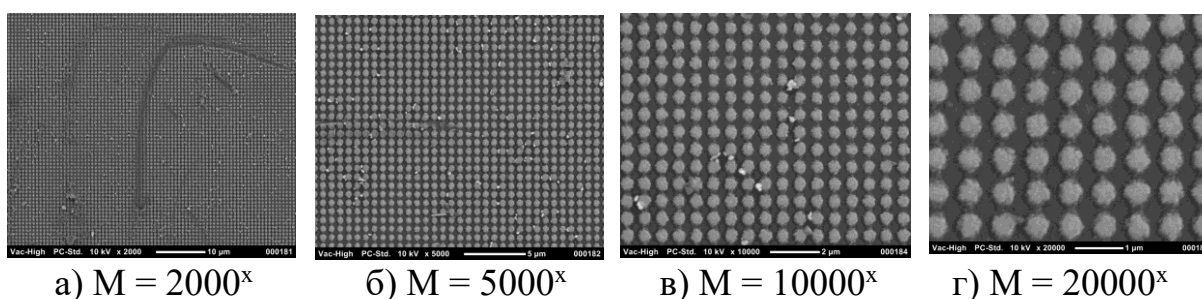


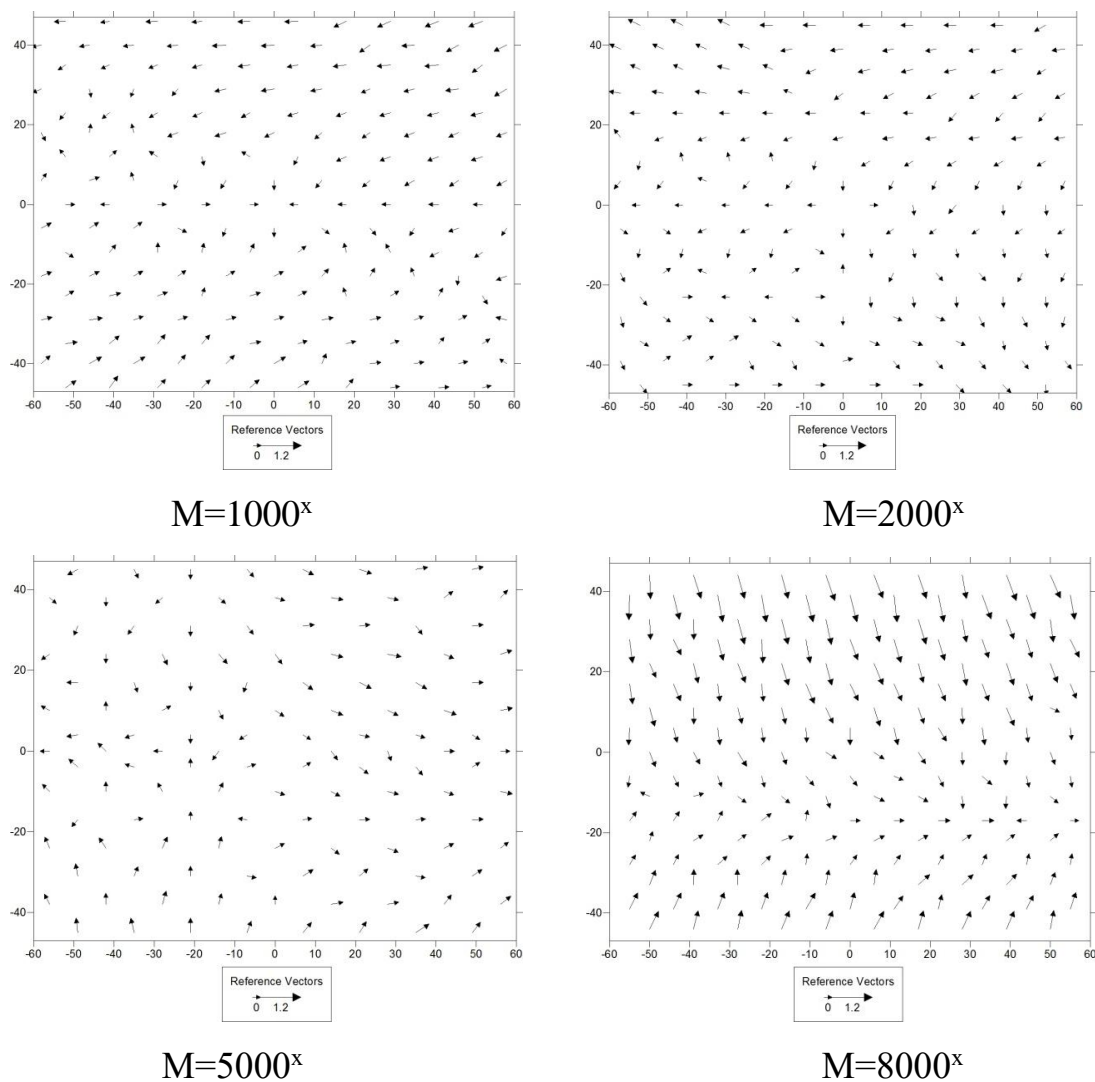
Рис. 3.3.4. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкту з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм при різних збільшеннях  $M^x$

За вимірами «точок розв'язку» і встановленими значеннями їх геометричних спотворень  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  програма «Policalc» програмного комплексу «Dimicros» [62] визначає коефіцієнти поліному загального виду 3-го степеня  $a_0 \div a_9$ ,  $b_0 \div b_9$ , які в подальшому використовуються для встановлення поправок у виміряні координати «контрольних точок». За

залишковими значеннями спотворень  $\delta x$ ,  $\delta y$  на «контрольних точках» визначаються їх середньоквадратичні похибки  $m_{\delta x}$ ,  $m_{\delta y}$  і таким чином встановлюється ефективність апроксимації.

За вимірами цифрових РЕМ-зображень тест-сіток і отриманими значеннями  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  геометричних спотворень, в програмному середовищі SURFER побудовані векторні діаграми спотворень в діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $30000^x$  до і після їх апроксимації поліномом, які приведені на рис. 3.3.5 і рис.3.3.6.

Результати вимірів дійсних збільшень РЕМ-знімків, середньоквадратичні величини їх геометричних спотворень до і після апроксимації поліномом загального виду 3-го степеня приведені в табл. 3.3.4.



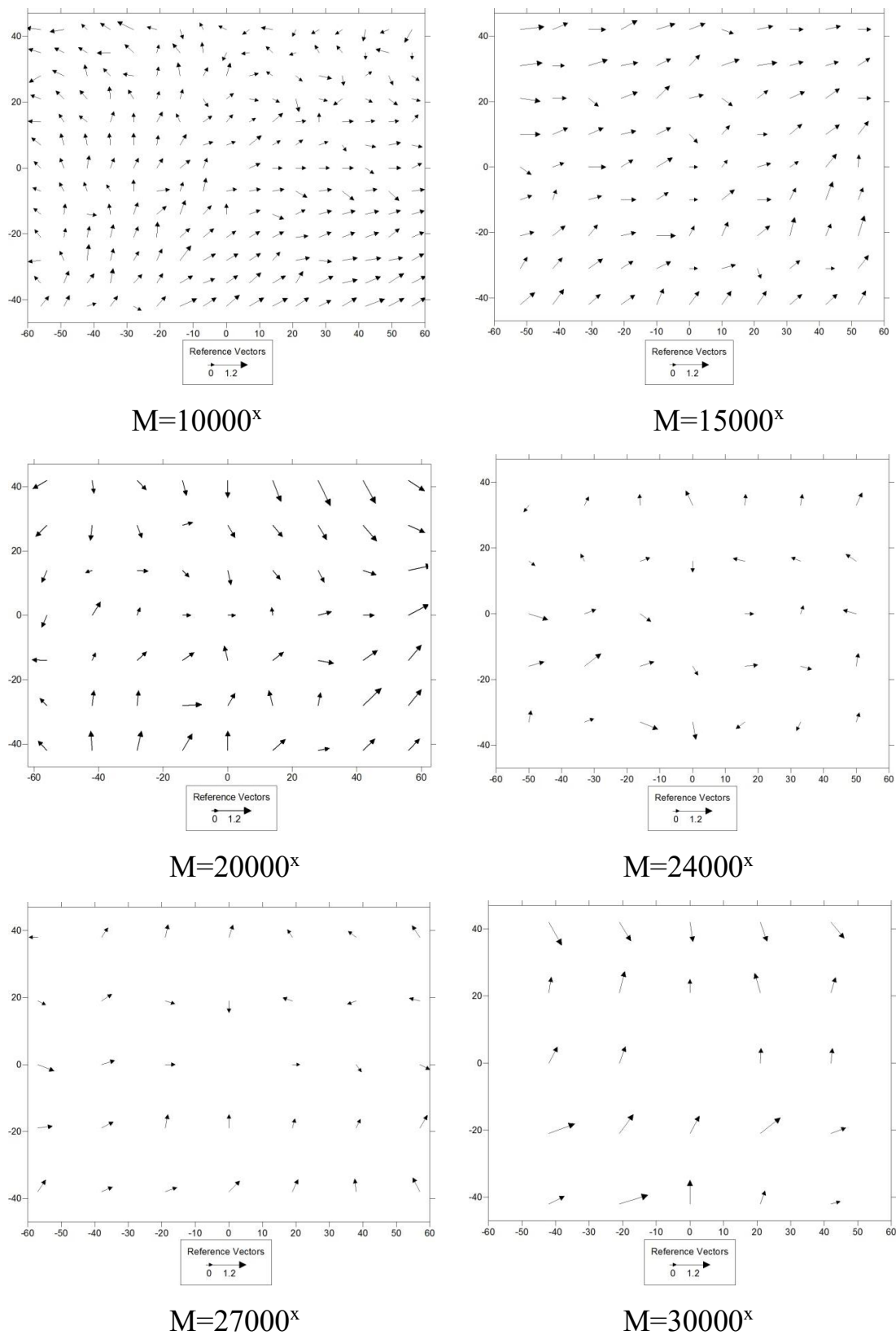


Рис. 3.3.5 Векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ-зображень до апроксимації при різних збільшеннях  $M$  від  $1000^x$  до  $30000^x$ .

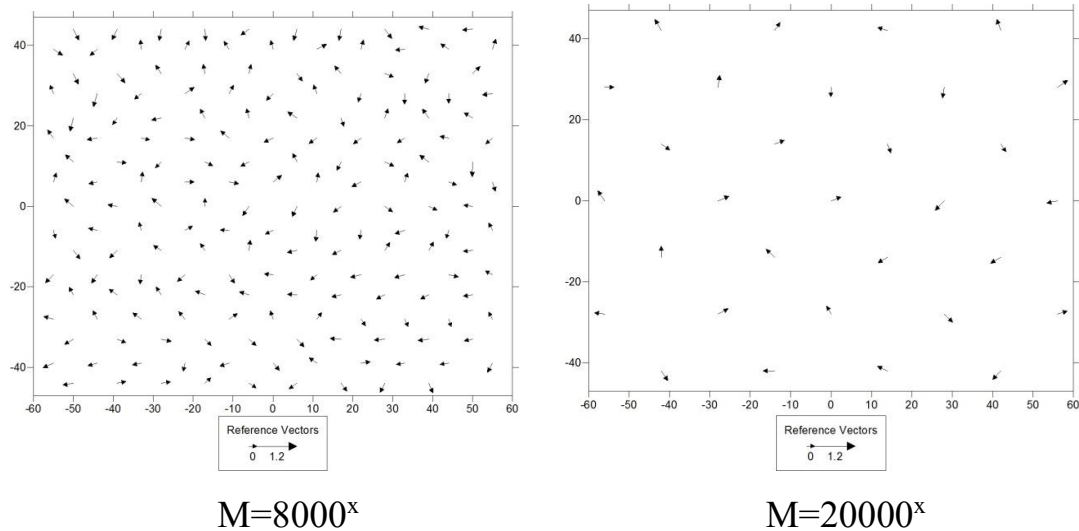


Рис. 3.3.6. Векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ-зображень після апроксимації при збільшеннях  $M=8000^x$  і  $M=20000^x$ .

Таблиця 3.3.4

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

№ п/п	$M_{РЕМ}$	$M_x$	$M_y$	$\Delta M_x, \%$	$\Delta M_y, \%$	$m_{\Delta x}$ МКМ	$m_{\Delta y}$ МКМ	$m_{\delta x}$ МКМ	$m_{\delta y}$ МКМ
1	$1000^x$	1003,80	1009,23	0,38	0,92	105,4	53,5	36,5	35,8
2	$2000^x$	2004,89	2013,04	0,24	0,65	91,2	53,4	32,1	31,1
3	$5000^x$	4933,43	4982,33	-1,33	-0,35	91,1	81,8	44,5	41,3
4	$8000^x$	7900,01	8041,28	-1,25	0,52	123,6	366,2	55,4	62,0
5	$10000^x$	9877,73	9964,66	-1,22	-0,35	203,2	159,5	48,6	41,1
6	$15000^x$	14887,23	14865,49	-0,75	-0,90	353,1	233,8	100,7	97,9
7	$20000^x$	19711,99	19972,79	-1,44	-0,14	293,0	352,4	84,8	81,6
8	$24000^x$	23710,90	23645,70	-1,20	-1,48	232,1	192,2	111,9	101,0
9	$27000^x$	26949,14	26666,61	-0,19	-1,23	178,2	188,0	109,5	87,9
10	$30000^x$	29578,86	29426,72	-1,40	-1,91	374,6	472,1	111,2	125,8

На підставі досліджень для цього РЕМ встановлено:

- абсолютні значення величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore), після врахування їх дійсних масштабів, в дослідженому діапазоні збільшень РЕМ незначні, переважно в межах 0,1-0,5 мм в масштабі цифрового знімка. Зважаючи на його фактичні розміри (117,76x99,36 мм) та значні величини збільшень ці спотворення можна вважати незначними, однак їх все ж доцільно враховувати. Максимальні ж геометричні спотворення, як правило, на краях РЕМ-зображень досягають величин близько 1 мм і їх, безумовно, треба враховувати;

- геометричні спотворення РЕМ-зображень нелінійного типу при різних параметрах РЕМ-знімання мають різні величини і напрям зміщень, однак при одних і тих же параметрах РЕМ-знімання вони мають систематичний характер і тому їх легко врахувати;

- апроксимація геометричних спотворень РЕМ-зображень поліномом загального виду є ефективною і дозволяє зменшувати їх величини у 2-10 разів.

3.3.2. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A (Carl Zeiss, Німеччина) та точності їх врахування

Оскільки досліджень метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A у науковій та технічній літературі не встановлено, тому перед авторами постало завдання всесторонньо дослідити метричні характеристики цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A і дати практичні рекомендації, які би підвищили точність і ефективність наукових досліджень.

Мета досліджень:



- отримання цифрових РЕМ-зображень еталонного тест-об'єкту з розрізняювальною здатністю  $r=1425$  лін/мм на РЕМ DSM-960А в діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $40000^x$  (крат), а також при різних кутах нахилу гоніометричного столика і при різних значеннях робочої відстані знімання;

- встановлення характеру і величин лінійних (масштабних) і нелінійних геометричних спотворень цих зображень, а також точності їх врахування з використанням пакету програм «Dimicros» [62].

Подамо основні технічні характеристики РЕМ DSM-960А.

DSM-960А – цифровий растровий електронний мікроскоп, який створений на фірмі «Carl Zeiss» (Оберкохен, Німеччина) у 90-х роках минулого століття і широко поширений у наукових лабораторіях та на



виробництві в багатьох країнах світу. РЕМ має високу роздільну здатність, велику глибину фокусування та достатньо простий у користуванні. Основні характеристики приладу приведені у таблиці 3.3.5.

Рис. 3.3.7. РЕМ DSM-960А

Таблиця 3.3.5

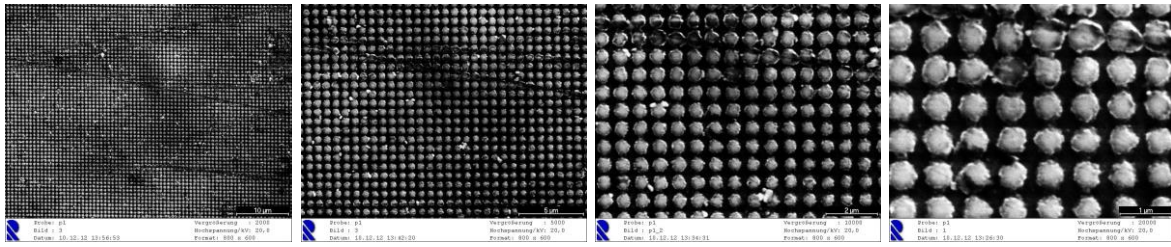
<b>Режими роботи</b>	високовакуумний режим, низьковакуумний режим
<b>Прискорююча напруга</b>	від 1 до 30 кВ
<b>Діапазон збільшень</b>	від $10^x$ до $30\,000^x$ (крат)
<b>Максимальний розмір зразка</b>	діаметр - до 70 мм, висота - до 50 мм
<b>Катод</b>	W (вольфрам), касетного типу
<b>Система відкачування повітря</b>	турбомолекулярний насос
<b>Програмне забезпечення</b>	для MS Windows

<b>Формат запису файлів</b>	TIFF або JPEG
<b>Режими отримання зображення</b>	у режимах відбитих та вторинних електронів
<b>Енергоспоживання</b>	не більше 2 кВА

Для отримання РЕМ-зображень і виконання експериментальних робіт була використана тест-сітка, яка представляє собою так звану «голографічну ґратку» - рівномірно розміщених кулеподібних напівсфер (сплав «напівпровідник-метал», ), нанесених на скляну пластину (рис. 3.3.8) з розділенням 1425 лін/мм [88].

РЕМ знімання виконувалось у науковій лабораторії Вищої школи м. Вісмар (Німеччина). Загалом було отримано 12 знімків тест-об'єкту у цифровому форматі JPEG: 6 знімків з фіксованими значеннями збільшень, встановлених на шкалі приладу: 1000<sup>x</sup>, 2000<sup>x</sup>, 3000<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup> при горизонтальному положенні гоніометричного столика ( $\alpha=0^\circ$ ) і робочій відстані знімання  $z=11$  мм, 2 знімки при фіксованому збільшенні РЕМ  $M=10000^x$ ,  $z=11$  мм і двох кутах нахилу столика –  $\alpha=5^\circ$  і  $\alpha=10^\circ$ . Ще 4 знімки отримано при  $M=10000^x$ , кутах нахилу столика  $\alpha=0^\circ$ , двічі  $5^\circ$  і  $10^\circ$  при меншій робочій віддалі знімання -  $z=7$  мм. Розміри РЕМ-зображень 211,60 мм x 158,70 мм (800 x 600 пікселів). Розмір пікселя – 0,2645 мм.

Вимірювання РЕМ-зображень тест-сітки виконувалось на ПК в програмному середовищі «Dimicros» за програмою «Test-Measuring». Вимірювання величин дійсних збільшень РЕМ-зображень тест-об'єкту виконувались тричі вздовж осей  $x$  і  $y$  знімка за аналогічною схемою, приведеною на рис. 3.3.3. В результаті отримано середні значення збільшень і їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ. Результати експерименту приведені в таблицях 3.3.6, 3.3.7.



а)  $M = 2000^x$       б)  $M = 5000^x$       в)  $M = 10000^x$       г)  $M = 20000^x$

Рис. 3.3.8. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкту з розрізняювальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм при різних збільшеннях  $M$  ( $\alpha=0^\circ$ ,  $z=11$  мм).

Таблиця 3.3.6

Виміряні збільшення вздовж осі  $x$  РЕМ-знімка та їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ

№ п/п	$M_x$ РЕМ	$2M_x$ РЕМ	$2M_{x1}$	$2M_{x2}$	$2M_{x3}$	$2M_{x\text{cp}}$	$\Delta M_x$ cp, %	$\Delta M_x$ min, %	$\Delta M_x$ max, %
<b><math>\alpha</math></b>	<b>WD = 11 мм</b>								
<b>1/0°</b>	<b>1000<sup>x</sup></b>	2000 <sup>x</sup>	1947,99	1951,92	1947,99	1949,30	-2,5	-2,4	-2,6
<b>2/0°</b>	<b>2000<sup>x</sup></b>	4000 <sup>x</sup>	3911,70	3911,70	3911,70	3911,70	-2,2	-2,2	-2,2
<b>3/0°</b>	<b>3000<sup>x</sup></b>	6000 <sup>x</sup>	5867,55	5859,69	5875,40	5867,55	-2,2	-2,1	-2,3
<b>4/0°</b>	<b>5000<sup>x</sup></b>	10000 <sup>x</sup>	9818,52	9739,97	9802,81	9787,10	-2,1	-1,8	-2,6
<b>5/0°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19605,6	19762,7	19637,0	19668,5	-1,7	-1,2	-2,0
<b>6/0°</b>	<b>20000<sup>x</sup></b>	40000 <sup>x</sup>	39022,7	39179,8	39148,4	3911,0	-2,2	-2,0	-2,4
<b>7/5°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19605,6	19731,3	19637,0	19658,0	-1,7	-1,4	-2,0
<b>8/10°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19448,5	19448,5	19511,4	19469,5	-2,6	-2,5	-2,7
<b>Середнє відхилення середніх значень <math>\Delta M_x</math> cp від <math>M_{\text{РЕМ}}</math>, %</b>							<b>-2,2</b>	<b>-2,0</b>	<b>-2,4</b>
<b><math>\alpha</math></b>	<b>WD = 7 мм</b>								
<b>1/0°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19605,6	19574,2	19542,8	19574,2	-2,1	-2,0	-2,2
<b>2/5°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19448,5	19448,5	19479,9	19459,0	-2,7	-2,6	-2,8
<b>3/5°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19731,3	9668,46	19731,3	19710,3	-1,5	-1,4	-1,6
<b>4/10°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19448,5	19511,4	19542,8	19500,9	-2,5	-2,3	-2,7
<b>Середнє відхилення середніх значень <math>\Delta M_x</math> cp від <math>M_{\text{РЕМ}}</math>, %</b>							<b>-2,2</b>	<b>-2,1</b>	<b>-2,3</b>

Таблиця 3.3.7

Виміряні збільшення вздовж осі у РЕМ-знімка та їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ

№ п/п	$M_y$ РЕМ	$2M_y$ РЕМ	$2M_{y1}$	$2M_{y2}$	$2M_{y3}$	$2M_{y\text{cp}}$	$\Delta M_{y\text{cp}}$ , %	$\Delta M_{y\text{min}}$ , %	$\Delta M_{y\text{max}}$ , %
$\alpha=0^\circ$	<b>WD=11мм</b>								
<b>1/0°</b>	<b>1000<sup>x</sup></b>	2000 <sup>x</sup>	1928,36	1920,50	1928,36	1925,74	-3,7	-3,6	-3,8
<b>2/0°</b>	<b>2000<sup>x</sup></b>	4000 <sup>x</sup>	3848,86	3833,15	3841,01	3841,01	-4,0	-3,8	-4,2
<b>3/0°</b>	<b>3000<sup>x</sup></b>	6000 <sup>x</sup>	5749,78	5741,87	5741,87	5744,49	-4,2	-4,2	-4,2
<b>4/0°</b>	<b>5000<sup>x</sup></b>	10000 <sup>x</sup>	9630,01	9677,14	9567,17	9624,77	-3,8	-3,2	-4,3
<b>5/0°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19102,9	19228,6	19102,9	19144,8	-4,3	-3,9	-4,5
<b>6/0°</b>	<b>20000<sup>x</sup></b>	40000 <sup>x</sup>	37043,3	36949,1	36854,8	36949,1	-7,6	-7,4	-7,8
<b>7/5°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19291,4	19417,1	19197,2	19301,2	-3,5	-2,9	-4,0
<b>8/10°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	18945,8	18788,7	18977,2	18903,9	-5,5	-5,1	-6,1
<b>Середнє відхилення середніх значень <math>\Delta M_{y\text{cp}}</math> від <math>M_{\text{РЕМ}}</math>, %</b>							<b>-4,6</b>	<b>-4,4</b>	<b>-4,8</b>
$\alpha$	<b>WD=7 мм</b>								
<b>1/0°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19228,6	19322,8	19322,8	19291,4	-3,5	-3,4	-3,6
<b>2/5°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19291,4	19354,3	19385,7	19343,8	-3,3	-3,1	-3,5
<b>3/5°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19794,1	19700,0	19825,6	19773,2	-1,2	-0,9	-1,5
<b>4/10°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19165,8	19354,3	19228,6	19249,5	-3,8	-3,2	-4,2
<b>Середнє відхилення середніх значень <math>\Delta M_{y\text{cp}}</math> від <math>M_{\text{РЕМ}}</math>, %</b>							<b>-3,0</b>	<b>-2,7</b>	<b>-3,2</b>

Для визначення геометричних спотворень РЕМ-зображень виконувались вимірювання з використанням програмою «Test-Measuring». Після встановлення початку системи координат знімка (центр кружечка, найближчого до геометричного центру знімка), визначення дійсних значень збільшень за вимірами 8 точок у центральній частині знімка, надалі виконувались виміри координат

центрів кружечків тест-сітки рівномірно по всьому полю РЕМ-зображення. Доцільно загалом вимірювати по **100-150 точок** на знімок. Цю кількість точок умовно поділяють на дві частини. Спочатку міряють у шаховому порядку зліва-направо зверху-вниз так звані «точки розв'язку», наводячи послідовно мишкою марку на центр кружечків тест-сітки. За вимірами цих точок програма знаходить величини геометричних спотворень точок  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  шляхом порівняння вимірних координат точок з їх дійсними значеннями, які нам відомі, оскільки відома розрізнявальна здатність тест-сітки  $r=1425$  ліній/мм (віддалі між сусідніми центрами кружечків тест-сітки є постійними і рівними  $\Delta l_x=\Delta l_y=1/r=0,7017544$  мкм – довжині хвилі променя червоного лазера, за допомогою якого була створена тест-сітка). За знайденими значеннями  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  наступна програма «Polycalc» визначає коефіцієнти полінома загального виду 3-го степеня  $a_0 \div a_9$ ,  $b_0 \div b_9$ . Далі, аналогічно, в шаховому порядку вимірюються і так звані «контрольні точки», за якими також визначаються величини геометричних спотворень координат  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , а в подальшому - точність і ефективність апроксимації геометричних спотворень поліномом загального виду 3-го степеня. Алгоритм роботи програми описаний в дисертації [55], а блок-схема приведена в роботі [62].

Загалом виміряно 12 вищеперелічених РЕМ-зображень тест-сітки, які опрацьовані за програмами «Test-Measuring», «Polycalc» програмного комплексу «Dimicros». Результати апроксимації геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A приведені в таблиці 3.3.8. За допомогою програми SURFER, за величинами геометричних спотворень РЕМ-зображень  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  контрольних точок побудовані векторні діаграми до і після їх апроксимації поліномом загального виду 3-го степеня при різних параметрах РЕМ-знімання (рис. 3.3.9-3.3.12).

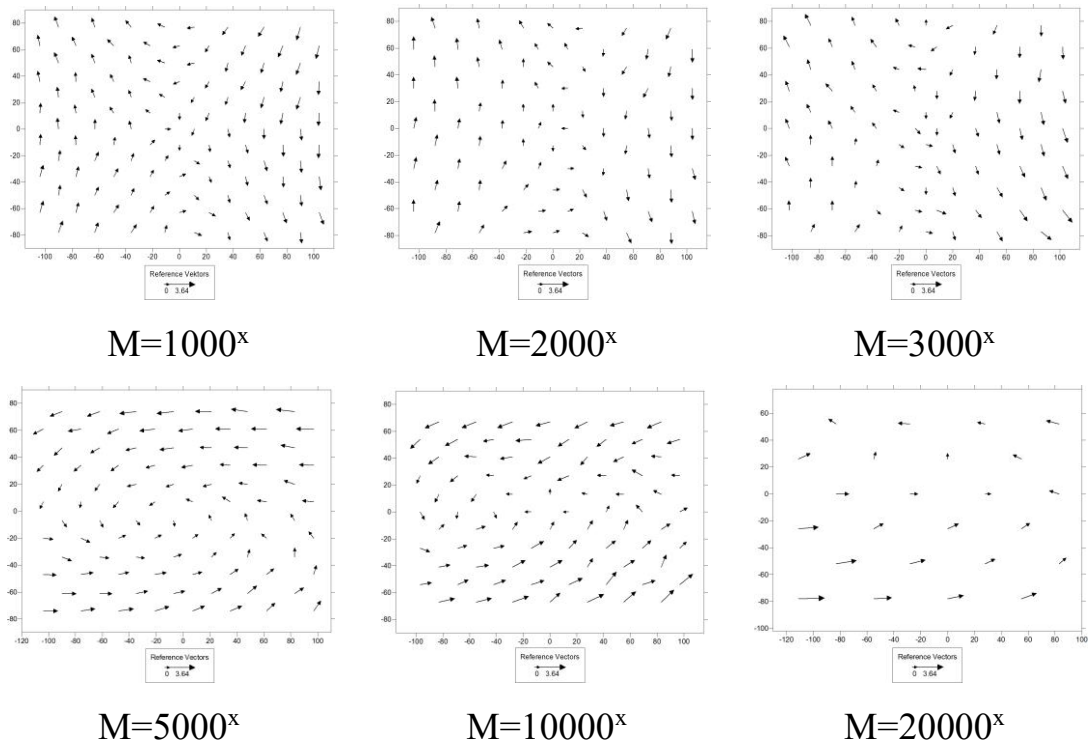


Рис. 3.3.9. Векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ-зображень до апроксимації ( $\alpha=0^\circ$ ,  $z=11$  мм)

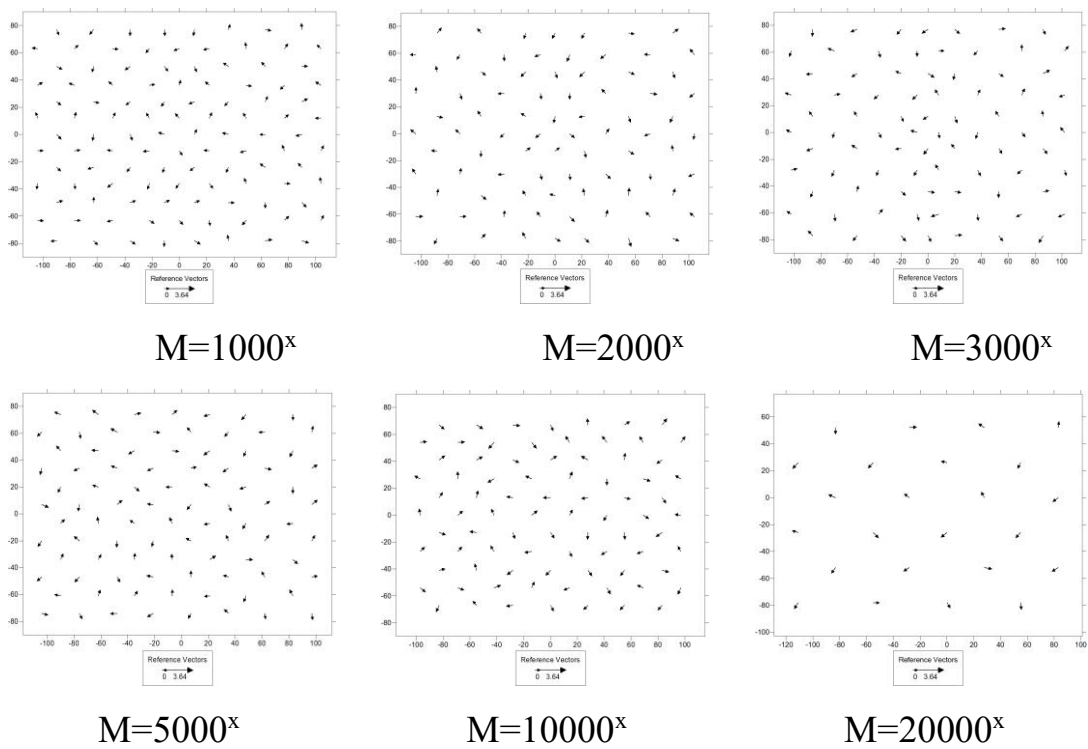


Рис. 3.3.10. Векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ-зображень після апроксимації ( $\alpha=0^\circ$ ,  $z=11$  мм)

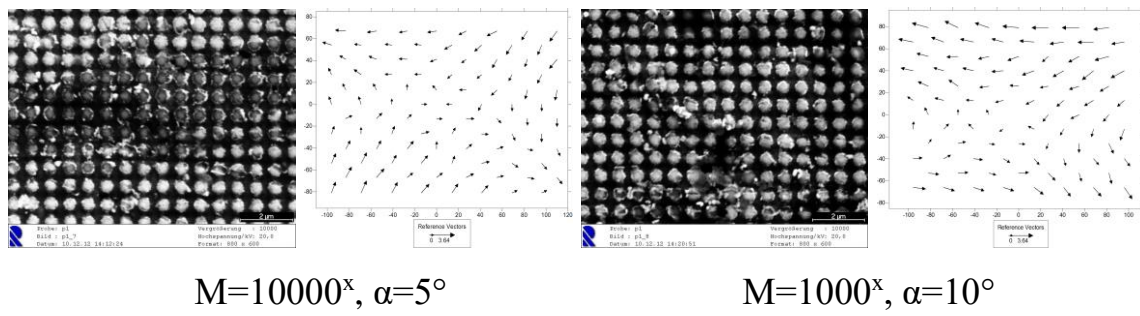


Рис. 3.3.11. РЕМ-зображення тест-сіток та векторні діаграми їх геометричних спотворень при двох різних кутах нахилу гоніометричного столика ( $\alpha=5^\circ$  і  $\alpha=10^\circ$ ) та постійній робочій віддалі  $z=11$  мм

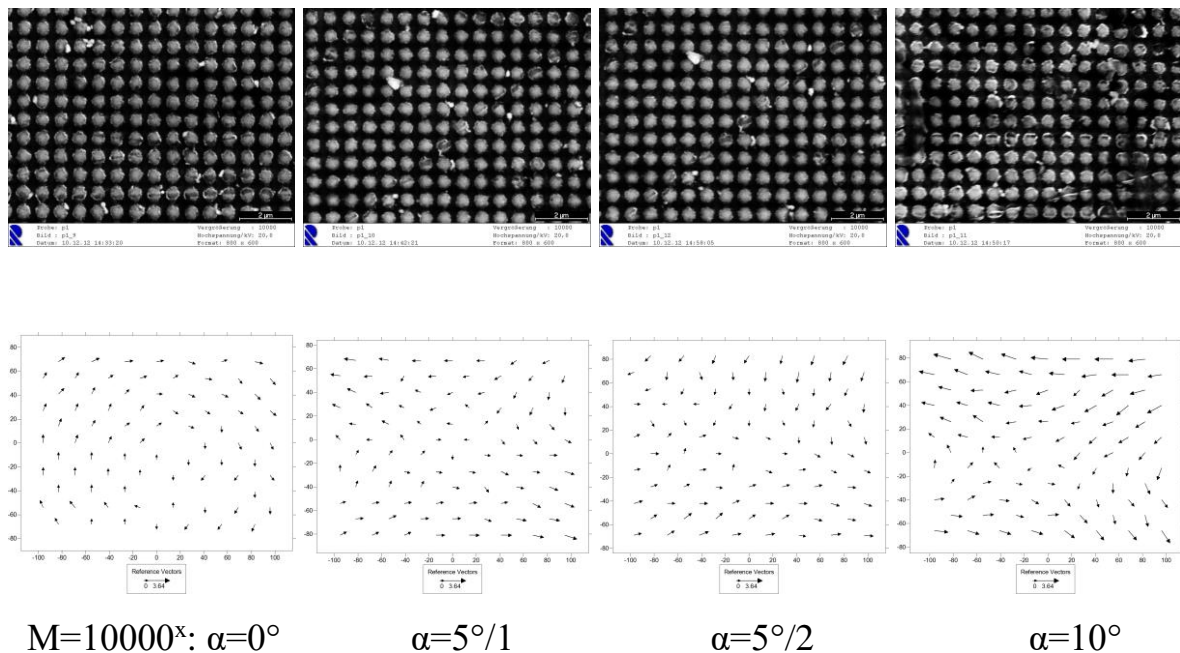


Рис. 3.3.12. РЕМ-зображення тест-сіток при змінах кута нахилу гоніометричного столика і зменшеній постійній робочій віддалі  $z=7$  мм та векторні діаграми їх геометричних спотворень

Таблиця 3.3.8

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

№ п/п	$M_x$ РЕМ	$2M$ РЕМ	$2M_x$	$2M_y$	$\Delta M_x$ , %	$\Delta M_y$ , %	$m_{\Delta x}$ , МКМ	$m_{\Delta y}$ , МКМ	$m_{\delta x}$ , МКМ	$m_{\delta y}$ , МКМ
<b><math>\alpha</math></b>	<b>WD = 11 мм</b>									
<b>1/0°</b>	<b>1000<sup>x</sup></b>	2000 <sup>x</sup>	1951,11	1919,72	-2,4	-4,0	251,0	743,5	111,4	100,1
<b>2/0°</b>	<b>2000<sup>x</sup></b>	4000 <sup>x</sup>	3908,56	3839,43	-2,3	-4,0	210,1	733,6	113,4	138,9
<b>3/0°</b>	<b>3000<sup>x</sup></b>	6000 <sup>x</sup>	5833,51	5749,73	-2,8	-4,2	342,0	726,4	150,3	150,5
<b>4/0°</b>	<b>5000<sup>x</sup></b>	10000 <sup>x</sup>	9834,23	9630,01	-1,7	-3,7	1086,7	355,3	147,0	134,7
<b>5/0°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19668,5	19197,2	-1,7	-4,0	1061,4	603,3	191,7	180,0
<b>6/0°</b>	<b>20000<sup>x</sup></b>	40000 <sup>x</sup>	39462,6	36886,2	-1,4	-7,8	1480,7	354,7	218,8	183,8
<b>7/5°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19605,6	19197,2	-2,0	-4,0	600,8	722,3	229,7	239,2
<b>8/10°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19511,4	18788,7	-2,4	-6,0	1397,8	677,6	299,1	290,6
<b>Середні значення</b>					<b>-2,1</b>	<b>-4,7</b>			<b>182,7</b>	<b>177,2</b>
<b><math>\alpha</math></b>	<b>WD = 7 мм</b>									
<b>1/0°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19605,6	19354,3	-2,0	-3,2	310,7	395,9	139,3	126,5
<b>2/5°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	13385,7	19165,8	-3,1	-4,2	635,8	279,6	180,7	171,0
<b>3/5°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19731,3	19731,3	-1,4	-1,4	498,9	445,0	201,9	190,2
<b>4/10°</b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	20000 <sup>x</sup>	19479,9	19460,0	-2,6	-3,7	769,3	642,9	230,6	190,0
<b>Середні значення</b>					<b>-2,3</b>	<b>-3,1</b>			<b>188,1</b>	<b>169,4</b>

За результатами наших досліджень даного РЕМ встановлено:

- дійсні величини збільшень (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960А приблизно у 2 рази більші від встановлених значень на шкалі РЕМ, що викликано специфікою запису цифрового зображення ( $k=1,931$ );



- дійсним величинам збільшень (масштабу) РЕМ зображень притаманна систематика масштабних спотворень в усьому робочому діапазоні збільшень мікроскопа від  $1000^x$  до  $20000^x$  (крат).

Вони відхиляються від встановлених значень на шкалі РЕМ вздовж осі  $x$  знімка в середньому на **-2,2%** з відхиленнями  $\pm 0,5\%$ , незалежно від величини збільшення РЕМ та робочої відстані  $z$ , а вздовж осі  $y$  в середньому на **-4,5%** з відхиленнями  $\pm 1\%$  з тенденцією збільшення спотворення при збільшенні масштабу до  $M=20000^x$  - до **-7,6%** при робочій віддалі  $z=11$ мм. При зменшенні робочої віддалі до  $z=7$ мм середні значення спотворень масштабу зображень вздовж осі  $y$  також дещо зменшуються до величини в середньому **-3,0%** з відхиленнями  $\pm 1\%$  в залежності від зміни кута нахилу гоніометричного столика.

- РЕМ DSM-960А в метричному відношенні стосовно параметра збільшення можна вважати стабільно працюючим приладом, який не потребує постійного калібрування збільшень перед РЕМ-зніманням дослідних зразків;

- геометричні спотворення РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960А мають тенденцію до суттєвого зростання їх середньоквадратичних величин вздовж осі  $x$  знімка при збільшенні масштабу (збільшення), зокрема від  $m_{\Delta x} = 0,25$  мм при  $M=1000^x$  до  $m_{\Delta x} = 1,50$  мм при  $M=20000^x$  зі збільшенням абсолютних величин спотворень до  $\Delta x = \pm 3$  мм. Середньоквадратичні ж величини геометричних спотворень РЕМ-зображень вздовж осі  $y$  суттєво не залежать від величини їх масштабу (збільшення) і складають  $m_{\Delta y} = 0,30-0,70$  мм (абсолютні величини досягають максимальних значень  $\Delta y = \pm 2$  мм);

- зважаючи на значні абсолютні величини геометричних спотворень РЕМ-зображень, доцільно перед РЕМ-стереозніманням дослідних зразків виконувати при одних і тих же параметрах ще й РЕМ-знімання тест-сітки, з допомогою опрацювання РЕМ-зображень якої і з

використанням комплексу програм «Dimicros» можна буде суттєво їх врахувати;

- результати апроксимування геометричних спотворень РЕМ-зображень поліномом 3-го степеня показали значну його ефективність. Середньоквадратичні похибки після апроксимування зменшуються від 2-х до 7-ми разів до величин, що знаходяться в межах точності вимірів, яка складає  $\pm 0,265$  мм. Значні ж абсолютні величини спотворень, як правило, зменшуються приблизно на порядок, що суттєво підвищує точність визначення кількісних характеристик дослідних мікроповерхонь.

- геометричні спотворення РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A значні, і суттєво змінюються в залежності від змін параметрів РЕМ-знімання, тому потребують обов'язкового калібрування при стереовимірах мікроповерхонь дослідних об'єктів.

### 3.3.3. Дослідження метрики цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106 I (Суми, ВАТ «SELMІ».Україна)

В останні роки в Україні створений сучасний растровий електронний мікроскоп - РЕМ-106І з можливістю запису РЕМ-зображень у цифровому форматі.

Раніше дослідження метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106І в Україні не виконувались. Таким дані дослідження повинні були розв'язати цю проблему і дати відповідні рекомендації дослідникам, які використовують цей мікроскоп.

Метою даних досліджень було: отримати цифрові РЕМ-зображення еталонних тест-об'єктів з роздільними здатностями  $\gamma=1425$  лін/мм і  $\gamma=3530$  лін/мм на РЕМ 106І в діапазоні збільшень від  $1000^{\times}$  до  $30000^{\times}$  (крат) та встановити величини масштабних спотворень цих зображень за їх вимірами на ПК з використанням програми "Test-Measuring" з пакету програм «Dimicros» [Іванчук, Хрупін, 2012].

РЕМ 106І – сучасний растровий електронний мікроскоп вітчизняного виробництва (ВАТ «SELMІ», м. Суми) з системою енергодисперсійного мікроаналізу, який встановлений у деяких наукових лабораторіях і у ВУЗах України, зокрема у Національному університеті



«Львівська політехніка». РЕМ-106І має високу роздільну здатність, велику глибину фокусування, достатньо простий в користуванні, має сучасне програмне забезпечення для отримання високоякісних

Рис. 3.3.13. РЕМ-106І

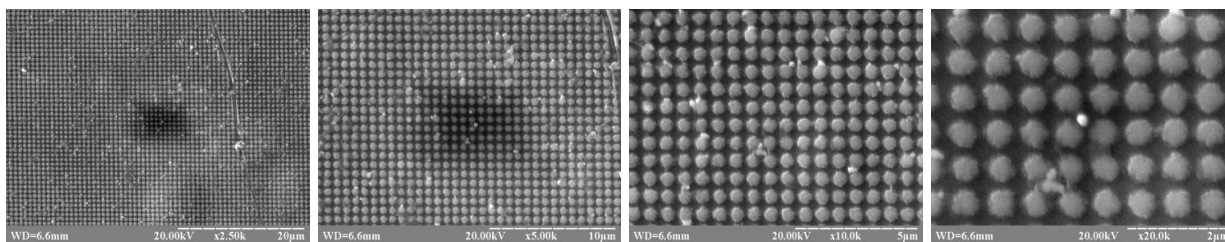
РЕМ-зображень, а також відносно, невисоку вартість. Основні характеристики приладу приведені у таблиці 3.3.9.

Таблиця 3.3.9

Режими роботи	високовакуумний режим (до $5 \times 10^{-6}$ мм рт. ст.)
Прискорююча напруга	від 0,5 до 30 кВ
Діапазон збільшень	від $15^x$ до $300\,000^x$ (крат)
Розрізнявальна здатність у вторинних електронах	в режимі високого вакууму - 4 нм, в режимі низького вакууму - 6 нм
Максимальний розмір зразка	діаметр - до 50 мм, висота - до 30 мм
Катод	W (вольфрам)
Система відкачування повітря	дифузійний насос + ротац. насос
Програмне забезпечення	для Windows XP
Формат запису файлів	BMP
Розміри робочого місця	2100 мм x 1046 мм x 1850 мм
Енергоспоживання	не більше 2,5 кВА

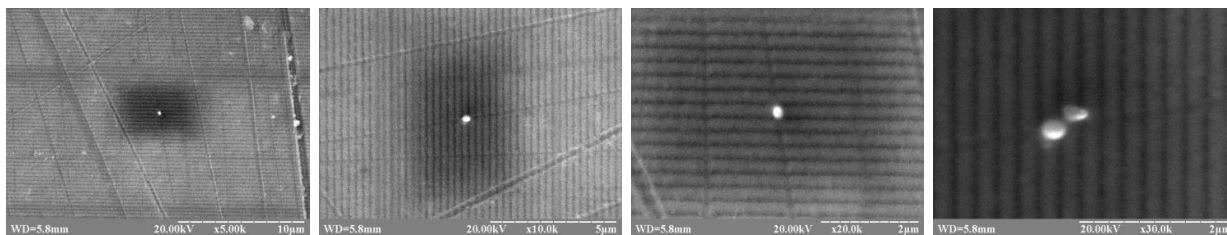
На РЕМ-106І було отримано 9 знімків тест-сітки з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм у цифровому форматі JPEG з фіксованими значеннями збільшень, встановлених на шкалі приладу:  $1000^x$ ,  $2500^x$ ,  $5000^x$ ,  $8000^x$ ,  $10000^x$ ,  $15000^x$ ,  $20000^x$ ,  $25000^x$ ,  $30000^x$  (рис. 3.3.14), а також по 8 знімків тест-гратки з розрізнявальною здатністю  $r = 3530$  лін/мм при їх горизонтальному і вертикальному положенні відносно координатної сітки знімка при тих же збільшеннях (рис. 3), за винятком  $M=1000^x$ , при якому лінії решітки практично зливаються. Умовні розміри отриманих цифрових РЕМ-зображень при їх опрацюванні на ПК за програмою “Test-Measuring” складають 338,56 мм х 253,92 мм (1280 х 960 пікселів). Розмір піксела – 0,2645 мм.

Вимірювання цифрових РЕМ-зображень обох тест-об’єктів виконувалось на персональному комп’ютері в програмному середовищі «Dimicros» за програмою “Test-Measuring”. Вимірювання величин дійсних збільшень РЕМ-зображень тест-об’єктів виконувались тричі вздовж осей  $x$  і  $y$  знімка за цією ж схемою, приведеною на рис. 3.3.3. Таким чином були отримані середні значення збільшень і їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ. Результати експерименту приведені в таблицях 3.3.10-3.3.13.



а)  $M = 2500^x$       б)  $M = 5000^x$       в)  $M = 10000^x$       г)  $M = 20000^x$

Рис. 3.3.14. Цифрові РЕМ-знімки тест-об’єкту з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм при різних збільшеннях  $M$ .



а)  $M = 5000^x$       б)  $M = 10000^x$       в)  $M = 20000^x$       г)  $M = 30000^x$

Рис. 3.3.15. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкту з розрізнявальною здатністю  $r = 3530$  лін/мм при різних збільшеннях  $M$ .

Таблиця 3.3.10

Збільшення вздовж осі  $x$  РЕМ-знімків, отримані за вимірами тест-сітки з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм та відхилення  $M_x$  від встановлених на шкалі РЕМ

№ п/п	$M_{x\text{РЕМ}}$	$M_{x1}$	$M_{x2}$	$M_{x3}$	$M_{x\text{ср}}$	$\Delta M_x$ ср, %	$\Delta M_x$ min, %	$\Delta M_x$ max, %
1	1000 <sup>x</sup>	1017,86	1016,74	1016,74	1017,11	+1,71	+1,67	+1,79
2	2500 <sup>x</sup>	2539,24	2535,43	2535,43	2536,70	+1,47	+1,42	+1,57
3	5000 <sup>x</sup>	5065,31	5070,88	5059,74	5065,31	+1,31	+1,20	+1,42
4	8000 <sup>x</sup>	7901,76	7912,93	7901,76	7905,48	-1,18	-1,09	-1,23
5	10000 <sup>x</sup>	9944,15	9944,15	9932,99	9940,43	-0,60	-0,56	-0,67
6	15000 <sup>x</sup>	14875,4	14886,6	14920,1	14894,0	-0,71	-0,53	-0,83
7	20000 <sup>x</sup>	19910,1	19953,9	19868,1	19910,7	-0,45	-0,23	-0,66
8	25000 <sup>x</sup>	24845,9	24862,5	24858,2	24855,5	-0,58	-0,55	-0,62
9	30000 <sup>x</sup>	29702,6	29680,3	30014,3	29799,1	-0,85	-0,64	-1,07
Ср. відхилення середніх значень $\Delta M_x$ ср від $M_{\text{РЕМ}}$ , %						<b> 0,99 </b>	<b> 0,88 </b>	<b> 1,10 </b>

Таблиця 3.3.11

Збільшення вздовж осі  $y$  РЕМ-знімків, отримані за вимірами тест-сітки з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм та відхилення  $M_y$  від встановлених на шкалі РЕМ

№ п/п	$M_{y\text{РЕМ}}$	$M_{y1}$	$M_{y2}$	$M_{y3}$	$M_{y\text{ср}}$	$\Delta M_y$ ср, %	$\Delta M_y$ min, %	$\Delta M_y$ max, %
1	1000 <sup>x</sup>	1004,47	1005,58	1006,70	1005,58	+0,56	+0,48	+0,67
2	2500 <sup>x</sup>	2513,96	2516,75	2513,96	2514,89	+0,60	+0,56	+0,67

3	5000 <sup>x</sup>	5040,75	5035,18	5024,04	5033,32	+0,67	+0,48	+0,82
4	8000 <sup>x</sup>	7912,93	7916,70	7890,58	7906,74	-1,17	-1,04	-1,37
5	10000 <sup>x</sup>	9843,70	9921,83	9910,67	9892,07	-1,08	-0,78	-1,56
6	15000 <sup>x</sup>	14797,38	14784,49	14762,22	14781,36	-1,46	-1,35	-1,59
7	20000 <sup>x</sup>	19491,75	19558,81	19558,81	19536,46	-2,32	-2,21	-2,54
8	25000 <sup>x</sup>	24273,62	24117,31	24117,31	24169,41	-3,32	-2,91	-3,53
9	30000 <sup>x</sup>	28834,21	28789,68	28789,68	28804,52	-3,98	-3,89	-4,03
<b>Середнє відхилення середніх значень <math>\Delta M_{y\text{cp}}</math> від <math>M_{PEM}</math>, %</b>						<b> 1,68 </b>	<b> 1,52 </b>	<b> 1,86 </b>

Таблиця 3.3.12

Збільшення вздовж осі  $x$  PEM-знімків, отримані за вимірами тест-сітки з розрізняювальною здатністю  $r = 3530$  лін/мм та відхилення  $M_x$  від встановлених на шкалі PEM

№ п/п	$M_{x\text{PEM}}$	$M_{x1}$	$M_{x2}$	$M_{x3}$	$M_{x\text{cp}}$	$\Delta M_x$ cp, %	$\Delta M_x$ min, %	$\Delta M_x$ max, %
1	2500 <sup>x</sup>	2528,16	2521,30	2525,43	2524,96	+1,00	+0,85	+1,13
2	5000 <sup>x</sup>	5029,66	5027,95	5031,77	5029,79	+0,60	+0,56	+0,64
3	8000 <sup>x</sup>	7942,31	7930,21	7954,96	7942,49	-0,72	-0,56	-0,87
4	10000 <sup>x</sup>	9937,76	9925,36	9910,15	9924,42	-0,76	-0,62	-0,90
5	15000 <sup>x</sup>	14841,50	14869,07	14893,94	14868,17	-0,88	-0,72	-1,06
6	20000 <sup>x</sup>	19772,23	19810,54	19855,78	19812,85	-0,94	-0,74	-1,14
7	25000 <sup>x</sup>	24782,58	24800,74	24684,93	24756,08	-0,98	-0,80	-1,26
8	30000 <sup>x</sup>	29597,79	29630,76	29663,36	29630,64	-1,23	-1,12	-1,34
<b>Середнє відхилення середніх значень <math>\Delta M_{x\text{cp}}</math> від <math>M_{PEM}</math>, %</b>						<b> 0,89 </b>	<b> 0,75 </b>	<b> 1,04 </b>

Таблиця 3.3.13

Збільшення вздовж осі у РЕМ-знімків, отримані за вимірами тест-сітки з розрізнявальною здатністю  $r = 3530$  лін/мм та відхилення  $M_y$  від встановлених на шкалі РЕМ

№ п/п	$M_{y\text{РЕМ}}$	$M_{y1}$	$M_{y2}$	$M_{y3}$	$M_{y\text{cp}}$	$\Delta M_{y\text{cp}}, \%$	$\Delta M_{y\text{min}}, \%$	$\Delta M_{y\text{max}}, \%$
1	2500 <sup>x</sup>	2512,59	2514,39	2516,74	2514,57	+0,58	+0,50	+0,67
2	5000 <sup>x</sup>	5024,13	5031,77	5028,73	5028,21	+0,56	+0,48	+0,64
3	8000 <sup>x</sup>	7923,84	7905,61	7942,47	7923,97	-0,95	-0,72	-1,18
4	10000 <sup>x</sup>	9903,79	9856,15	9887,15	9882,36	-1,18	-0,96	-1,44
5	15000 <sup>x</sup>	14751,50	14714,08	14778,15	14747,91	-1,68	-1,48	-1,91
6	20000 <sup>x</sup>	19445,30	19445,30	19574,20	19488,27	-2,56	-2,13	-2,77
7	25000 <sup>x</sup>	24250,81	24300,81	24134,93	24228,85	-3,08	-2,80	-3,46
8	30000 <sup>x</sup>	28815,79	28914,29	28845,36	28858,48	-3,81	-3,62	-3,95
<b>Середнє відхилення середніх значень <math>\Delta M_{y\text{cp}}</math> від <math>M_{\text{РЕМ}}, \%</math></b>						<b> 1,80 </b>	<b> 1,59 </b>	<b> 2,00 </b>

На підставі проведених нами досліджень можна оцінити метрику даного мікроскопа так:

- дійсні величини збільшень (масштабу) РЕМ зображень, отриманих на РЕМ-106І відхиляються від встановлених на шкалі РЕМ вздовж осі  $x$  в межах  $\pm 2\%$ , а вздовж осі  $y$  знімка від  $+1\%$  при відносно незначних збільшеннях  $1000 \times -5000 \times$  крат до  $-4\%$  при  $M=30000 \times$  в робочому діапазоні збільшень мікроскопа від  $1000^x$  до  $30000^x$  (крат).

- аналіз результатів досліджень, приведених у таблицях 3.3.10-3.3.11 показали високу їх кореляцію з даними, приведеними у таблицях 3.3.12-3.3.13. Тобто дійсні значення збільшень цифрових РЕМ-зображень, отримані за вимірами двох тест-сіток з різними роздільними здатностями практично однакові, тобто в межах точності вимірювань -  $\pm 0,5\%$ ;

- РЕМ 106 І можна вважати надійним в метричному відношенні мікроскопом, який не потребує постійного калібрування збільшень перед кожним РЕМ-зніманням дослідних зразків;

- у випадках потреби прецизійного визначення масштабу цифрових РЕМ-зображень з точністю  $\pm 0,5\%$  доцільно попередньо отримати ці значення за РЕМ-знімками голографічних тест-сіток.

Для встановлення величин і характеру нелінійних геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень проведено знімання та опрацювання зображень цього ж еталонного тест-об'єкту з розрізнявальною здатністю  $\Gamma=1425$  ліній/мм, отриманих на РЕМ-106І в діапазоні збільшень від  $1000^{\times}$  до  $30000^{\times}$ . Також досліджено точність врахування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень шляхом їх апроксимації поліномом загального виду третьої степені.

Під час РЕМ-знімання було отримано 9 знімків еталонного тест-об'єкту (сітки) з розрізнявальною здатністю  $\Gamma=1425$  ліній/мм з фіксованими значеннями збільшення:  $1000^{\times}$ ,  $2500^{\times}$ ,  $5000^{\times}$ ,  $8000^{\times}$ ,  $10000^{\times}$ ,  $15000^{\times}$ ,  $20000^{\times}$ ,  $25000^{\times}$ ,  $30000^{\times}$ . Знімки записано у цифровому форматі BMP (рис. 3.3.14). Розгортка цифрових РЕМ-зображень на екрані монітора РЕМ складає  $1280 \times 960$  пікселів. Особливістю цих зображень є те, що їх реальний масштаб (збільшення) лише тоді приблизно відповідає встановленому значенню на шкалі РЕМ, коли їх розмір на екрані монітора  $120 \times 90$  мм. Фізичний розмір пікселя у цьому випадку складає **0,09375** мм. Однак при фотограмметричному опрацюванні цифрових РЕМ-зображень за допомогою спеціального програмного пакету «Dimicros», їх реальний (умовний) розмір на екрані монітора значно більший і складає  $338,56 \times 253,92$  мм при розмірі пікселя **0,2645** мм. Таким чином, коефіцієнт переходу для визначення реального масштабу цифрового знімка для кожного його фіксованого значення складає приблизно  $k=2,8213$ .

За програмою «Test-Measuring» були виміряні цифрові РЕМ-зображення спеціального тест-об'єкта, результатом яких було встановлення їх дійсних значень масштабу (збільшень) вздовж осей  $x$  і  $y$



знімка, а також величин геометричних спотворень рівномірно по всьому полю знімка. Наступна програма «Polycalc» за результатами обчислень, виконаних програмою «Test-Measuring» і з використанням поліному загального виду 3-го степеня, дозволила обчислити поправки у виміряні координати вузлових точок тест-об'єкта, а також середньоквадратичні похибки величин залишкових спотворень, тобто встановити точність апроксимації геометричних спотворень поліномом (табл. 3.3.14).

На кожному знімку вимірювалась (рівномірно по всьому полю знімка) різна кількість точок: від 35 точок (при  $M=30000^x$ ) до близько 200 точок (при  $M$  від  $1000^x$  до  $10000^x$  крат). На рис. 3.3.15 і рис. 3.3.16 приведені векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ – знімків до і після їх апроксимації.

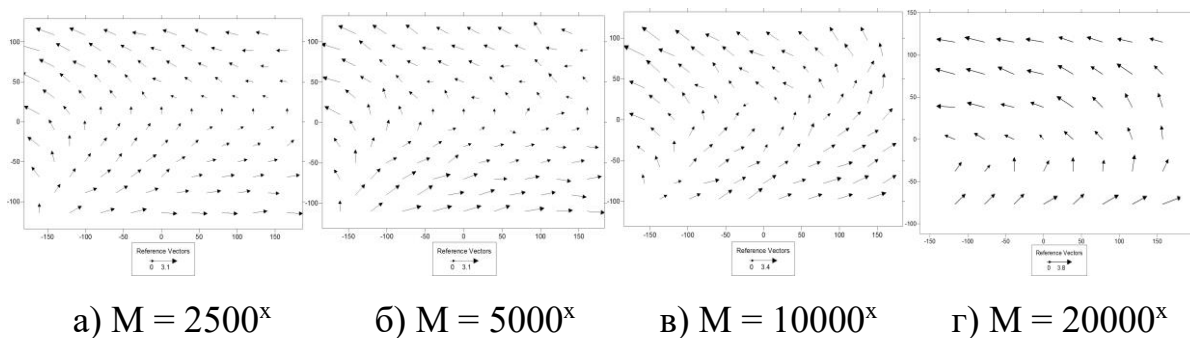


Рис. 3.3.15. Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта при різних збільшеннях  $M^x$  до апроксимації.

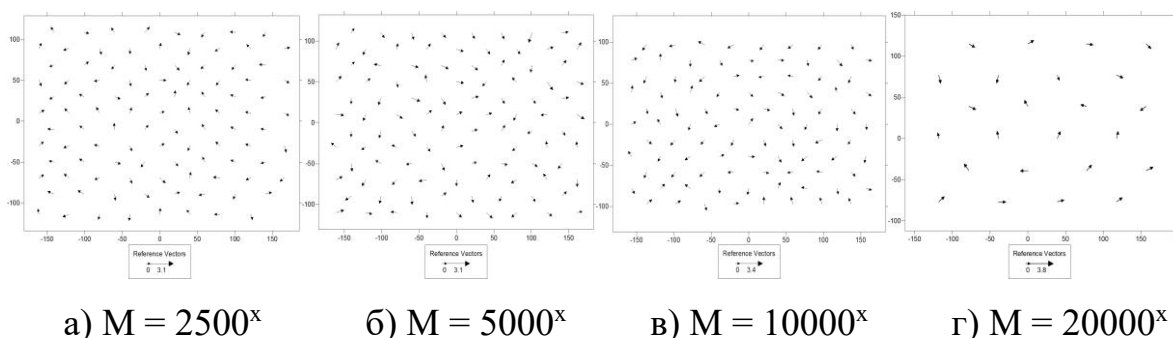


Рис. 3.3.16. Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта при різних збільшеннях  $M^x$  після апроксимації.

Таблиця 3.3.14

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

№ п/ п	$M_{РЕМ}$	Дійсні значення збільшень		$\Delta M_x, \%$	$\Delta M_y, \%$	До апроксимації		Після апроксим.	
		$M_x$	$M_y$			$m_{\Delta x},$ мм	$m_{\Delta y},$ мм	$m_{\delta x},$ мм	$m_{\delta y},$ мм
1	1000 <sup>x</sup>	1014,50	1005,58	+1,45	+0,56	1,254	0,525	0,134	0,122
2	2500 <sup>x</sup>	2544,65	2517,18	+1,79	+0,69	1,085	0,534	0,155	0,127
3	5000 <sup>x</sup>	5079,73	5024,04	+1,60	+0,48	1,186	0,586	0,257	0,239
4	8000 <sup>x</sup>	7927,84	7875,68	-0,90	-1,55	1,274	0,222	0,173	0,159
5	10000 <sup>x</sup>	9932,99	9832,54	-0,67	-1,67	1,289	0,906	0,211	0,219
6	15000 <sup>x</sup>	14862,4	14650,9	-0,92	-2,33	1,306	0,482	0,309	0,219
7	20000 <sup>x</sup>	19871,8	19491,8	-0,64	-2,54	2,179	1,260	0,347	0,307
8	25000 <sup>x</sup>	24943,5	24318,3	-0,23	-2,73	1,424	1,069	0,301	0,261

Таким чином, виходячи з отриманих реальних точностей вимірювань РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ 106 I можна отримати реальну точність вимірювання плоских просторових координат точок дослідних об'єктів  $m_x = m_y$  в залежності від реального масштабу (збільшення) цифрових РЕМ-зображень, які приведені в таблиці 3.3.15.

Таблиця 3.3.15

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

	1000 <sup>x</sup>	2500 <sup>x</sup>	5000 <sup>x</sup>	8000 <sup>x</sup>	10000 <sup>x</sup>	15000 <sup>x</sup>	20000 <sup>x</sup>	25000 <sup>x</sup>
$3m^o_x = 3m^o_y,$ мм	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280
$m_x = m_y,$ мкм	0,280	0,112	0,056	0,035	0,028	0,019	0,014	0,011

Аналізуючи результати досліджень величин геометричних спотворень за вимірами цифрових знімків спеціальних тест-об'єктів (рис. 3.3.14), які приведені в табл. 3.3.14 у вигляді їх середньоквадратичних величин  $m_{\Delta x, (мм)}$ ,  $m_{\Delta y, (мм)}$ , можемо відмітити наступне: абсолютні значення геометричних спотворень цифрових зображень в умовному масштабі їх вимірювання за програмою «Test-Measuring» достатньо великі, досягаючи максимальних величин до  $\pm 4$  мм відносно центральної точки знімка при його розмірах 338,56x253,92 мм. Характер цих спотворень наглядно відображають *векторні діаграми* (рис. 3.3.15), які мають *спіралеподібний* вигляд, який суттєво не змінюється незалежно від зміни величини збільшення (масштабу) знімка у діапазоні від  $1000^x$  до  $25000^x$ .

При приведенні цих знімків до розміру 120x90 мм, при якому масштаб знімків відповідає встановленому збільшенню на шкалі РЕМ, максимальні величини спотворень все ж сягають значень до  $\pm 1,5$  мм (до **15 пікселів**). Очевидно, що необхідно враховувати ці спотворення. Наші дослідження за допомогою програми «Polycalc» ще раз підтвердили ефективність апроксимації спотворень поліномом загального виду третьої степені. Результати досліджень приведені в табл.1 в колонках величин середньоквадратичних похибок  $m_{\Delta x}$  (мм),  $m_{\Delta y}$  (мм) після їх апроксимації поліномом. Бачимо, що ці величини приблизно на порядок менші від початкових значень спотворень. Візуально залишкові величини геометричних спотворень також нами показані у вигляді векторних діаграм (див. рис. 3.3.16). Для знімків розміром 120x90 мм максимальні їхні значення не перевищують  $\pm 0,3$  мм, тобто 3-х пікселів. Таким чином поліноміальна апроксимація спотворень дає можливість приблизно на порядок підвищити точність визначення просторових координат точок досліджуваних різноманітних мікроповерхонь твердих тіл. В табл. 3.3.15 приведені абсолютні значення максимально можливих

похибок в отриманні координат  $M_X = M_Y = 3m^o_x/M_x^x = 3m^o_y/M_y^x$  (мкм) в залежності від збільшення (масштабу) знімка вони мають значення від **0,28 мкм** при  $M=1000^x$  до **0,01 мкм** при  $M=25000^x$ . Це дає можливість отримувати кількісні параметри мікроповерхонь твердих тіл на мікронному і субмікронному рівнях з високою точністю, що так важливо при теперішніх нанотехнологіях у виробництві.

На підставі виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

- геометричні спотворення цифрових зображень, отриманих на РЕМ 106І вітчизняного виробництва (ВАТ «SELMІ», м. Суми) в діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $30000^x$  достатньо значні і досягають максимальних значень від **1 до 1,5 мм** (приблизно від 10 до 15 пікселів). Візуально ці спотворення мають спіралеподібний характер практично незалежно від величини збільшення і їхні значення зростають пропорційно віддалі від центра знімка до його країв;

- підтверджена ефективність апроксимації геометричних спотворень РЕМ-зображень поліномом загального вигляду третьої степені, який дозволяє їх зменшувати у 5-10 разів;

- РЕМ 106І можна вважати високотехнологічним растровим електронним мікроскопом, який дозволяє отримувати високоякісні цифрові зображення мікроповерхонь твердих тіл з відносно незначними спотвореннями: лінійними (масштабними) в межах  $\pm 1-3\%$  і нелінійними (дисторсійними) – максимально до  **$\pm 1,5$  мм** при розмірах зображення  $120 \times 90$  мм.

### 3.3.4. Метричні дослідження цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F (JEOL, Японія)

Растровий електронний мікроскоп (РЕМ) JSM-7100F фірми JEOL – сучасний прилад з високою розрізняювальною здатністю і з можливістю запису РЕМ-зображень у будь-якому цифровому форматі.

Дослідження метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F виконані в Україні вперше. Виконані дослідження дозволили зробити висновки стосовно даного РЕМ і дати відповідні рекомендації щодо його використання.

Метою даних досліджень було: отримати цифрові РЕМ-зображення еталонного тест-об'єкту з розрізняювальною здатністю  $r=1425$  лін/мм в діапазоні збільшень від  $2000^{\times}$  до  $40000^{\times}$  (крат), встановити величини геометричних спотворень цих зображень за їх вимірами на ПК з використанням програми “Test-Measuring” та дослідити ефективність їх апроксимації (врахування) за допомогою програми «Polycalc» з пакету програм «Dimicros» [62].

РЕМ JSM-7100F – сучасний растровий електронний мікроскоп відомої фірми JEOL (Японія). Особливістю цього РЕМ є використання автоемісійного катоду Шотткі. РЕМ JSM-7100F має високу роздільну



здатність, велику глибину фокусування, достатньо простий в користуванні, має сучасне програмне забезпечення для отримання високоякісних РЕМ-зображень у будь-якому форматі запису. Основні характеристики приладу приведені у табл. 3.3.16.

Рис. 3.3.17. РЕМ JSM-7100F

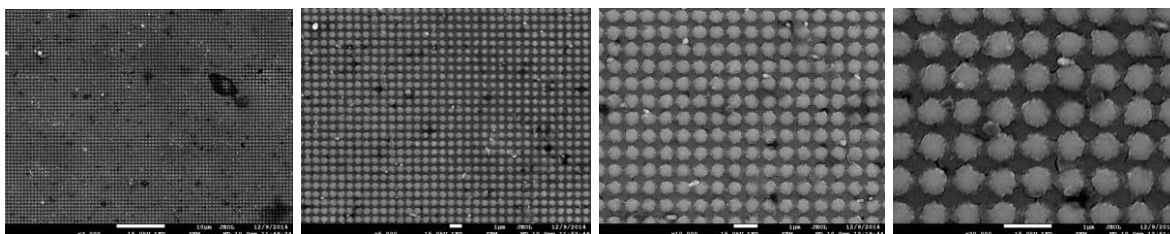
Таблиця 3.3.16

Прискорююча напруга	від 0,2 до 30 кВ
Діапазон збільшень	від $10^x$ до 1 000 000 <sup>x</sup>
Розрізнявальна здатність у вторинних електронах	при 30кВ – 1,2 нм, при 1кВ – 3,0 нм
Максимальний розмір зразка	діаметр - до 200 мм, висота - до 30 мм
Катод	автоемісійний катод Шотткі
Система відкачування повітря	дифузійний насос + ротаційний насос
Програмне забезпечення	для Windows XP
Формат запису файлів	JPG, BMP, TIFF
Діапазон переміщень гоніометричного столика вздовж осей РЕМ, кути нахилів і розвертань	X: від $\pm 35$ мм до $\pm 70$ мм Y: від $\pm 25$ мм до $\pm 40$ мм Z: від 3 до 41 мм, нахили: від $-5^\circ$ до $70^\circ$ , розвертання: $360^\circ$
Енергоспоживання	не більше 1,1 кВА

На РЕМ JSM-7100F було отримано 9 знімків тест-сітки з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм з фіксованими значеннями збільшень, встановлених на шкалі приладу:  $2000^x$ ,  $5000^x$ ,  $7500^x$ ,  $10000^x$ ,  $15000^x$ ,  $20000^x$ ,  $25000^x$ ,  $30000^x$ ,  $40000^x$  (рис. 3.4.4.2), які були записані у трьох цифрових форматах JPEG, BMP і TIFF. Розміри отриманих цифрових РЕМ-зображень при їх опрацюванні на ПК за програмою “Test-Measuring” складають  $120,00 \times 96,00$  мм ( $1280 \times 1024$  пікселів). Розмір піксела –  $0,09375$  мм.

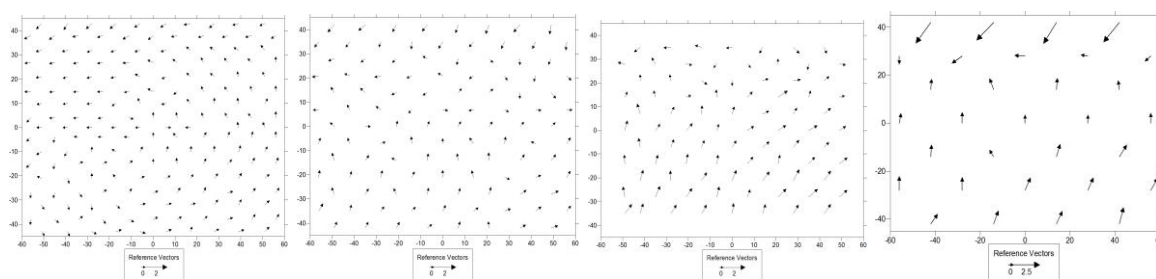
Вимірювання цифрових РЕМ-зображень тест-об’єкту виконувалось на ПК в програмному середовищі «Dimicros» за програмою “Test-Measuring”. Дійсні збільшення РЕМ-зображень тест-об’єктів обчислювались тричі вздовж осей  $x$  і  $y$  знімка за схемою, приведеною на рис. 3.3.3. Середні значення збільшень і їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ приведені нами в таблиці 3.4.4.2.

Обчислені за програмою “Test-Measuring” дійсні значення збільшень цифрового РЕМ-знімка  $M_x$  і  $M_y$  в подальшому використовуються для обчислення нелінійної складової геометричних спотворень РЕМ-зображень (дисторсії) за програмою «Polysac». Для встановлення величин дисторсії нами на кожному знімку вимірювались у шаховому порядку від 34 до 356 точок, в залежності від збільшення знімка. На рис. 3.3.19 і 3.3.20 приведені векторні діаграми цих спотворень на контрольних точках до і після їх апроксимації поліномом загального виду. Кількісні їх середньоквадратичні значення приведені у таблиці 3.3.17 в колонках 7-10.



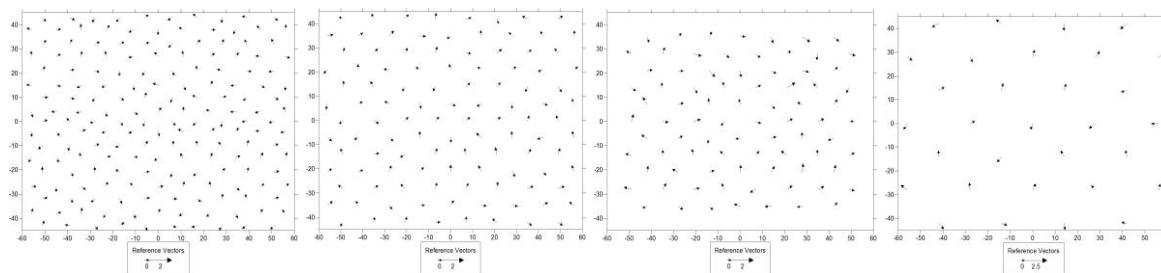
а)  $M = 2000^x$       б)  $M = 5000^x$       в)  $M = 10000^x$       г)  $M = 20000^x$

Рис. 3.3.18. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкту з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм при різних  $M$ .



а)  $M = 2000^x$       б)  $M = 5000^x$       в)  $M = 10000^x$       г)  $M = 20000^x$

Рис. 3.3.19. Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта за різних збільшень  $M^x$  до апроксимації.



а)  $M = 2000^x$       б)  $M = 5000^x$       в)  $M = 10000^x$       г)  $M = 20000^x$

Рис. 3.3.20. Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта за різних збільшень  $M^x$  після апроксимації.

Таблиця 3.3.17

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

№ п/п	$M_{РЕМ}$	Дійсні знач. збільшень		$\Delta M_x, \%$	$\Delta M_y, \%$	До апроксимації		Після апроксим.	
		$M_x$	$M_y$			$m_{\Delta x},$ мм	$m_{\Delta y},$ мм	$m_{\delta x},$ мм	$m_{\delta y},$ мм
1	$2000^x$	1984,38	1999,91	-0,78	-0,01	0,109	0,083	0,040	0,041
2	$5000^x$	4970,65	5020,74	-0,59	+0,41	0,138	0,181	0,081	0,088
3	$7500^x$	7718,51	7725,93	+2,91	+3,01	0,216	0,224	0,113	0,123
4	$10000^x$	10264,13	10397,72	+2,64	+3,98	0,294	0,370	0,138	0,136
5	$15000^x$	15429,60	15451,86	+2,86	+3,01	0,359	0,280	0,165	0,148
6	$20000^x$	20628,46	20750,92	+3,14	+3,75	0,551	0,823	0,203	0,220
7	$25000^x$	26005,44	25916,38	+4,02	+3,67	0,667	0,822	0,268	0,255
8	$30000^x$	31104,11	31037,31	+3,68	+3,46	0,921	1,384	0,270	0,245

Таблиця 3.3.18

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

	$1000^x$	$2000^x$	$5000^x$	$7500^x$	$10000^x$	$15000^x$	$20000^x$	$25000^x$
$3m^o_x = 3m^o_y,$ мм	0,280	0,280	0,280	0,375	0,450	0,525	0,600	0,675
$M_x = M_y,$ мкм	0,280	0,140	0,056	0,050	0,045	0,035	0,030	0,027
$M_{Z(h)},$ мкм	1,0-1,5	0,8-1,1	0,5-0,8	0,4-0,6	0,35-0,5	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2



Аналізуючи результати досліджень, приведених у табл. 3.3.17, бачимо, що лінійні (масштабні) спотворення цифрових РЕМ-зображень, відносно, незначні. В діапазоні збільшень від  $2000^x$  до  $5000^x$  вони в межах  $\pm 1\%$ , а зі зростанням  $M^x$  від  $7500^x$  до  $30000^x$  достатньо постійні і складають від  $+2,5\%$  до  $+4\%$ . Різномасштабність збільшень вздовж осей не перевищує  $1\%$ . Точність їх визначення за допомогою тест-об'єкту складає  $\pm 0,5\%$ .

В табл. 3.3.18 приведена гарантована точність отримання просторових координат точок мікроповерхонь дослідних об'єктів в залежності від величини збільшення і дійсної точності вимірювань РЕМ-знімків, максимальні залишкові похибки яких після апроксимації не перевищують  $3m$  (від 3 до 5 пікселів).

За результатами досліджень встановлено:

- дійсні величини збільшень (масштабу) РЕМ зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F в межах збільшень  $2000^x \div 5000^x$  складають  $\pm 1\%$ . В діапазоні збільшень  $7500^x \div 30000^x$  дещо зростають від  $+2,5\%$  до  $+4\%$ ;

- нелінійні геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень при їх фізичному розмірі  $120 \times 90$  мм в центральній частині знімка, відносно незначні (до  $0,3$  мм, тобто до 3 пікселів), однак збільшуються до його країв, досягаючи при великих збільшеннях навіть  $2,5$  мм (25 пікселів), що обумовлює необхідність їх врахування. Характер і величини спотворень змінюються в залежності від збільшення знімка і параметрів РЕМ-знімання. Їх абсолютні значення зі збільшенням величини (масштабу), як правило, також нелінійно зростають;

- РЕМ JSM-7100F можна вважати високоточним і стабільним в метричному відношенні приладом, який не потребує постійного калібрування цифрових РЕМ-зображень перед кожним РЕМ-зніманням. Однак, періодично необхідно проводити його дослідження за нашою

методикою з застосуванням прецизійного тест-об'єкту і з використанням програм «Test-Measuring» та «Polycalc»;

- за умови врахування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень за допомогою прецизійного тест-об'єкта і поліноміальної їх апроксимації, максимальні залишкові величини спотворень не перевищуватимуть  $\pm 0,3-0,5$  мм ( $\pm 3-5$  пікселів), тобто їх можна зменшити у  $2\div 10$  разів.

Це дозволить отримати просторові кількісні параметри мікроповерхонь дослідних об'єктів з високою точністю, зокрема, при збільшенні (масштабі) зображень  $M=1000^x$ :  $m_x = m_y = 0,1-0,3$  мкм,  $m_{h(z)} = 1-1,5$  мкм, а при  $M=25000^x$  –  $m_x=m_y=0,01-0,03$  мкм,  $m_{h(z)}=0,1-0,2$  мкм.

3.4. Дослідження фрактальних та метричних властивостей зображень за даними вимірювань різномасштабних цифрових РЕМ-зображень тест-об'єкта, отриманих на різних типах РЕМ

Проблемам визначення дійсних масштабів РЕМ-зображень, їх геометричних спотворень та їх врахування з часу створення перших РЕМ і до появи РЕМ з цифровим записом зображення приділялось багато уваги. І ці проблеми на сьогодні практично вирішені. В їх основі лежить методика калібрування РЕМ на підставі фотограмметричного опрацювання РЕМ-зображень спеціальних тест-об'єктів зі строго еталонними характеристиками їх роздільної здатності (тест-сітки, голографічні решітки, тощо). Найбільш важливі публікації з цієї проблематики приведені нами у переліку літературних джерел [52, 59, 60, 63-69, 72, 74, 78, 84, 88, 101, 103, 105, 111, 136, 137, 150, 153, 190, 215, 225-227, 230, 234, 242, 248, 249, 255, 272].

Однак питанням досліджень РЕМ-зображень різних масштабів з точки зору їх можливої фрактальної природи, а також отримання різноманітних числових характеристик, які б підтвердили чи спростували думку про те, що РЕМ-зображенням притаманні ще й властивості *скейлінга*, тобто масштабної інваріантності або самоподібності, присвячено небагато робіт.

Принципи фрактальної геометрії в практиці РЕМ-стереофотограмметрії вперше застосовано для досліджень мікроструктури ґрунтів і розробки теорії їх ерозії [117, 139].

Теоретичні положення фрактальності використовувались також у дослідженнях механіки руйнування металів за РЕМ-зображеннями їх мікроповерхонь [5, 7]. Метод фрактального аналізу застосований Мельником В. М. і Волошиним В. У. для оцінки деструктивних змін кісткової тканини тварин внаслідок їх радіаційного опромінення [129]. Теоретичні і практичні результати використання принципів і

теоретичних положень фрактальної геометрії при опрацюванні РЕМ-зображень різних мікроповерхонь узагальнені і викладені у монографії Мельника В. М. і Шостак А. В. [137]. Однак робіт, які би використовували дані підходи для досліджень метричних характеристик РЕМ-зображень, автори не зустрічали.

#### 3.4.1. Теоретичні положення та вихідні дані

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 підмічено, 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, [Федер, [189]]. Різномасштабні РЕМ-зображення можна віднести до типу статистично подібних фрактальних множин, які ґрунтуються на понятті метричної розмірності, що строго більше топологічної розмірності [Анищенко, [1]]. Прикладом природніх фракталів такого типу є фрагмент берегової лінії [Richardson, [265]].

Як показано в роботах Іванчука О. М. [55, 63-69] 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 (див. фото у табл. 3.4.2). 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 отримані експериментальні значення серій дійсних масштабів для різних РЕМ у діапазонах фіксованих значень збільшень, встановлених на шкалі приладу [63÷69]:

- 1000<sup>x</sup>, 2000<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 8000<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 15000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup>, 24000<sup>x</sup>, 27000<sup>x</sup>, 30000<sup>x</sup> для РЕМ JCM-5000 (NeoScope), (JEOL, Японія);

- 2000<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 7500<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 15000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup>, 25000<sup>x</sup>, 30000<sup>x</sup> для РЕМ JSM 7100F (JEOL, Японія);

- 1000<sup>x</sup>, 2000<sup>x</sup>, 3000<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup> для РЕМ DSM-960A (Zeiss, Німеччина);

- 1000<sup>x</sup>, 2500<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 8000<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 15000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup>, 25000<sup>x</sup> для РЕМ 106I (Суми, Україна).

Основні технічні характеристики РЕМ, за допомогою яких отримані цифрові РЕМ-зображення тест-сітки приведені у таблиці 3.2.1.

Аналіз отриманих результатів показує, що при зміні масштабу відстані між вузлами тест-сітки не змінюються строго пропорційно масштабному 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 [Richardson, [265]] встановлено масштабне співвідношення між фіксованим на шкалі приладу цілочисельним масштабом  $M$  і «фрактальним» масштабом  $M_f$  [Іванчук, Тумська, [248]]

$$M_f = A_f \cdot M^{2-D_f} \quad (3.4.1)$$

де  $A_f$  – коефіцієнт пропорційності;  $D_f$  – експоненціальний показник. Обчислений за формулою (3.4.1) 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 (3.4.1), дорівнює

$$M_f \cdot r = A_f \cdot (M \cdot r) \cdot M^{1-D} \quad (3.4.2)$$

В роботі [Mandelbrot, 1983, [254]] показано, що величина  $D$  представляє фрактальну розмірність.

Величини  $A_f$  та  $D_f$  визначимо за набором пар значень цілих і дійсних масштабів  $(M, M_{xr})$ ,  $(M, M_{yr})$  вздовж осей  $x$  і  $y$  відповідно. На рис. 3.4.1 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.

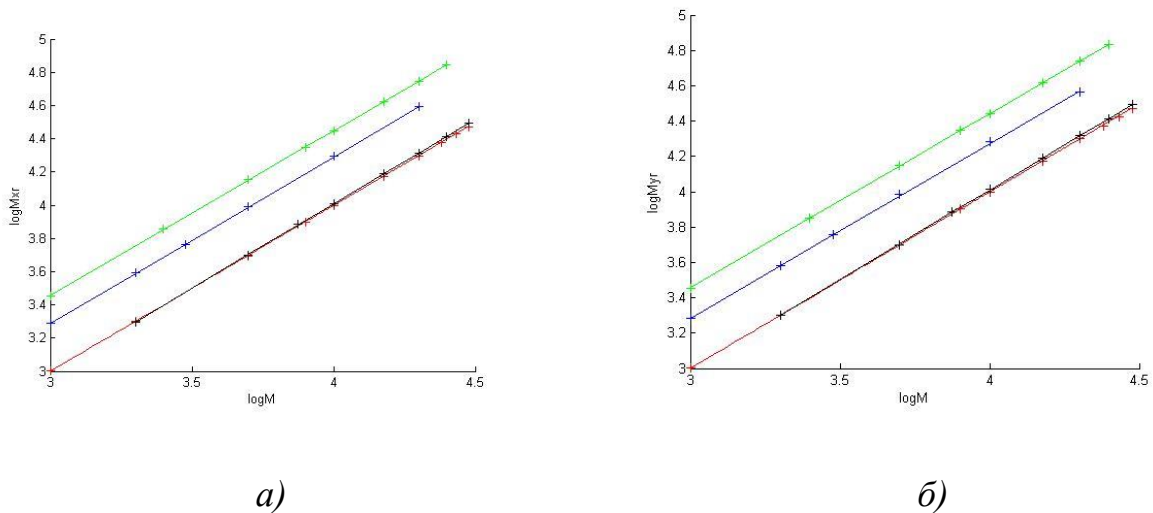


Рис. 3.4.1. Графіки залежностей  $\log M \rightarrow \log M_{xr}$  (а) та  $\log M \rightarrow \log M_{yr}$  (б) для JCM-5000 (червоний), JSM 7100F(чорний), DSM-960 А (синій), РЕМ 106 І (зелений)

Зауважимо, що графіки для JCM-5000 та JSM 7100F майже співпадають, а графіки для DSM-960А та РЕМ 106І (Суми) зсунуті по логарифмічній осі  $y$  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. 3.4.1) визначимо з рівнянь регресії.

### 3.4.2. Побудова прямої регресії

Підставляючи у рівняння (1) замість  $M_f$  відомі значення  $M_r$ , після логарифмування, маємо

$$\lg M_r = \lg A_f + (2 - D_f) \cdot \lg M . \quad (3.4.3)$$

Якщо позначити

$$x = \lg M, \quad y = -\lg M_r, \quad A = 2 - D_f, \quad C = \lg A_f, \quad (3.4.4)$$

то отримаємо рівняння прямої  $Ax + By + C = 0$ . Визначаємо параметри прямої як такі, що мінімізують суму квадратів відстаней за перпендикуляром між множиною точок  $(x_i, y_i)$  і прямою [Cromley, 1992]:

$$\min \sum_{i=1}^N (s_i)^2, \quad (3.4.5)$$

де  $s_i = |Ax_i + By_i + C|$  - відстань між  $i$ -ою точкою и прямою. Якщо  $A^2 + B^2 = 1$ , то  $s_i$  - вимірєє відстань за перпендикуляром між точкою і прямою.

Задача мінімізації загальної перпендикулярної відстані між множиною точок і прямою полягає у знаходженні мінімуму функції:

$$\sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + C)^2, \quad (3.4.6)$$

$$\text{за умови} \quad A^2 + B^2 = 1. \quad (3.4.7)$$

Ця задача може бути переписана у формі лагранжіана:

$$\min \sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + C)^2 - \lambda(1 - A^2 - B^2), \quad (3.4.8)$$

де  $\lambda$  - множник Лагранжа, пов'язаний з рівнянням (3.4.7). Розв'язок нормальних рівнянь для (3.4.8) дає

$$A = \frac{q - (q^2 + 4t^2)^{1/2}}{2t} B \quad \text{і} \quad C = -A\bar{x} - B\bar{y},$$

$$\text{де} \quad q = \left( \sum_{i=1}^N x_i'^2 - \sum_{i=1}^N y_i'^2 \right) \quad \text{і} \quad t = \sum_{i=1}^N x_i' y_i', \quad (3.4.9)$$

$x_i', y_i'$  - координати точки відносно середнього центру з координатами  $\bar{x}, \bar{y}$ .

Звідси знайдемо параметри рівняння (3.4.1)

$$A_f = 10^C, \quad D_f = 2 - A \quad (3.4.10)$$

відповідно для масштабів  $M_{xf}$  вздовж осі  $x$  та  $M_{yf}$  вздовж осі  $y$ .

За наведеним алгоритмом у системі MatLab виконано розрахунок коефіцієнтів  $A_f$  та показників степенів  $D_f$  для фрактальних масштабів вздовж осей  $x$  та  $y$  (табл. 3.4.2). Для обчислень використано вимірні значення дійсних масштабів для 4-х типів РЕМ. 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.

Результати обчислень для 4-х типів РЕМ проілюстровано графічно на рис. 3.4.2.

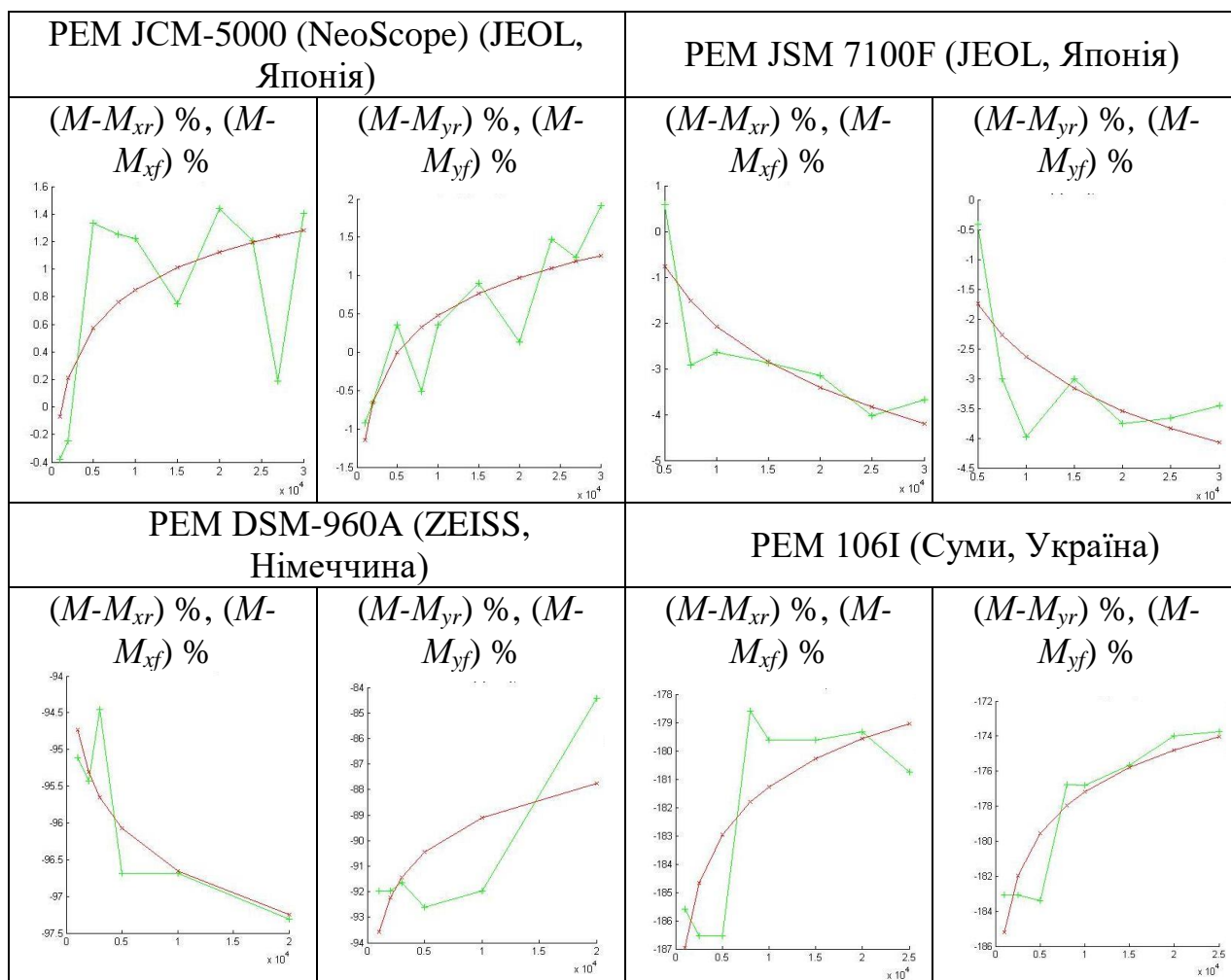


Рис. 3.4.2. Графіки залежності різниць  $(M-M_r) \%$  (зелені позначки) та  $(M-M_f) \%$  – (червоні позначки) від цілих масштабів  $M$  вздовж  $x$  та  $y$  напрямків.  $M_r$  – дійсні масштаби,  $M_f$  – фрактальні масштаби.



Таблиця 3.4.1

Значення коефіцієнтів  $A_{xf}$  ( $A_{yf}$ ) та показників степенів  $D_{xf}$  ( $D_{yf}$ )  
фрактальних масштабів  $M_x$  ( $M_y$ )

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

Графіки на рис. 3.4.2. показують, що різниці між цілими і дійсними та цілими і фрактальними масштабами у зазначених діапазонах збільшень (табл. 3.5.2) складають:

для РЕМ JCM-5000:

- по  $x$  від - 0,4 % до + 1,4 %;
- по  $y$  від - 1,5% до + 2 %;

для РЕМ JCM-7100F:

- по  $x$  від - 4 % до + 0,6 %;
- по  $y$  від - 4 % до - 0,4 %;

для РЕМ DSM-960A:

- по  $x$  від - 97,5 % до - 94,5 %;
- по  $y$  від - 94 % до - 84 %;

для РЕМ 106 I:

- по  $x$  від - 187 % до - 179 %;
- по  $y$  від - 186 % до - 174 %.

Можна відзначити, що дійсні і фрактальні масштаби для РЕМ JSM-5000 та РЕМ JSM 7100F несуттєво відрізняються від масштабів, встановлених на шкалі РЕМ. Для РЕМ DSM-960A та РЕМ 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 РЕМ DSM-960A та РЕМ 106 I (див. табл. 3.2.1).

Отже, без врахування знайдених масштабних коефіцієнтів результати вимірювань для РЕМ DSM-960A та РЕМ 106I не будуть коректними і приведуть до значних помилок у визначенні кількісних характеристик дослідних мікроповерхонь. Результати досліджень цих РЕМ і дійсні масштаби цифрових РЕМ-зображень були отримані раніше в роботах [63-69].

Відомо, що фрактальна розмірність теоретично знаходиться в межах  $1 < D < 2$  для одновимірного випадку. Зауважимо, що для JSM 7100F та РЕМ DSM-960A отримані експериментально значення експоненціальних показників є меншими ніж 1. Тому величину  $A_f$  будемо інтерпретувати як коефіцієнт подібності, а експоненціальний показник  $D_f$  як скейлінговий показник [Потапов, [154]]. Наведемо результати практичного застосування фрактальних масштабів (надалі залишаємо термін «фрактальний масштаб»).

#### 3.4.3. Обчислення діапазону збільшень тест-сітки за фрактальними масштабами

Візьмемо за мінімальний масштаб  $M_0$  таке збільшення тест-сітки, при якому крок тест-сітки на РЕМ зображенні дорівнює розміру пікселя:

$$M_0 = \frac{p}{r}, \quad (p \geq r), \quad (3.4.11)$$

де  $p$  – значення розміру піксела РЕМ-зображення в мм,  $r$  – величина кроку тест-сітки в мм (для досліджуваної тест-сітки  $r=1/1425$  мм).

Звідси випливає, що крок тест-сітки  $\Delta h$  в пікселях на зображенні в масштабі  $M$  дорівнює

$$\Delta h = M \cdot \frac{r}{p}. \quad (3.4.12)$$

Тоді кількість вузлів тест-сітки на зображенні розміру ( $W \times H$ ) в пікселях в масштабі  $M$  дорівнює по горизонталі:

$$n_x = [W / \Delta x] + 1, \quad (3.4.13)$$

по вертикалі:

$$n_y = [H / \Delta y] + 1, \quad (3.4.14)$$

де  $\Delta x$  ( $\Delta y$ ) крок тест-сітки в масштабі  $M$  по горизонталі (вертикалі), визначений за (3.5.12), тут квадратні дужки [...] – означають найбільше ціле число, що не перевищує значення частки. Причому вертикальний розмір  $H$  зображення визначається без інформаційної смуги (див. фото у табл. 3.4.3).

Визначимо максимальне збільшення зображення тест-сітки, за яким можна, наприклад, обчислити коефіцієнти полінома другого степеня двох змінних, тобто на зображенні треба мати не менш 6-ти вузлів. Так як вертикальний розмір зображення  $H$  менше горизонтального  $W$ , то достатньо задати кількість вузлів по  $y$ . Для того, щоб вузли не розташовувались на краях зображення задамо, наприклад,  $n_y=4$ . Максимальний масштаб обчислимо як

$$M_{\max} = \Delta y \cdot \frac{r}{p}, \quad (3.4.15)$$

де  $\Delta y = \frac{H}{n_y - 1}$  - крок тест-сітки в пікселях. Пара значень ( $M_0, M_{\max}$ )

визначає діапазон збільшень для РЕМ-зображень тест-об'єкта.

Визначимо, яку роздільну здатність  $R$  (лін/мм), повинна мати тест-сітка, щоб її можна було використовувати для обчислення поправок за поліномом другого степеня двох змінних ( $n_y=4$  як в попередньому випадку) при максимальних збільшеннях:

$$R = \frac{M_{\max} \cdot (n_y - 1)}{H \cdot p}, \quad (3.4.16)$$

де  $M_{\max}$  – максимальний масштаб, вказаний в технічних характеристиках РЕМ (табл. 1),  $n_y$ ,  $H$ ,  $p$  мають ті самі значення, що в попередніх формулах.

В таблиці 3.4.2 подано характеристики РЕМ-зображень тест-об'єкта, обчислених для різних типів РЕМ. Для заданих максимальних масштабних збільшень визначено кількість вузлів на зображеннях 4-х типів РЕМ за даними масштабів  $M$ ,  $M_r$ ,  $M_f$  [63-69]. Як бачимо на фото в табл. 3.4.3, розміри сіток на РЕМ-зображеннях JCM-5000 та JSM 7100F, обчислених за різними масштабами відрізняються не більше ніж на один рядок (стовпчик). Визначені розміри сіток для DSM 960A і PEM 106I, з використанням цілих масштабів, не відповідають реальності, в той час як для дійсних і фрактальних масштабів дають вірний результат. Зокрема відзначимо, що для РЕМ-зображень JCM-5000, JSM 7100F та DSM 960A результати обчислень дають кількість вузлів з врахуванням частин вузлів на краях зображень. На зображенні PEM 106I всі вузли тест-об'єкта розміщені в межах РЕМ-зображення у повній формі і відповідно результати обчислень збігаються з кількістю вузлів на знімку.

Таблиця 3.4.2

## Характеристики цифрових зображень тест-об'єкта для різних РЕМ

Назва РЕМ	JCM-5000 (NeoScope)	JSM 7100F	DSM-960A	РЕМ 106 I
Зображення тест-об'єкта				
Масштаб $M$	30000 <sup>x</sup>	30000 <sup>x</sup>	20000 <sup>x</sup>	25000 <sup>x</sup>
Масштаб $M_{xr}$	29578,86	31104,11	39462,60	70190,65
Масштаб $M_{yr}$	29426,72	31037,31	36886,22	68431,17
Масштаб $M_{xf}$	29614,91	31249,43	38844,55	69758,01
Масштаб $M_{yf}$	29667,84	31253,74	37101,22	68508,67
Кількість вузлів сітки ( $n_x \times n_y$ ) в межах зображ. за $M$ , $M_r$ , $M_f$	6x5 6x5 6x5	6x5 6x5 6x5	16x12 8x7 8x7	20x14 7x5 7x5
Діапазон збільшень для тест-сітки з $R=1425$ лін/мм	від 130 <sup>x</sup> до 44467 <sup>x</sup>	від 134 <sup>x</sup> до 42927 <sup>x</sup>	від 377 <sup>x</sup> до 75406 <sup>x</sup>	від 377 <sup>x</sup> до 111850 <sup>x</sup>
Розгортка, пікселів	1280x1080	1280x1024	800x600	1280x960
Розмір пікселя, мм	0,09132	0,09375	0,26450	0,26450
Розрізнявальна здатність тест- сітки (лін/мм) для $max$ збільшення	1282 для $M=40000^x$	9589 для $M=300000^x$	3439 для $M=181950^x$ (замість 100000 <sup>x</sup> )	10156 для $M=797150^x$ (замість 300000 <sup>x</sup> )

В останньому рядку таблиці 3.4.2 наведено, значення роздільних здатностей тест-сіток для максимальних збільшень, заданих у технічних характеристиках (табл. 3.4.1), необхідних для обчислення коефіцієнтів

поліному другого степеня. Для визначення роздільних здатностей тест-сіток для PEM DSM-960A і PEM 106I використано значення фрактальних масштабів, розраховані за наведеними в технічних характеристиках максимальними значеннями цілих масштабів.

3.4.4. Обчислення величин спотворень координат зображень тест-сітки з використанням дійсних та фрактальних масштабів для різних типів PEM

Величини спотворень координат зображень тест-сітки по  $x$  та  $y$  визначаємо за поліномом загального виду 3-го степеня. Вхідними даними слугують: розрізнявальна здатність тест-сітки (лін/мм); список значень масштабів, встановлених на шкалі приладу (цілі значення); списки значень відповідних дійсних масштабів (нецілі); параметри фрактальних масштабів  $(A_{xf}, D_{xf})$  та  $(A_{yf}, D_{yf})$ .

Для кожного масштабу збільшення задаються виміряні вручну (або розпізнані автоматично) координати центрів вузлів тест-сітки.

Обчислювальна процедура визначення величин спотворень координат зображення тест-сітки за виміряними (розпізнаними) координатами центрів вузлів та істинними координатами відповідних вузлів тест-сітки складається із таких кроків:

1. Ввід координат точок рішення та контрольних точок для заданого масштабу.
2. Визначення значення фрактального масштабу за (3.4.1).
3. Обчислення кроку сітки у масштабі збільшення.
4. Формування схеми розташування точок рішення і контрольних точок.
5. Обчислення істинних координат центрів вузлів тест-сітки у масштабі збільшення.
6. Визначення коефіцієнтів полінома 3-го степеня по  $x$  і по  $y$ .

7. Обчислення залишкових значень за поліномом по точках рішення та контрольних точках.
8. Побудова векторних діаграм.

Розглянемо детальніше ті моменти наведеної блок-схеми, де суттєву роль відіграє масштаб збільшення.

По-перше, за вимірними (розпізнаними) координатами треба знайти відповідні істинні координати (мм) тест-сітки у масштабі збільшення

$$x_{icm}(y_{icm}) = k_x(k_y) \cdot h_x(h_y), \quad (3.4.17)$$

де  $h_x(h_y) = r \cdot M_x(M_y)$  ( $r=1/1425$  крок істинної сітки в мм);  $M_x(M_y)$  – задані дійсні або фрактальні масштаби, обчислені за (1);  $k_x$  і  $k_y$  – це кількість ліній (проміжків) від точки початку системи координат (центрального вузла) до вимірюваної точки, відповідно, вздовж осей  $x$  і  $y$ :

$$k_x(k_y) = [x_{вим}(y_{вим}) / h_x(h_y)]. \quad (3.4.18)$$

Квадратні дужки тут означають заокруглення результатів до цілого значення.

Зауважимо, що кількість ліній на зображенні тест-сітки обернено-пропорційна величині масштабу. Тому, якщо масштаб менше реального то, під час обчислення кількості ліній тест-сітки за вимірними (обчисленими) координатами точок ближче до країв зображення накопичується помилка і виникає одна чи дві зайвих ліній в залежності від кроку сітки.

Звідси випливає, що з одного боку треба знати як можна точніше реальний масштаб збільшення, а з іншого боку проміжок між вузлами сітки для апроксимації треба збільшити, щоб не перейти на іншу лінію сітки апроксимації. Ці зауваження найбільш актуальні для масштабів  $1000^x$ ,  $2000^x$ , де невеликі зміни значень масштабу можуть привести до зміни величини  $k_x(k_y)$ .

Проблеми виникають при визначенні величин  $k_x$  ( $k_y$ ) для масштабів збільшення в діапазоні  $1000^x$  -  $2000^x$  там, де крок сітки одного порядку з точністю вимірів (1-3 пікселів). Наприклад, крок сітки по  $x$  у масштабі  $1000^x$ , обчислений за відповідними фрактальними масштабами (3.4.12), становить для: РЕМ JCM-5000 – 7,7; JSM 7100F – 7,5; РЕМ DSM-960A – 5,1; РЕМ 106I – 7,6 пікселів. Тому використання дійсних або фрактальних масштабів дозволяє, як показує досвід, дозволяє майже безпомилково визначити кількість проміжків  $k_x$  ( $k_y$ ) у масштабі  $1000^x$  за вимірними координатами і знайти істинні координати.

По-друге, для виявлення картини масштабних та дисторсійних спотворень точки розташовують симетрично відносно центрального вузла тест-сітки. Крім того, вимірні точки розподіляють на точки рішення – для визначення коефіцієнтів поліному і контрольні - для оцінки точності результатів обчислень. Отже, під час автоматичного розпізнавання центрів вузлів треба із отриманого масиву вибрати точки рішення та контролю. З цією метою для кожного масштабу формуємо (задаємо вручну) схему розташування точок для апроксимації та контролю, а саме точні значення  $k'_x$  ( $k'_y$ ). Наприклад, для РЕМ JCM-5000 в масштабі  $1000^x$  схема розташування точок для тест-сітки розміру (167x134) така:

$$k'_x = [-82 \ -74 \ -66 \ -58 \ -50 \ -42 \ -34 \ -26 \ -18 \ -9 \ 0 \ 9 \ 18 \ 26 \ 34 \ 42 \ 50 \ 58 \ 66 \ 74 \ 82]$$

$$k'_y = [65 \ 57 \ 49 \ 41 \ 33 \ 25 \ 17 \ 9 \ 0 \ -9 \ -17 \ -25 \ -33 \ -41 \ -49 \ -57 \ -65].$$

За заданою схемою формуємо дві матриці  $[x_{ij}]$  та  $[y_{ij}]$  кожна розміру (17x21), де в шаховому порядку розташовані координати точок розв'язку і контролю (рис. 3.4.3). Також, задану схему вузлів використовуємо, для виправлення значень  $k_x$  ( $k_y$ ), обчислених за вимірними (розпізнаними) координатами. Якщо обчислена за (18) кількість ліній  $k_x$  ( $k_y$ ) не дорівнює значенню  $k'_x$  ( $k'_y$ ), вказаному в списку, і  $|k_x - k'_x| < d$  ( $|k_y - k'_y| < d$ ), де  $d$  допуск (задана кількість ліній), то значення  $k_x$  ( $k_y$ ) замінюється на  $k'_x$  ( $k'_y$ ) зі



списку. Значення допуску вибирається залежно від збільшення, а саме, при великих збільшеннях, допуск встановлюється менше. (Для  $1000^x$  допуск  $d=3$ , для збільшень більше ніж  $2000^x - d=0,5$ ).

Наприклад, для РЕМ JCM-5000 з цілим масштабом  $M=1000^x$  (крок сітки  $h_x = h_y = 0,7018$  мм) помилки виникають при обчисленні величин  $k_y$  на одну лінію по  $y$ : 66 (замість 65), 58 (57), -58 (-57), -65 (-66) на двох крайніх рядках сітки.

Використання дійсних та фрактальних масштабів дає більші значення  $h_x$  ( $h_y$ ) ніж при цілих масштабах (для дійсних ( $M_{xr}=1003,80^x$ ,  $M_{yr}=1009,23^x$ ):  $h_x = 0,7044$  мм,  $h_y = 0,7082$  мм; для фрактальних ( $M_{xf}=1000,67^x$ ,  $M_{yf}=1009,23^x$ ):  $h_x = 0,7022$  мм,  $h_y = 0,7089$  мм) тому, в даному випадку, помилок на краях не виникає і значення  $k_x$  ( $k_y$ ) визначаються точно.

За наявністю схеми розташування точок для апроксимації помилкові значення  $k_x$  ( $k_y$ ) можуть бути програмно виправлені.

По-третє, порівняємо для РЕМ 7100F результати апроксимації з використанням фрактального масштабу і цілого масштабу  $M=10000^x$ , встановленого на шкалі приладу. На рис. 3 а,б наведено векторні діаграми геометричних спотворень зображень, визначених за координатами вузлів тест-об'єкта. Геометричні спотворення РЕМ зображення (в мм) визначаємо як різниці між вимірними (в мм) і істинними координатами (в мм) вузлів тест-сітки:

$$\Delta x (\Delta y) = x_{вим} (y_{вим}) - x_{іст} (y_{іст}). \quad (3.4.19)$$

Векторні діаграми, таким чином, показують напрямок реальних зміщень точок відносно неспотворених (істинних) їх положень. Як бачимо, рис. 3.4.3 а ( $M=10000^x$ ) наочно ілюструє радіальний характер спотворень від центра зображення до країв, а на рис. 3.4.3 б, після врахування фрактальних масштабів РЕМ-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. 3.4.3 *в, г* демонструють однакову картину залишкових спотворень. Вектори для наочності збільшено у 20 разів.

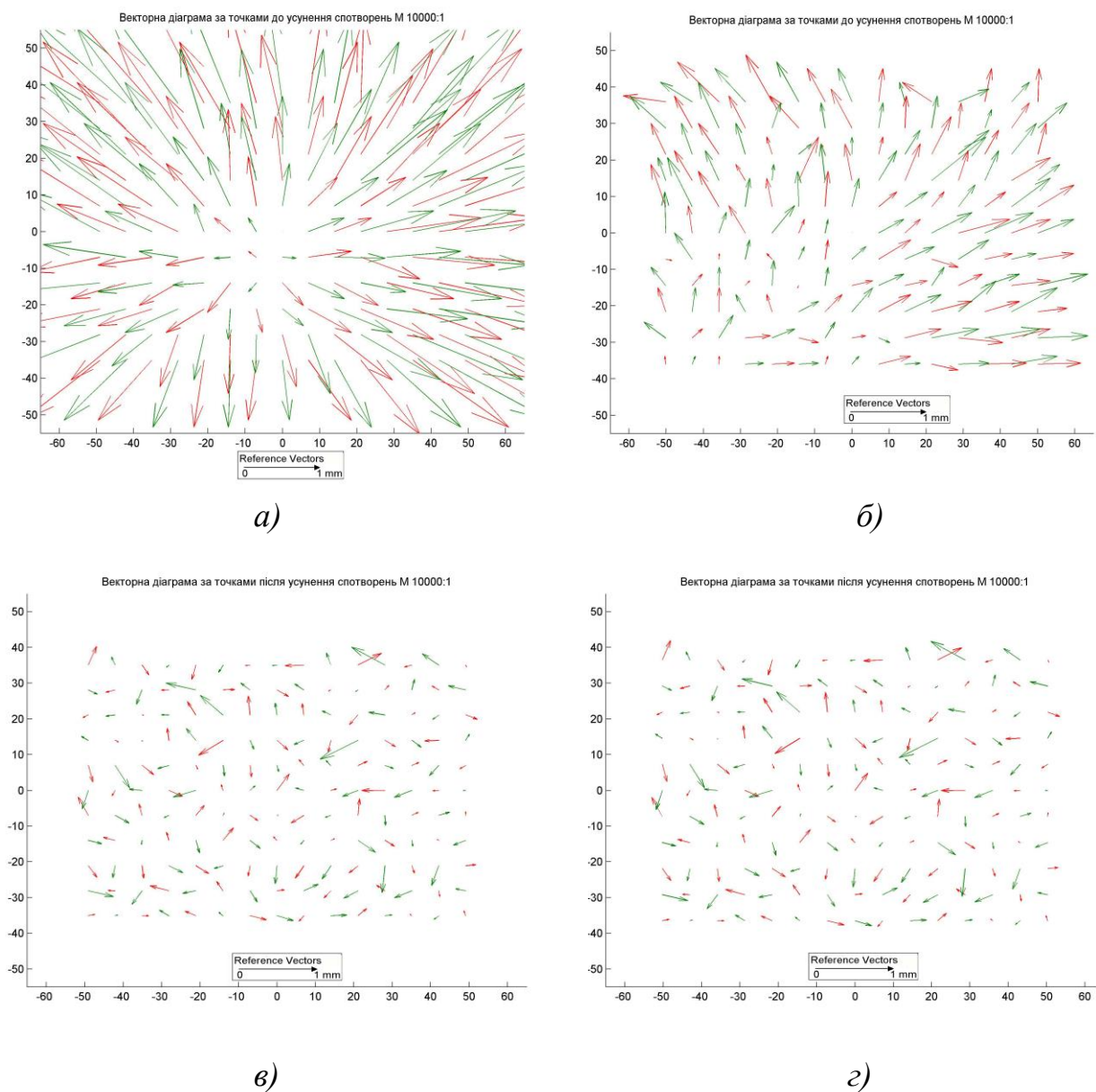


Рис. 3.4.3. Векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ-зображень до (а, б) і після їх апроксимації (в, г).

На підставі виконаних досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Встановлено аналітичне співвідношення між фіксованим на шкалі приладу і «фрактальним» збільшенням (масштабом) та виконано розрахунок коефіцієнтів подібності  $A_f$  та експоненціальних показників  $D_f$  для фрактальних збільшень (масштабів) вздовж осей  $x$  та  $y$  для 4-х типів РЕМ. Зображення тест-об'єкта в різних масштабах, отриманих на одному РЕМ, мають однакові параметри фрактальних масштабів, які можуть бути використані як додаткові кількісні характеристики РЕМ.

2. Із аналізу серій різномасштабних РЕМ-зображень встановлено, що найменше відрізняються від масштабів, фіксованих на шкалі приладу в діапазоні  $1000^x - 30000^x$ , дійсні і фрактальні масштаби для JCM-5000 та JSM 7100F і для них найменше виражений анізотропний характер спотворень вздовж осей  $x$  та  $y$ . Для DSM-960A і РЕМ 106I метричні характеристики не відповідають масштабам, встановленим на шкалі приладу у всьому діапазоні збільшень (масштабів).

3. Отримано і приведено формули для розрахунку можливого діапазону збільшень зображень тест-об'єкта в залежності від кроку тест-об'єкта, розміру пікселя та масштабу. Наведено результати обчислень діапазону збільшень для 4-х типів РЕМ. Максимальні збільшення визначались з врахуванням можливості визначення дисторсійних спотворень за поліномом другого степеня.

4. Обчислено роздільні здатності тест-об'єктів, які придатні для визначення величин спотворень зображень тест-об'єкта при максимальних збільшеннях, вказаних в технічних характеристиках РЕМ.

5. Наведено особливості застосування алгоритму обчислення величин спотворень при автоматичному розпізнаванні центрів вузлів на зображення тест-об'єкта. Показано, що при невеликих збільшеннях

( $1000^x - 2000^x$ ) наявність схеми розташування точок рішення та контрольних точок з оптимальним кроком дозволяє запобігти помилок під час знаходження істинних координат вузлів тест-сітки, що відповідають розпізнаним (виміряним).

6. Векторні діаграми, які побудовані з використанням фрактальних масштабів, показують картину реальних дисторсійних спотворень. Застосування фіксованих на шкалі приладу збільшень (масштабів) дозволяє відобразити переважно лише радіальні спотворення у вигляді векторів від центра зображення до країв. Після апроксимації з використанням загального поліному 3-го степеня залишкові спотворення суттєво (у 2-10 разів) менші від дійсних і складають переважно 1-2 піксела незалежно від збільшень (масштабів) РЕМ-зображень.

7. Отримані співвідношення для обчислення фрактальних масштабів дозволяють автоматично визначити дійсне збільшення (масштаб) РЕМ-зображень і разом з визначеними коефіцієнтами поліномів ефективно усувають їх дисторсійні спотворення. Тим самим суттєво підвищується точність отримання просторових координат точок мікроповерхонь дослідних об'єктів і побудова їх цифрових моделей рельєфу.

3.5. Розробка та дослідження технології автоматизації калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, їх врахування та порівняльний аналіз їх статистичних і скейлінгових характеристик для різних типів РЕМ

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

Тому метою даної роботи й була розробка технології автоматизованого опрацювання цифрових РЕМ-зображень еталонного тест-об'єкту з розрізнявальною здатністю  $r=1425$  лін/мм, яка б дозволила автоматично розпізнавати необхідні елементи зображень, отримувати величини їх дійсних масштабів, геометричні спотворення та враховувати їх при визначенні кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів. Для досліджень нами були використані цифрові РЕМ-знімки, отримані на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) в діапазоні збільшень від  $1000^{\times}$  до  $15000^{\times}$  (крат), а для встановлення скейлінгових характеристик цифрових РЕМ-зображень – РЕМ-знімки еталонного тест-об'єкта з розрізнявальною здатністю 1425 лін/мм, які були отримані на 4 типах сучасних РЕМ: РЕМ JCM-5000 (NeoScore), JSM-7100F (оба фірми JEOL, Японія), DSM-960A (Zeiss, Німеччина), РЕМ 106 I (Суми, Україна).

#### 3.5.1. Характеристика РЕМ-зображень

Всього на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) було отримано 12 знімків тест-об'єкта з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм у цифровому форматі TIFF з фіксованими значеннями збільшень, встановлених на шкалі приладу:  $1000^{\times}$ ,  $2000^{\times}$ ,  $5000^{\times}$ ,  $8000^{\times}$ ,  $10000^{\times}$ ,  $15000^{\times}$ ,  $20000^{\times}$ ,  $24000^{\times}$ ,  $27000^{\times}$ ,  $30000^{\times}$ ,  $34000^{\times}$  і  $40000^{\times}$ . Для експерименту були відібрані перші 6 з них. Умовні розміри отриманих цифрових РЕМ-зображень при їх опрацюванні на ПК за програмою “Test-Measuring” складають 116,95 мм

х 98,67 мм (1280 х 1080 пікселів). Розрізнявальна здатність РЕМ-зображення 277,571 dpi, розмір піксела – 0,09136 мм.

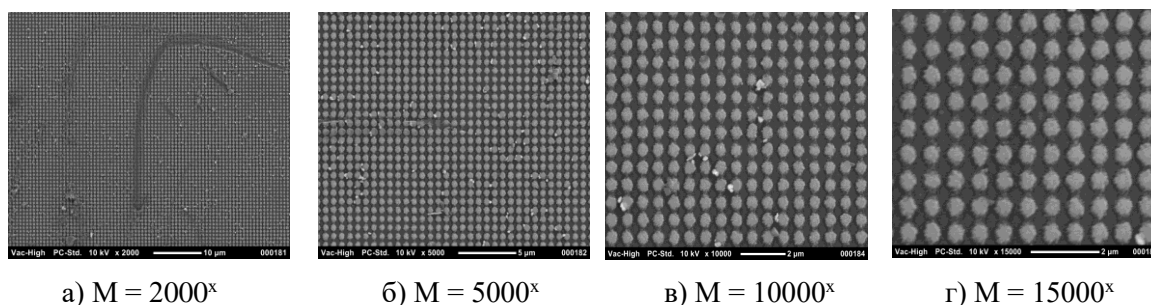


Рис. 3.5.1. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкту з розрізнявальною здатністю  $r = 1425$  лін/мм при різних  $M^x$ .

3.5.2. Послідовність автоматизованих операцій перетворень і опрацювань РЕМ-зображень

Експериментальні роботи за розробленою авторами автоматизованою технологією [72, 248] опрацювання РЕМ-зображень виконувались для 6 РЕМ-знімків зі збільшенням від  $M=1000^x$  до  $M=15000^x$  (крат).

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

- 1 Автоматизоване розпізнавання вузлів голографічного тест-об'єкту.
2. Вимірювання плоских координат вузлів та визначення за цими вимірами дійсних значень збільшень РЕМ-зображення вдовж осей  $x$ ,  $y$  знімка та величин їх геометричних спотворень.
3. Апроксимація геометричних спотворень поліномом загального виду 3-го степеня.

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

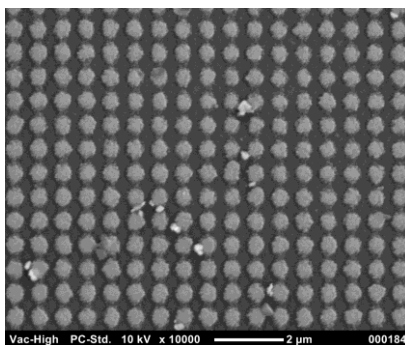


Рис. 3.5.2. РЕМ-зображення еталонного тест об'єкта при збільшенні  $M=10000^x$

1. Задача автоматизованого розпізнавання вузлів тест-об'єкту полягає у знаходженні координат центрів зображень вузлів тест-об'єкту для різних масштабів (збільшення). Для розв'язку проблеми нами використані методи цифрової обробки зображень (зокрема фільтрація, сегментація, морфологічна обробка). Задача ускладнюється наявністю дефектів на зображеннях тест-об'єкту, тому виникає необхідність розробки універсального алгоритму відбракування пошкоджених вузлів. Частина дефектів (перемички між вузлами, плями від пилу, порожнини та ін.) 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.

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

Алгоритм розв'язку складається із наступних кроків:

1. Обчислення кроку еталонного тест-об'єкту в мкм.
2. Обчислення кроку еталонного тест-об'єкту в пікселях для масштабного ряду  $1000^x$ ,  $2000^x$ ,  $5000^x$ ,  $8000^x$  та  $15000^x$ .
3. Завантаження зображення тест-об'єкта.

4. Згладження зображення (крім  $M=1000^x$ ) з використанням низькочастотного фільтра «гауссіан». (Для масштабів  $1000^x$  -  $8000^x$  розмір вікна фільтра:  $hsize = 3$  піксела, СКВ  $sigma=1$ , для  $10000^x$ ,  $15000^x$  -  $hsize = 15$  пікселів,  $sigma = 5$ ).

Першим етапом процесу є відділення вузлів від фону, що містить несуттєві деталі. Підхід складається у згладженні зображення з наступним пороговим опрацюванням для побудови бінарного зображення. Для згладження зображення використовуємо просторовий ізотропний фільтр «гауссіан», що має однакове стандартне відхилення вздовж обох вимірів [Bovik [224]]. Це дозволяє уникнути деформації зображення вузлів тест-об'єкта і запобігти зсуву їх центрів. Маска фільтра розміру  $(m \times n)$  зі стандартним відхиленням  $\sigma$  формується за такими співвідношеннями:

$$h_g(k, t) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(k^2+t^2)}{2\sigma^2}}. \quad (3.5.1)$$

$$h(k, t) = \frac{h_g(k, t)}{\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^n h_g(k, t)} \quad (3.5.2)$$

На рис. 3.5.3 наведено значення коефіцієнтів фільтра або гауссової просторової маски, отриманих функцією *fspecial* (табл. 3.5.1).

0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000
0.0000	0.0113	0.0837	0.0113	0.0000
0.0002	0.0837	0.6187	0.0837	0.0002
0.0000	0.0113	0.0837	0.0113	0.0000
0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000

Рис. 3.5.3. Коефіцієнти гауссової просторової маски (розмір маски  $5 \times 5$  пікселів, значення  $\sigma = 0,5$ )



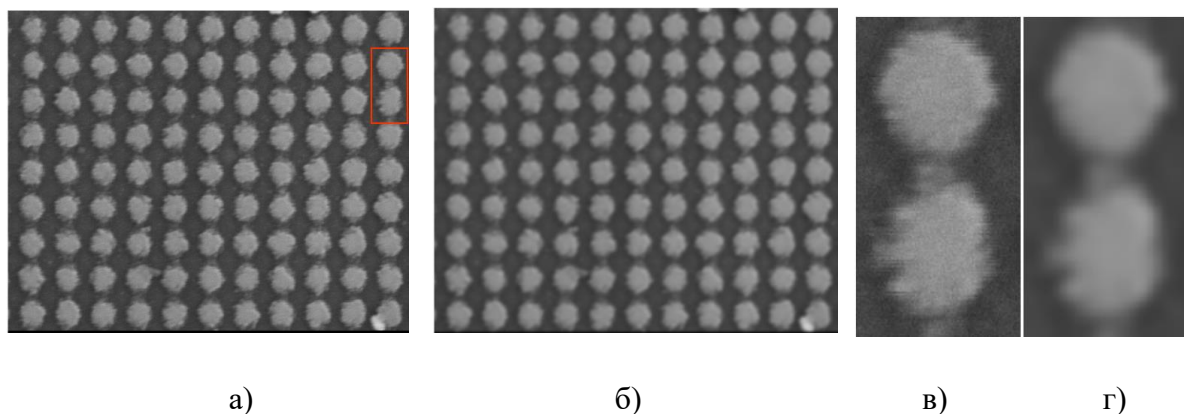


Рис. 3.5.4. Зображення тест-об'єкта  $M=15000^x$  (а). Згладжене зображення (б). Фрагмент зображення вузлів (в). Результат згладжування (г) (розмір маски  $15 \times 15$  пікселів, значення  $\sigma = 5$ ).

В залежності від масштабу збільшення ступінь згладження регулюємо зміною розміру маски і значенням  $\sigma$  (рис. 3.5.4).

5. Бінаризація зображення з автоматичним вибором порогу методом Отсу [263].

Бінаризацію зображення виконуємо методом Отсу з автоматичним вибором порогу. Метод Отсу шукає поріг, що зменшує дисперсію в середині класу, який визначається як зважена сума дисперсій двох класів [Otsu, [263]]:

$$\sigma_o^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t), \quad (3.5.3)$$

де ваги  $\omega_i$  - це ймовірності двох класів, які розділені порогом  $t$ ,  $\sigma_i^2$  - дисперсія цих класів.

Отсу показав, що мінімізація дисперсії в середині класу рівносильна максимізації дисперсії між класами:

$$\sigma_b^2(t) = \sigma^2 - \sigma_o^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2, \quad (3.5.4)$$

що визначається через ймовірності  $\omega_i$  та середнє арифметичне класу  $\mu_i$ , яке може оновлюватись ітераційним шляхом. В системі MATLAB поріг визначається за методом Отсу функцією *graythresh* (Табл. 3.5.1).

На *другому* етапі виконуємо 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 [Гонсалес, Вудс [31]]. У багатьох пакетах обробки зображень найбільш поширені структурні елементи мають спеціальні назви: BOX (H, W) - прямокутник заданого розміру, DISK (R) - круг заданого радіуса, RING (R) - кільце заданого розміру. На рис. 3.5.5 наведено структурний елемент DISK радіуса 3 піксела, створений функцією *strel* (табл. 3.5.1).

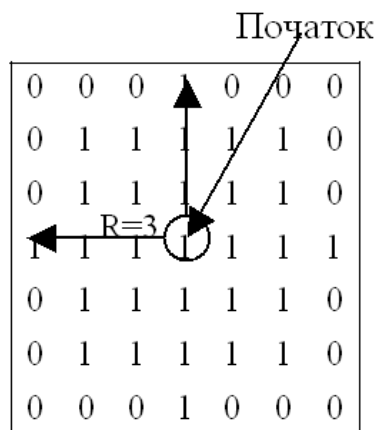


Рис. 3.5.5. Приклад структурного елемента DISK(3)

До бінарного зображення вузлів тест-об'єкту застосовуємо морфологічну операцію розкриття (*opening*) зі структурним елементом «диск».

Морфологічне розкриття  $A$  за структурним елементом  $B$  складається із послідовного виконання двох операцій: ерозія (звуження)  $A$  по  $B$ , після якої виконується дилація (розширення) результату по  $B$ :

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (3.5.5)$$

$\ominus$  - позначення ерозії,  $\oplus$  - дилація,  $\circ$  - розкриття.

Морфологічні операції ерозія і дилація, визначаються за допомогою логічних операцій об'єднання (OR) і перетину (AND) зображення і структурного елемента, який пересувається по зображенню.

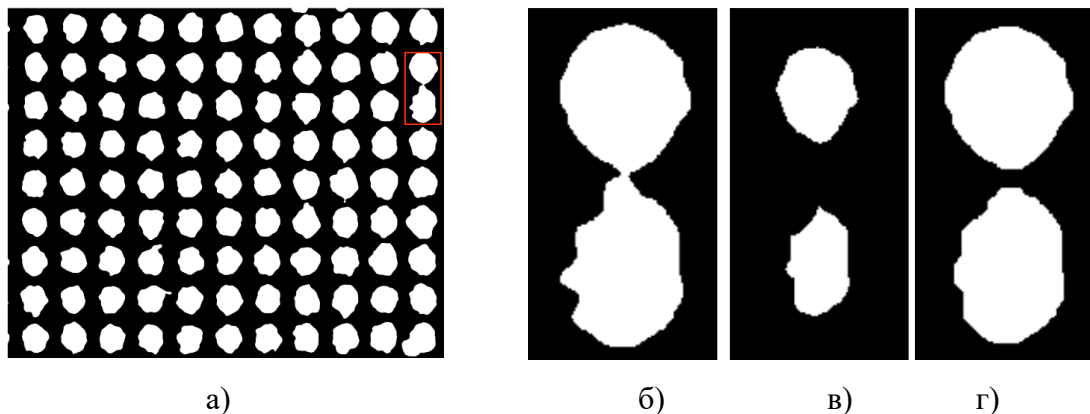


Рис. 3.5.6. Морфологічна операція розкриття зі структурним елементом DISK(19). Бінарне зображення  $M=15000^x$  (а). Фрагмент бінарного зображення (б). Результат ерозії (в). Результат розкриття (г) - операція ділації застосована до зображення (в)

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;).

Розкриття усуває ті частини об'єктів, в які структурний елемент повністю не поміщається. В результаті виконання морфологічної операції розкриття (*imopen*, Табл. 3.5.1) згладжені контури вузлів, зруйновані перемички, видалені зубчасті елементи границь (рис. 3.5.6). Радіус структурного елемента DISK складає біля однієї шостої від кроку тест-сітки в пікселах в масштабі збільшення.

Після морфологічної фільтрації на *третьому* етапі визначаються зовнішні межі вузлів (функція *bwboundaries*, табл. 3.5.1). Далі

визначається зв'язна частина контурів вузлів та їх піксельні координати (функція *bwtraceboundary*, табл. 3.5.1) і координати центроїдів (інерціальних центрів мас) вузлів (функція *bwtraceboundary*, табл. 3.5.1).

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

На *четвертому* етапі виконується процедура відбракування зміщених центроїдів спотворених вузлів. Тому що, не зважаючи на виконані операції згладжування та морфологічної фільтрації залишається частина вузлів, що сплавлені разом або з'єднані широкими перемички тощо. Пропонується універсальний алгоритм відбракування, який полягає у побудові кіл, наближених до виділених контурів зображень вузлів. Далі визначається середній радіус кіл та видаляються центроїди 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.

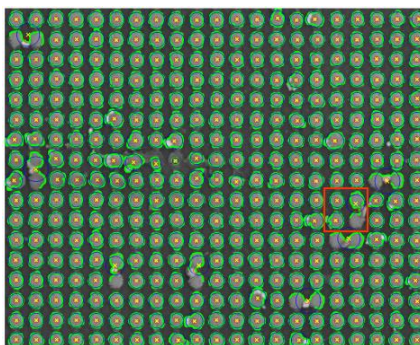


Рис. 3.5.7. Зображення тест-об'єкта  $M=8000^x$  після морфологічної фільтрації з нанесеними контурами вузлів, побудованими колами, центроїдами та центрами кругів

8. Підбір кола для виділених контурів зображень вузлів тест-об'єкта. Визначення координат центра кола та радіуса методом найменших квадратів [33]. 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).

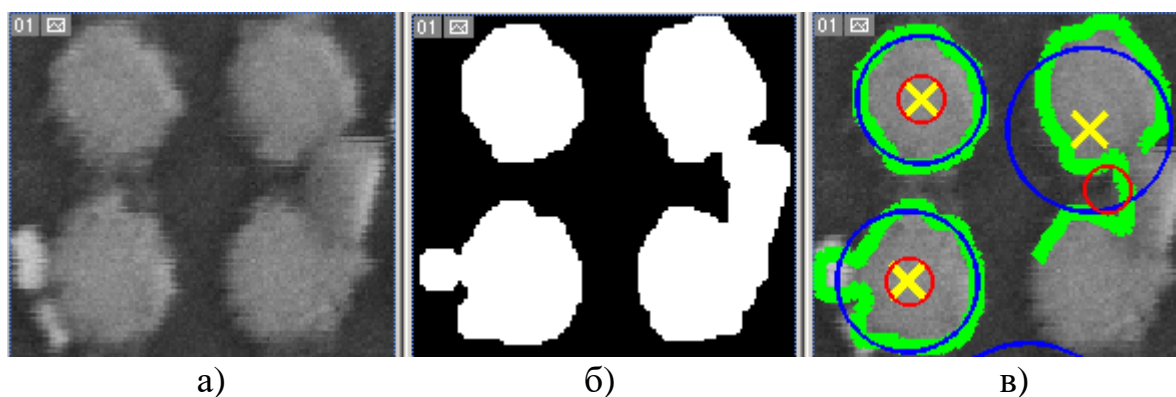


Рис. 3.5.8. Спотворені вузли на фрагменті вхідного зображення М  $8000^x$  (а). Результат морфологічної фільтрації (б). Побудовані кола - синій колір, контури вузлів – зелений колір, жовті хрестики – центри кіл, червоні кружечки - центроїди (в).

На рис. 3.5.6 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. 3.5.8 в), то такий центроїд видаляється.

Розв'язок задачі визначення координат центра кола і радіуса.

Для визначення координат центра кола і радіуса скористаємось рівнянням кола:

$$\begin{aligned} (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + R^2 &= 0 \\ \text{яке запишемо у вигляді} & \\ -2x_0 \cdot x_i - 2y_0 \cdot y_i + (x_0^2 + y_0^2 - R^2) &= -(x_i^2 + y_i^2) \end{aligned} \quad (3.5.6)$$

Позначимо

$$u_1 = -2x_0, \quad u_2 = -2y_0, \quad u_3 = x_0^2 + y_0^2 - R^2.$$

Тоді маємо систему рівнянь

$$Au = b,$$

де

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} -(x_1^2 + y_1^2) \\ -(x_2^2 + y_2^2) \\ \dots \\ -(x_n^2 + y_n^2) \end{bmatrix}. \quad (3.5.7)$$

$A$  - матриця, що має  $n$  рядків та  $m=3$  стовпців, причому  $m \leq n$ .

Тоді для вектора  $b$  знайдеться єдиний вектор  $u$ , що мінімізує евклідову норму

$$\|b - Au\| = \min_{\xi} \|b - A\xi\| \quad (3.5.8)$$

якщо стовпці вхідної матриці  $A$  лінійно незалежні. Обчислювальна процедура складається із розв'язку нормального рівняння вигляду

$$A^T Au = A^T b. \quad (3.5.9)$$

Остаточно

$$x_0 = -\frac{u_1}{2}, \quad y_0 = -\frac{u_2}{2}, \quad R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - u_3}. \quad (3.5.10)$$

центр і радіус кола наближеного до виділених контурів зображень вузлів сітки.

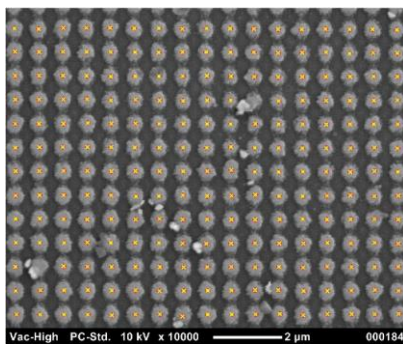


Рис. 3.5.9. РЕМ-зображення з позначеними центрами вузлів тест-об'єкта («хрестиком» жовтого кольору – центри кіл, а кружечком червоного кольору – центроїди

На *п'ятому* 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.

За розробленим алгоритмом складено програму в середовищі MATLAB. У табл. 3.5.1 наведено опис функцій MATLAB, що реалізують основні процеси знаходження центрів вузлів та їх координат.

Таблиця 3.5.1

Функції MATLAB, використані в програмі визначення координат центрів вузлів тест-об'єкта

Позначення функції	Опис функції
$w = fspecial$ ( <i>'gaussian'</i> , $hsize, sigma$ );	Функція повертає симетричний згладжуючий фільтр $w$ розміру $hsize$ з стандартним відхиленням $sigma$ . Якщо $hsize$ скаляр, то матриця квадратна.
$g = imfilter$ ( $f, w,$ <i>'replicate'</i> );	Функція виконує просторову фільтрацію зображення $f$ з маскою $w$ , результат фільтрації - зображення $g$ . Опція <i>'replicate'</i> розширює розмір зображення повторенням величин на його бічних межах.
$level = graythresh$ ( $g$ );	Функція обчислює глобальний поріг $level$ за методом Отсу.
$g = im2bw$ ( $g,$ $level$ );	Функція перетворює значення яскравостей зображення $g$ у бінарне зображення з використанням порогового значення $level$ .
$b = strel$ ( <i>'disk'</i> , $R$ );	Функція з опцією <i>'disk'</i> формує структурний елемент $b$ , що представляє матрицю із 0 і 1, де 1 утворюють схематичний круг радіуса $R$ .

$c = \text{imopen}(g, b);$	Функція реалізує морфологічну операцію розкриття, де $g$ - бінарне зображення, а $b$ задає структурний елемент.
$P = \text{bwboundaries}(BW);$	Функція знаходить зовнішні межі об'єктів, а також межі отворів всередині цих об'єктів. $BW$ - це бінарне зображення, де ненульові піксели належать об'єкту, а 0 - піксели фону.
$B = \text{bwtraceboundary}(BW, P, fstep, conn)$	Функція відслідковує зовнішні контури об'єктів у бінарному зображенні $BW$ . Ненульові піксели належать об'єкту, а 0-піксели фону. $P$ - двохкомпонентний вектор, що містить координати точки початку цифрування границі об'єкту; $fstep$ - символічний рядок, що вказує напрямок цифрування за або проти годинникової стрілки. Функція повертає матрицю $B$ розміру $N \times 2$ , де $N$ - кількість пікселів границі об'єкту. $B$ - містить рядок і стовпчик координат граничних пікселів. Параметр $conn$ визначає тип зв'язності оцифрованих координат точок границі.
$STATS = \text{regionprops}(BW, properties)$	Функція визначає множину параметрів, кожного зв'язного об'єкту на бінарному зображенні $BW$ . $STATS$ - масив структур, довжина якого дорівнює кількості об'єктів у $BW$ . Множина параметрів містить список, розділених комами специфікацій характеристик, які треба визначити, наприклад: 'Area', 'Centroid', 'Perimeter' тощо.
$\hat{A} = \text{sortrows}(A, col);$	Функція відсортовує рядки матриці $A$ у порядку спадання за стовпцем, вказаним у параметрі $col$ .

Для контролю результатів роботи програми і оцінки точності результатів нами вручну виміряні координати центрів вузлів тест-



об'єктів для масштабного ряду  $1000^{\times}$ ,  $2000^{\times}$ ,  $5000^{\times}$ ,  $8000^{\times}$ ,  $10000^{\times}$ ,  $15000^{\times}$  крат. На рисунках 3.5.7, 3.5.8 (а-в) показано вхідні зображення з нанесеними центрами вузлів (крім відбракованих): позначені жовтим символом “х” – виміряні вручну; центроїди, обчислені програмним шляхом - червоним символом “+”. Візуальний аналіз рисунків 3.5.7, 3.5.8 показує, що у більшості випадків, обчислені і виміряні вручну центри збігаються. Розбіжності у місцеположенні центрів спостерігаються для вузлів, розташованих на краю зображень і лише частково відображених, де оператор на око визначав де може міститися центр (див.  $M=5000^{\times}$  і  $M=8000^{\times}$ ). Ступінь розсіяності розподілу значень різниць (в пікселях)  $\Delta x_i = x_{роз_i} - x_{вим_i}$ ,  $\Delta y_i = y_{роз_i} - y_{вим_i}$  між розпізнаними і вимірними центрами вузлів навколо їх середнього центра подано на діаграмах рис. 3.5.10, 3.5.11 (в-г).

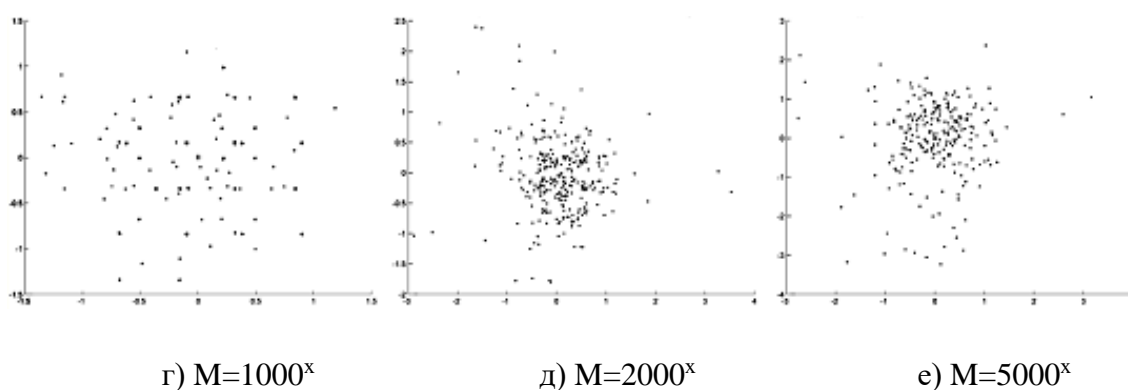
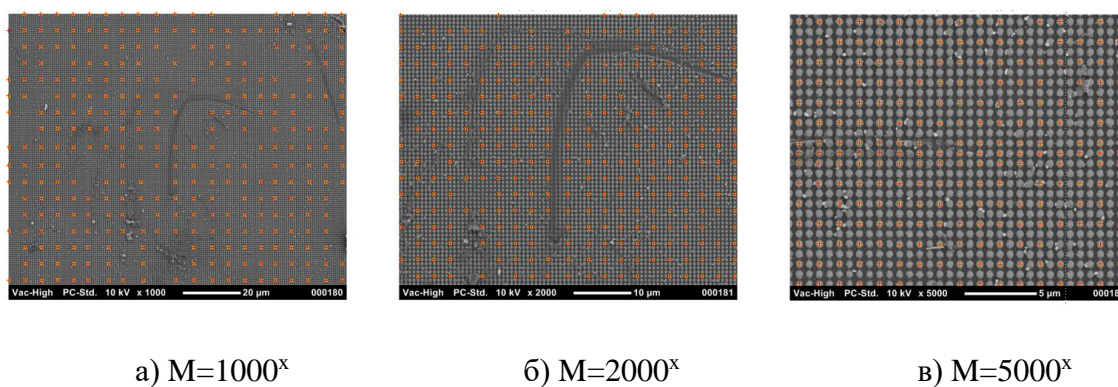


Рис. 3.5.10. Зображення тест-об'єкта з нанесеними центрами вузлів (а-в) і діаграми розподілу відхилень (у пкс) (г-е) при  $M= 1000^{\times}$ ,  $2000^{\times}$ ,  $5000^{\times}$ .

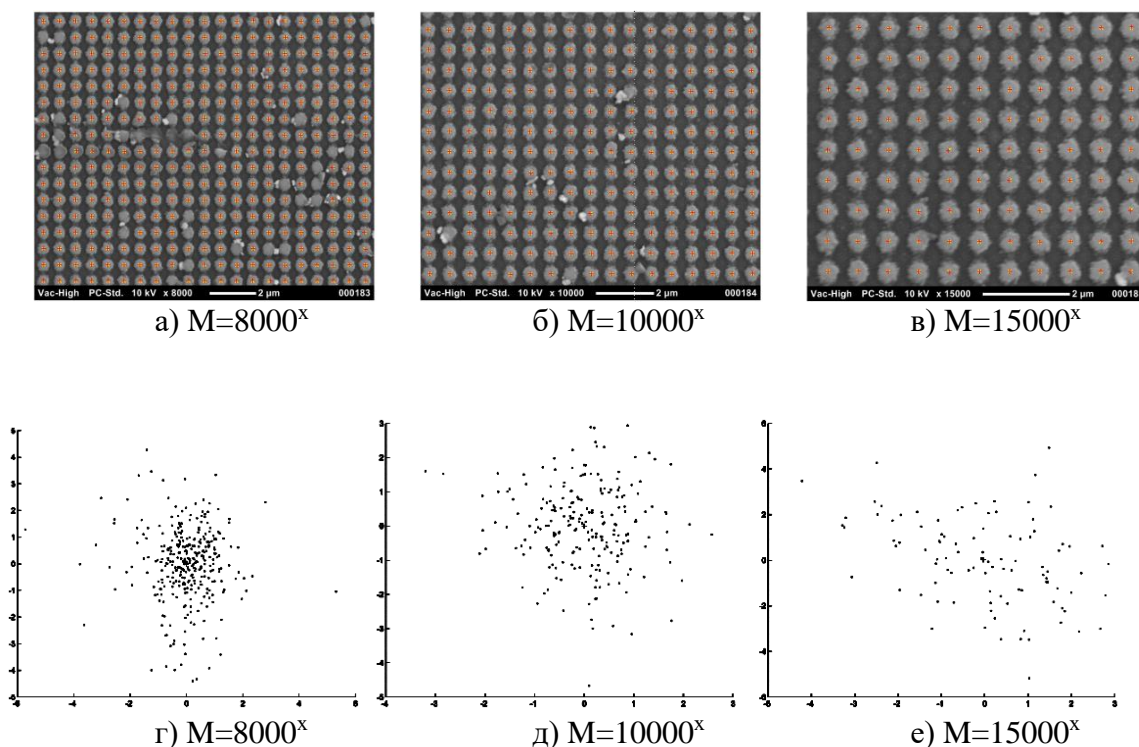


Рис. 3.5.11. Зображення тест-об'єкта з нанесеними центрами вузлів (а-в) і діаграми розподілу відхилень (у пкс) (г-е) при  $M=8000^x$ ,  $10000^x$ ,  $15000^x$ .

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 [231] (табл. 3.5.2). Середню відстань визначаємо як:

$$R_{сep} = \frac{\sum_{i=1}^N D_{ci}}{N}, \quad (3.5.11)$$

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

Таблиця 3.5.2

Характеристики РЕМ-зображень тест-об'єкта та застосовані в процесі їх автоматизованого опрацювання окремі кількісні параметри для всього масштабного ряду

	<b>1000<sup>x</sup></b>	<b>2000<sup>x</sup></b>	<b>5000<sup>x</sup></b>	<b>8000<sup>x</sup></b>	<b>10000<sup>x</sup></b>	<b>15000<sup>x</sup></b>
Крок сітки, піксел	7,72	15,44	38,60	61,75	77,19	115,79
Розмір сітки на зображенні	210x249	105x124	27x33	17x21	13x17	9x11
Розмір вікна фільтра <i>hsize</i> для згладжування та СКВ <i>sigma</i>	-	<i>hsize</i> =3, <i>sigma</i> =1	<i>hsize</i> =3, <i>sigma</i> =1	<i>hsize</i> =3, <i>sigma</i> =1	<i>hsize</i> =15, <i>sigma</i> =5	<i>hsize</i> =15, <i>sigma</i> =5
Радіус <i>R</i> примітива <i>DISK</i> для розкриття	<i>R</i> =1	<i>R</i> =3	<i>R</i> =7	<i>R</i> =10	<i>R</i> =13	<i>R</i> =19
Допуск <i>e1</i> для відбракування за середн. радіусом круга	<i>e1</i> =1	<i>e1</i> =1	<i>e1</i> =3	<i>e1</i> =3	<i>e1</i> =5	<i>e1</i> =6
Середні відстані <i>R<sub>сер</sub></i> у пікселях між виміряними та розпізнаними центрами вузлів	<i>R<sub>сер</sub></i> =0,58	<i>R<sub>сер</sub></i> =0,74	<i>R<sub>сер</sub></i> =1,19	<i>R<sub>сер</sub></i> =1,37	<i>R<sub>сер</sub></i> =1,29	<i>R<sub>сер</sub></i> =2,15

9. Порівняння координат розпізнаних та вимірних вручну центрів зображень вузлів за значенням середньої відстані між розпізнаними та вимірними вузлами (табл. 3.5.3).

Таблиця 3.5.3

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

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

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

Для визначення величин геометричних спотворень необхідно за координатами розпізнаного центра вузла тест-об'єкта знайти відповідний вузол істинної тест-сітки. Як показано у роботах [55, 63-69] значення дійсних масштабів РЕМ-зображень є нецілими і відрізняються від встановлених на шкалі приладу. На підставі проведених досліджень було прийнято допущення, що збільшення РЕМ-зображень мають фрактальну природу. На основі емпіричної залежності Річардсона [265] для дійсного і фіксованого масштабів отримано співвідношення

$$M_r \approx A \cdot M^{2-D}, \quad (3.5.12)$$

де  $M_r$  - дійсний масштаб збільшення;  $M$  – масштаб збільшення на шкалі приладу (цілий);  $A$  – постійна величина;  $D$  - нецілий показник. Якщо крок істинної тест-сітки позначимо як  $h$ , то при збільшенні у  $M$  разів дійсна довжина кроку, згідно (3.5.12), дорівнює

$$M_r \cdot h \approx A \cdot (M \cdot h) \cdot M^{1-D} \quad (3.5.13)$$

В роботі [Mandelbrot, [254]] показано, що величину  $D$  можна вважати фрактальною розмірністю, яку можна визначити за формулою [Cromley. [231]]

$$D = \log(n_2 / n_1) / \log(x_1 / x_2), \quad (3.5.14)$$

де  $x_1$  – довжина еталону під час 1-го вимірювання лінії;  $x_2$  – довжина еталону під час 2-го вимірювання лінії;  $n_1$  – кількість еталонів під час 1-го вимірювання;  $n_2$  – кількість еталонів під час 2-го вимірювання.

На підставі значень дійсних масштабів, отриманих в роботі [63] обчислені значення коефіцієнтів  $A$  і показника  $D$  для РЕМ JCM-5000 (NeoScope): для збільшень  $M_x$ :  $A_x = 1,042468$ ,  $D_x = 1,00547185$ ; для  $M_y$ :  $A_y = 1,042589$ ,  $D_y = 1,00547337$ .

Аналіз отриманих результатів апроксимації у діапазоні від  $1000^x$  до  $15000^x$  з використанням вимірних дійсних масштабів та обчислених за співвідношенням (3.5.12) 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. 3.5.12).

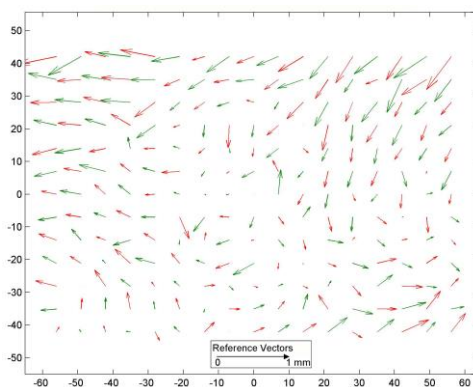


Рис. 3.5.12. Векторна діаграма спотворень РЕМ-зображення до їх апроксимації поліномом

Далі геометричні спотворення РЕМ-зображень були нами програмно апроксимовані з використання поліному загального виду 3-го степеня. Величини залишкових спотворень також проілюстровані у вигляді векторів (рис. 3.5.13)

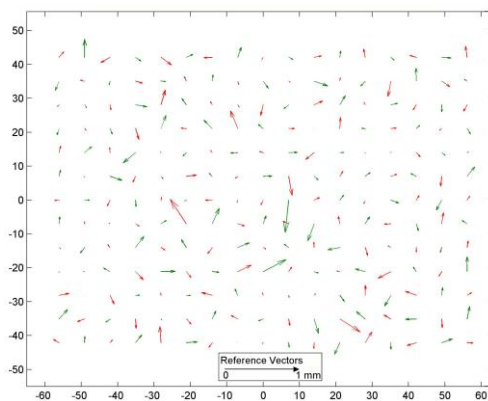


Рис. 3.5.13. Векторна діаграма залишкових спотворень РЕМ-зображення після їх апроксимації поліномом

Порівнюючи рис. 3.5.12 і рис. 3.5.13 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. 3.5.4).

Таблиця 3.5.4

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

№ п/п	M <sub>РЕМ</sub>	За виміряними вручну точками				За розпізнаними автоматично точками			
		До апроксимації		Після апроксимації		До апроксимації		Після апроксимації	
		m <sub>Δx</sub> , мкм	m <sub>Δy</sub> , мкм	m <sub>δx</sub> , мкм	m <sub>δy</sub> , мкм	m <sub>Δx</sub> , мкм	m <sub>Δy</sub> , мкм	m <sub>δx</sub> , мкм	m <sub>δy</sub> , мкм
1	1000 <sup>x</sup>	103,7	52,4	35,4	33,6	106,0	55,3	27,2	29,0
2	2000 <sup>x</sup>	39,9	21,2	16,2	16,0	47,8	23,2	24,8	19,7
3	5000 <sup>x</sup>	78,0	82,7	45,6	41,4	89,4	126,7	64,5	80,0
4	8000 <sup>x</sup>	69,1	331,7	55,9	64,1	101,3	390,7	10,0	115,2
5	10000 <sup>x</sup>	172,3	94,7	48,9	41,3	184,8	153,3	82,9	107,2
6	15000 <sup>x</sup>	131,6	106,1	96,4	78,1	209,7	199,3	164,6	121,1

3.5.3. Порівняльний аналіз статистичних та скейлінгових характеристик РЕМ-зображень тест-об'єкта, отриманих на різних типах РЕМ

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

Для того щоб можна було оцінити вплив шуму на результати подальших досліджень на першому етапі визначимо тип та характер шуму за зображеннями тест-об'єкта. Для визначення типу просторового шуму і оцінювання його параметрів знайдемо середнє значення і

дисперсію шуму. Одним із способів оцінювання середнього і дисперсії шуму є використання тестового зображення сталої яскравості. З цією метою виберемо на зображенні тест-об'єкта деяку однорідну ділянку, наприклад, між вузлами, де немає фонових деталей, тоді розподіл яскравості на ній буде залежати головним чином від шуму. Якщо вважати, що шум є гауссовим з нульовим середнім, то середня яскравість зображення з шумом приблизно дорівнює середній яскравості цього зображення без шуму. Зокрема, якщо виділена ділянка - область інтересу (ROI – Region Of Interest), достатньо однорідна за яскравістю, то можна стверджувати, що дисперсія яскравості на ділянці, в першу чергу визначається дисперсією шумової складової [Гонсалес, Вудс, Еддинс [31]]. Дисперсія, як міра яскравісного контрасту, зокрема, може бути використана для побудови дескрипторів відносної гладкості яскравості  $z_i$ . Величина гладкості

$$R = 1 - 1/[1 + \sigma^2(z)] \quad (3.5.15)$$

дорівнює нулю для області сталої яскравості і наближується до 1 для великих значень  $\sigma^2(z)$ .

Важливим показником для порівняння інформативності зображень тестових об'єктів є співвідношення сигнал – шум. Якщо зображення однорідне, то варіації сигналу невеликі і значення співвідношення сигнал-шум також малі і, навпаки, якщо коливання сигналу значні, то і дисперсія сигналу більша, отже, і значення співвідношення сигнал-шум велике [3].

Виконаємо оцінку енергетичного співвідношення сигнал – шум (signal – to - noise power ratio, SNPR), використовуючи середню енергію шуму і зображення [31]:

$$R = \frac{f_A}{\eta_A}, \quad (3.5.16)$$



$$\text{де } f_A = \frac{1}{MN} \sum_u \sum_v S_f(u, v), \quad \eta_A = \frac{1}{MN} \sum_u \sum_v S_\eta(u, v), \quad (3.5.17)$$

причому  $S_f(u, v)$  - енергетичний спектр неспотвореного зображення,  $S_\eta(u, v)$  - енергетичний спектр шуму,  $M \times N$  - розмір зображення. Допускаючи, що шум є адитивний, і вважаючи, що СКВ шуму значно менше СКВ зображення (табл. 3.5.6), то для оцінки зверху при розрахунках використано енергетичний спектр вхідного зображення.

Наведемо алгоритм розрахунку статистичних параметрів та оцінки співвідношення сигнал – шум за тестовим РЕМ зображенням:

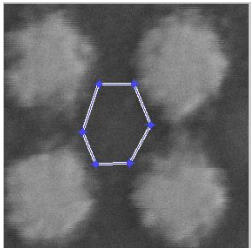
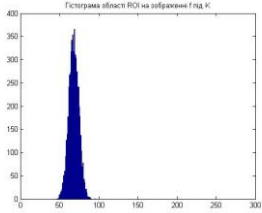
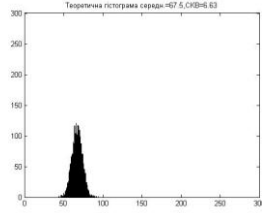
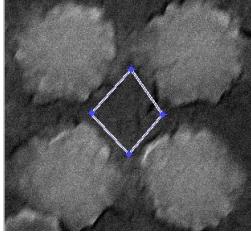
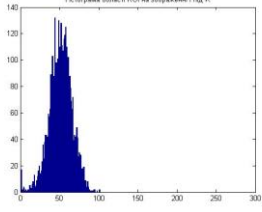
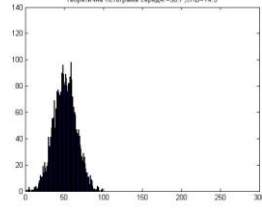
1. Ввід зображення тест-об'єкта.
2. Вибір області ROI між вузлами тест-об'єкта.
3. Побудова бінарної маски  $K$  для ROI.
4. Вимір координат вершин маски  $K$  в інтерактивному режимі.
5. Обчислення середнього значення, СКВ яскравості та кількості пікселів ROI.
6. Обчислення дескриптора відносної гладкості яскравості (3.5.15).
7. Генерування гауссового шуму за обчисленими параметрами.
8. Побудова гістограм зображення під маскою  $K$  та теоретичної гістограми.
9. Генерування шумового зображення, що має розмір вхідного зображення, з середнім значенням яскравості рівним нулю і СКВ, обчисленим за ROI.
10. Обчислення енергетичного спектра за шумовим зображенням.
11. Обчислення середнього значення енергії шуму.
12. Обчислення енергетичного спектра за вхідним зображенням.
13. Обчислення середнього значення енергії зображення.
14. Обчислення співвідношення сигнал – шум за середніми значеннями енергії шуму і зображення.

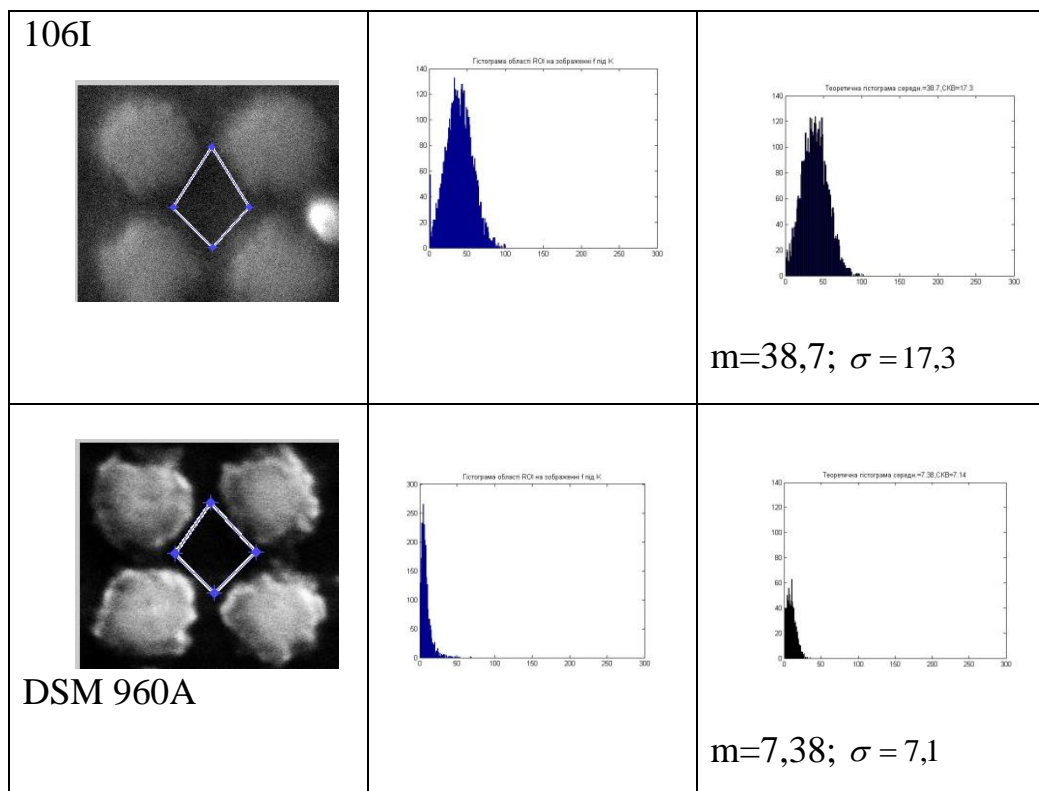
Програмна реалізація наведеного алгоритму виконана в середовищі MatLab.

У таблиці 3.5.5 подано фрагменти РЕМ-зображень тест-об'єкта М 20000<sup>x</sup> з виділеними областями інтересу для чотирьох типів РЕМ. За областю інтересу побудована гістограма (друга колонка) і визначено середнє значення, СКВ, і кількість пікселів ROI. У третій колонці наведено гістограми, побудовані за згенерованим масивом (розмір, якого дорівнює кількості пікселів ROI) випадкових гауссових величин з визначеним середнім значенням і СКВ.

Таблиця 3.5.5

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

Область ROI на фрагменті РЕМ зображення (M=20000 <sup>x</sup> )	Гістограма ROI	Гістограма шуму, згенерована функцією MatLab
<p>JCM-5000</p> 		 <p><math>m=67,5; \sigma = 6,6</math></p>
<p>JSM 7100F</p> 		 <p><math>m=50,7; \sigma = 14,5</math></p>



Результати обчислень середніх значень, СКВ та дескрипторів гладкості для всього зображення і області ROI подано у таблиці 3.5.6.

Таблиця 3.5.6

Статистичні параметри PEM-зображень тест-об'єкта і області ROI

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

Подібність гістограм PEM JSM 7100F вказує, що на зображенні присутній шум, який добре апроксимується гауссовим розподілом з середнім значенням яскравості шуму  $m=50,7$  та СКВ  $\sigma=14,5$ . Такі самі зауваження стосуються і графіків PEM 106 I (середнє значення яскравості шуму  $m=38,7$  та СКВ  $\sigma=17,3$ ).

Для PEM JCM-5000 гістограма ROI та теоретична гістограма, побудована за значеннями  $m=67,5$  та СКВ  $\sigma=6,6$ , відрізняються по висоті майже в три рази, що вказує на присутність в області значної кількості пікселів з близькими значеннями яскравості (смуга посередині гістограми).

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

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

### 3.5.3.2. Дослідження роздільної здатності цифрових PEM-зображень різних масштабів (збільшень) для різних типів PEM

Дані дослідження нами виконані на підставі опрацювання цифрових PEM-зображень еталонного тест-об'єкта з розрізнявальною здатністю 1425 лін/мм, які були отримані на 4-х типах сучасних PEM при наступних фіксованих на шкалах приладів збільшеннях (масштабах):

- 1000<sup>x</sup>, 2000<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 8000<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 15000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup>, 24000<sup>x</sup>, 27000<sup>x</sup>  
для PEM JCM-5000 (NeoScope) (JEOL, Японія);

- 2000<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 7500<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 15000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup>, 25000<sup>x</sup> для РЕМ JCM-7100F (JEOL, Японія);
- 1000<sup>x</sup>, 2000<sup>x</sup>, 3000<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup> для РЕМ DSM-960A (Zeiss, Німеччина),
- 1000<sup>x</sup>, 2500<sup>x</sup>, 5000<sup>x</sup>, 8000<sup>x</sup>, 10000<sup>x</sup>, 15000<sup>x</sup>, 20000<sup>x</sup>, 25000<sup>x</sup> для РЕМ 106I (Суми, Україна).

В таблиці 3.5.7 приведені результати вимірів кількості пікселів, які відобразились між першим і п'ятим вузлами тест-об'єкта вздовж осі *x* (горизонталі) і *y* (вертикалі) у центральній частині вище перелічених РЕМ-зображень. Ця відстань на нашому еталонному тест-об'єкті складає приблизно 2,8 мкм тобто 4-и інтервали між його сусідніми вузлами, оскільки один інтервал складає приблизно 0,7 мкм (1000 мкм/1425). Таку відстань вибрано тому, що при збільшенні 27000<sup>x</sup> (РЕМ JCM-5000) на РЕМ-знімку відображаються лише 6х5 вузлів тест-об'єкта. Таким чином, ці числа в певній мірі характеризують роздільну здатність (ступінь розрізнення деталей) зображення вздовж горизонтальних та вертикальних напрямів знімка в даному масштабі, яка складає 2,8 мкм поділених на кількість пікселів між 1-м і 5-м вузлами тест-об'єкта.

Таблиця 3.5.7

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

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

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

Неоднакова кількість пікселів між вузлами еталонної відстані тест-об'єкта для різних РЕМ при фіксованому збільшенні викликана різними розмірами РЕМ-зображень для різних РЕМ (розгортками у пікселях), геометричними спотвореннями зображень і похибками вимірювань, особливо при великих збільшеннях ( $M \geq 10000^x$ ).

Порівнюючи ці величини можна зробити висновок, що розрізнявальна здатність зображень перших 3-х РЕМ одного порядку для всіх масштабів збільшень і відповідає масштабу, встановленому на шкалі приладу.

Поряд з тим із попередніх досліджень випливає, що метричні характеристики зображень РЕМ 106І відповідають масштабам, збільшеним майже у 3 рази (2,8213), порівняно з встановленими на шкалі приладу. Це можна пояснити тим, що реальний розмір пікселя більший, ніж вказано в технічних характеристиках (0,26450 мм замість 0,09375 мм), але при цьому зазначимо, що інформативність зображень, отриманих на РЕМ 106І, буде відповідати масштабам, встановленим на шкалі приладу.

Що стосується РЕМ DSM 960А, то розрізнявальна здатність зображень відповідає масштабам меншим приблизно у 1,5 рази порівняно з масштабами, встановленими на шкалі приладу, оскільки розгортка при отриманні РЕМ-зображення у цьому приладі складає 800x600 пікселів, а в інших типах мікроскопів 1280x1080 (JSM-5000), 1280x1024 (JSM 7100F), 1280x960 (РЕМ 106І). В той же час метричні характеристики відповідають масштабам, збільшеним майже у 2 рази (1,9310).

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

### 3.5.4. Фрактальний аналіз цифрових РЕМ-зображень

#### 3.5.4.1. Визначення дисперсійної розмірності

Для оцінки дисперсійної фрактальної розмірності визначимо спектр потужності як одновимірне перетворення Фур'є від значень яскравості зростаючої послідовності проміжків  $(a_i, b_i)$ , вибраних в центральній частині одного рядка (стовпця) РЕМ-зображення тест-об'єкта в різних масштабах. Для одновимірного випадку дисперсійну розмірність визначимо за формулою [154]:

$$D' = 1 + \frac{3D}{2}, \quad (3.5.18)$$

де  $D'$  - оцінка фрактальної розмірності, що визначається як

$$D' = 1 - \frac{\log \sigma_1^2 - \log \sigma_2^2}{\log m - \log n}. \quad (3.5.19)$$

Тут  $\sigma_1^2$  - дисперсія, визначена за спектром потужності профілю яскравості на проміжку  $(a, b)$  в масштабі  $m$ , відповідно  $\sigma_2^2$  - дисперсія, визначена за спектром потужності на проміжку  $(a, b)$  в масштабі  $n$ . Дисперсію  $\sigma^2$  визначаємо в горизонтальному та вертикальному напрямках.

#### 3.5.4.2. Визначення розмірностей за значеннями профілю яскравостей еталонного проміжку

Розмірність за значеннями профілю яскравостей визначаємо за формулою

$$D_L = 1 - \frac{\log L_1 - \log L_2}{\log m - \log n}. \quad (3.5.20)$$

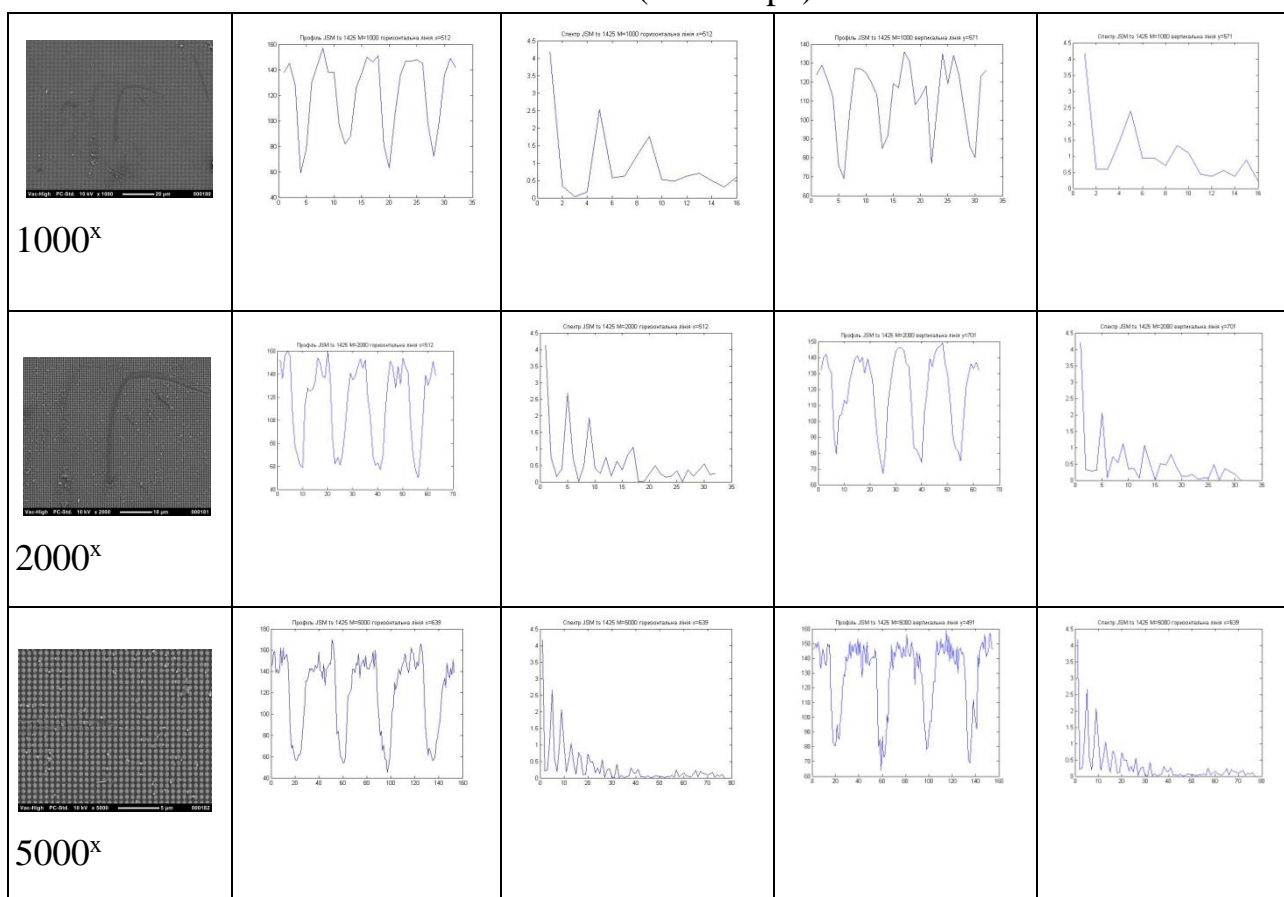
Тут  $l_1$  - сума різниць яскравостей на проміжку  $(a,b)$  в масштабі  $m$ , відповідно  $L_2$  сума різниць яскравостей на проміжку  $(a,b)$  в масштабі  $n$ . Суму різниць яскравостей в горизонтальному напрямку визначаємо за формулою:

$$L_x = \sum_{x=x_a}^{x_b} |z_x - z_{x+1}|, \quad (3.5.21)$$

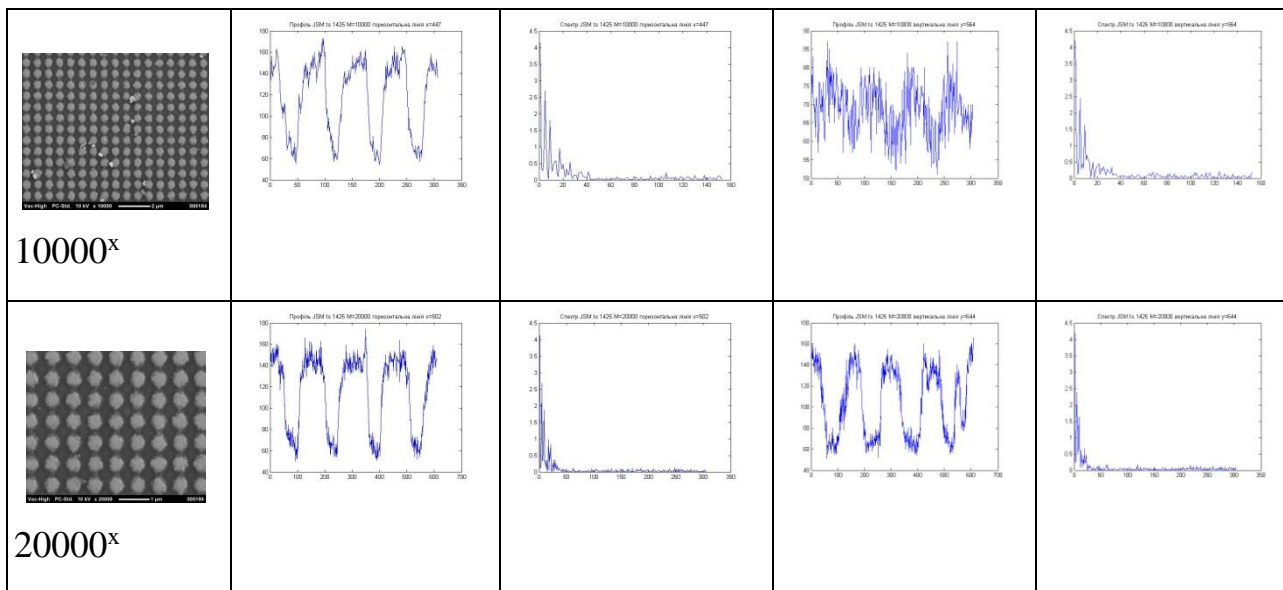
де  $z$  значення яскравості на проміжку  $(x_a, x_b)$ . Так само визначається сума різниць яскравостей у вертикальному напрямку  $l_y$  на проміжку  $(y_a, y_b)$ .

Таблиця 3.5.8

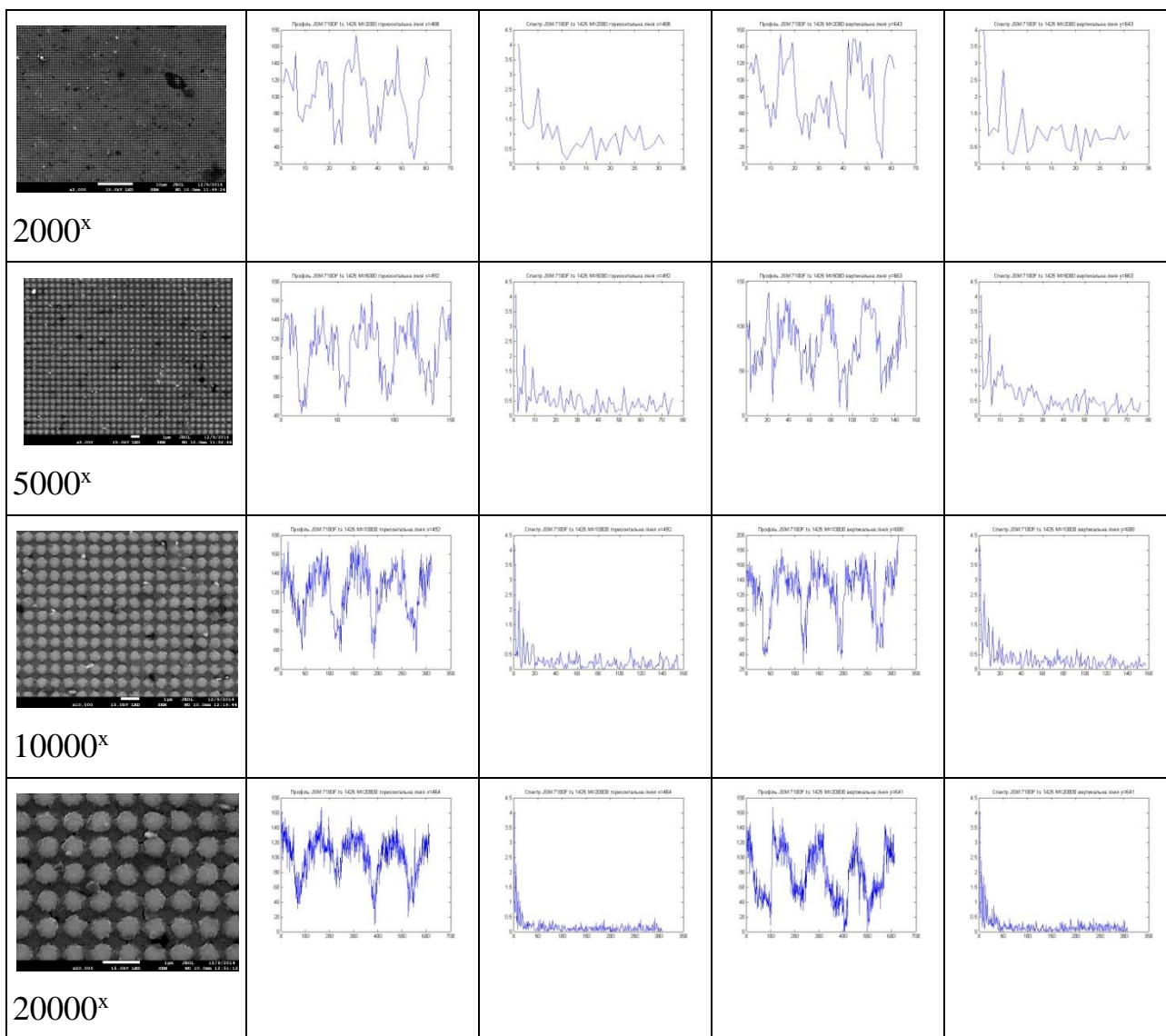
Профілі яскравостей та їх спектри вздовж осей  $x$  і  $y$   
РЕМ JCM 5000 (NeoScore)



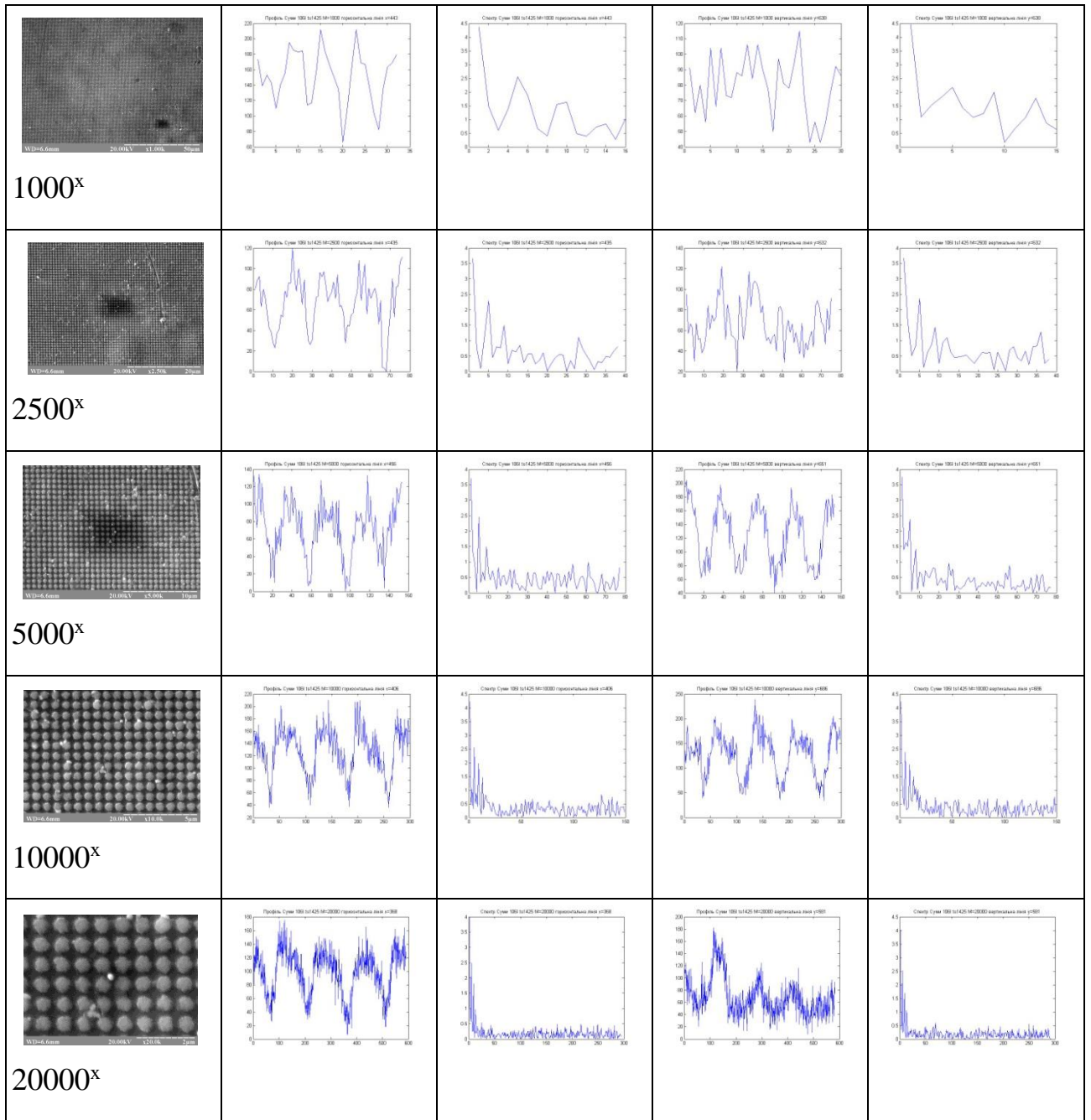




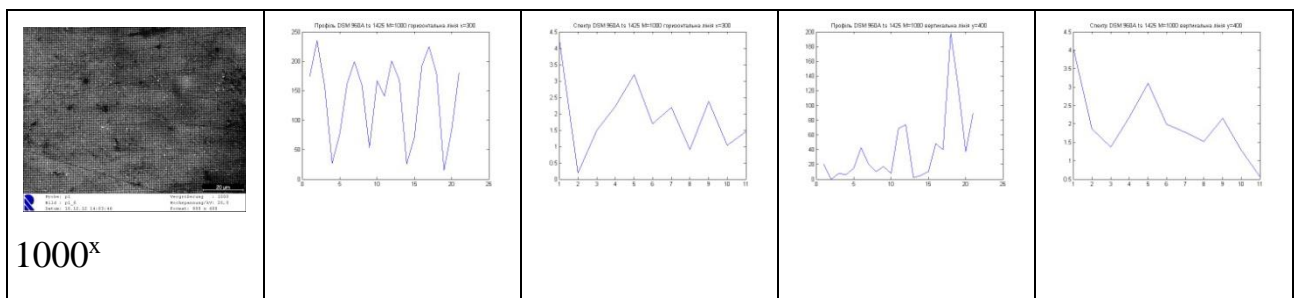
PEM JSM 7100F

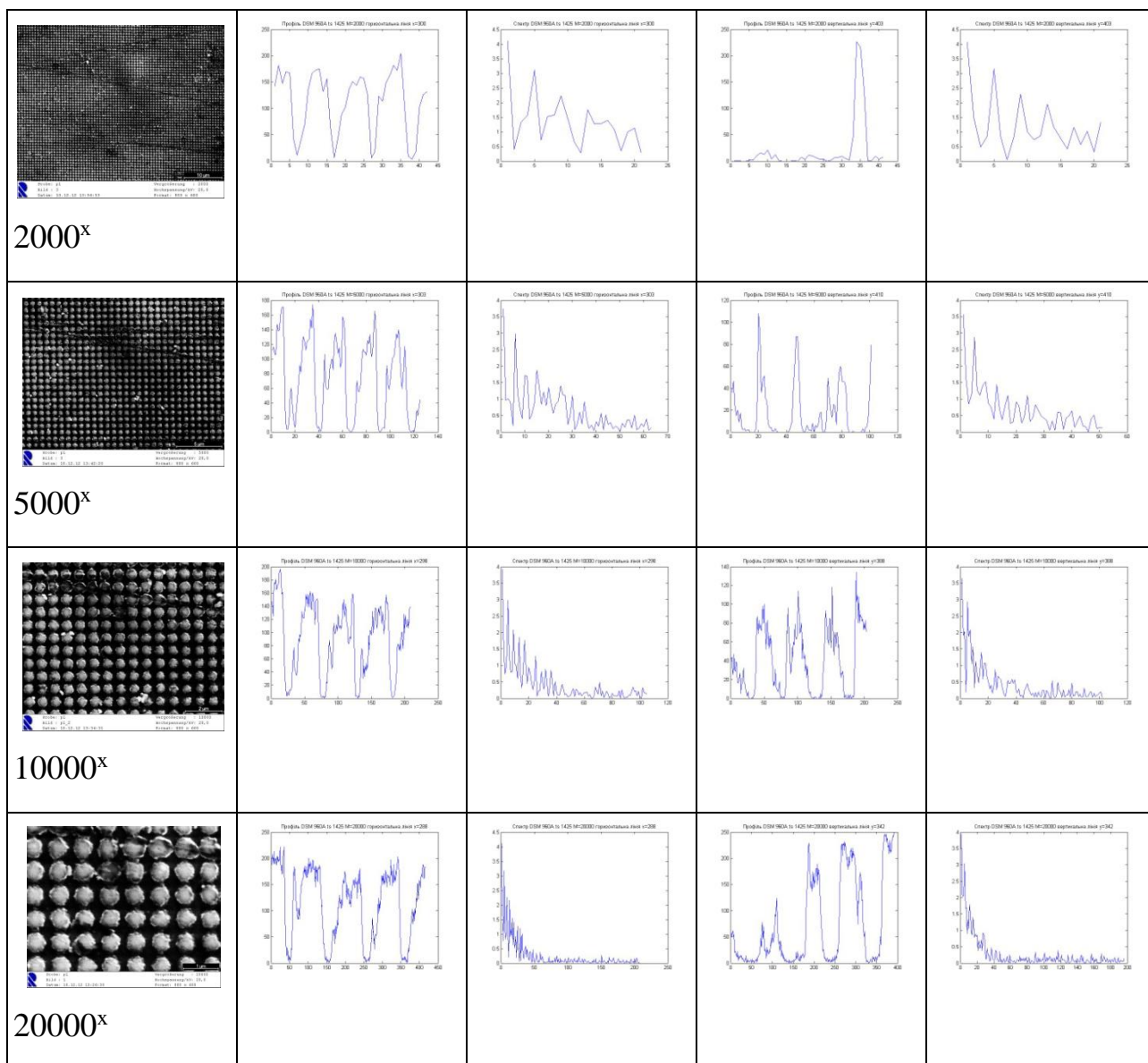


### PEM 106I



### PEM DSM 960A





Перша колонка таблиці 3.5.8 містить зображення тест-об'єкта; друга колонка містить горизонтальний профіль яскравостей, а третя його спектр; відповідно 4 і 5-та колонки містять профіль яскравостей і його спектр у вертикальному напрямку. Як можна бачити, спектральна крива є самоподібною функцією, тобто має властивості скейлінга. Наприклад, особливості, що містить один масштаб повторюються і на інших масштабах. Зокрема, можна помітити, що максимуми при більших збільшеннях менше максимумів при менших збільшеннях, що є однією із властивостей подібної функції.

3.5.4.3. Обчислення розмірності за довжиною профілю та дисперсійної розмірності за спектром для різних збільшень (масштабів) і різних типів РЕМ

Обчислення значень розмірностей виконувалось за парами значень масштабів  $(m_i, m_j)$ . В результаті нами було сформовані матриці виду (3.5.22) для дисперсійної розмірності (3.5.18), обчисленої за спектром потужності та розмірності, обчисленої за профілем яскравості (3.5.20) в горизонтальному та вертикальних напрямках.

$$D_{m_i, m_j} = \begin{bmatrix} 0 & m_{i2} & m_{i3} & \dots & m_{in} \\ 0 & 0 & m_{j2} & \dots & m_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{in} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5.22)$$

Нижче наведено приклад матриці дисперсійної розмірності для яскравісних профілів у горизонтальному напрямку для пар значень масштабів

РЕМ JCM 5000:

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

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

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

та середнє квадратичне відхилення:

$$D_{\sigma_{\text{СКВ}}} = \{0.03 \quad 0.04 \quad 0.10 \quad 0.14 \quad 0.09 \quad 0.10 \quad 0.35 \quad 0\}.$$

Програма обчислення розмірностей складена в середовищі MatLab.

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

Обчислювальна процедура визначення розмірностей дисперсійної та за профілями яскравостей в горизонтальному та вертикальному напрямках складалась із таких кроків:

1. Введення РЕМ-зображення.
2. Формування масиву значень яскравостей профілю за координатами початкової та кінцевої точки проміжку.
3. Обчислення суми різниць яскравостей за профілем (3.5.21).
4. Обчислення спектра потужності Фур'є за яскравісним профілем.
5. Оцінка фрактальної розмірності за значеннями дисперсії спектра потужності (3.5.19).
6. Обчислення розмірностей дисперсійних (3.5.18) та за профілем (3.5.20).
7. Формування матриць розмірностей (3.5.22) дисперсійних та за яскравісним профілем.
8. Обчислення середніх значень та СКВ розмірностей дисперсійних та за яскравісним профілем.

Результати обчислень середніх значень розмірностей за яскравісними профілями, дисперсійних розмірностей та відповідні середні квадратичні відхилення для послідовностей горизонтальних та вертикальних пар масштабів для різних типів РЕМ наведено у таблиці 3.5.9.

Для JSM 7100F задано такі послідовності масштабів:



Для РЕМ 106I задано такі послідовності масштабів:



Для РЕМ DSM 960A задано такі послідовності масштабів:



У таблицю 3.5.9 ввійшли результати обчислень середніх значень і СКВ з 1-го по 3-ій рядків матриць виду (3.5.22).

Таблиця 3.5.9

Результати обчислень розмірності за профілем, дисперсійною розмірністю та за спектром потужності для РЕМ-зображень різних збільшень (масштабів) і різних типів РЕМ

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

Аналізуючи дані таблиці 3.5.9, можемо зробити висновок, що дисперсійна розмірність зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 стабільна для масштабного ряду від  $1000^x$  до  $27000^x$  в горизонтальному і вертикальному напрямках і становить:  $D\sigma = 1,54 \pm 0,03$  - для горизонтальних пар значень масштабів від  $(1000^x-2000^x)$  до  $(1000^x-27000^x)$ ;

$D\sigma = 1,55 \pm 0,03$  для вертикальних пар значень масштабів від  $(1000^x-2000^x)$  до  $(1000^x-27000^x)$ ;

$D\sigma = 1,53 \pm 0,04$  - для горизонтальних пар значень масштабів від  $(2000^x-3000^x)$  до  $(2000^x-27000^x)$ ;

$D\sigma = 1,51 \pm 0,03$  - для вертикальних пар значень масштабів від  $(2000^x-3000^x)$  до  $(2000^x-27000^x)$ .

Для визначення дисперсійної розмірності  $\sigma$ , в якості еталону (одиниці) вимірювання використовувались сегменти тест-об'єкта  $1000^x$  та  $2000^x$  масштабів. З використанням еталона вимірювання сегмента тест-об'єкта  $M=5000^x$  отримано результати подібні до результатів, отриманих з еталоном  $M=1000^x$ . Обчислена розмірність за профілем  $\sigma$  дає подібні результати для еталонів вимірювання в масштабах  $1000^x$  та  $2000^x$  і зростає для еталона вимірювання в  $M=5000^x$ .

Подібні результати встановлені для JSM 7100F. Для масштабного ряду від  $1000^x$  до  $25000^x$  у горизонтальному і вертикальному напрямках дисперсійна розмірність становить:

$D\sigma = 1,59 \pm 0,15$ - для горизонтальних пар значень масштабів від  $(2000^x-3000^x)$  до  $(2000^x-25000^x)$ ;

$D\sigma = 1,61 \pm 0,15$ - для вертикальних пар значень масштабів від  $(2000^x-3000^x)$  до  $(2000^x-25000^x)$  з еталоном вимірювання масштабу  $M=2000^x$ .

Розмірність за довжиною профілю зростає від 1,75 з еталоном  $M=2000^x$  до 1,95 з еталоном  $M=5000^x$ .

На основі отриманих результатів можна зробити висновок про ізотропний характер величини дисперсійної розмірності для PEM JSM-5000 та JSM 7100F.

Для PEM 106I для пар значень масштабів, що починаються з  $M=1000^x$  дисперсійна розмірність не стабілізується. Отже, фрактальний характер дисперсії виявляється починаючи з масштабів більших ніж  $M=2500^x$ . Тільки починаючи з масштабу  $M=5000^x$  спостерігається відносна стабільність як для горизонтальних так і вертикальних масштабів.

$D\sigma = 1,95 \pm 0,26$  - для горизонтальних пар значень масштабів від  $(2500^x-5000^x)$  до  $(2500^x-25000^x)$ ;

$D\sigma = 1,93 \pm 0,23$  - для вертикальних пар значень масштабів від  $(2500^x-5000^x)$  до  $(2500^x-25000^x)$ ;

При вимірюваннях  $D\sigma$  з еталонами в  $M=2500^x$  і  $M=5000^x$  отримаємо для горизонтальних пар результат біля 1,95, а для вертикальних пар значення  $D\sigma$  зростає з 1,97 до 2,28.

Стосовно розмірності за довжиною профілю  $D_L$ , то її величина зростає від 1,75 (еталон  $M=1000^x$ ) до 2,29 (еталон  $M=5000^x$ ).

Подібні зауваження можна віднести і до PEM DSM 960A, де відносна стабільність встановлюється для пар масштабів, що починаються з  $M=3000^x$ .

$D\sigma = 1,83 \pm 0,21$  - для горизонтальних пар значень масштабів від  $(3000^x-5000^x)$  до  $(3000^x-20000^x)$ ;

$D\sigma = 1,93 \pm 0,12$  - для вертикальних пар значень масштабів від  $(3000^x-5000^x)$  до  $(3000^x-20000^x)$ .



Величина розмірності за довжиною профілю  $D_L$  зростає від 1,18 (еталон  $M=1000^x$ ) до 1,67 (еталон  $M=3000^x$ ) і не узгоджується величиною  $D\sigma$ .

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

Для PEM JCM-5000 значення  $D\sigma$  для всього масштабного ряду близько до  $D=1,5$ , що згідно класифікації для фрактальної розмірності за Кроновером Р. М. [93] вказує на випадковий ряд, причому функція щільності ймовірностей появи яскравостей відповідає нормальному розподілу. Для PEM JSM 7100F значення  $D\sigma$  для всього масштабного ряду містяться у діапазоні ( $1,5 < D < 2$ ).

Такий ряд більш мінливий, ніж ряд випадковий, так як складається із частих реверсів спад-підйом. Стійкість такої поведінки залежить від того, наскільки значення  $D\sigma$  близьке до  $D=1,5$ . Для PEM 106I значення  $D\sigma$  не стабілізуються в межах досліджуваного масштабного ряду. Такі самі зауваження стосуються і DSM 960A.

На підставі виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

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

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

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

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

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

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

більшими 10 пікселів. Крім того, вони залишаються стабільними впродовж тривалого часу експлуатації.

7. Обчислені параметри шумової складової РЕМ-зображень, отримані на підставі статистичного опрацювання зображень еталонного тест-об'єкта окрім калібрувальних характеристик, дозволяють встановити особливості формування цифрових зображень для різних типів РЕМ. Показник відношення сигнал/шум, який є мірою неоднорідності області зображення, може бути використаний в процесі кореляційного ототожнення точок дослідних мікроповерхонь твердих тіл, які відобразились на цифрових РЕМ-стереопарах в процесі побудови ЦМР.

8. З порівняння двох незалежних методів визначення розмірності яскравісних профілів у горизонтальному та вертикальному напрямках, встановлено, що розподіл яскравостей РЕМ-зображень, отриманих на JSM-5000 та JSM 7100F, може характеризуватись величиною дисперсійної фрактальної розмірності  $D\sigma$ , яка має відносно сталі значення і несуттєво змінюється при зміні збільшення (масштабу) РЕМ-зображення, що може бути підставою до фрактального опрацювання цифрових зображень, отриманих на цих типах РЕМ.

9. Отримані значення дисперсійних фрактальних розмірностей  $D\sigma$  та розмірності «довжини» яскравісного профілю дають важливу інформацію про анізотропію РЕМ-зображень у різних масштабах і можуть бути додатковими параметрами, які характеризують особливості формування РЕМ-зображень різними типами РЕМ.

### 3.6. Висновки та рекомендації

Підсумовуючи дослідження, викладені у 3 розділі можна зробити наступні узагальнені висновки і дати рекомендації:

1. Цифровим РЕМ-зображенням, отриманим за допомогою сучасних РЕМ притаманні геометричні спотворення, величини і характер яких залежать від типу РЕМ і параметрів РЕМ-знімання.

2. Встановлено, що лінійні спотворення масштабу (збільшення) цифрових РЕМ-зображень, отримані на РЕМ японського виробництва фірм JEOL, Hitachi, відносно незначні, в межах  $\pm 1-3\%$  в діапазоні збільшень  $1000^{\times}-20000^{\times}$ . При збільшеннях  $M > 20000^{\times}$  величини спотворень масштабу зображень мають тенденцію до зростання. У цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-760A фірми «Carl Zeiss» (Оберкохен, Німеччина), спотворення масштабу трохи більші, в межах  $-2\div-7\%$  в залежності від параметрів РЕМ-знімання. Цифровим РЕМ-зображенням, отриманим на вітчизняному РЕМ 106 I (Суми Україна) також притаманні, відносно, незначні спотворення масштабу  $\pm 1-4\%$  в діапазоні збільшень  $1000^{\times}-30000^{\times}$ .

3. Характерною особливістю спотворень масштабу цифрових РЕМ-ображень, отриманих на усіх без винятку досліджених РЕМ є те, що вони мають *систематичний характер*, можуть бути за допомогою спеціальних тест-об'єктів з високою розрізняючою здатністю визначені і враховані.

4. Величини геометричних спотворень нелінійного типу (дисторсійні), які залишаються після встановлення дійсних значень збільшень (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, у всіх досліджених нами РЕМ зростають від 0,1-0,5 мм у центральній частині знімка до  $\pm 1-3$  мм на його краях. Під час високоточних досліджень кількісних параметрів мікроповерхонь їх обов'язково необхідно враховувати.

5. Найбільш ефективно геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень враховувати (апроксимувати) аналітично за допомогою полінома загального виду 3-го степеня. Залишкові спотворення при цьому зменшуються у 2-10 разів і співмірні з точністю вимірів знімків, тобто  $\pm 1-2$  піксела чи  $\pm 0,1-0,2$  мм в масштабі знімка.

6. Для ефективного калібрування геометричних спотворень цифрових знімків, отриманих на всіх типах РЕМ, які є в Україні, необхідно відновити технологію отримання тест-об'єктів дифракційного

типу з високою розрізнявальною здатністю (1000-5000 ліній/мм) з застосуванням лазерів.

7. Встановлено, що цифрові РЕМ-зображення мають властивості, до яких можна застосувати принципи фрактальної геометрії, а також властивість *скейлінга*, тобто масштабну інваріантність або подібність. Введено поняття фрактальний масштаб, а також отримано ряд так званих *скейлінгових* кількісних характеристик РЕМ, які дозволяють отримати значення дійсних масштабів цифрових РЕМ-зображень без їх калібрування з допомогою тест-об'єктів і тим самим підвищити точність вимірювань знімків і отримання просторових координат точок мікроповерхонь дослідних об'єктів.

8. Виконано дослідження і порівняльний аналіз статистичних та скейлінгових характеристик цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних типах РЕМ мета яких підвищення точності визначення та врахування їх геометричних спотворень.

9. Розроблено технологію автоматизації калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень та їх врахування, яка показала свою ефективність і дозволяє значно скоротити час на виконання кропітких вимірювань в процесі їх метричних досліджень.

10. Розроблено комплекс програм «Dimicros», які ефективно дозволяють виконувати опрацювання цифрових РЕМ-зображень тест-об'єктів, тобто визначати дійні значення їх масштабів (збільшень) та геометричних спотворень нелінійного типу, враховувати їх, а також опрацювати РЕМ-стереопари для отримання просторових кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів.

## РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ МІКРОПОВЕРХОНЬ ОБ'ЄКТІВ ЗА ЇХ ЦИФРОВИМИ РЕМ-СТЕРЕОЗОБРАЖЕННЯМИ

4.1. Дослідження методів математичного моделювання мікрорельєфу поверхонь об'єктів за їх цифровими РЕМ-стереозображеннями

### 4.1.1. Загальна постановка задачі

Перед нами було поставлено завдання дослідити ефективність використання відомих у практиці методів математичного моделювання і пакетів програм, застосувати їх у РЕМ-фотограмметрії для побудови ЦММР мікроповерхонь дослідних об'єктів та дослідити їх ефективність та доцільність використання.

Для досліджень були використані, насамперед, математичні моделі, які містить для побудови ЦММР програмний пакет Surfer 10.0, а також дані вимірів РЕМ-стереопар на ЦФС «Дельта» з використанням програмного комплексу «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  $M=1000^x$ );

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

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

Усі РЕМ-стереопари отримані нормально-конвергентним випадком РЕМ-знімання: лівий знімок при  $\alpha_l=0^\circ$ , правий -  $\alpha_{np}=8^\circ$  (рис. 4.1.1).

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 90x100 мкм. Перепад висот в межах ділянки близько 40 мкм. Для побудови ЦММР використано 14 основних математичних методів програмного пакету Surfer 10.0, зокрема:

- метод степеня зворотної віддалі (IDP);
- 3 різновиди методу Крігінга (Kriging) з варіограмою лінійного виду і з врахуванням лінійного та квадратичного трендів поверхні;
- метод мінімальної кривизни (Minimum Curvature);

- методи натуральних (Natural Neighbor) і сусідніх (Nearest Neighbor) околів;

- метод радіально базисних функцій з 5 різними методами інтерполювання: зворотній мультіквадрик (Inverse Multiquadric), з використанням логарифмічної функції (Multilog), мультіквадриковий (Multiquadric), кубічного сплайну (Natural Cubic Spline і т.з. метод тонкого пластинчастого сплайну (Thin Plate Spline);

- триангуляції з лінійною інтерполяцією (Triangulation with Linear Interpolation);

- модифікований метод Шепарда (Modified Shepard's method).

Послідовність побудови ЦММР наступна: після вибору методу моделювання з заданого масиву координат точок (X, Y, Z) будувалась регулярна сітка з кроком приблизно 1 мкм (89x100 перехресть, розширення .grd). За регулярною сіткою (ЦММР) надалі графічно будувались плани мікроповерхонь в горизонталях і 3D зображення мікроповерхні, які представлені на рис. 4.1.3-4.1.5.

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 моделювання тим чи іншим методом.

Теоретична точність отримання висот точок мікроповерхні при даних параметрах РЕМ-знімання складає:

- для мікроповерхні лесу - близько  $m_{z\text{ теор}} \approx 1,0$  мкм;
- для мікроповерхні зламу металу -  $m_{z\text{ теор}} \approx 0,1$  мм;
- для мікроповерхні хромованої сталі  $m_{z\text{ теор}} \approx 1,5$  мкм.

Результати досліджень приведені у наступному підрозділі 4.1.2.



4.1.2. Оцінка точності цифрового моделювання мікрорельєфу поверхонь об'єктів різними математичними методами за вимірами їх цифрових РЕМ-стереозображень

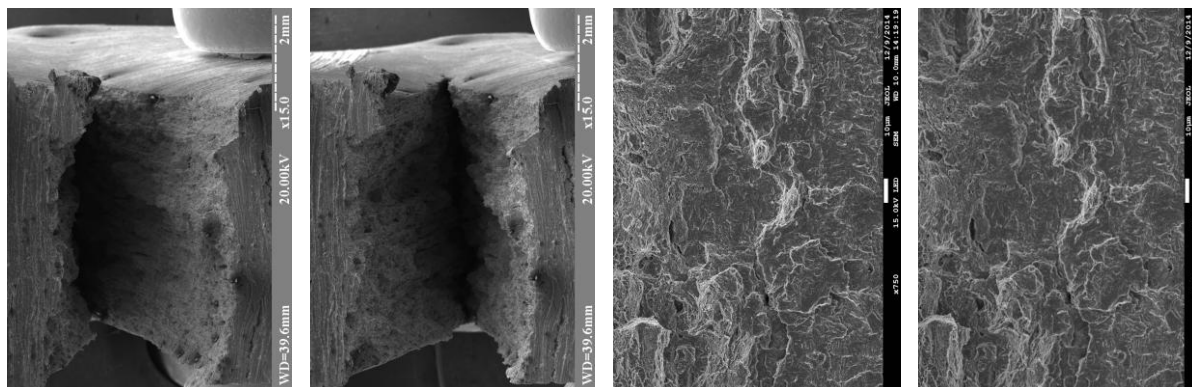
В результаті досліджень було побудовано 42 ЦММР чотирнадцятьма методами по 3 моделі для різних поверхонь кожним методом і виконана оцінка точності побудови для кожного з них.

В таблиці 4.1.1 приведені результати оцінки точності моделювання лише мікроповерхні лесового ґрунту різними математичними методами, як поверхні з найбільш складним рельєфом. Для інших поверхонь ми задля економії обсягу підрозділу не стали приводити кількісні результати досліджень, позаяк вони абсолютно корелюють з даними для мікроповерхні лесового ґрунту пропорційно точності отримання висот точок для цих поверхонь.

Приведені в таблиці 4.1.1 дані дають змогу виконати об'єктивний аналіз ефективності досліджених математичних методів для моделювання рельєфу мікроповерхонь і дати рекомендації щодо доцільності їх використання, які ми виклали у висновках.



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



а)

б)

Рис. 4.1.2. Стереопари: а) мікроповерхні зламу металу (РЕМ 106I,  $M=42,7^x$ ,  $\alpha_{л} = -6^\circ$ ,  $\alpha_{п} = +6^\circ$ ), б) мікроповерхні хромованої сталі (РЕМ JSM-7100F,  $M=750^x$ ,  $\alpha_{л} = 0^\circ$ ,  $\alpha_{п} = +8^\circ$ ).

Таблиця 4.1.1

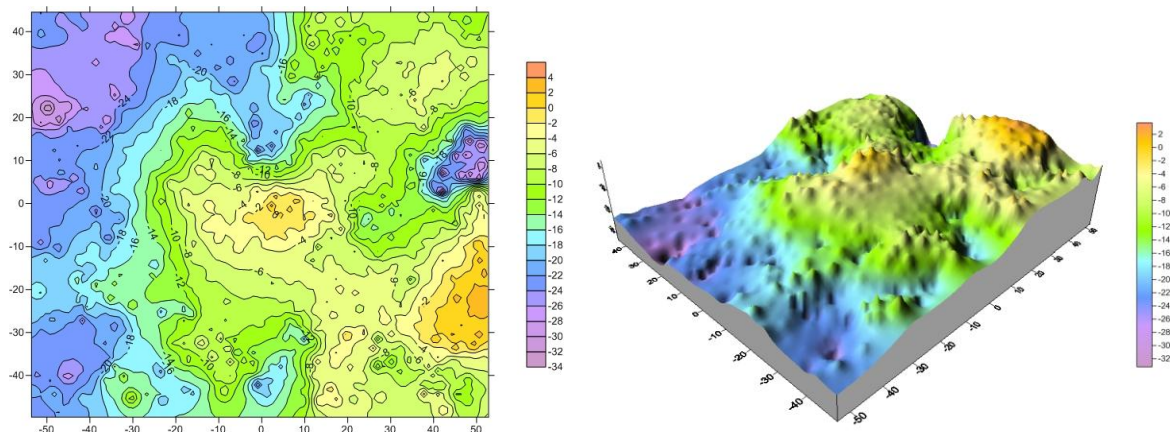
Результати оцінки точності моделювання мікроповерхні лесу різними математичними методами

№	Метод моделювання	К-ть точ. модел. контр.т.	$\Delta Z_{\min}$ , МКМ	$\Delta Z_{\max}$ , МКМ	Середнє арифмет. відхил. $\sum \Delta Z/n$ , МКМ	Середнє квадрат. 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	<b>1,30</b>
2	Крігінга (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+квадр. 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	<b>1,14</b>
6	Природних околів Natural Neighbor	850	-4,5	4,1	0,035	0,71
		100	-1,5	1,2	-0,041	0,65

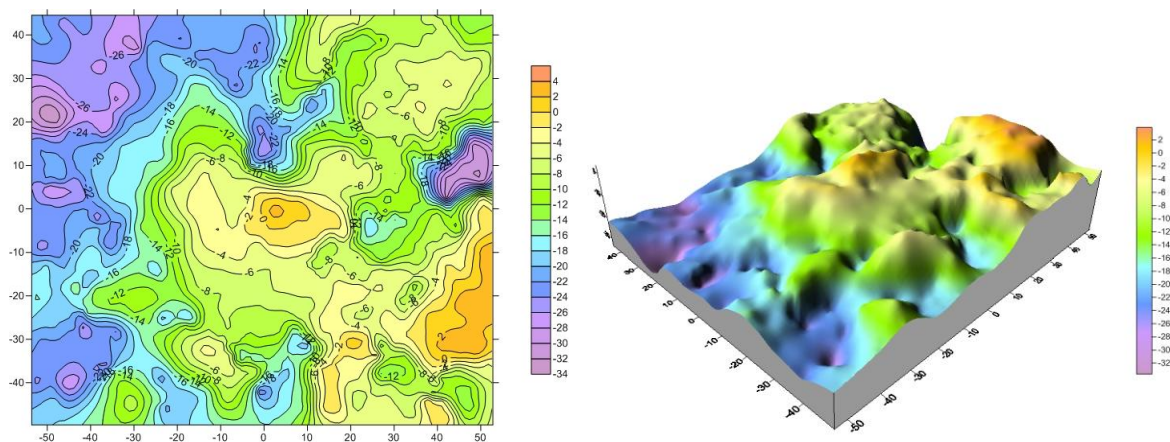
7	Сусідніх околів Nearest Neighbor	850	-1,8	2,4	0,014	0,27
		100	-3,6	3,6	-0,005	<b>1,18</b>
8	Радіальних базисних функцій RBF (Inverse Multiquadric)	850	-2,0	1,6	-0,007	0,53
		100	-2,2	1,5	0,035	0,71
9	Радіальних базисних функцій RBF (Multilog)	850	-1,4	1,4	-0,010	0,36
		100	-1,4	1,6	-0,079	0,73
10	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 інтерпол. (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) Modification Sheppard's Method	850	-1,4	1,1	-0,024	0,24
		100	-5,9	4,5	-0,420	<b>1,76</b>

Точність отримання висот точок мікроповерхні дослідних об'єктів залежить, насамперед, від збільшення РЕМ-зображення, кутів нахилу гоніометричного столика і точності вимірів, яка для цифрових РЕМ-зображень складає 0,09375 мм, тобто рівна розміру 1 пікселя цифрового зображення. Для умов РЕМ-знімання, які були під час отримання РЕМ-стереопар лесового ґрунту вона складає  $m_z \approx 1$  мкм. Жирним у таблиці 4.1.1. виділені результати моделювання, які гірші від допустимих.

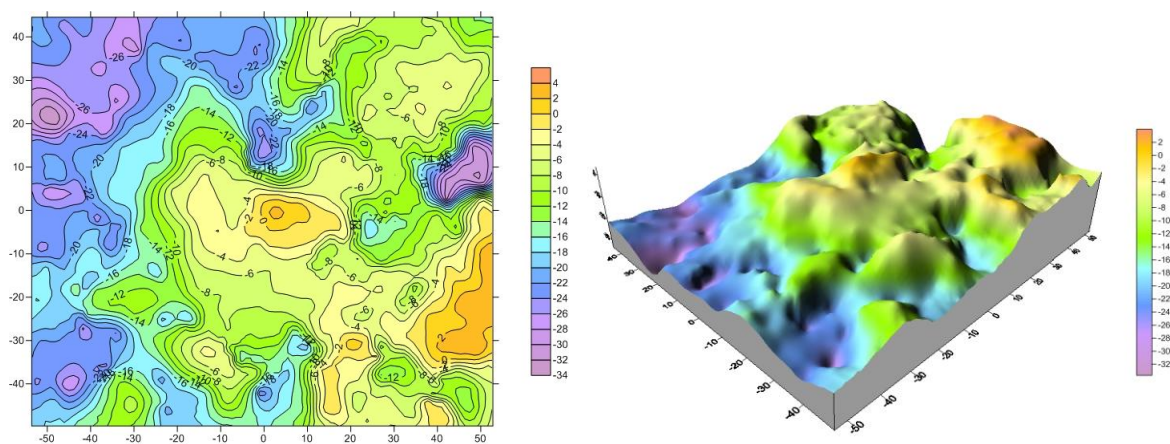
Нижче на рис. 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5 приведені приклади графічного представлення мікроповерхні лесового ґрунту у вигляді мікропланів та 3D моделей, побудованими різними математичними методами за вимірними точками з використанням програм пакету SURFER.



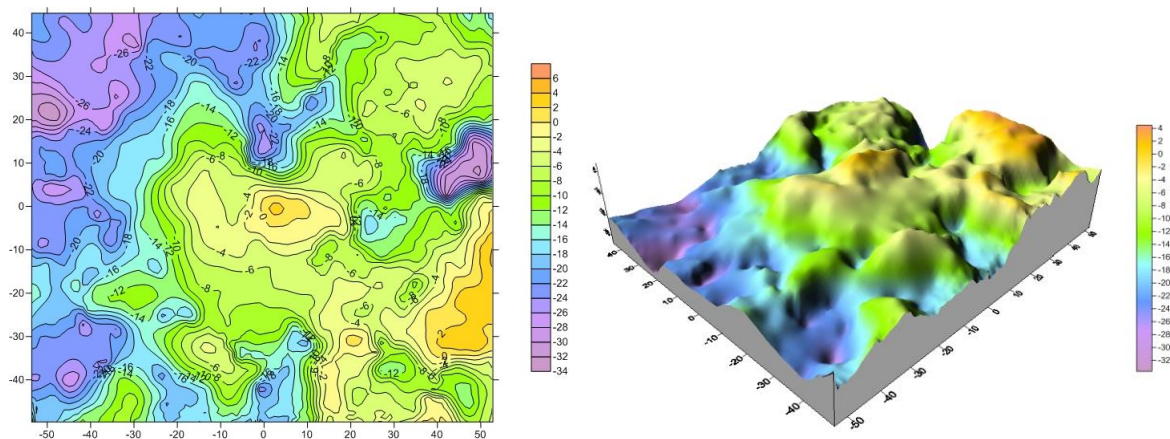
*а) обернено-пропорційний відстані у степені*



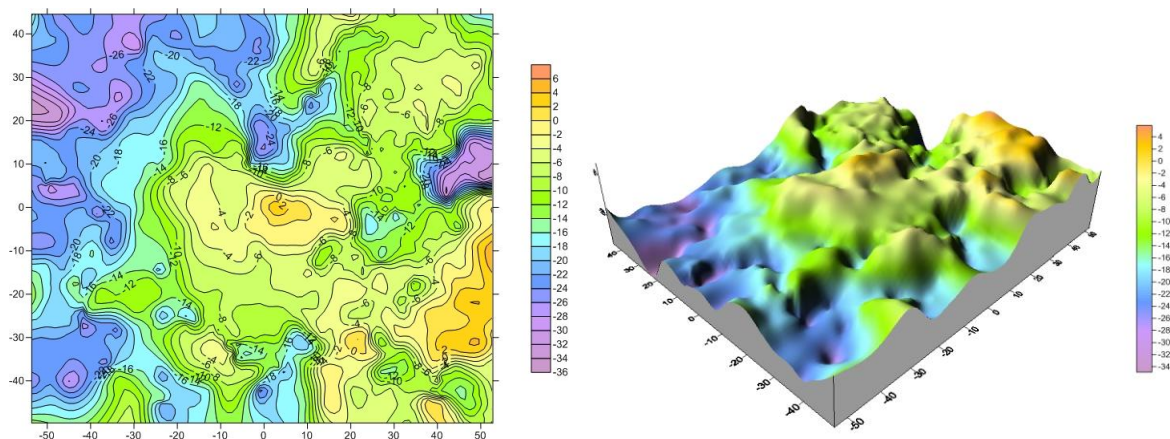
*б) Крігінга (лінійна варіограма)*



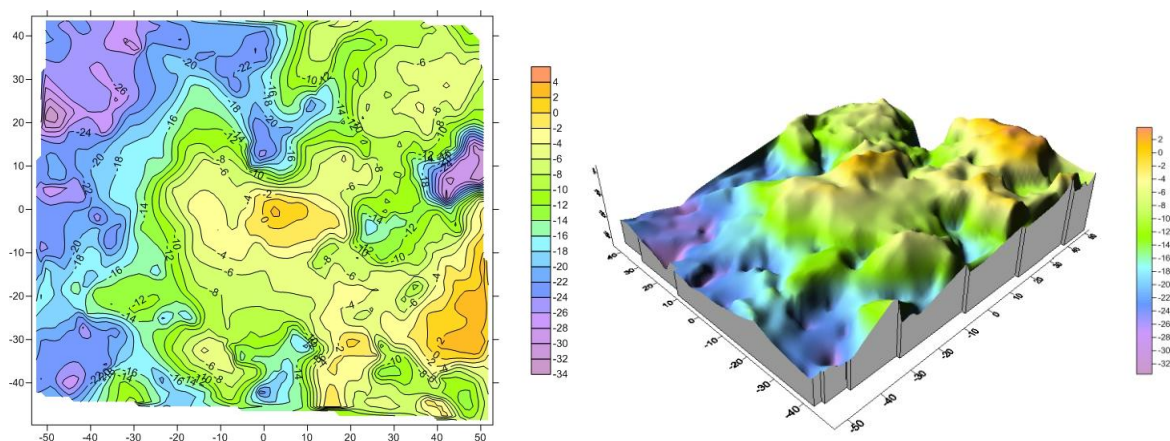
*в) Крігінга (лін. вар. + врах. лін. тренду)*



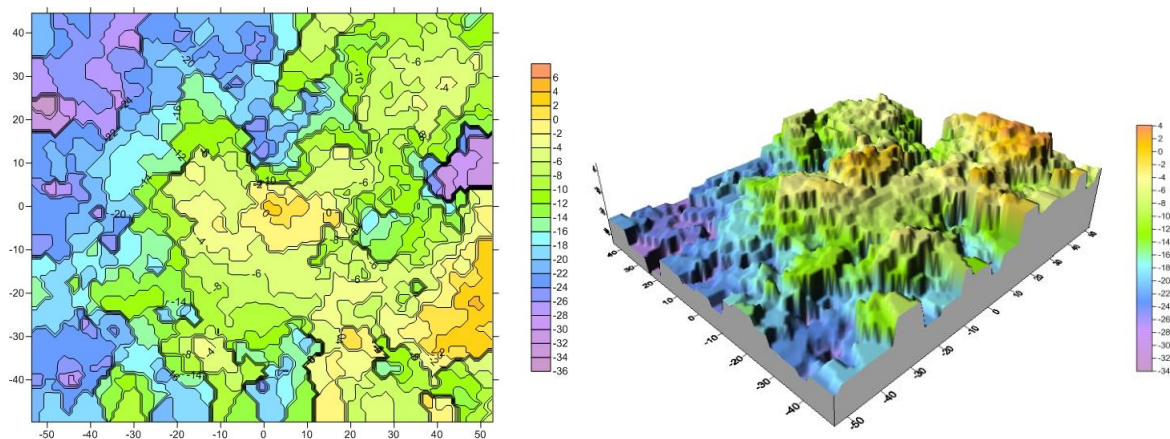
*г) Крігінга (лін. варіограма + врахування квадратичного тренду)*



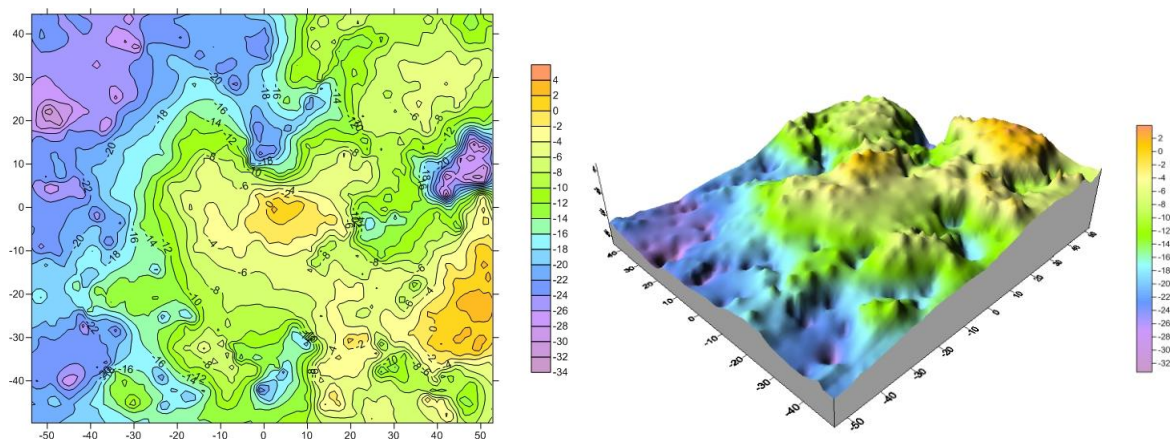
*г) мінімальної кривизни*



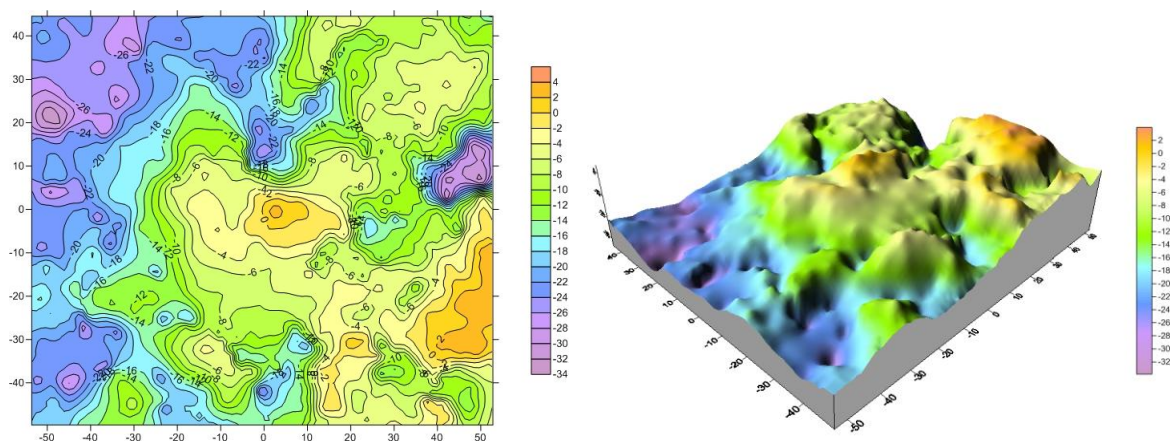
*д) природних околів*



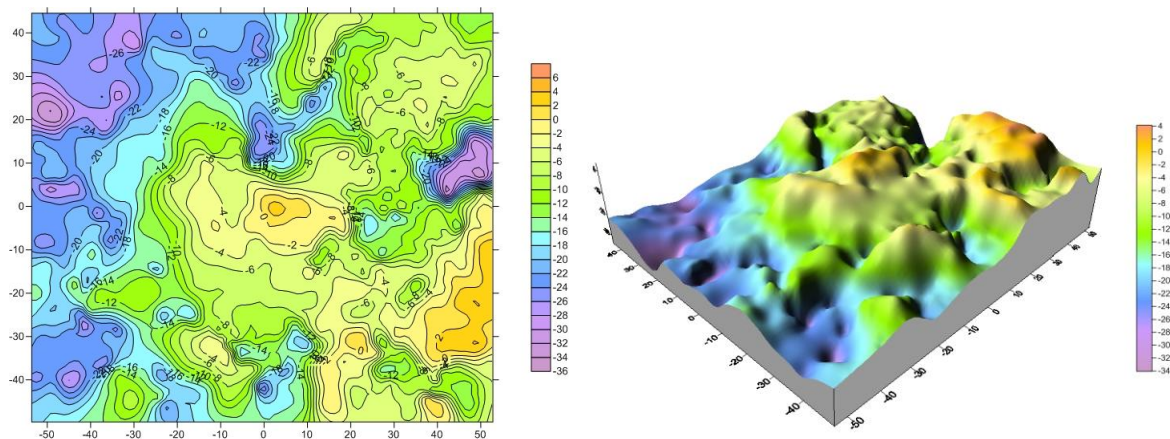
*е) сусідніх околів*



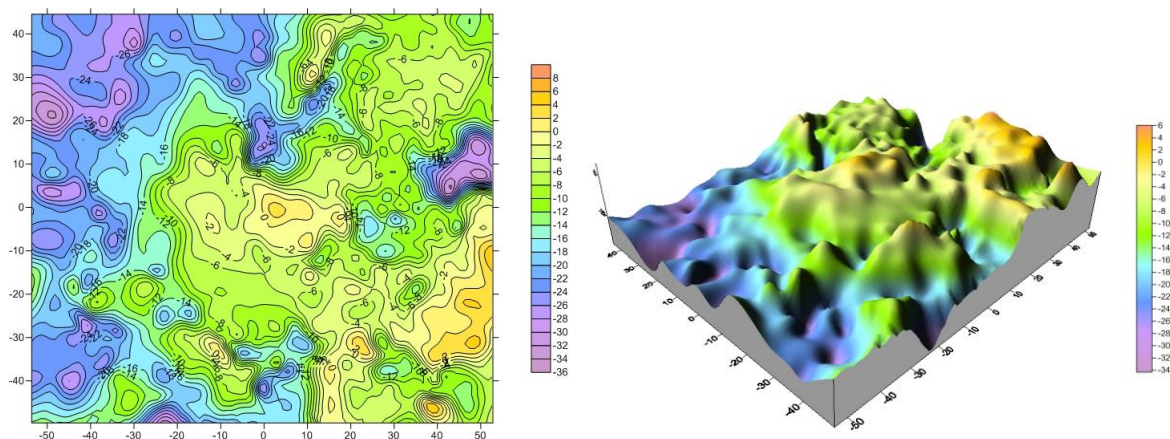
*є) радіальних базисних функцій (РБФ), зворотн. мультіквадр.*



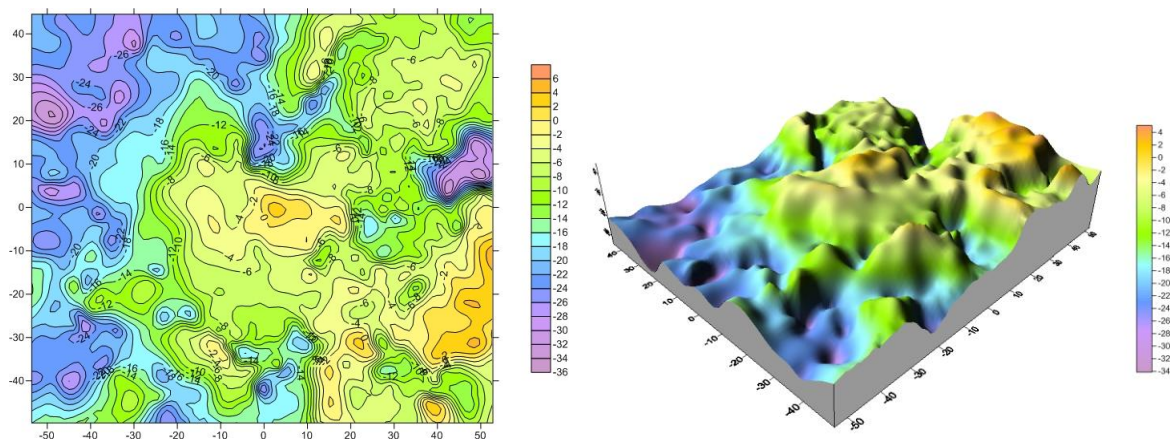
*ж) РБФ, мультилогарифмічний метод інтерполявання*



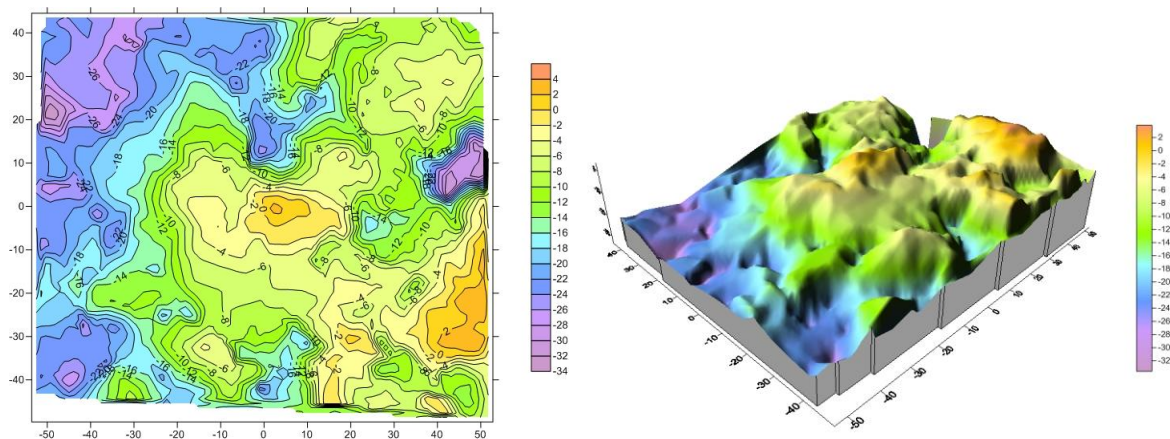
з) РБФ, мультиквадриковий метод



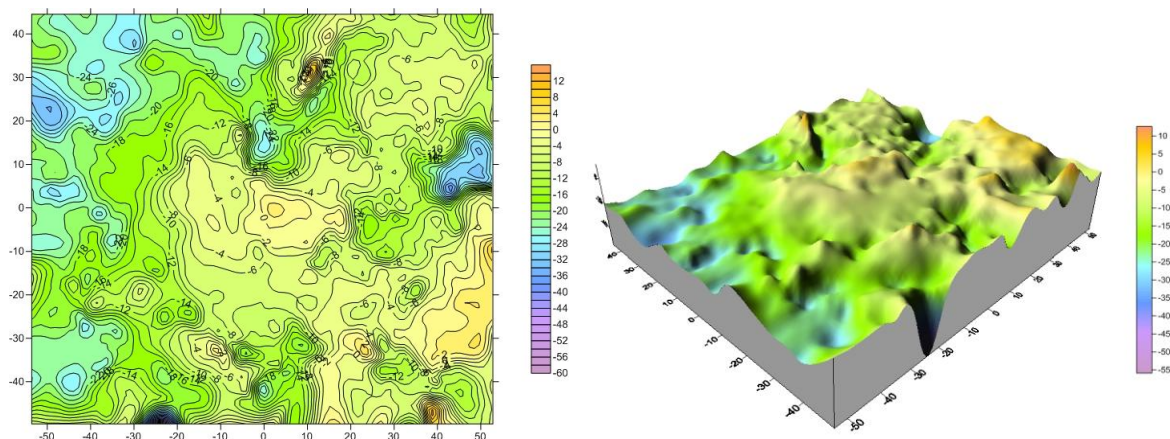
і) РБФ, метод кубічного сплайну



й) РБФ, метод тонкого пластинчастого сплайну

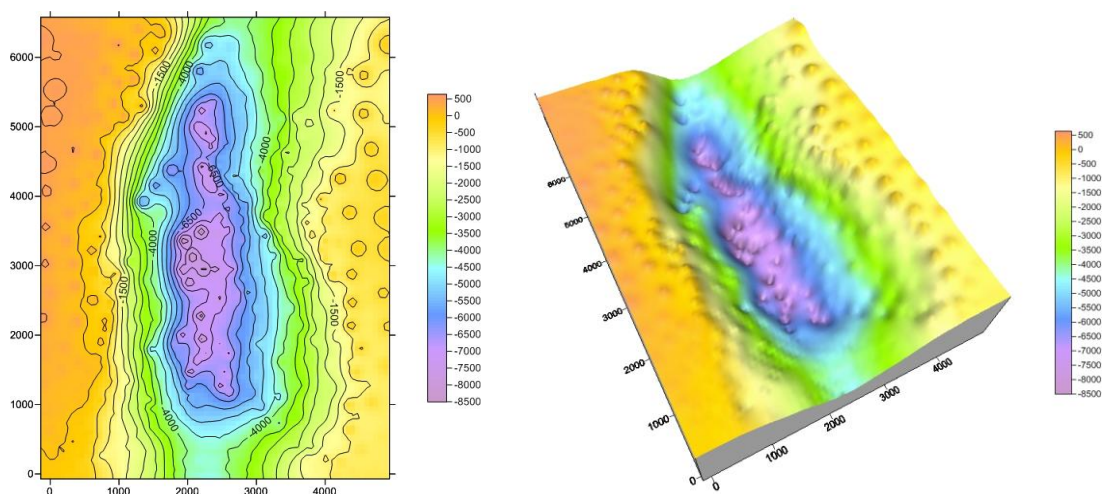


к) триангуляції з лінійною інтерполяцією



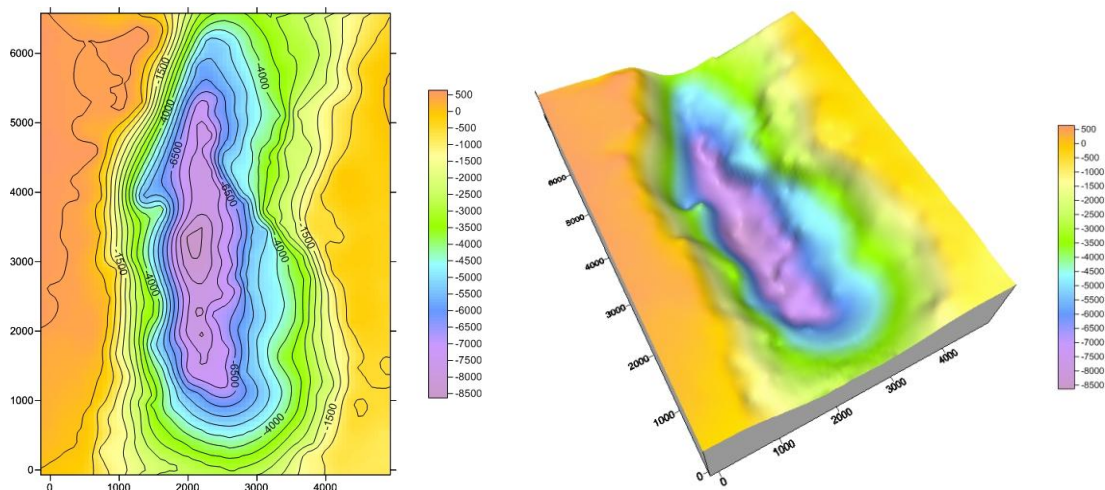
л) Шепарда (модифікований)

Рис. 4.1.3. Приклади графічного представлення мікроповерхні лесового ґрунту у вигляді мікропланів та 3D моделей, побудованими різними математичними методами за 850 вимірними точками

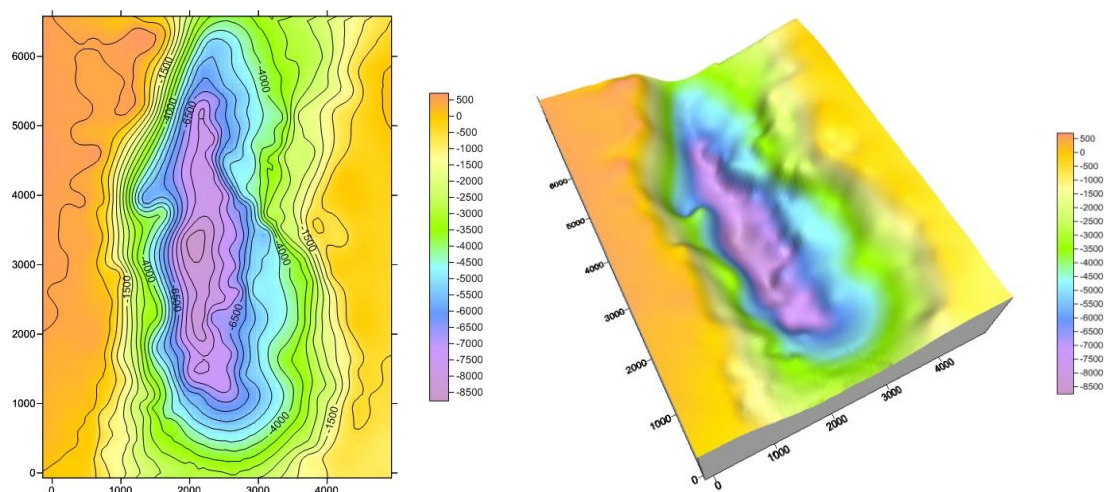


а) обернено-пропорційний відстані у степені

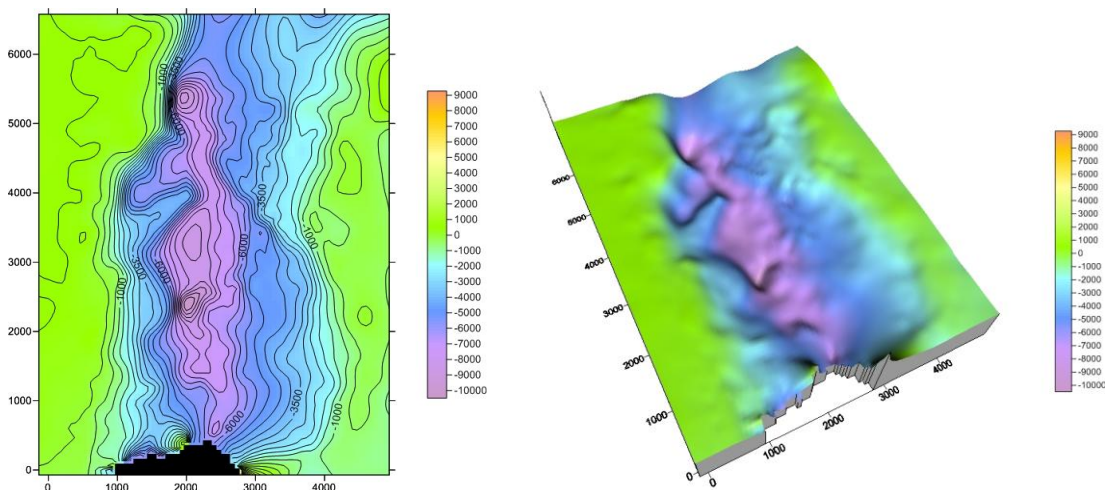




*б) Крітінга (лінійна варіограма)*

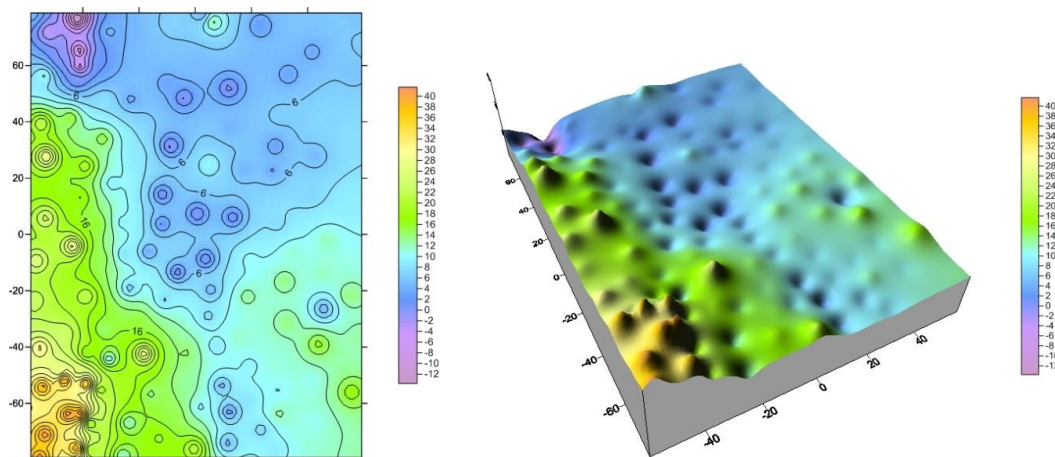


*в) РБФ, мультіквадриковий метод*

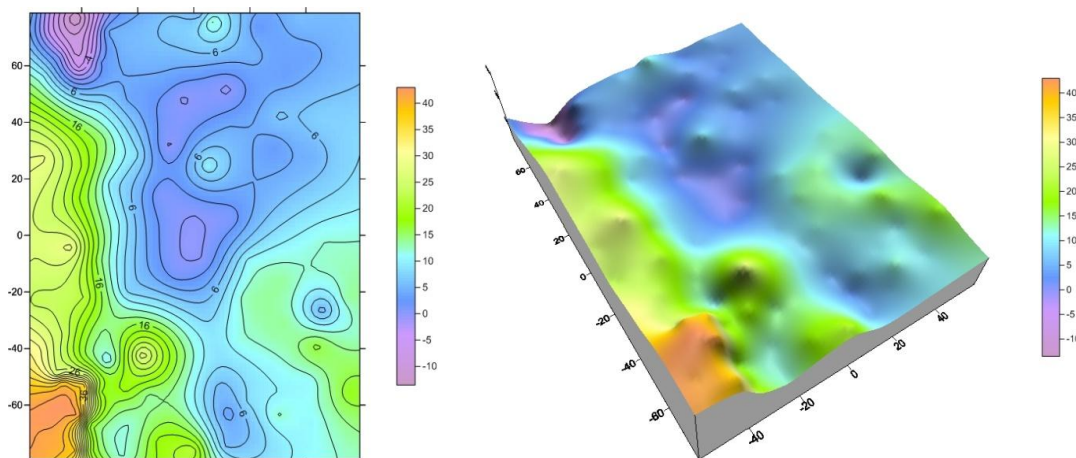


*г) Шепарда (модифікований)*

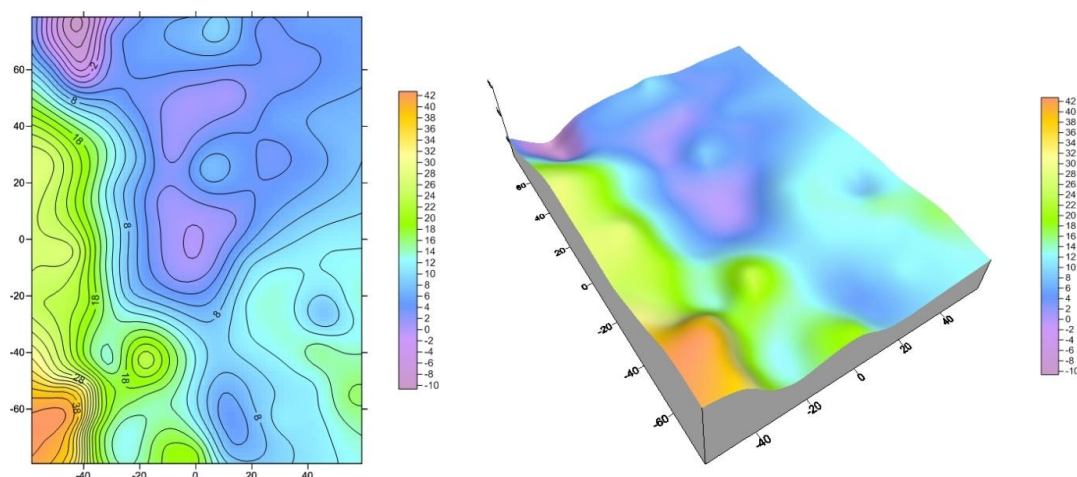
Рис.4.1.4. Приклади графічного представлення мікроповерхні зламу металу у вигляді мікропланів та 3D моделей, побудованими різними математичними методами за 450 вимірними точками



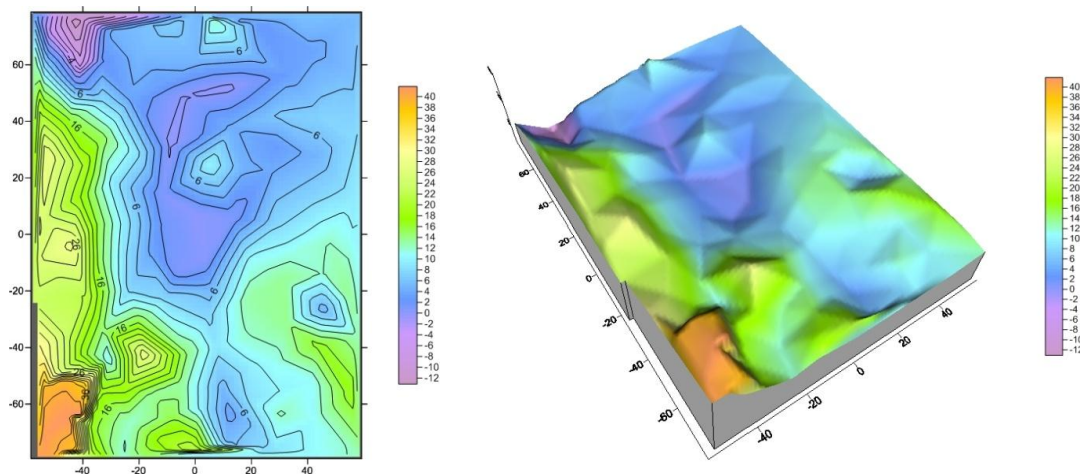
*а) обернено-пропорційний відстані у степені*



*б) Крігінга (лінійна варіограма)*



*в) РБФ, мультіквадриковий метод*



г) *триангуляції з лінійною інтерполяцією*

Рис. 4.1.5. 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 4.1.2.

Таблиця 4.1.2

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
1	Плоский, мікрорівнинний, перепад висот $\Delta h = \pm 2,5$ мкм	100	250	Радіальні базисні функції (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 Тріанг. з лін. інт.
4	Складний, мікрогористий, зі значними перепадами висот, $\Delta h = \pm 20$ мкм	800	2000	РБФ Крігінга Тріанг. 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 мм<sup>2</sup> РЕМ-знімка розміром 120x90 мм (1280x960 пікселів) або 500-3000 точок на весь знімок площею  $S=10800$  мм<sup>2</sup>, в залежності від складності мікрорельєфу поверхні об'єкта.

Узагальнені висновки за результатами досліджень приведені у підрозділі 4.3.

4.2. Дослідження методики автоматизованої побудови цифрової моделі мікрорельєфу поверхні об'єкта за стереопарою цифрових РЕМ-зображень

#### 4.2.1. Загальний опис досліджуваних моделей

Цифрова модель мікрорельєфу (ЦММР) поверхні об'єкта створювалась шляхом опрацювання цифрових РЕМ - стереопар із заданими характеристиками. Для дослідження впливу параметрів, які використані під час кореляційного ототожнення та оцінки точності при побудові ЦММР використано *тестову модель* фрагменту мікроповерхні хромованої сталі, яка побудована в пакеті Surfer за результатами вимірів РЕМ-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, а відповідні точки правого знімка знаходились за кореляційним підходом. Оцінка точності та усунення викидів виконувалось способом аналогічним для моделі 2.

Процес побудови тестової моделі та моделей 1-3 складався із таких основних етапів:

1. Тестова модель:

- вимірювання стереопари РЕМ-зображень за програмою «Dimicros»;
- визначення просторових координат точок мікроповерхні об'єкта за даними вимірювань;
- побудова регулярної сітки (grid) та візуалізація моделі у пакеті Surfer.

2. Модель 1:

- обчислення діапазону значень висот в залежності від значень поздовжнього паралаксу;
- завдання порогового значення коефіцієнта кореляції;
- вибір розмірів кореляційного вікна на лівому знімку;
- встановлення розмірів вікна пошуку на правому знімку;
- обчислення за координатами виміряних точок лівого знімка та кутом нахилу координат точок правого знімка (центрів пошукових вікон);
- пошук відповідних точок на правому знімку стереопари за кореляційним ототожненням;
- фільтрування точок, що не пройшли поріг кореляції;
- оцінка точності значень висот ЦММР поверхні об'єкта шляхом порівняння з тестовою моделлю;
- обчислення статистичних характеристик розбіжностей між побудованою та тестовою моделями у пакеті Surfer.

3. Модель 2:

- автоматичне розбиття на лівому знімку регулярної сітки з заданим кроком вздовж осі  $x$  ( $y$ ).

- використання багатовіконного кореляційного ототожнення для різних розмірів пошукових вікон та допусків для значень коефіцієнтів кореляції.

- (далі повторюються дії із п. 2).

4. Модель 3:

- генерування на лівому знімку РЕМ-стереопари точок за модулем градієнта.

Подальше опрацювання виконувалось аналогічно вищенаведеному для моделі 2.

Деталі програмної реалізації технології наведені в підрозділі 4.2.2.

4.2.2. Створення *тестової моделі* мікроповерхні дослідного об'єкта для дослідження автоматизованих методів побудови ЦММР

*Характеристика вхідних даних*

Вхідні дані.

Стереопара цифрових РЕМ-зображень хромованої сталі, які отримані за допомогою РЕМ JSM 7100F (JEOL).

Таблиця 4.2.1

Характеристики РЕМ-зображень

	лівий знімок	правий знімок
Імена файлів вхідних зображень	x_750L.bmp	x_750_kut_8L.bmp
Збільшення (масштаб)	750 крат	750 крат
Розміри зображення (пкс):	1024 x 1280	1024 x 1280
Розміри зображення (мм):	96x120	96x120
Розрізнявальна здатність (dpi)	270,94	270,94
Кут нахилу знімка (градус)	0°	8°
Формат запису файлів	BMP	BMP
Об'єм РЕМ-знімка, Мб	1,25	1,25

Розмір піксела становить 0,09375 мм, тобто приблизно 0,1 мм.

Надано коефіцієнти поліному третьої степені для обчислення величин геометричних спотворень  $\Delta x$  і  $\Delta y$ .

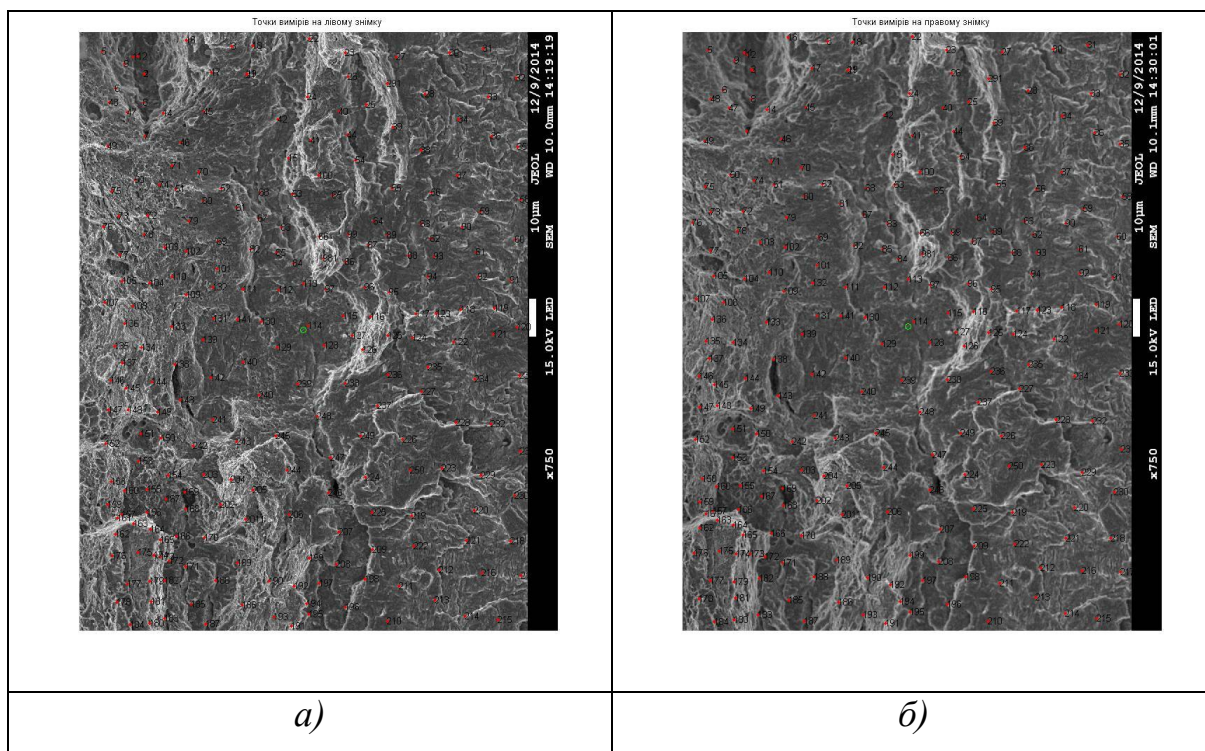


Рис. 4.2.1. Виміряні точки стереопари на лівому (а) та відповідні точки на правому (б) РЕМ-зображення зразка хромованої сталі при збільшенні  $750^{\times}$ . Кути нахилу лівого зображення  $0^{\circ}$ , правого -  $8^{\circ}$ .

На рис. 4.2.1. наведено стереопару РЕМ – зображень фрагменту мікроповерхні дослідного зразка хромованої сталі з нанесеними номерами вимірних точок.

Тестова цифрова модель мікроповерхні об'єкта побудована за даними вимірювань РЕМ-стереопари. Вимірювальні роботи виконувались за програмою «Dimicros» [62] у монокулярному режимі. На РЕМ-стереопарі вибирались характерні точки мікрорельєфу. Всього було виміряно 250 точок на лівому та відповідних їм точок на правому зображенні в системі координат РЕМ-знімка (рис. 4.2.1).



Система координат РЕМ-знімка: початок системи координат в геометричному центрі знімка; додатна вісь  $x$  спрямована зліва направо; додатна вісь  $Y$  спрямована знизу догори; одиниці вимірів – мм.

*Перший етап: перетворення вимірів із мм у піксели*

Перехід у систему координат зображення, де початок координат у верхньому лівому куті зображення; додатна вісь  $x$  спрямована зліва направо; додатна вісь  $y$  спрямована зверху донизу; одиниці вимірів – піксели.

Формули перетворення координат точок із мм у піксели:

$$x_{лріх} = x_{Олріх} + x_{лмм} \cdot r_{ріхмм},$$

$$y_{лріх} = y_{Олріх} - y_{лмм} \cdot r_{ріхмм},$$

$$x_{нріх} = x_{Онріх} + (x_{лмм} - p_{мм}) \cdot r_{ріхмм},$$

$$y_{нріх} = y_{Онріх} + (y_{лмм} - q_{мм}) \cdot r_{ріхмм},$$

де  $x_{Олріх}, y_{Олріх}$  ( $x_{Онріх}, y_{Онріх}$ ) - координати центральної точки  $O$  на лівому (правому) знімку в пікселях;  $r_{ріхмм}$  - кількість пікселів на мм (для РЕМ JSM 7100F  $r_{ріхмм}=270,94/25,4=10,67$ );  $x_{лмм}$  ( $y_{лмм}$ ) – координати вимірюваних точок на лівому знімку в мм;  $x_{нмм}$  ( $y_{нмм}$ ) – координати вимірюваних точок на правому знімку в мм;  $x_{лріх}$  ( $y_{лріх}$ ) – координати точок на лівому знімку в пікселях;  $x_{нріх}$  ( $y_{нріх}$ ) – координати точок на правому знімку в пікселях;  $p_{мм}$  – поздовжній паралакс в пікселях;  $q_{мм}$  – поперечний паралакс в пікселях.

В результаті у файл записано номери точок та їх координати в пікселях на лівому та правому зображеннях.

*Примітка.* Якщо вимірювання координат точок виконувалось безпосередньо в пікселях, то перетворення вимірів із мм у піксели може бути опущено.

*Перехід від системи координат зображення в систему координат знімка*

На *другому етапі* виконуємо перехід від системи координат зображення в систему координат знімка (перетворення вимірів із пікселів в міліметри). *Система координат РЕМ-знімка:* початок системи координат в геометричному центрі знімка; додатна вісь  $x$  спрямована зліва направо; додатна вісь  $y$  спрямована знизу догори; одиниці вимірів – мм.

Розмір пікселя в мм для JSM 7100F:

$$r_{мм} = 0,09375.$$

Координати центральної точки  $O$  на лівому знімку (в пікселях):

$$x_{Oл\ pix} = 480,0, \quad y_{Oл\ pix} = 638,2.$$

Координати точки  $O$  на правому знімку (в пікселях):

$$x_{Oп\ pix} = 483,0, \quad y_{Oп\ pix} = 630,0.$$

Обчислення виконувались в системі MatLab. Послідовність обчислень наступна:

1. Перетворення вимірів із пікселів в мм:

$$\left. \begin{aligned} x_{лмм} &= (x_{л\ pix} - x_{Oл\ pix}) \cdot r_{мм}; \\ y_{лмм} &= (y_{л\ pix} - y_{Oл\ pix}) \cdot r_{мм}; \\ p_{мм} &= x_{лмм} - (x_{п\ pix} - x_{Oп\ pix}) \cdot r_{мм}; \\ q_{мм} &= y_{лмм} - (y_{п\ pix} - y_{Oп\ pix}) \cdot r_{мм}; \\ x_{пмм} &= (x_{лмм} - p_{мм}); \\ y_{пмм} &= (y_{лмм} - q_{мм}). \end{aligned} \right\} \quad (4.2.1)$$

У формулах (4.2.1)  $x_{л\ мм}$  ( $y_{л\ мм}$ ) – перетворені координати вимірних точок на лівому знімку в мм;  $x_{п\ мм}$  ( $y_{п\ мм}$ ) – перетворені координати

виміряних точок на правому знімку в мм;  $x_{l \text{ pix}} (y_{l \text{ pix}})$  – координати виміряних точок на лівому знімку в пікселях;  $x_n \text{ pix} (y_n \text{ pix})$  – координати виміряних точок на правому знімку в пікселях;  $p_{mm}$  – поздовжній паралакс в пікселях;  $q_{mm}$  – поперечний паралакс в пікселях;

2. Запис у файл координат, перетворених із пікселів в мм.

*Визначення просторових координат точок мікроповерхні об'єкта*

На *третьому етапі* для нормально-конвергентного випадку РЕМ-знімання ( $\alpha_n = 0^\circ$ ,  $\alpha_n \neq 0^\circ$ ) отримаємо просторові координати точок мікроповерхні за формулами (2.12):

$$\begin{aligned} X &= \frac{x_l^0 \cdot 10^3}{M_x}; \\ Y &= \frac{y_l^0 \cdot 10^3}{M_y}; \\ Z(h) &= \frac{x_l^0 \cdot (1 - \cos \alpha_n) + \Delta p_x^0 \cdot 10^3}{M_x \cdot \sin \alpha_n}. \end{aligned}$$

У формулах (2.12):

$$\left. \begin{aligned} x_l^o &= x_{l_{\text{вим}}}^o - \Delta x_l, & \Delta p_{x_i}^o &= p_{x_i}^o - p_o, \\ y_l^o &= y_{l_{\text{вим}}}^o - \Delta y_l, & p_{x_i}^o &= x_{x_i}^o - x_{i_n}^o. \end{aligned} \right\} \quad (4.2.2)$$

Величини геометричних спотворень  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  визначаємо за поліномом загального виду двох змінних третьої степені:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_l &= a_0 + a_1 x_l + a_2 y_l + a_3 x_l y_l + a_4 x_l^2 + a_5 y_l^2 + a_6 x_l^3 + a_7 x_l^2 y_l + a_8 x_l y_l^2 + a_9 y_l^3; \\ \Delta y_l &= b_0 + b_1 x_l + b_2 y_l + b_3 x_l y_l + b_4 x_l^2 + b_5 y_l^2 + b_6 x_l^3 + b_7 x_l^2 y_l + b_8 x_l y_l^2 + b_9 y_l^3. \end{aligned} \right\} \quad (4.2.3)$$

У формулах (2.12):  $X$ ,  $Y$ ,  $Z(h)$  – просторові координати точок мікроповерхні, мкм;  $x_{l_{\text{вим}}}$ ,  $y_{l_{\text{вим}}}$  – перетворені із пікселів в мм координати точок на лівому РЕМ-знімку, виміряні монокулярно в програмі «Dimicros».  $x_l^o, y_l^o$  – виправлені за геометричні спотворення  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  координати точок на лівому РЕМ-знімку, мм;  $a_i$ ,  $b_i$  – коефіцієнти

полінома (4.2.6) ( $i=0,1,2,\dots,9$ );  $\Delta p_x^o$  - різниця паралаксів  $i$ -ої точки  $p_x^o$  і початкової (центральної) точки РЕМ-знімка  $p_o$ , мм;  $M_x, M_y$  – збільшення (крат) або масштаб вздовж осей  $x$  і  $y$ ;  $\alpha_l, \alpha_n$  - кути нахилу гоніометричного столика навколо осі  $Y$  (вздовж осі  $X$ ) під час отримання правого знімка стереопари.

За вищенаведеним алгоритмом к.т.н. Тумською О.В. складена програма у середовищі MatLab. Результатом роботи програми є масив просторових координат точок мікроповерхні об'єкта  $X, Y, Z$  та їх номери.

Системи координат РЕМ-знімка і об'єкта тут суміщені і ним є геометричний центр знімка та відповідна точка на поверхні об'єкта, що відобразилась на знімку; одиниці вимірів – мкм.

Послідовність обчислення координат точок об'єкта в програмі наступна:

1. Введення файлу координат (в мм) точок лівого та правого знімків.
2. Обчислення величин геометричних спотворень  $\Delta x_n, \Delta y_n$  за (4.3.3).
3. Внесення поправок за дисторсію в координати (мм) лівого  $x_{l\_мм} (y_{l\_мм})$  та правого  $x_{n\_мм} (y_{n\_мм})$  знімків (4.3.2).
4. Обчислення координат точок об'єкта з поправками за дисторсію (2.12).
5. Масштабування (множення просторових координат  $X, Y, Z$  на масштабний множник  $K_M=7,5$ ).
6. Запис у файл просторових координат точок об'єкта та їх номерів.

Побудова цифрової тестової моделі мікроповерхні об'єкта за обчисленими просторовими координатами точок мікроповерхні об'єкта виконувалась в пакеті Surfer.

*Характеристики побудованої тестової моделі мікроповерхні об'єкта*

Тестова модель мікроповерхні об'єкта побудована в пакеті Surfer.

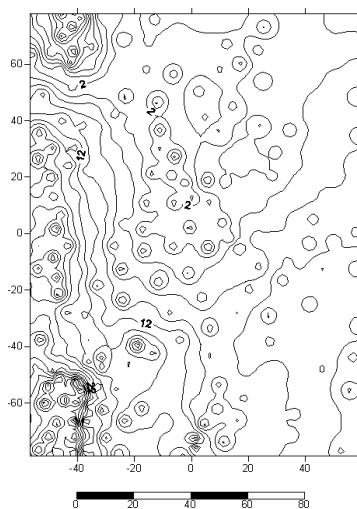
Метод побудови ЦММР поверхні об'єкта: обернено-пропорційний квадрату відстані (Inverse Distance to a Power).

Характеристики побудованої ЦММР поверхні об'єкта подано у таблиці 4.2.2. На рис. 4.2.2 подано результати моделювання мікроповерхні зразка хромованої сталі в горизонталях та у вигляді 3D моделі.

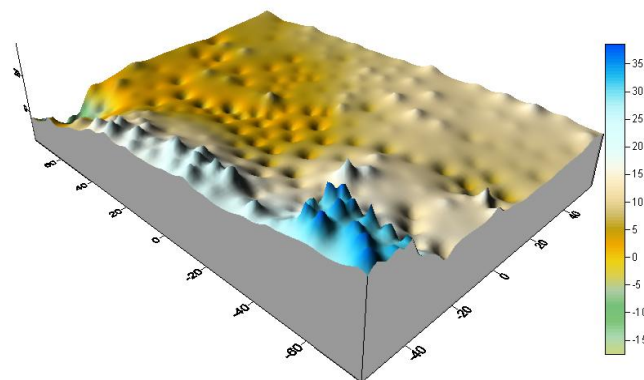
Таблиця 4.2.2

Характеристики тестової цифрової моделі мікроповерхні об'єкта  
(зразка сталі)

Розмір сітки (grid size):	100 рядків x 74 стовпця
Кількість вузлів:	7400
Геометричні характеристики сітки, мкм :	
$X_{min}$ , мкм	-56,7
$X_{max}$ , мкм	58,4
$\Delta X$ (інтервал), мкм	1,6
$Y_{min}$ , мкм	-78,7
$Y_{max}$ , мкм	77,4
$\Delta Y$ (інтервал), мкм	1,6
$Z_{min}$ , мкм	-14,1
$Z_{max}$ , мкм	40,1



а)



б)

Рис. 4.2.2. Мікрорельєф поверхні зразка хромованої сталі в горизонталях (а); 3D модель мікроповерхні хромованої сталі (б).

Масштаб  $750^{\times}$ , горизонталі проведені через 2 мкм

В подальшому тестова модель використовувалась для оцінки точності моделей 1 – 3.

4.2.3. Автоматизована побудова цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за даними вимірювань точок лівого знімка та знайденими кореляційним способом відповідними точками правого знімка стереопари (*модель 1*)

Для точок лівого знімка, які виміряні в характерних місцях мікроповерхні, визначено за кореляцією відповідні точки правого знімка.

Послідовність визначення просторових координат точок у моделі 1 наступна:

- вводимо блок вхідних даних:
  - розрізнявальну здатність зображення;
  - кут нахилу правого знімка;
  - збільшення (масштаб) зображення;
  - допуск для коефіцієнта кореляції;
  - розміри кореляційного вікна;
  - розміри пошукового вікна;
  - введення вимірних координат точок лівого зображення РЕМ-стереопари (в пікселях).
- вводимо блок зображень та виконуємо їх візуалізацію:
  - введення лівого зображення;
  - виведення точок вимірів на лівий знімок;
  - введення правого зображення;
  - обчислення за кутом нахилу значення координати  $x$  центра пошукового вікна на правому зображенні;
  - усунення інформаційної смуги на лівому (правому) зображенні;

- поширення лівого зображення на половину горизонтального розміру кореляційного вікна;
- поширення правого зображення на половину суми горизонтального розміру пошукового та кореляційного вікон;
- заповнення кореляційного вікна значеннями яскравостей навколо вимірної точки, вимірної на лівому зображенні.
- вводимо блок обчислення кореляції:
  - обчислення коефіцієнта кореляції між кореляційним вікном та відповідним вікном на правому зображенні, що рухається від пікселя до пікселя у пошуковому вікні;
  - визначення максимального значення коефіцієнта кореляції серед масиву значень, обчислених у пошуковому вікні;
  - визначення координат  $(x_n, y_n)$  відповідної точки на правому зображенні (геометричний центр вікна з максимальним значенням коефіцієнта кореляції).
- вводимо блок визначення просторових координат:
  - перетворення координат  $(x_l, y_l, x_n, y_n)$  із пікселів в мм;
  - обчислення величин геометричних спотворень;
  - виправлення координат  $(x_l, y_l, x_n, y_n)$  за дисторсію;
  - обчислення просторових координат  $(X, Y, Z)$  точок мікроповерхні об'єкта в мкм;
  - обчислення середніх значень та СКП різниць  $\Delta Z = Z_{\text{вим}} - Z_{\text{кор}}$ ;
  - запис результатів у файл.

Обчислення координат  $x, y$  (в пікселях) центра пошукового вікна на правому знімку виконувалось за формулами:

$$\left. \begin{aligned} x_{npix} &= \text{round}(x_{лpix} - x_{Oлpix}) \cdot \cos \alpha_n + x_{Oнpix} + c_x \\ y_{npix} &= \text{round}(y_{лpix} - y_{Oлpix}) + y_{Oнpix} + c_y \end{aligned} \right\}, \quad (4.2.4)$$

де операція  $\text{round}(\dots)$  означає заокруглення виразу в дужках до найближчого цілого;  $c_x$  ( $c_y$ ) – величина, на яку поширюється праве зображення (в пікселях) по  $x$  ( $y$ ) для можливості знаходження відповідних точок для крайніх точок, розташованих на краях зображення.

Обчислення нормованого коефіцієнта кореляції виконувалось за формулою:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w_{i,j} - \bar{w})(w'_{i,j} - \bar{w}')}{\left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w_{i,j} - \bar{w})^2 \right]^{1/2} \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w'_{i,j} - \bar{w}')^2 \right]^{1/2}}, \quad (4.2.5)$$

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 визначається між кореляційним вікном на лівому зображенні та відповідним вікном, локалізованим у кожному пікселі пошукового вікна на правому зображенні. З метою прискорення обчислень визначаємо квадрат коефіцієнта кореляції.

Важливим параметром успішного виконання кореляційного ототожнення є правильний підбір розміру пошукового вікна. Якщо порогове значення коефіцієнта кореляції визначається розміром та яскравісними властивостями кореляційного вікна [30], то 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 (2.12) визначимо очікуваний горизонтальний розмір вікна-пошуку для відповідного діапазону значень висот (табл. 4.2.3).

Таблиця 4.2.3

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 (масштаб знімання $750^x$ )
Кути нахилу знімків $\alpha_l = 0^\circ$ , $\alpha_n = 8^\circ$			
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 буде приблизно в 2 рази більше ніж верхня границя паралаксу у вибраному діапазоні. Вертикальний розмір вікна пошуку вибираємо в діапазоні 11-25 пікселів, так як зміщення вздовж осі  $y$  під час нахилу правого знімка, як правило, незначні. Горизонтальні та вертикальні розміри кореляційного вікна та вікна пошуку задаємо непарні, щоб існувала центральна точка вікна, до якої відноситься коефіцієнт кореляції.

#### *Оцінка точності побудованої мікроповерхні об'єкта (модель 1)*

Для моделі 1 для 250-ти вимірних точок на лівому знімку за кореляцією визначено відповідні точки на правому знімку. Оцінку точності (табл. 4.2.4) виконано 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 4.2.4

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

Параметри моделі 1		Масштаб знімання 750 <sup>x</sup> ; кути нахилу знімків: $\alpha_n = 0^\circ$ , $\alpha_n = 8^\circ$ , кількість вимірних точок: 250					
№ П/П	Розмір корел. вікна, пкс (лівий знімок)	Розмір вікна пошуку, пкс (правий знімок)	К-сть точок, для яких $r_{кор} \geq R_c$ $n$ (%)	Середні значення, мкм $\Delta Z = Z_{вим} - Z_{кор}$	СКВ $m_{1\Delta Z}$ , 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 4.2.4 показує, що основна кількість точок, у яких висоти містяться в межах від -5 до 20 мкм розпізнаються за пошуковим вікном 41x15 (71-88%). Точки, які мають висоти більше ніж 20 мкм, краще розпізнаються за пошуковими вікнами 81x17 та 131x21. У таблиці 4.2.5 наведено результати порівняння тестової моделі та моделі для різних розмірів вікон-пошуку та різних значень допуску коефіцієнта кореляції.

Таблиця 4.2.5

Порівняння *тестової моделі* та *моделі 1* для різних розмірів вікон-пошуку

Параметри	Масштаб (збільшення) 750 <sup>x</sup> . Кореляційне вікно 17x9, вікно пошуку 41x15 пкс, к-сть вимірних точок N=250					
	$R_C < 0,7$	$R_C \geq 0,7$	$R_C < 0,75$	$R_C \geq 0,75$	$R_C < 0,8$	$R_C \geq 0,8$
$N$ (%)	72 (28,8)	178 (71,2)	85 (34)	165 (66)	116(46,4)	134 (53,6)
$Z_1 \div Z_2$ МКМ	-18÷40	-18÷40	-18÷40	-17÷20	-18÷40	-17÷20
$\Delta Z_1 \div \Delta Z_2$ МКМ	-3,6÷62,8	-3,6÷34,0	-3,6÷62,8	-3,6÷62,8	-3,6÷62,8	-3,6÷1,8
$m_{\Delta Z}$ МКМ	18,9	3,7	19,3	<b>1,3</b>	18,8	<b>1,0</b>
Кореляційне вікно 17x9, вікно пошуку 81x17, пкс						
$R_C$	$R_C < 0,7$	$R_C \geq 0,7$	$R_C < 0,75$	$R_C \geq 0,75$	$R_C < 0,7$	$R_C \geq 0,8$
$N$ (%)	38 (15,2)	212 (84,8)	54 (21,6)	196 (78,4)	95 (38)	155 (62)
$Z_1 \div Z_2$	-18÷40	-18÷40	-18÷40	-17÷40	-18÷40	-17÷20
$\Delta Z_1 \div \Delta Z_2$	-27,0÷73,6	-6,3÷30,4	-27,0÷73,6	-6,3÷30,4	-27,0÷73,6	-3,6÷1,8
$m_{\Delta Z}$ МКМ	22,2	3,1	19,2	3,1	15,3	<b>0,9</b>
Кореляційне вікно 17x9, вікно пошуку 131x21, пкс						
$R_C$	$R_C < 0,7$	$R_C \geq 0,7$	$R_C < 0,75$	$R_C \geq 0,75$	$R_C < 0,8$	$R_C \geq 0,8$
$N$ (%)	30 (12)	220 (88)	46 (18,4)	204 (81,6)	86 (34,4)	164 (65,6)
$Z_1 \div Z_2$	-18÷39	-18÷40	-18÷39	-18÷40	-18÷39	-18÷40
$\Delta Z_1 \div \Delta Z_2$	-25,1÷73,6	-67,4÷69,1	-25,1÷73,6	-67,4÷69,1	-52,1÷73,6	-67,4÷69,1
$m_{\Delta Z}$ МКМ	19,6	9,8	15,9	10,0	14,5	9,4

Із даних таблиці 4.2.5 випливає, що при збільшенні значення кореляційного порогу  $R_C$  залишаються точки, що належать ділянкам з меншим перепадом висот. (Діапазон значень висот визначався за даними тестової моделі). Збільшення розміру пошукового вікна призводить до зменшення кількості точок, що відфільтровується за пороговим значенням коефіцієнта кореляції. Поряд з тим збільшуються величини розходжень за висотами між тестовими значеннями і знайденими кореляційним шляхом. Нами запропоновано використовувати

послідовність вікон-пошуку із зростаючою кількістю пікселів. Кореляційні вікна вибрані одного розміру 17x9 (більше ніж 100 пікселів), що дозволяє впевнено обчислювати значення коефіцієнту кореляції [Тумська, Процик, Янчак, [188], Горбачев [33]]. Результати об'єднання вікон 41x15 і 81x17, 41x15 і 131x21 та 41x15, 81x17 і 131x21 подано у табл. 4.2.6.

Таблиця 4.2.6

Порівняння *тестової моделі* та *моделі I* для об'єднаних вікон-пошуку

Параметри	Об'єднані вікна 41x15 і 81x17, кореляційне вікно 17x9		Об'єднані вікна 41x15 і 131x21, кореляційне вікно 17x9	
	$R_C < 0,7$	$R_C \geq 0,7$	$R_C < 0,7$	$R_C \geq 0,7$
$N$ (%)	38 (15,2)	212 (84,8)	31 (12,4)	219 (87,8)
$Z_1 \div Z_2$	-18÷40	-18÷40	-18÷39	-18÷40
$\Delta Z_1 \div \Delta Z_2$	-26,9÷73,6	-6,3÷34,0	-25,2÷73,6	-34,2÷34,0
$m_{\Delta Z-МКМ}$	22,2	3,6	19,6	4,2
	Об'єднані вікна 41x15, 81x17 і 131x21 кореляційне вікно 17x9			
	$R_C < 0,7$		$R_C \geq 0,7$	
$N$ (%)	30 (12,0)		220 (88,0)	
$Z_1 \div Z_2$	-18÷39		-18÷40	
$\Delta Z_1 \div \Delta Z_2$	-26,9÷73,6		-6,3÷34,0	
$m_{\Delta Z-МКМ}$	19,3		3,5	

Схема об'єднання наступна: спочатку обчислюємо коефіцієнт кореляції по всіх точках за вікном-пошуку меншого розміру; на наступний етап передаємо точки, що не задовольняють заданому допуску кореляції (якщо такі існують), для яких знову обчислюємо коефіцієнт кореляції за вікном-пошуку більшого розміру; результати обчислень об'єднуємо. Точки, що не пройшли поріг кореляції для вікна-пошуку більшого розміру або передаються на наступний етап, або відфільтровуються, якщо цей етап останній. Таким чином, зменшується

час роботи програми і збільшується кількість точок, які задовольнили кореляційний критерій.

Порівняння даних таблиць 4.2.5 та 4.2.6 виявляє зміни статистичних характеристик між окремими і об'єднаними вікнами. Для об'єднаних вікон 41x15 і 81x17 пкс:

- кількість точок для  $R_C \geq 0,7$  є 212 (для 41x15 пкс було 178 точок, для 81x17 пкс - 212);
- значення відхилень  $\Delta Z_1 \div \Delta Z_2$  є в межах  $-6,3 \div 34,0$  мкм (нижня межа така як для вікна 41x15, а верхня – як для вікна 81x17);
- нове значення СКВ  $m_{\Delta Z 41x15/81x17} = 3,6$  мало відрізняється від значень для окремих вікон ( $m_{\Delta Z 41x15} = 3,7$ ,  $m_{\Delta Z 81x17} = 3,1$ ).

Для об'єднаних вікон 41x15 і 131x21 пкс:

- кількість точок для  $R_C \geq 0,7$  є 219 (для 41x15 є 178 точок, для 131x21 - 220);
- значення відхилень  $\Delta Z_1 \div \Delta Z_2$  для вікон в межах  $-34,2 \div 34,0$  мкм, замість меж для вікна 41x15 пкс -  $-3,6 \div 34,0$  мкм та для вікна 131x21 пкс -  $-67,4 \div 69,1$  мкм.
- нове значення СКВ  $m_{\Delta Z 41x15/131x21} = 4,2$  мкм значно відрізняється від значень для окремих вікон ( $m_{\Delta Z 41x15} = 3,7$  мкм,  $m_{\Delta Z 131x21} = 9,8$  мкм);

Це означає, що точки на ділянках з більшим перепадом висот, визначені за вікном 131x21 пкс, у яких значення коефіцієнта кореляції  $R_C \geq 0,7$ , доповнили 178 точок, визначених за вікном 41x15.

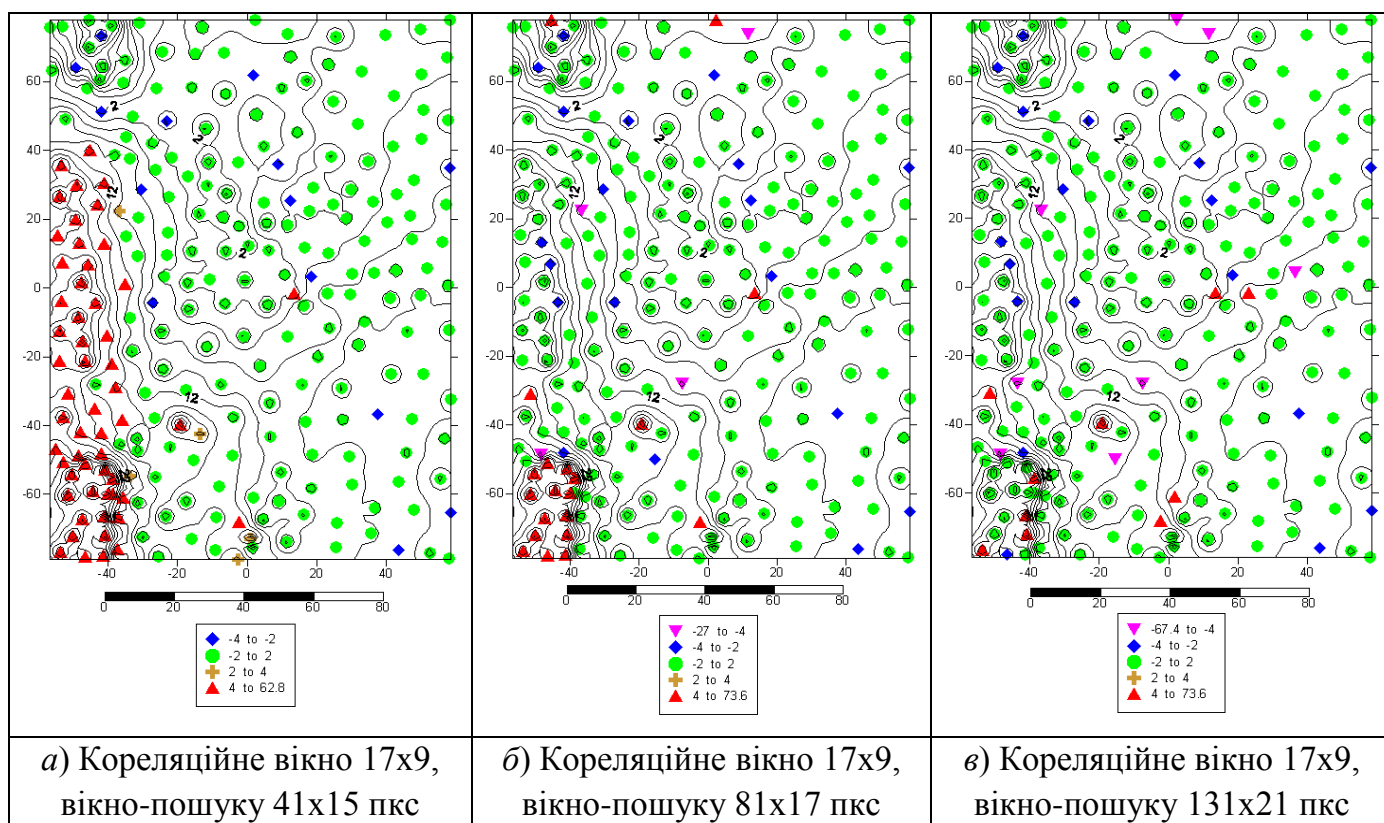
Крім того, слід зазначити, що серед точок, обчислених за вікном 131x21 пкс зустрічались точки, що пройшли поріг кореляції  $R_C = 0,7$ , але при цьому мали значні відхилення  $\Delta Z$  від точок тестової моделі.

Така ситуація виникала під час застосування для ототожнення точок на рівнинних ділянках більших вікон-пошуку. (У більшому

пошуковому вікні більша ймовірність знайти декілька подібних ділянок, які будуть мати майже однакові значення коефіцієнта кореляції).

Для візуальної оцінки просторового розподілу точок із значними відхиленнями висот від тестової моделі класифікуємо значення  $\Delta Z$  за методом середнє квадратичного відхилення. Кожен клас визначається величиною відхилення від середнього значення. Середина діапазону відповідає середньому значенню; верхня межа діапазону містить значення, що перевищують суму середнього і СКВ; нижній діапазон містить різниці середнього і СКВ. За результатами попередніх досліджень відомо [69], що для РЕМ JSM 7100F за збільшення  $750^\times$  середні квадратичні похибки становлять біля 1 мкм (0,74 мкм). Для встановлення меж діапазонів класів вибрано СКВ 2 мкм ( $2\sigma$ ).

Результати класифікації значень  $\Delta Z$  в умовних позначеннях нанесено на карти горизонталей, побудованих за тестовою моделлю (рис. 4.3.3) для вікон-пошуку розмірів 41x15, 81x17, 131x21 пкс та їх комбінацій 41x15 і 81x17, 41x15 і 131x21 та 41x15, 81x17, 131x21 пкс.



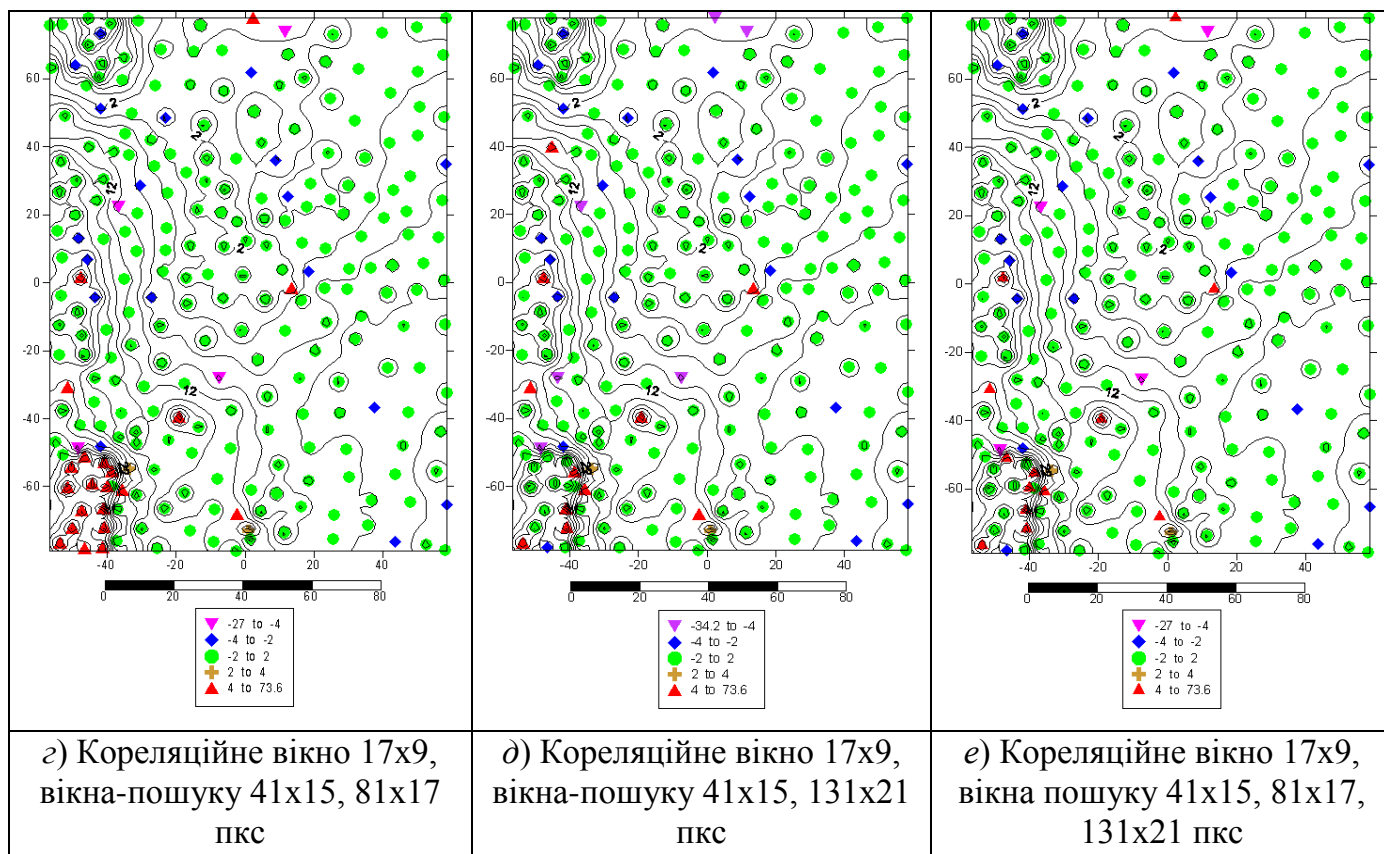


Рис. 4.2.3. Мікроповерхня хромованої сталі в горизонтелях, масштаб  $750^x$ . Умовні позначення показують різниці між значеннями висот, обчисленими за вимірними та знайденими за кореляцією точками правого зображення для різних розмірів пошукових вікон. Значення допуску для коефіцієнта кореляції –  $R_C = 0,7$ . Верхній ряд показує результати класифікації  $\Delta Z$  з одним пошуковим вікном, другий ряд – з об'єднаними вікнами. Горизонталі проведені через 2 мкм.

У табл. 4.2.6. подано числові дані класифікації різниць між значеннями висот, обчисленими за вимірними та знайденими за кореляцією точками правого зображення для різних розмірів пошукових вікон за 4-ма та 5-ма діапазонами. (В результатах класифікації приймали участь всі 250 точок, незалежно від значення коефіцієнта кореляції). Аналіз поодиноких вікон пошуку (рис. 4.2.3 а-в), показує, що відхилення від тестової моделі на рівнинних ділянках є незначні (зелені кружечки) в межах від  $-2$  до  $2$  мкм і майже співпадають для зазначених вікон пошуку. Для вікна-пошуку  $41 \times 15$  пкс на ділянках мікроповерхні складної форми з перепадом висот більшими ніж  $20$  мкм, як і очікувалось, спостерігаються

значні відхилення (червоні трикутники) від тестової моделі: від 4 до 62,8 мкм (22,3%). Для вікна пошуку 81x17 пкс основна кількість червоних трикутників (спрямовані догори) зосереджена в нижньому лівому куті, де найбільш складна форма мікроповерхні, відхилення досягають від 4 до 73,6 мкм (8,0%). Найкращий результат для цієї ділянки показує застосування вікна пошуку 131x21 пкс: від 4 до 73,6 мкм (4,4%). Якщо порівняти результати застосування окремих вікон-пошуку та об'єднаних, то тут спостерігається збіг для вікна (131x21 пкс) та комбінацій двох вікон (41x15, 131x21 пкс) і трьох вікон (41x15, 81x17, 131x21 пкс).

Причому для комбінацій вікон спостерігається перерозподіл розташування відхилень від тестової моделі. Наприклад, відсутні деякі червоні трикутники в центрі рівнинної ділянки (рис. 4.2.3 е), які спостерігались на рис. 4.2.3 в. Зокрема, частина червоних трикутників розташована біля меж зображення, де помилки кореляційного ототожнення можуть бути викликані необхідністю поширення зображення на половину розміру пошукового вікна.

Таблиця 4.2.7

Класифікація різниць висот  $\Delta Z$  точок тестової моделі та моделі 1 для вікон-пошуку різних розмірів та їх об'єднань

Кореляційне вікно 17x9 пкс	Діапазон меж класів значень $\Delta Z = Z_{вим} - Z_{кор}$ , мкм				
Вікна-пошуку, пкс	$\Delta Z < -4$ -2 мкм n (%)	від -2 до - 4 мкм n (%)	від -2 до 2 мкм n (%)	від 2 до 4 мкм n (%)	$\Delta Z > 4$ мкм n (%)
Допуск для коефіцієнта кореляції: 0,7					
41x15	0	14 (5,6)	176 (71,3)	5 (2,0)	55 (22,3)
81x17	4 (1,6)	19 (7,6)	207 (82,8)	0	20 (8,0)
135x21	8 (3,2)	19 (7,6)	212 (84,8)	0	11 (4,4)
41x15 і 81x17	4 (1,6)	18 (7,2)	205 (82,0)	2 (0,8)	21 (8,4)
41x15 і 131x21	6 (2,4)	19 (7,6)	212 (84,8)	2 (0,8)	11 (4,4)
41x15, 81x17 і 135x21	4 (1,6)	19 (7,6)	212 (84,8)	2 (0,8)	13 (5,2)

Отже, використання 2-3-х віконного алгоритму має переваги у порівнянні з використанням одного вікна.



4.2.4. Автоматизоване створення цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за згенерованими точками (вузлами) регулярної сітки на лівому знімку та знайденими кореляційним шляхом відповідними точками сітки на правому знімку стереопари (*модель 2*)

На лівому знімку генеруються точки, розташовані у вершинах регулярної сітки з заданим інтервалом (в пікселях) вздовж осей  $x$  та  $y$ .

Послідовність обчислень наступна:

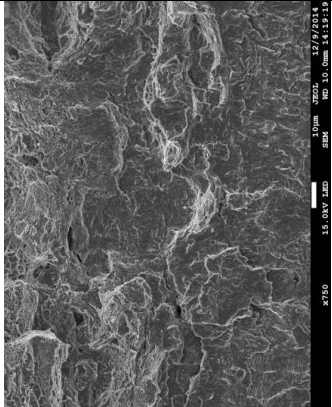
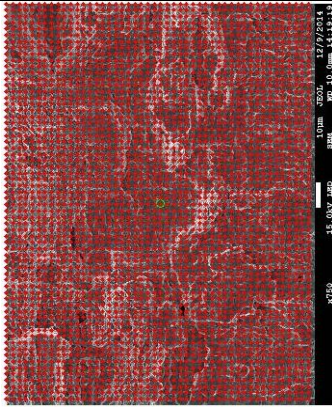
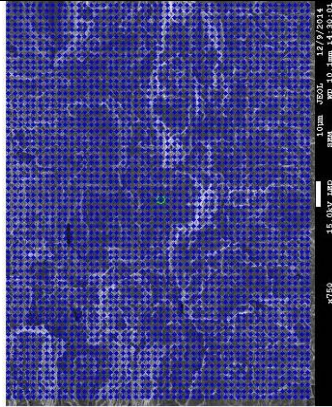
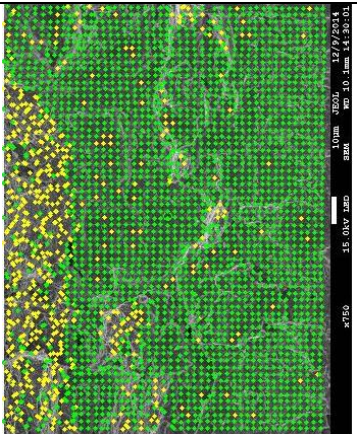
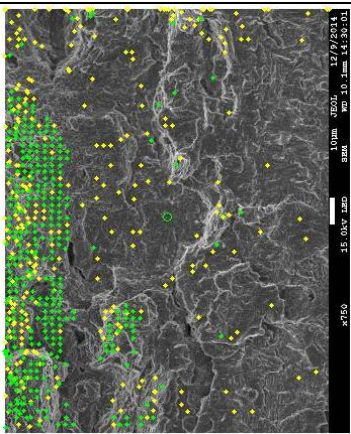
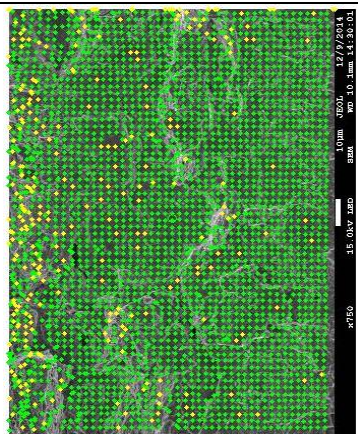
- блок вводу вхідних даних:
  - розрізнявальна здатність зображення;
  - кут нахилу правого знімка;
  - збільшення (масштаб) зображення;
  - допуски для коефіцієнтів кореляції для кожного із кореляційних вікон;
  - розміри кореляційних вікон (2-3 вікна);
  - розміри пошукових вікон (2-3 вікна);
  - крок сітки на лівому зображенні по  $x$  (по  $y$ );
- блок вводу та візуалізації зображень:
  - створення масиву точок (вузлів сітки) з заданим кроком на лівому зображенні;
  - візуалізація вузлів сітки на лівому зображенню;
  - обчислення за кутом нахилу знімка наближеного значення координат  $x$  відповідних вузлів сітки (центрів пошукових вікон) на правому зображенні;
  - візуалізація вузлів сітки на правому зображенні;
- блок обчислення коефіцієнта кореляції за масивом згенерованих вузлів регулярної сітки (блок повторюється 2-3 рази за кількістю заданих вікон):

- локалізація центра вікна-пошуку у відповідному вузлі на правому знімку;
- обчислення масиву коефіцієнтів кореляції для кожного пікселя пошукового вікна;
- визначення максимального значення коефіцієнта кореляції;
- перевірка максимального значення коефіцієнта кореляції на допуск;
- визначення координати точки  $x$  на правому зображенні за максимальним значенням коефіцієнта кореляції;
- запис у масив точок, що не пройшли перевірку на допуск;
- об'єднання масивів координат точок для різних пошукових вікон, що задовольнили кореляційний критерій;
- передача на повторне опрацювання з вікном більшого розміру масиву точок, що не пройшли перевірку на допуск.

Точки, що не пройшли поріг кореляції на останньому кроці після опрацювання 2-3-ма вікнами збільшених розмірів – відфільтровуються.

Далі виконується блок визначення просторових координат точок мікроповерхні об'єкта (див. п. 4.2.3).

На рис. 4.2.4 проілюстровано процес визначення кореляційним способом відповідних точок на правому знімку за вершинами згенерованої регулярної сітки ( $\Delta x = \Delta y = 20$  пкс) на лівому знімку стереопари з використанням двох пошукових вікон (41x15, 131x21 пкс).

		
<p>а) Вхідне зображення</p>	<p>б) Сітка, створена на лівому знімку.</p>	<p>в) Центри пошукових вікон на правому знімку, обчислені за координатами лівого та кутом нахилу <math>8^\circ</math></p>
<p>Допуск для коефіцієнта кореляції <math>R_C=0,6</math>; кореляційне вікно <math>17 \times 9</math> пкс</p>		
		
<p>г) Точки, обчислені за кореляцією (зелені в допуску, жовті - ні). Вікно пошуку <math>41 \times 15</math>.</p>	<p>д) Точки, обчислені за кореляцією (зелені в допуску, жовті - ні). Вікно пошуку <math>131 \times 21</math>.</p>	<p>е) Об'єднані точки</p>

Допуск для коефіцієнта кореляції  $R_C=0,7$ ; вікно взірець  $17 \times 9$  пкс

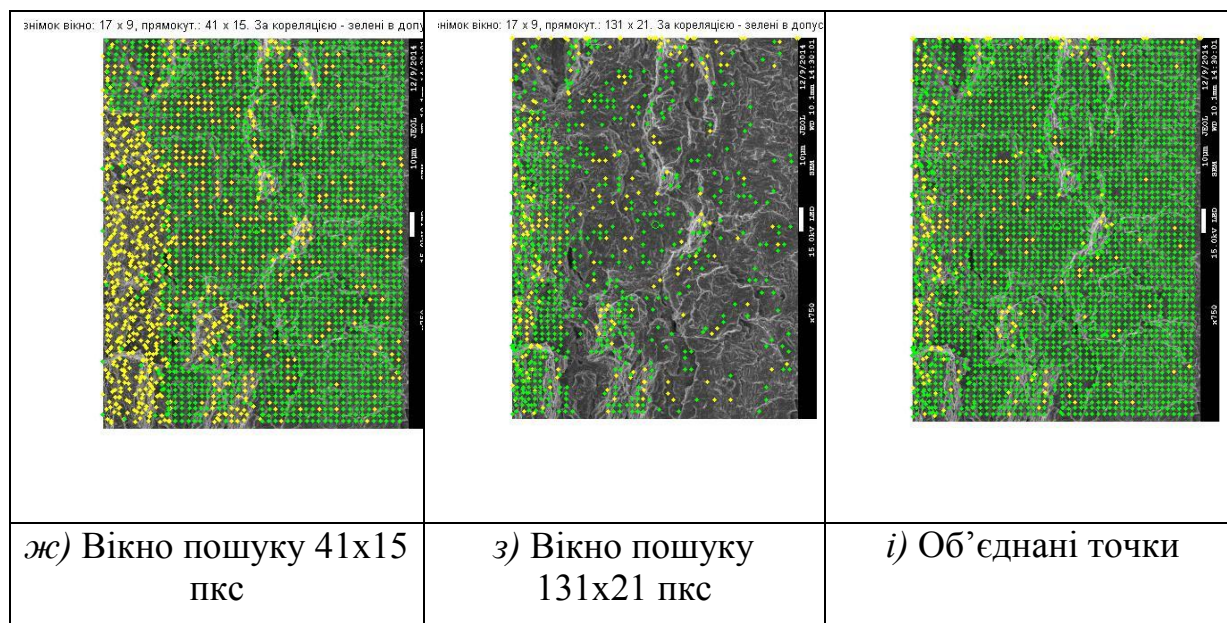
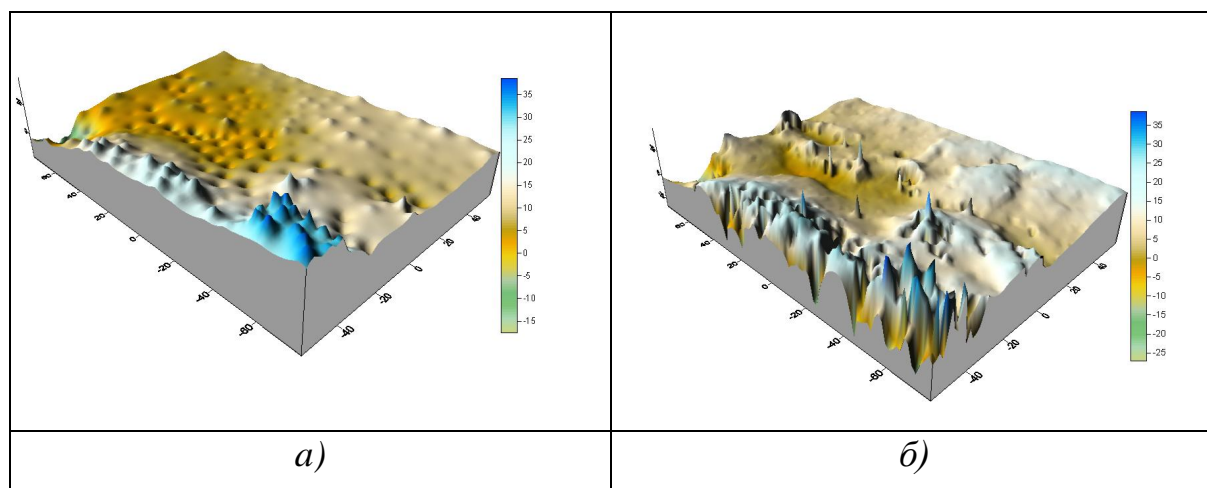


Рис. 4.2.4. Ілюстрація процесу визначення відповідних точок на правому знімку стереопари кореляційним способом з використанням двох пошукових вікон різних розмірів

*Оцінка точності побудованої мікроповерхні об'єкта за згенерованою на лівому знімку стереопари регулярною сіткою (модель 2)*

За визначеними просторовими координатами в пакеті Surfer побудовано моделі мікроповерхні для зразка сталі для 3-х сіток, згенерованих на лівому зображенні з кроками  $\Delta x = \Delta y = 15, 20, 25$  пікселів. Після відсіювання за кореляційним порогом  $R_C = 0,6$  залишилось відповідно 5009 з 5440, 2759 з 3072 і 1824 з 1938 точок. Метод побудови моделей та їх параметри такі самі як у тестової моделі (табл. 4.2.2).



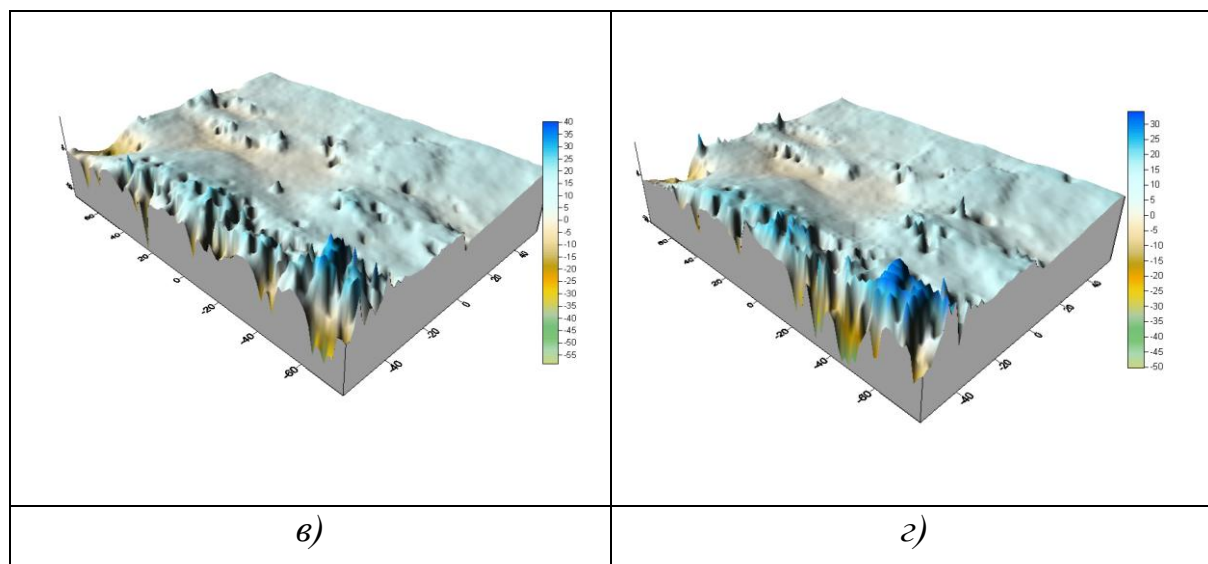
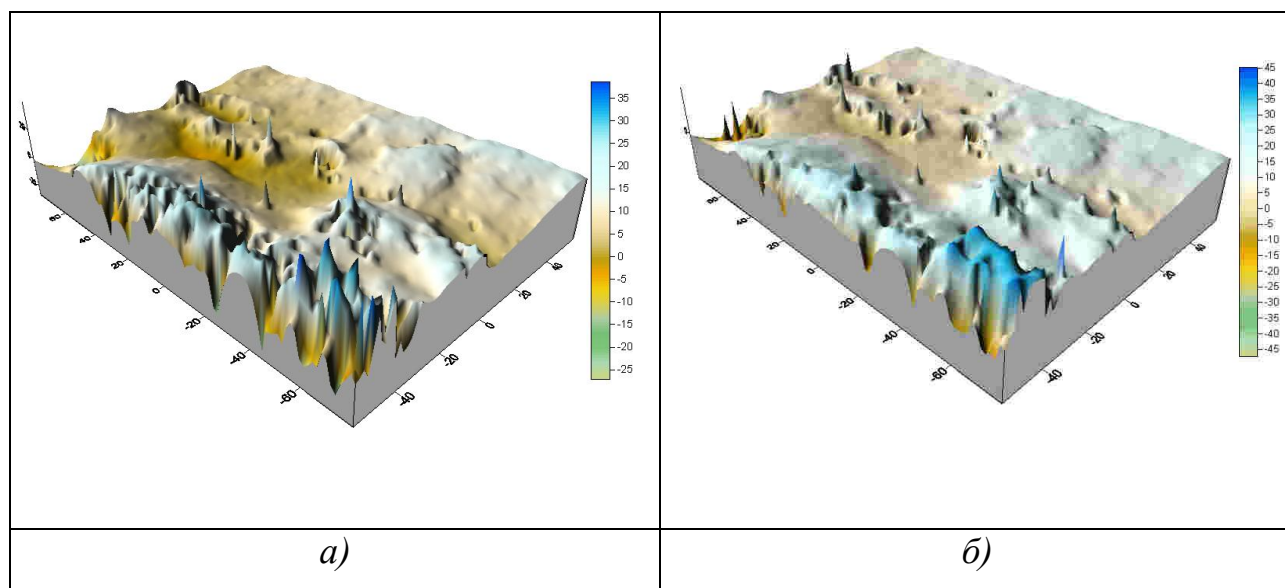


Рис. 4.2.5. 3D моделі мікроповерхні зразка сталі: а) тестова модель; б), в), г) моделі, побудовано за згенерованою на лівому зображенні регулярною сіткою; крок сітки: б)  $\Delta x = \Delta y = 15$  *мкс*; в)  $\Delta x = \Delta y = 20$  *мкс*; г)  $\Delta x = \Delta y = 25$  *мкс*; допуск  $R_C=0,6$

На рис. 4.2.6. подано дві моделі, які побудовано за згенерованою на лівому зображенні стереопари регулярною сіткою з кроком  $\Delta x = \Delta y = 15$  *мкс*. (Ліворуч допуск для коефіцієнта кореляції дорівнює  $R_C=0,6$  (повтор рис. 2.5 б), праворуч -  $R_C=0,7$ .)



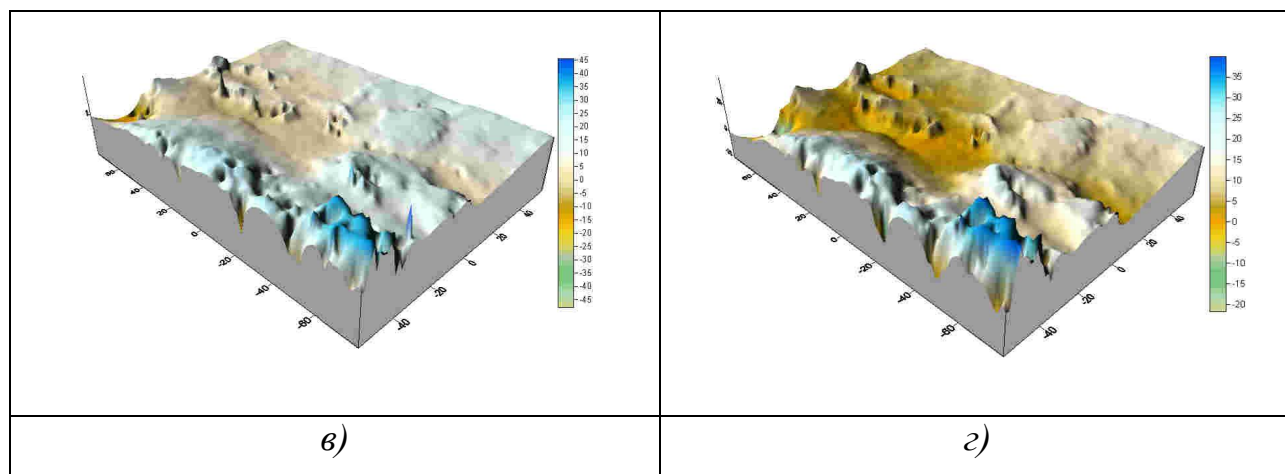


Рис. 4.2.6. 3D моделі мікроповерхні зразка сталі, які побудовано за згенерованими точками у вершинах регулярної сітки; крок сітки на лівому зображенні:  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс; а) допуск  $R_C = 0,6$ ; б) допуск  $R_C = 0,7$ . Кореляційне вікно  $17 \times 9$  пкс, два вікна пошуку  $41 \times 15$  пкс і  $131 \times 21$  пкс; в), г) три вікна пошуку:  $41 \times 15$ ,  $81 \times 17$ ,  $131 \times 21$  пкс; допуск  $R_C = 0,7$ ; в) до г) після застосування адаптивної медіанної фільтрації (вікно фільтра  $7 \times 7$ )

Для моделі ліворуч ( $R_C = 0,6$ ) перепад висот становить 60 мкм, моделі праворуч ( $R_C = 0,7$ ) – 90 мкм. Для допуску  $R_C = 0,7$  характерно, що на першому кроці з вікном пошуку  $41 \times 17$  пкс залишається менше точок ніж для  $R_C = 0,6$ , відповідно на другий крок для вікна  $131 \times 21$  пкс передається більша кількість точок (рис. 4.2.4 д,з). Отже, допуск для коефіцієнта кореляції регулює кількість точок, що обчислюються на наступному кроці. Відповідно більша кількість точок потрапила на ділянки зі складною формою мікрорельєфу, де використання вікна пошуку більшого розміру привело до згладження форм мікрорельєфу (рис. 4.3.6 б). З іншого боку, для допуску  $R_C = 0,7$  з'являються точки-викиди в низинах, які там не спостерігались для допуску  $R_C = 0,6$ . Цей факт свідчить про те, що деякі точки краще розпізнаються з вікном пошуку меншого розміру, але можуть не задовольняти заданому допуску.

Ефективним засобом відсіювання точок-викидів є застосування адаптивної медіанної фільтрації [Гонсалес, Вудс [30]], перевагою якої є можливість ітераційного виконання процесу фільтрації. Адаптивний медіанний фільтр застосовуємо до побудованих у пакеті Surfer 3D моделей, перетворених у форму зображень, де значення яскравості пропорційно величині  $Z$  (рис. 4.2.7). На рис. 4.2.7 можна спостерігати, що після медіанної фільтрації змінюється діапазон яскравостей, який відповідає зміні діапазону величини  $Z$ .









Два пошукових вікна (41x15, 131x21 пкс)			Три вікна
			
<i>а) <math>\Delta x = \Delta y = 15</math></i>	<i>б) <math>\Delta x = \Delta y = 20</math></i>	<i>в) <math>\Delta x = \Delta y = 25</math></i>	<i>г) модуль градієнта</i>
			
<i>д) після фільтра</i>	<i>е) після фільтра</i>	<i>ж) після фільтра</i>	<i>з) після фільтра</i>

Рис. 4.2.7. Ілюстрація застосування адаптивної медіанної фільтрації до grid моделей 74x100 (у вигляді зображень). Верхній ряд – до фільтрації, нижній ряд – після фільтрації (вікно фільтра 7x7). Як можна бачити змінився діапазон рівнів яскравостей, які відповідають зміні меж величини  $Z$

У таблиці 4.2.8 подано розподіл по класах різниць між тестовою моделлю та моделями другого типу згенерованих сіток з кроками

$\Delta x = \Delta y = 15, 20, 25$  пкс з використанням двох пошукових вікон  $41 \times 15$ ,  $131 \times 21$  пкс відповідно.

Таблиця 4.2.8

Класифікація розподілу різниць між тестовою та згенерованою моделлю 2 з використанням 2-3-х пошукових вікон після застосування адаптивної медіанної фільтрації

Розмір сітки $74 \times 100$ , результат після медіанної фільтрації						
Розподіл по діапазонах $\Delta Z$ (мкм)	Два вікна-пошуку: $41 \times 15$ , $131 \times 21$ пкс. Допуск для коефіцієнта кореляції $R_c = 0,7$			Три вікна-пошуку: $41 \times 15$ , $81 \times 17$ , $131 \times 21$ пкс		
				$R_c = 0,7$	$R_c = 0,6$	Порівн. $R_c = 0,6$ і $R_c = 0,7$
	$\Delta x = 15,$ $\Delta y = 15$	$\Delta x = 20,$ $\Delta y = 20$	$\Delta x = 25,$ $\Delta y = 25$	$\Delta x = 15,$ $\Delta y = 15$	$\Delta x = 15,$ $\Delta y = 15$	$\Delta x = 15,$ $\Delta y = 15$
< -4 (n%)	368 (5,0)	248 (3,4)	188 (2,5)	349 (4,7)	218 (2,9)	588 (7,9)
-4 до -2 (n%)	1189 (16,1)	1051 (14,2)	1028 (13,9)	1180 (15,9)	1027 (13,9)	270 (3,6)
-2 до 2 (n%)	4443 (60,0)	4627 (62,5)	4844 (65,5)	4446 (60,1)	4288 (57,9)	6429 (86,9)
2 до 4 (n%)	883 (11,9)	922 (12,5)	854 (11,5)	881 (11,9)	969 (13,1)	70 (0,9)
> 4 (n%)	516 (7,0)	552 (7,5)	486 (6,6)	543 (7,3)	898 (12,1)	42 (0,6)
$\Delta Z_{\min}$ , мкм	-15,8	-16,3	-11,7	-13,1	-13,1	-42,4
$\Delta Z_{\max}$ , мкм	32,3	50,8	64,1	35,9	47,9	22,7
$\sum \Delta Z/n$ , мкм	0,0	0,3	0,4	0,1	1,2	-1,1
СКВ $m_{\Delta Z}$ , мкм	3,2	3,4	3,8	3,3	5,6	4,0



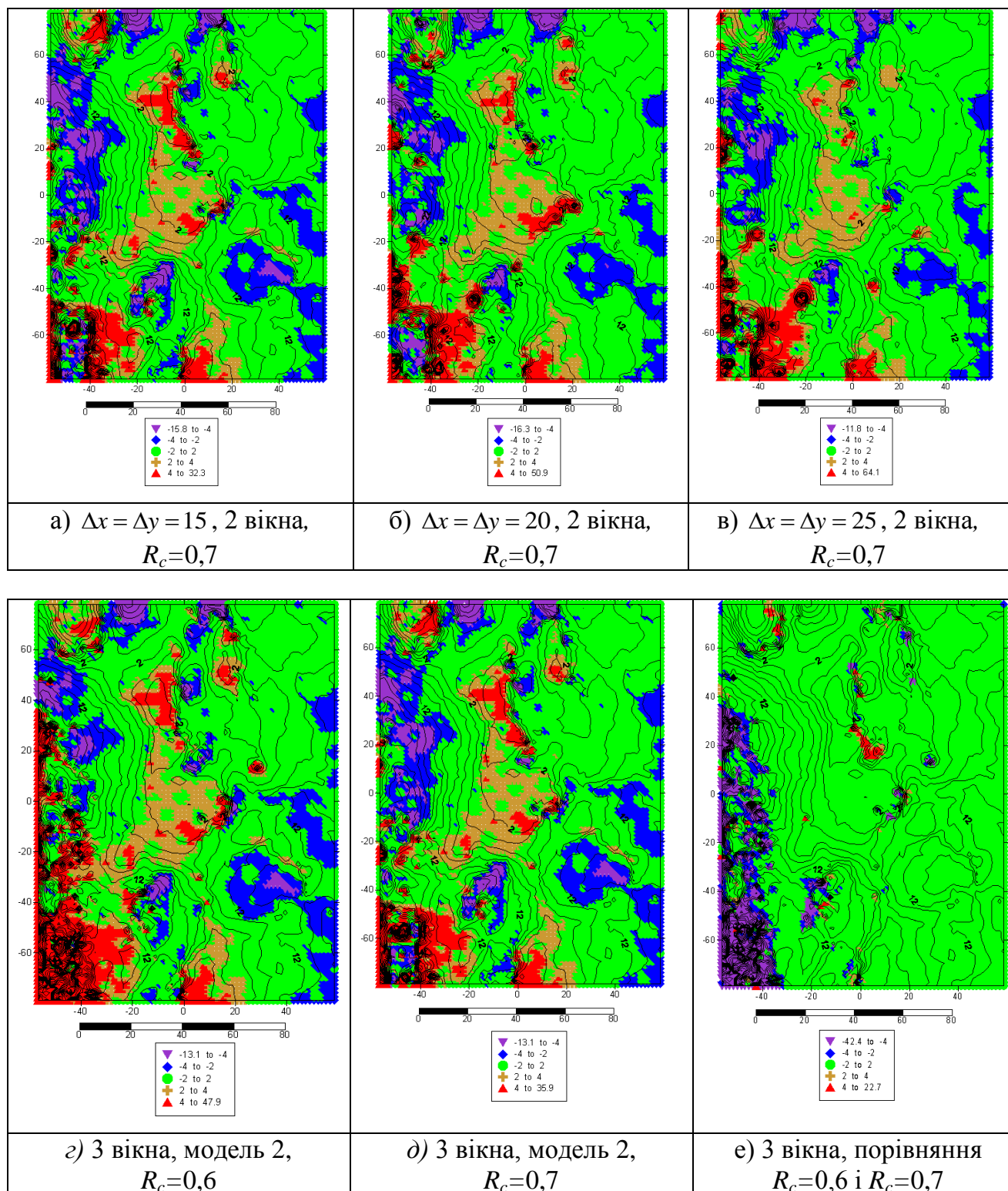
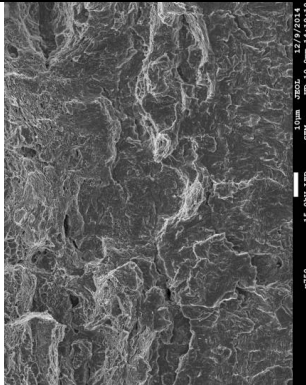
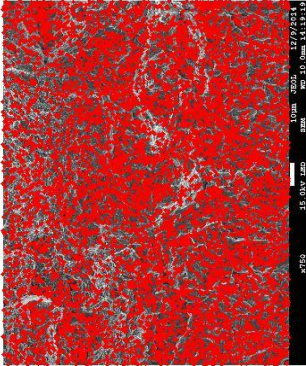
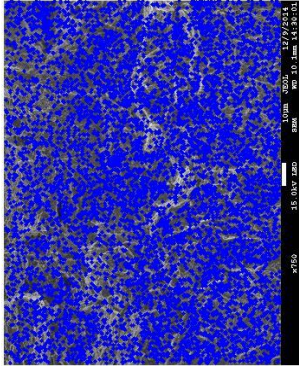


Рис. 4.3.8. Карти розподілу різниць між тестовою та згенерованою моделлю 2 після застосування адаптивної медіанної фільтрації. а-в) з використанням 2-х пошукових вікон (41x15, 131x21 пкс) для  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс,  $\Delta x = \Delta y = 20$  пкс,  $\Delta x = \Delta y = 25$  пкс,  $R_c = 0,6$ ; г, д) з використанням 3-х пошукових вікон (41x15, 81x17, 131x21 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)

Із аналізу табл. 4.2.8 та співставлення її з рис. 4.2.8. видно, що найбільш наближена до тестової моделі (250 точок) модель 2 (65,5% в межах від  $-2$  до  $2$  мкм) з інтервалами згенерованої сітки  $\Delta x = \Delta y = 25$  пкс як найбільш згладжена модель (1824 точки) із представлених моделей.

4.2.5. Автоматизоване створення цифрової моделі мікроповерхні об'єкта на основі точок, згенерованих за модулем градієнта на лівому знімку і відповідними точками правого знімка стереопари (модель 3)

За модулем градієнта на лівому зображенні стереопари згенеровано 8550 точок, відповідні точки на правому знімку знайдені з використанням двохвіконного кореляційного алгоритму. Кореляційне вікно – розміру  $17 \times 9$  пкс; перше вікно-пошуку  $41 \times 15$  пкс, друге  $131 \times 21$  пкс. Результати обчислень подано на рис. 4.2.9 для двох значень допусків коефіцієнтів кореляції ( $R_c = 0,6$  та  $R_c = 0,7$ ).

	<p>Згенеровані точки на лівому знімку</p> 	<p>Правий знімок. Точки, обчислені за коорд. лівого та кутом <math>\theta</math> - сині</p> 
<p>а) вхідне зображення. Два вікна <math>41 \times 15</math> та <math>131 \times 21</math> пкс</p>	<p>б) точки на лівому знімку, побудовані за модулем градієнта</p>	<p>в) точки на правому знімку, обчислені за координатами лівого та кутом нахилу <math>8^\circ</math></p>

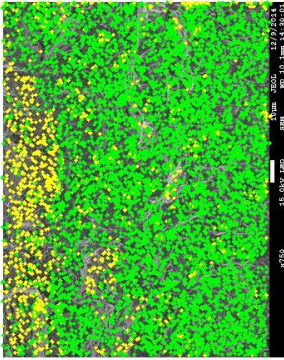
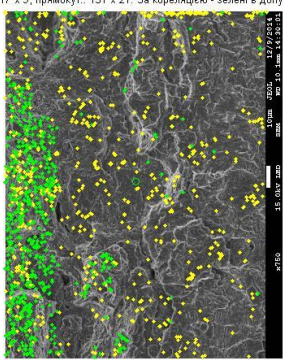
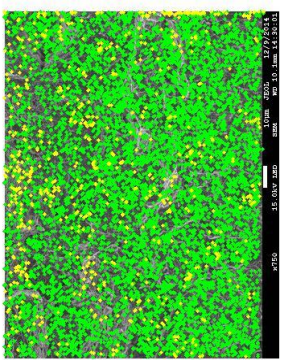
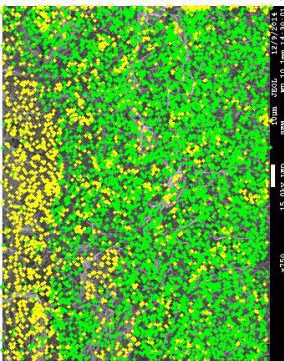
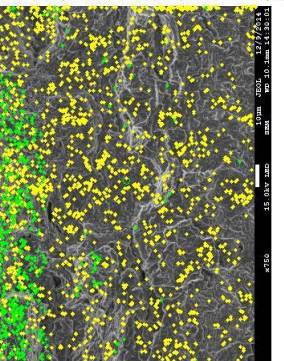
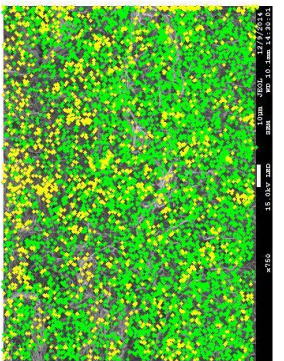
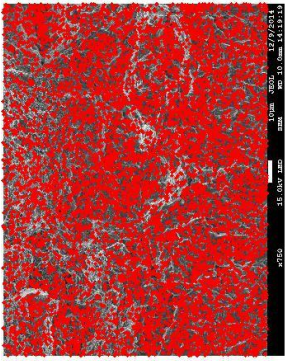
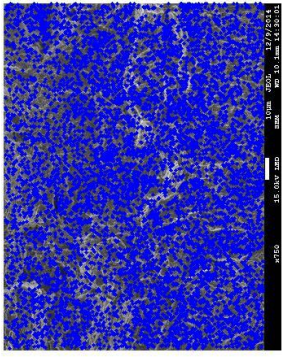
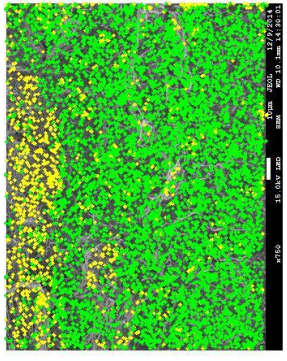
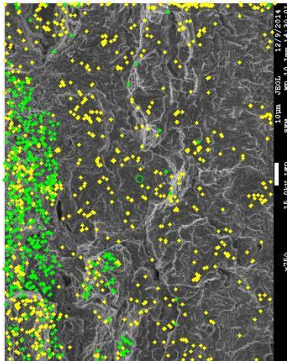
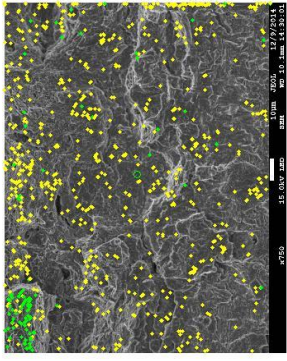
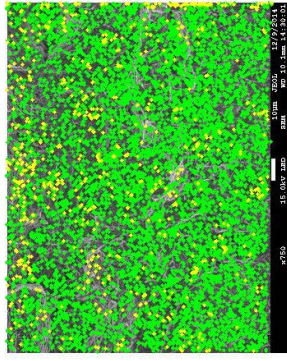
Коефіцієнт кореляції $R_C = 0,6$ ; кореляційне вікно 17x9 пкс		
<p>знімок вікно: 17 x 9, прямокут.: 41 x 15. За кореляцією - зелені в допуску, жовті - ні.</p>  <p>а) перше вікно-пошуку 41x15 пкс</p>	<p>знімок вікно: 17 x 9, прямокут.: 131 x 21. За кореляцією - зелені в допуску, жовті - ні.</p>  <p>б) друге вікно-пошуку 131x21 пкс</p>	 <p>в) об'єднані точки</p>
Коефіцієнт кореляції $R_C = 0,7$		
<p>знімок вікно: 17 x 9, прямокут.: 41 x 15. За кореляцією - зелені в допуску, жовті - ні.</p>  <p>г) перше вікно-пошуку 41x15 пкс</p>	<p>знімок вікно: 17 x 9, прямокут.: 131 x 21. За кореляцією - зелені в допуску, жовті - ні.</p>  <p>д) друге вікно-пошуку 131x21 пкс</p>	 <p>е) об'єднані точки</p>

Рис. 4.2.9. Ілюстрація процесу генерування точок на лівому знімку за модулем градієнта та визначення відповідних точок на правому знімку стереопари кореляційним способом з використанням двох пошукових вікон різних розмірів

Як у попередньому випадку за модулем градієнта на лівому зображенні стереопари згенеровано 8550 точок, відповідні точки на правому знімку знайдені з використанням тривіконного кореляційного алгоритму. Кореляційне вікно – розміру 17x9 пкс; перше вікно пошуку 41x15 пкс, друге - 81x17 пкс, третє - 131x21 пкс. Результати обчислень подано на рис. 4.2.10 для двох значень допусків коефіцієнтів кореляції ( $R_C=0,6$  та  $R_C=0,7$ ).

<p>Згенеровані точки на лівому знімку</p> 	<p>Правий знімок. Точки, обчислені за коорд. лівого та кутом <math>\theta</math> - сині</p> 	<p>знімок вікно: 17 x 9, прямокут.: 41 x 15. За кореляцією - зелені в допуску, жовті - ні</p> 
<p>а) точки на лівому знімку, побудовані за модулем градієнта</p>	<p>б) точки на правому знімку, обчислені за координатами лівого та кутом нахилу <math>8^\circ</math></p>	<p>в) перше вікно-пошуку 41x15 пкс</p>
<p>Коефіцієнт кореляції <math>R_C = 0,6</math>; кореляційне вікно 17x9 пкс</p>		
<p>знімок вікно: 17 x 9, прямокут.: 81 x 17. За кореляцією - зелені в допуску, жовті - ні</p> 	<p>знімок вікно: 17 x 9, прямокут.: 131 x 21. За кореляцією - зелені в допуску, жовті - ні</p> 	
<p>г) друге вікно-пошуку 81x17 пкс</p>	<p>д) третє вікно-пошуку 131x21 пкс</p>	<p>е) об'єднані вікна</p>

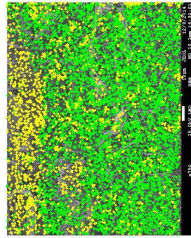
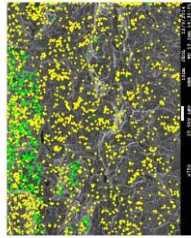
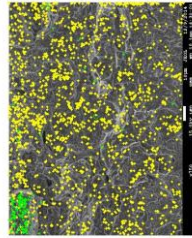
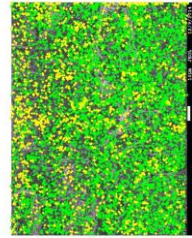
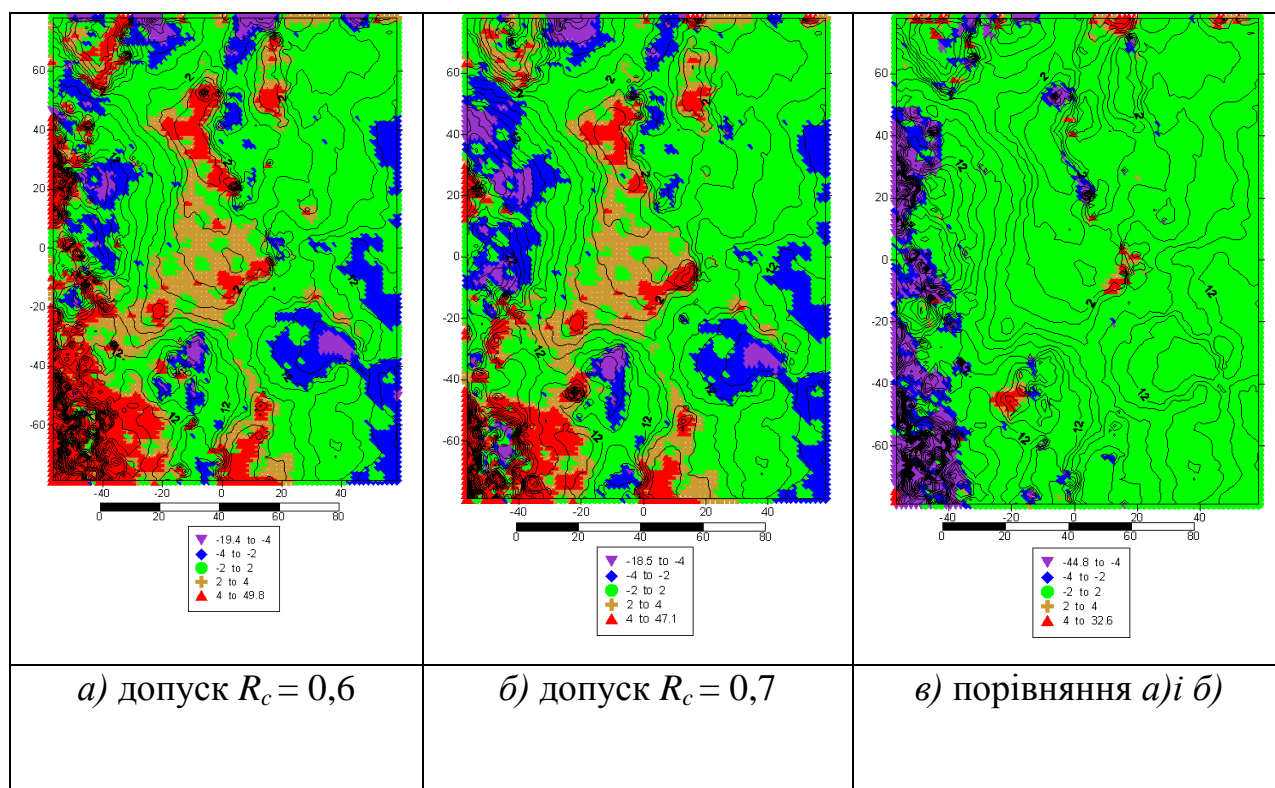
Коефіцієнт кореляції $R_c = 0,7$ ; кореляційне вікно 17x9 пкс			
			
ж) перше вікно-пошуку 41x15 пкс	з) друге вікно-пошуку 81x17 пкс	і) третє вікно-пошуку 131x21 пкс	й) об'єднані вікна

Рис. 4.2.10. 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



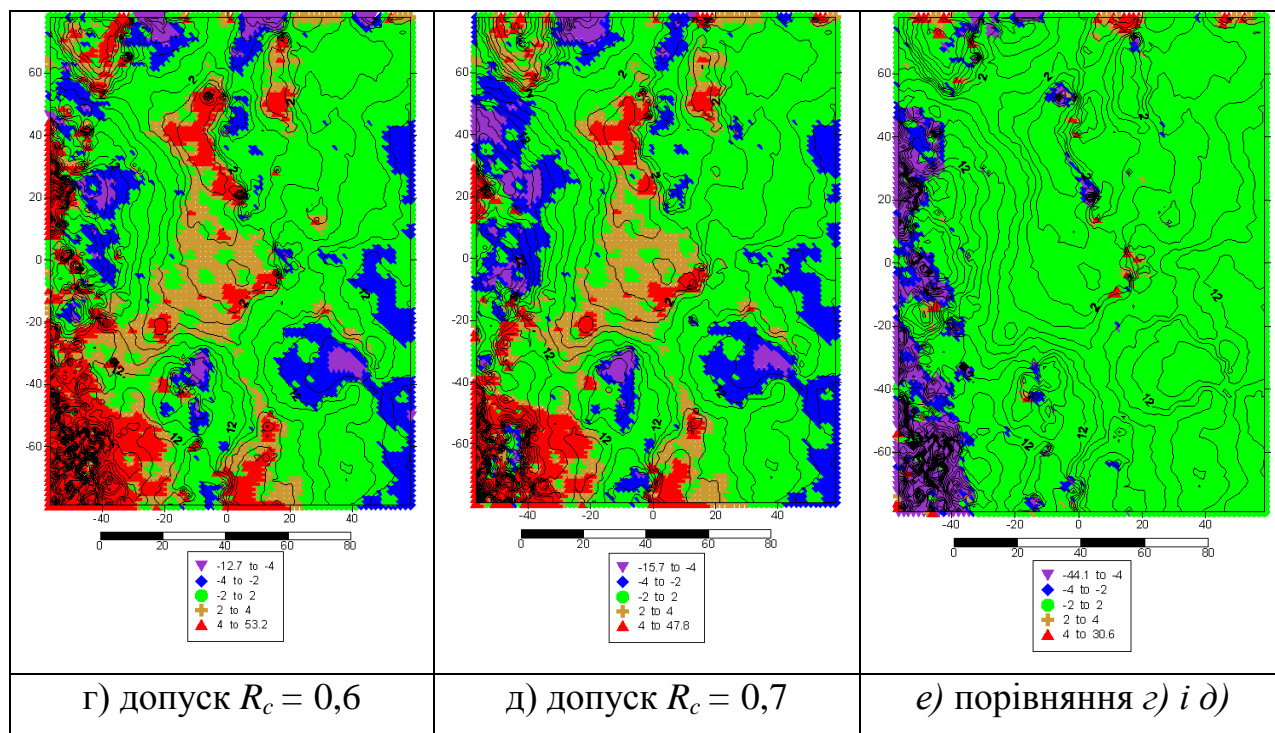
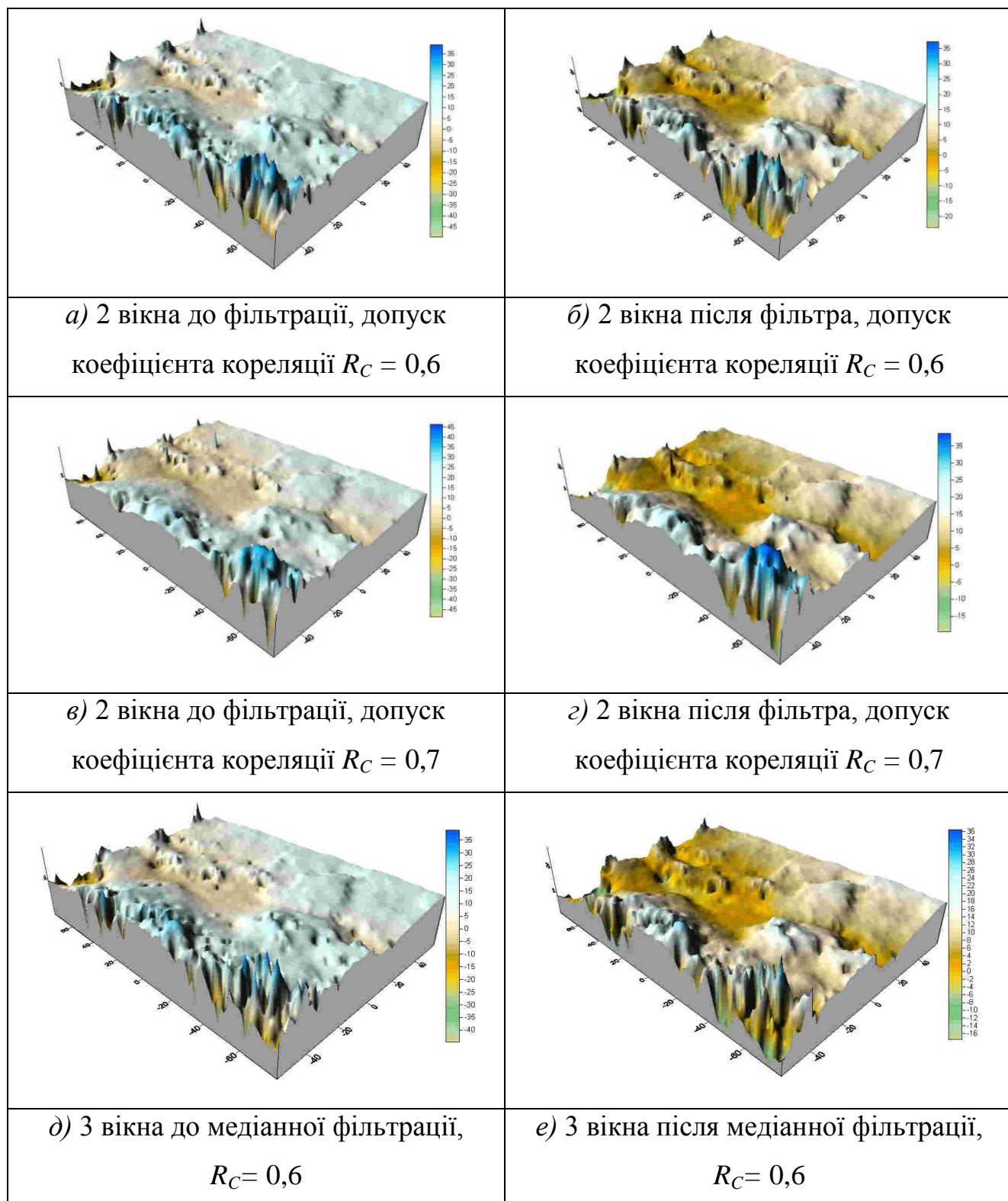


Рис. 4.2.11. Карти розподілу різниць  $\Delta Z$  між тестовою та згенерованою за модулем градієнта моделлю 3 з використанням 2-х а), б) (41x15, 131x21 пкс) та 3-х г), д) (41x15, 81x17, 131x21 пкс) пошукових вікон після застосування адаптивної медіанної фільтрації. Лівий стовпчик - допуск для коефіцієнта кореляції  $R_c=0,6$ ; середній -  $R_c=0,7$ ; правий – розподіл різниць  $\Delta Z$  між моделями  $R_c=0,6$  та  $R_c=0,7$

Із порівняння моделей на рис. 4.2.11 для допусків  $R_c=0,6$  та  $R_c=0,7$  видно, що основні відмінності зосереджені на ділянках складної форми мікроповерхні, де кореляційні підходи дають нестабільні результати.

На рис. 4.2.12 представлено 3D моделі мікроповерхні зразка сталі, побудовані в пакеті Surfer за точками, згенерованими за модулем градієнта. Метод побудови моделей та їх параметри такі самі як у тестової моделі (табл. 4.2.2). Ліворуч представлені 3D моделі до адаптивної медіанної фільтрації, праворуч – після фільтрації. Як бачимо, в результаті медіанної фільтрації змінено шкалу значень висоти  $Z$  з  $[-45 \div 45]$  на  $[-23,6 \div 37,3]$  для допуску коефіцієнта кореляції  $R_c=0,6$  та з

$[-45 \div 45]$  на  $[-19,5 \div 38,6]$  для  $R_c=0,7$ , що більше відповідає реальності. На краях моделі залишились окремі піки та ями, а в центральній частині моделі їх усунуто.



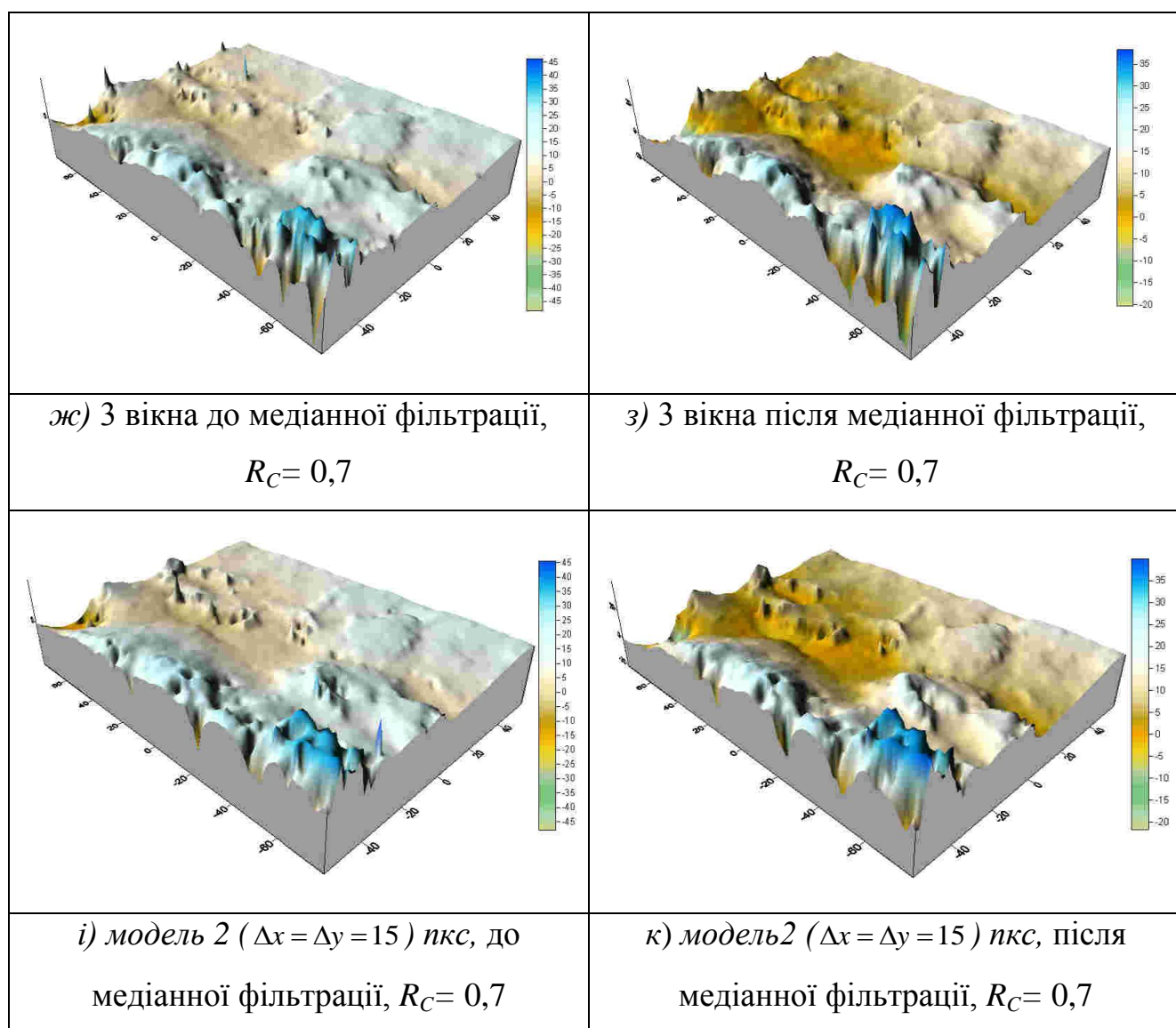


Рис. 4.2.12. 3D моделі мікроповерхні зразка сталі, побудовані за точками, згенерованими за модулем градієнта. Ліворуч - до застосування адаптивної медіанної фільтрації, праворуч – після. Моделі а)-г) побудовані з використанням 2-х вікон пошуку (а,б допуск  $R_C = 0,6$ ; в),г допуск  $R_C = 0,7$ ). Моделі д)-к) побудовані з використанням 3-х вікон пошуку (д,е допуск  $R_C = 0,6$ ; ж),з) допуск  $R_C = 0,7$ ). Для порівняння і), к) містить моделі типу 2, де точки на лівому знімку згенеровані у вершинах регулярної сітки ( $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс), побудовані з використанням 3-х вікон пошуку, допуск  $R_C = 0,7$ . Для всіх моделей кореляційне вікно має розмір  $17 \times 9$  пкс; два вікна пошуку:  $41 \times 15$ ,  $131 \times 21$  пкс; три вікна пошуку:  $41 \times 15$ ,  $81 \times 17$ ,  $131 \times 21$  пкс.



Таблиця 4.2.9

Розподіл різниць висот між тестовою та згенерованою за градієнтом  
*моделлю 3* після застосування адаптивної медіанної фільтрації

За градієнтом, після медіанної фільтрації, розмір сітки 74x100 пкс							Сітка $\Delta x = 15,$ $\Delta y = 15$
	2 вікна			3 вікна			3 вікна
Розподіл по класах	допуск $R_c=0,6$	допуск $R_c=0,7$	порівн. $R_c=0,6$ і $R_c=0,7$	допуск $R_c=0,6$	допуск $R_c=0,7$	порівн. $R_c=0,6$ і $R_c=0,7$	допуск $R_c=0,7$
<-4 мкм (n%)	182 (2,5)	278 (3,8)	587 (7,9)	177 (2,4)	257 (3,5)	591 (8,0)	349 (4,7)
-4 до -2 мкм (n%)	945 (12,8)	1108 (15,0)	307 (4,1)	933 (12,6)	1118 (15,1)	292 (3,9)	1180 (15,9)
-2 до 2 мкм (n%)	4158 (56,2)	4281 (57,9)	6353 (85,9)	4171 (56,4)	4277 (57,8)	6396 (86,4)	4446 (60,1)
2 до 4 мкм (n%)	1086 (14,7)	1062 (14,4)	83 (1,1)	1083 (14,6)	1039 (14,0)	74 (1,0)	881 (11,9)
> 4 мкм (n%)	1029 (13,9)	671 (9,1)	70 (0,9)	1036 (14,0)	709 (9,6)	47 (0,6)	543 (7,3)
$\Delta Z_{\min}$ , мкм	-19,3	-18,5	-44,8	-12,7	-15,7	-44,1	-13,1
$\Delta Z_{\max}$ , мкм	49,7	47,1	32,6	53,2	47,8	30,6	35,9
$\sum \Delta Z/n$ , мкм	1,3	0,4	-0,9	1,5	0,5	-0,9	0,1
СКВ $m_{\Delta Z}$ , мкм	5,2	3,7	3,3	5,7	3,8	3,5	3,3

В останньому стовпчику наведено дані різниць висот  $\Delta Z$  між тестовою моделлю та згенерованою за регулярною сіткою з інтервалами  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс моделлю 2 із табл. 4.2.8 для допуску  $R_c=0,7$ . Модель 2 з інтервалами  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс складалась із 5504 вузлів сітки, із яких 1244 було відфільтровано за допуском  $R_c=0,7$ . Модель 3, яку згенеровано за модулем градієнта, складалась із 8550 точок за допуском  $R_c=0,7$  відфільтровано 2019 точок. Порівняння розподілів різниць висот по діапазонах для моделей 2 та 3 після застосування адаптивної медіанної фільтрації показує їх схожість. Те саме підтверджує візуальний огляд 3D моделей (рис. 4.2.12 з, к), результати розподілу по класах різниць висот  $\Delta Z$  та накладання горизонталей. Основні розходження між моделями на краях зображень та на ділянці складної форми мікроповерхні у нижньому лівому куті зображення.

Таблиця 4.2.10

Розподіл по класах різниць висот точок  $\Delta Z$  між моделями 2 та 3, побудованих з використанням 3-х вікон пошуку

Модель 2а: крок сітки $\Delta x = \Delta y = 15$ пкс, 4260 точок. Модель 3: модуль градієнта, 6531 точок, $R_c=0,7$ .				Модель 2б: крок сітки $\Delta x = \Delta y = 10$ пкс, 9522 точок. Модель 3: модуль градієнта, 6531 точок, $R_c=0,7$ .		
N кл.	$\geq \Delta Z_{\min}$ МКМ	$< \Delta Z_{\max}$ МКМ	n (%)	$\geq \Delta Z_{\min}$ , МКМ	$< \Delta Z_{\max}$ , МКМ	n (%)
1	-29,4	-4	114 (1,5)	-36,6	-4	142 (1,9)
2	-4	-2	129 (1,7)	-4	-2	121 (1,6)
3	-2	2	6250 (88,1)	-2	2	6603 (89,2)
4	2	4	324 (4,4)	2	4	268 (3,6)
5	4	32,5	312(4,2)	4	38,9	266 (3,6)

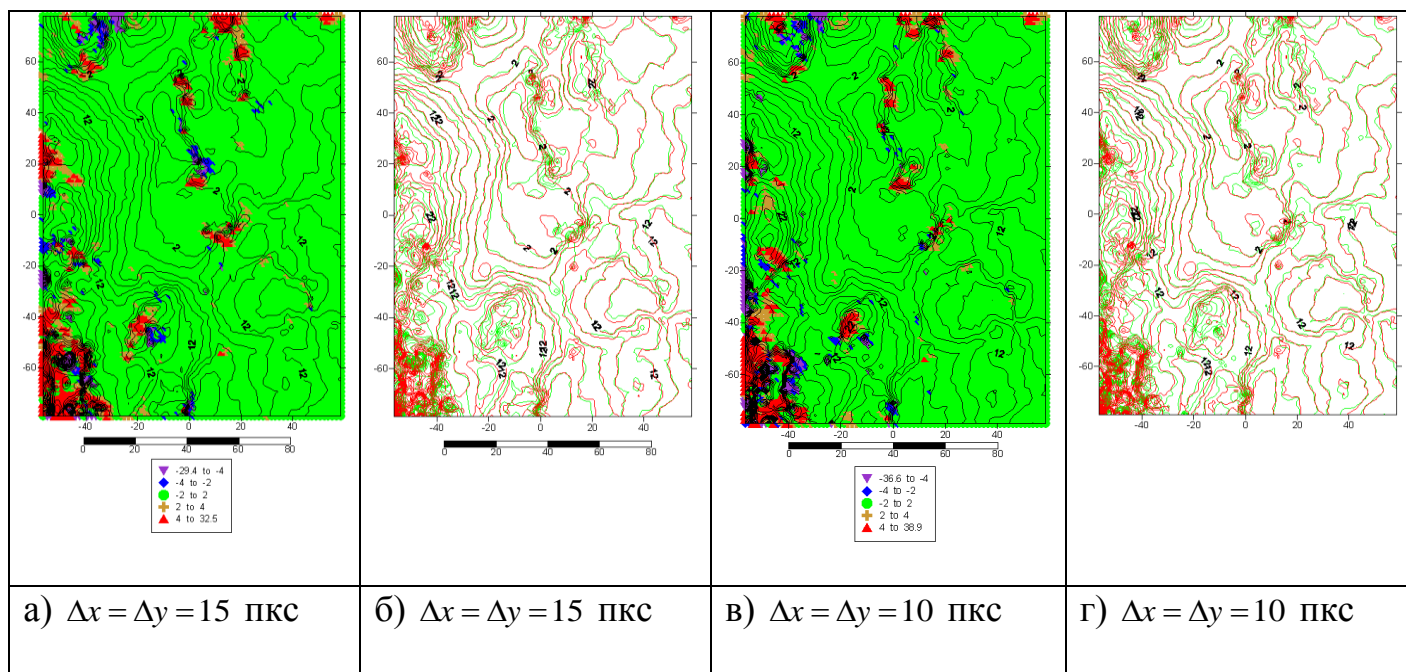


Рис. 4.2.13. Карти розподілу по класах різниць висот  $\Delta Z$  між моделями 2 та 3, побудованих з використанням 3-х вікон пошуку: а), в) в умовних позначеннях; б), г) накладання горизонталей (модель 2 – горизонталі зеленого кольору; модель 3 – червоного кольору)

Аналіз порівняння розподілу по класах величини  $\Delta Z$  (табл. 4.2.10 та рис. 4.2.13) по 5-ти діапазонах між моделями 2 та 3 показує, що найбільші різниці зосереджені на ділянках зі складною формою мікроповерхні. (Модель 2а: 5504 точок після фільтрування за  $R_c=0,7$  залишилось 4260 точок, щільність 0,24. Модель 2б: 12288 точок після фільтрування за  $R_c=0,7$  залишилось 9522 точки, щільність 0,53. Модель 3: 8550 після фільтрування за  $R_c=0,7$  залишилось 6531точок, щільність 0,36). Модель 2 побудована за щільною регулярною сіткою, що покриває прямокутну область розміром 115,1x156,7 кв. мкм в масштабі збільшення 750<sup>x</sup>. Точки у моделі 3, які згенеровано за модулем градієнта, розташовуються там, де є перепади яскравостей і відповідно кореляційні характеристики є кращими, ніж на ділянках з малопомітною зміною яскравостей. Обидві моделі дозволяють відновити дрібну структуру

мікроповерхні за рахунок щільного покриття, а карта розподілу різниць чітко відокремлює ділянки, які потребують втручання оператора.

Такі можливості є наслідком особливостей РЕМ знімання, а саме невелика площа знімання, точно відомий кут нахилу вздовж осі  $Y$ , звідси паралакс виникає в основному вздовж осі  $X$ , невеликий поперечний паралакс, відсутність значних масштабних спотворень. Звідси випливає можливість вибрати належний розмір пошукового вікна в залежності від діапазону висот. Тоді послідовний перехід від вікна меншого розміру до більшого дозволяє передати на наступний етап точки, що не задовольнили кореляційний критерій і в більшості належать до наступних діапазонів висот. Такий підхід в цілому зменшує ймовірність помилкового ототожнення.

4.2.6. Оцінка ефективності алгоритму пошуку ідентичних точок стереопари з використанням вікон-пошуку різних розмірів

Для оцінки ефективності алгоритму  $n$ -віконного пошуку ідентичних точок стереопари отримаємо співвідношення для часу роботи із припущення, що час витрачений для обчислення коефіцієнта кореляції з двома вікнами-пошуку не повинен перевершувати час, необхідний для обчислення коефіцієнта кореляції з одним вікном-пошуку більшого розміру.

Позначимо  $n_u$  – кількість точок у кореляційному вікні  $u$  (припускаємо, що розмір кореляційного вікна однаковий для всіх пошукових вікон);  $S_{w_i}$  – кількість точок у  $w_i$ -ому пошуковому вікні,

причому  $S_{w_1} < S_{w_2} < \dots < S_{w_i} \dots < S_{w_n}$ ;  $k_i = \frac{S_{w_{i+1}}}{S_{w_i}}$  ( $k_i > 1$ ) ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ). На

першому кроці за кореляційним вікном  $u$  та пошуковим вікном  $w_1$  визначимо коефіцієнт кореляції для кожної із  $N_1$  - точок лівого знімка. На другому кроці коефіцієнт кореляції визначимо знову з пошуковим вікном

$w_2$  для  $N_2$  точок, які не подолали поріг кореляції на першому кроці. Отже, на  $(i+1)$  - кроці коефіцієнт кореляції визначимо з пошуковим вікном  $w_{i+1}$  для  $N_{i+1}$  точок, які не подолали поріг кореляції на попередньому кроці. Кількість точок  $N_{i+1}$ , для якої сумарні витрати часу на роботу алгоритму з об'єднаними вікнами ( $w_i$  і  $w_{i+1}$ ) будуть не більше ніж з одним вікном  $w_{i+1}$  більшого розміру визначимо за умовою:

$$N_i \cdot n_u \cdot S_{w_i} + N_{i+1} \cdot n_u \cdot k_i \cdot S_{w_i} < N_i \cdot n_u \cdot k_i \cdot S_{w_i} . \quad (4.2.9)$$

Звідси

$$N_{i+1} < \frac{k_i - 1}{k_i} \cdot N_i \quad (4.2.10)$$

Граничну сумарну кількість точок  $N_T$  під час об'єднання  $n$  пошукових вікон, отримаємо, якщо у (4.3.9) змінимо знак «менше» на – «рівно»:

$$N_T = N_1 + N_2 + \dots + N_n \quad (4.2.11)$$

або

$$N_T = N_1 + \sum_{i=1}^{n-1} N_i \cdot \frac{k_i - 1}{k_i}, \quad (4.2.12)$$

або

$$N_T = N_1 \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} \prod_{j=1}^i \frac{k_j - 1}{k_j}\right) \quad (4.2.13)$$

Якщо відомо, яку частину мікроповерхні складають ділянки з мікрорельєфом складної форми, (наприклад, для зразка сталі це 20-30%), то (4.2.13) можна уточнити за рахунок додаткового коефіцієнта  $K_0$

$$N_T = N_1 \cdot \left(1 + K_0 \cdot \left(1 + \sum_{i=2}^{n-1} \prod_{j=1}^i \frac{k_j - 1}{k_j}\right)\right) \quad (4.2.14)$$

Для об'єднання трьох вікон (4.3.13) приймає вигляд:

$$N_T = N_1 \cdot \left(1 + \frac{k_1 - 1}{k_1} + \frac{k_1 - 1}{k_1} \cdot \frac{k_2 - 1}{k_2}\right). \quad (4.2.15)$$

За такою ж умовою (4.2.9) отримаємо граничні сумарні витрати часу  $T(n_u, N_1, S_{w_1}, N_2, S_{w_2}, \dots, N_n, S_{w_n})$  для  $n$  пошукових вікон:

$$T(u_u, N_1, S_{w_1}, N_2, S_{w_2}, \dots, N_n, S_{w_n}) = n_u \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot S_{w_i}, \quad (4.2.16)$$

За умовою (4.2.9) час роботи алгоритму з двома вікнами ( $w_1$  і  $w_2$ ) співпадає з одновіконним більшого розміру  $w_2$ . Час роботи 3-х віконного ( $w_1, w_2$  і  $w_3$ ) алгоритму можна порівняти з часом роботи 2-х віконного, де друге вікно  $w_2$  має таку саму кількість пікселів як третє вікно  $w_3$ . За інших рівних умов (кількість точок, розмір кореляційного вікна, порогове значення коефіцієнта кореляції), час роботи алгоритму з одним вікном-пошуку зростає при переході від меншого вікна  $w_1$  до більшого –  $w_2$  пропорційно відношенню  $k_i$  між кількістю пікселів вікон-пошуку  $w_{i+1}$  та  $w_i$ . Якщо відоме співвідношення між кількістю точок ділянок рівнинної мікроповерхні та мікроповерхні складної форми, то час роботи алгоритму можна оцінити з більшою ймовірністю (4.2.14).

На рис. 4.2.14, 4.2.15 наведено профіль часу виконання програми, обчислення просторових координат точок мікроповерхні об'єкта за точками, згенерованими за модулем градієнта та основних модулів 2-х та 3-х віконного алгоритму для  $R_c=0,6$  (ліворуч) та  $R_c=0,7$  (праворуч). Зазначимо, що основний час витрачається на модуль обчислення кореляції (block-corel) та функцій, до яких він звертається (myscorel, peresw, mean).

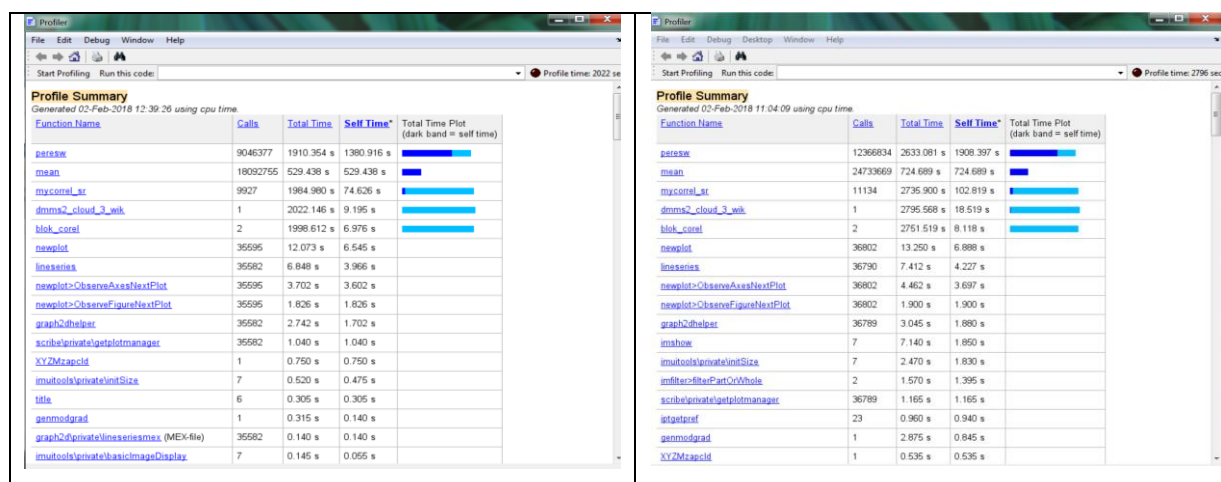


Рис. 4.2.14. Час виконання програми та основних модулів 2-х віконного алгоритму

The image shows two side-by-side screenshots of the Visual Studio Profiler. Each screenshot displays a 'Profile Summary' table with columns for Function Name, Calls, Total Time, and Self Time. The left screenshot shows a profile for 2114 seconds, and the right screenshot shows a profile for 268 seconds. The tables list various functions and their performance metrics, with 'parisw' and 'mean' being the most significant in the first profile, and 'sw' and 'n' being significant in the second.

Рис. 4.2.15 Час виконання програми та основних модулів 3-х віконного алгоритму

В таблицях 4.2.11, 4.2.12 наведено результати порівняння фактичних витрат часу програмної реалізації алгоритму кореляційного ототожнення відповідних точок стереопари (block-corel) для моделей 2 та 3, з теоретичною оцінкою часу, обчисленого за 4.2.14 – 4.2.16.

Для моделей 2 (табл. 4.2.11) порівняння виконано для сіток, згенерованих з інтервалами  $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс (12288 вершин) та  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс (5504 вершини) для 2-х вікон пошуку для кореляційних допусків  $R_c=0,6$  та  $R_c=0,7$ .

Для моделі 2 ( $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс) з першим вікном пошуку  $41 \times 15$  пкс опрацьовано 100% точок, з другим вікном пошуку  $131 \times 21$  пкс:

- $\sim 19\%$  точок, відфільтровано 9,2% за  $R_c=0,6$ , за (4.3.16) розрахунок часу  $2,16e+09$ ;
- $\sim 32\%$  точок, відфільтровано 22,5% для  $R_c=0,7$ , за (4.2.16) розрахунок часу  $2,79e+09$ .

Співвідношення між часом  $T_{0,7}$ , обчисленим за (4.2.16) для  $R_c=0,7$  та часом  $T_{0,6}$  для  $R_c=0,6$ , дорівнює  $\sim 1,29$ , що відповідає співвідношенню

між фактичним часом виконання блоку кореляції (3986 сек/3127 сек  $\sim$  1,27).

Розрахунок часу виконання з одним вікном-пошуку 131x21 пкс для  $N=12288$  точок дає оцінку  $5,17e+09$  для обох критеріїв кореляції, що більше ніж у 2,4 рази за  $R_c=0,6$  (1,9 рази за  $R_c=0,7$ ) порівняно з використанням двох вікон пошуку.

Для *моделі 2* ( $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс) у відсотковому відношенні кількість опрацьованих та відфільтрованих точок за двома вікнами є майже однакова з попереднім випадком ( $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс). Для  $N=5504$  точки оцінка з одним вікном пошуку дає  $2,32e+095$ , для обидвох критеріїв кореляції, що як у попередньому випадку більше ніж у 2,4 рази за  $R_c=0,6$  (1,9 рази за  $R_c=0,7$ ) при використанні двох пошукових вікон.

Для *моделі 3* (табл. 4.2.12), де точки були згенеровані за модулем градієнта, під час використання двох пошукових вікон зберігаються такі самі оцінки та співвідношення між одним та двома пошуковими вікнами (див. табл. 4.2.11).

Таблиця 4.3.11

Оцінка часу виконання алгоритму з використанням 2-х вікон-пошуку різних розмірів

Два вікна пошуку, кореляційне вікно 17x9 пкс							
Метод генерування точок: регулярна сітка на лівому знімку ( <i>модель 2</i> )							
Інтервал , пкс	$R_c$	Вікно- пошуку 1 41x15, N1 (%)	Вікно- пошуку 2 131x21, N2 (%)	Відфіль- - тровано за $R_c$ n (%)	Розраху- -нок часу за (4.2.16)	Оцінка часу (одне вікно- пошуку 131x21)	Час виконання блоку кореляції, (загальний час), сек
$\Delta x = 10$ $\Delta y = 10$	0,6	12288	2375 (19,3)	1135 (9,2)	$2,16e+09$	$5,17e+09$	3127 (3171)
	0,7	12288	3891 (31,6)	2766 (22,5)	$2,79e+09$	$5,17e+09$	3986 (4016)



Час	$T_{0,7}/T_{0,6}$	-	-	-	1,29	-	1,27
$\Delta x = 15$ $\Delta y = 15$	0,6	5504	1049 (19,1)	495 (9,0)	$0,96e+09$	$2,32e+09$	1387 (1369)
	0,7	5504	1751 (31,8)	1244 (22,6)	$1,25e+09$	$2,32e+09$	1891 (1907)
Час	$T_{0,7}/T_{0,6}$	-	-	-	1,30	-	1,07
Метод генерування точок: за модулем градієнта на лівому знімку (модель 3)							
-	0,6	8550	1377 (16,1)	747 (8,7)	$1,38e+09$	$3,60e+09$	1999 (2022)
-	0,7	8550	2584 (30,2)	2019 (23,6)	$1,89e+09$	$3,60e+09$	2752 (2796)
Час	$T_{0,7}/T_{0,6}$	-	-	-	1,37	-	1,38

Оцінки часу з використанням 3-х вікон пошуку для кореляційних критеріїв  $R_c=0,6$  та  $R_c=0,7$  представлено в табл. 4.2.12 як у табл. 4.2.11 для згенерованих сіток і точок, згенерованих за модулем градієнта. Оцінка часу виконання алгоритму 3-х віконного кореляційного ототожнення порівнювалась з 2-х віконним. На відміну від попереднього випадку для розрахунку використано (4.2.14), де вважається, що нам відомо, яка частину мікроповерхні складають ділянки з рельєфом складної форми. За величину  $K_0$  у відсотках приймаємо кількість точок, які перейшли на другий етап після опрацювання з першим вікном-пошуку. Для кореляційного допуску  $R_c=0,6$  величина  $K_0 = 0,2$  ( $R_c=0,7$ ;  $K_0=0,3$ ).

Таблиця 4.2.12

Оцінка часу виконання алгоритму з використанням 3-х вікон-пошуку різних розмірів

Три вікна-пошуку, кореляційне вікно 17x9 пкс								
Метод генерування точок: регулярна сітка на лівому знімку (модель 2)								
Інтервал сітки, пкс	$R_c$	Вікно-пошук у 1 41x15, N1 (%)	Вікно-пошуку 2 81x17, N2 (%)	Вікно-пошуку 3 131x21, N3 (%)	Від-фільтрова-но за $R_c$ n (%)	Розраху-нок часу за (4.2.16)	Оцінка часу (2 вікна-пошуку 41x15 і 131x21) за (4.2.14)	Час вико-нання блоку кореля-ції, (заг. час), с
$\Delta x = 10$ $\Delta y = 10$	0,6	12288	2375 (19,3)	1309 (10,6)	1135 (9,2)	2,21e+09	$K_0=0,2$ 2,19e+09	3170 (3200)
	0,7	12288	3891 (31,6)	3001 (24,4)	2766 (22,5)	3,24e+09	$K_0=0,3$ 2,79e+09	4597 (4628)
Час	$T_{0,7}/T_{0,6}$	-	-	-	-	1,47	1,27	1,45
$\Delta x = 15$ $\Delta y = 15$	0,6	5504	1049 (19,1)	561 (10,2)	495 (9,0)	0,98e+09	$K_0=0,2$ 0,98e+09	1388 (1402)
	0,7	5504 3753	1751 (31,8)	1350 (24,5)	1244 (22,6)	1,46e+09	$K_0=0,3$ 1,25e+09	2070 (2084)
Час	$T_{0,7}/T_{0,6}$					1,49	1,30	1,49
Метод генерування точок: за модулем градієнта на лівому знімку (модель 3)								
	0,6	8550	1377 (16,1)	851 (10,0)	747 (8,7)	1,45e+09	$K_0=0,2$ 1,38e+09	2090 (2214)
	0,7	8550	2584 (30,2)	2156 (25,2)	2019 (23,6)	2,25e+09	$K_0=0,3$ 1,96e+09	3245 (3268)
Час	$T_{0,7}/T_{0,6}$	-	-	-	-	1,55	1,42	1,48

Для моделі 2 ( $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс) з першим вікном пошуку  $41 \times 15$  пкс опрацьовано 100% точок за  $R_c=0,6$ :

- 19,3% точок з другим вікном пошуку  $81 \times 17$  пкс;
- 10,6% точок з третім вікном пошуку  $131 \times 21$  пкс;
- 9,2% відфільтровано за кореляційним критерієм;
- $Th_{0,6} = 2,21e+09$  розрахунок часу за (4.3.16);
- $Te_{0,6} = 4,02e+09$  оцінка часу за (4.3.15);
- $Tk_{0,6} = 2,19e+09$  оцінка часу за (4.3.14) для  $K_0=0,2$ ;
- $T_{0,6} = 3170$  сек – фактичний час виконання модуля обчислення кореляції;

Для моделі 2 ( $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс) для  $R_c=0,7$ :

- 31,6% точок з другим вікном пошуку  $81 \times 17$  пкс;
- 24,4% точок з третім вікном пошуку  $131 \times 21$  пкс;
- 22,5% відфільтровано за кореляційним критерієм;
- $Th_{0,7} = 3,24e+09$  розрахунок часу за (4.3.16);
- $Te_{0,7} = 4,02e+09$  оцінка часу за (4.3.15);
- $Tk_{0,6} = 2,79e+09$  оцінка часу за (4.3.14) для  $K_0=0,3$ ;
- $T_{0,7} = 4597$  сек фактичний час виконання модуля обчислення кореляції.

Співвідношення між часом, обчисленим за (4.2.16) для  $R_c=0,6$  та  $R_c=0,7$ :  $Th_{0,7}/Th_{0,6} \sim 1,47$  відповідає співвідношенню між фактичним часом виконання блоку кореляції ( $4519$  сек /  $3170$  сек  $\sim 1,45$ ). Порівняння оцінки часу за (4.3.15) з розрахунком часу за (4.3.16) для  $R_c=0,6$ :  $Te_{0,6}/Th_{0,6} \sim 1,8$ ; для  $R_c=0,7$ :  $Te_{0,7}/Th_{0,7} \sim 1,2$ . Порівняння оцінки часу за (4.3.14) з розрахунком часу за (4.3.16) для  $R_c=0,6$ :  $Tk_{0,6}/Th_{0,6} \sim 1,0$ ; для  $R_c=0,7$ :  $Tk_{0,7}/Th_{0,7} \sim 0,9$ . Отже, використання додаткової інформації для оцінки часу (величина  $K_0$ ) дозволяє отримати більш точну оцінку. Зокрема, порівняємо фактичний час роботи 3-х віконного алгоритму з

фактичним часом роботи 2-х віконного (табл. 4.2.11), де друге і третє вікно мають однакові розміри, а саме 131x21 пкс.

*Модель 2а:*

- 3127 сек для 2-х вікон  $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс  $R_c = 0,6$  – для оцінки часу;
- 3170 сек для 3-х вікон  $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс  $R_c = 0,6$  – фактичний час.

Співвідношення:  $3127/3170 \sim 0,98$ .

- 3986 сек для 2-х вікон  $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс  $R_c = 0,7$  – для оцінки часу;
- 4597 сек для 3-х вікон  $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс  $R_c = 0,7$  – фактичний час.

Співвідношення:  $3986/4597 \sim 0,87$ .

*Модель 2б:*

- 1774 сек для 2-х вікон  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс  $R_c = 0,6$  – для оцінки часу,
- 1388 сек для 3-х вікон  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс  $R_c = 0,6$  – фактичний час.

Співвідношення:  $1774/1388 \sim 1,28$ .

- 1891 сек для 2-х вікон  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс,  $R_c = 0,7$  – для оцінки часу,
- 2070 сек для 3-х вікон  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс,  $R_c = 0,7$  – фактичний час.

Співвідношення:  $1891/2070 \sim 0,91$ .

*Модель 3:*

- 1999 сек для 2-х вікон  $R_c = 0,6$  – для оцінки часу,
- 2090 сек для 3-х вікон  $R_c = 0,6$  – фактичний час.

Співвідношення:  $1999/2090 \sim 0,96$ .

- 2752 сек для 2-х вікон  $R_c = 0,7$  – для оцінки часу,
- 3245 сек для 3-х вікон  $R_c = 0,7$  – фактичний час,

Співвідношення:  $2752/3245 \sim 0,84$ .

Співвідношення між фактичним часом виконання кореляційного блоку в середньому дорівнює 1,1 ( $R_c = 0,6$ ) та 0,9 ( $R_c = 0,7$ ), що узгоджується з результатами оцінок за (4.2.14).

Таким чином, алгоритм кореляційного ототожнення з використанням 2-х (3-х) пошукових вікон за ефективністю при певних

умовах (4.2.9) не поступається автоматизованому пошуку відповідних точок стереопари з одним (двома) вікнами.

Узагальнені висновки за результатами досліджень цього підрозділу приведені нами у підрозділі 4.3.

### 4.3. Висновки та рекомендації

За результатами досліджень ефективності методів математичного моделювання мікроповерхонь дослідних об'єктів, виконаних у підрозділі 4.1. нами зроблені наступні висновки.

1. Виконані дослідження показали можливість і доцільність використання для моделювання мікрорельєфу поверхонь дослідних об'єктів (грунти, метали, кераміка, тощо) математичні методи, які закладені в програмному пакеті Surfer 10.0 і який на сьогоднішній час є загальнодоступним та постійно вдосконалюється.

2. З 14 нами досліджених методів 4 з них дають гіршу точність побудови ЦММР для поверхні лесового ґрунту, ніж необхідна ( $m_z \leq 1.0$  мкм) за 100 контрольними точками мікроповерхні при заданій достатньо значній кількості вимірних точок (850). Це методи Шепарда, обернено-пропорційний відстані у степені, сусідніх околів і мінімальної кривизни, які недоцільно використовувати в процесі моделювання достатньо складних за мікрорельєфом поверхонь лесових ґрунтів.

3. Найкращі результати моделювання отримані методами Крігінга, радіальних базисних функцій, природних околів та триангуляції з лінійною інтерполяцією. Що стосується методу Крігінга, то можливості його застосування набагато ширші і універсальніші від решти перелічених, оскільки при його використанні можна використовувати різні типи варіограм (лінійну, експоненційну, квадратичну і інші функції), а також враховувати тип тренду поверхні, різне число точок для моделювання в октанті і тим самим дещо підвищувати точність цифрового моделювання мікрорельєфу.

4. Вибір найбільш оптимальних з великого числа математичних методів цифрового моделювання мікрорельєфу залежить від багатьох факторів (типу та структури поверхні об'єкта, матеріалу з якого він

виготовлений, параметрів РЕМ-знімання, кількості вимірних характерних точок мікроповерхні тощо) і потребує для кожного випадку окремих експериментальних досліджень.

5. Оптимальною кількістю точок для складного типу рельєфу мікроповерхні лесу площею близько 10000 мкм<sup>2</sup> є 500-1000 точок, які необхідно набирати нерегулярно в усіх характерних місцях (вздовж структурних ліній, вершини, впадини, уступи, тощо). Важливо при вимірюванні точок їх *не дублювати*, так як деякі методи, зокрема, метод радіальних базисних функцій дуже чутливий до цього фактору і при моделюванні в околах таких подвійних точок отримуються сильно спотворені висоти точок регулярної сітки, так звані «піки».

6. Для стереоскопічного вимірювання 800-1000 точок складного типу мікрорельєфу з перепадом висот до 50 мкм ( $M=1000^x$ ) необхідно близько 2-3 годин, якщо вимірювання РЕМ-стереопар виконувати на ЦФС «Дельта» з використанням спеціального пакету програм «Dimicros».

7. Для зменшення часу вимірювань доцільно використовувати поєднання виконання вимірювань характерних точок мікроповерхні дослідних об'єктів безпосередньо оператором та методи автоматизованого розпізнавання точок і побудови ЦММР, дослідження яких нами приведені у підрозділі 4.2 дисертаційної роботи.

Нижче наведено висновки за результатами досліджень методики автоматизованої побудови цифрової моделі мікроповерхні об'єкта, викладеної у підрозділі 4.2 дисертації.

1. Запропоновано методику поетапного ототожнення відповідних точок стереопари з застосуванням вікон-пошуку різних розмірів. Розмір пошукового вікна та відповідний діапазон висот визначено за набором зростаючих значень поздовжніх паралаксів. Перехід на наступний етап обчислень з більшим вікном-пошуку

здійснюється тільки для тих точок, що не задовольнили кореляційний критерій під час обчислень з меншим пошуковим вікном.

2. Область пошуку доцільно задавати прямокутним вікном, у якого ширина обмежена подвійним значенням поздовжнього паралакса, а висота значно менше ширини і коливається в межах 15 - 25 пікселів, оскільки для отримання РЕМ-стереопар використовують, переважно, лише поздовжні нахили гоніометричного столика на кут  $\alpha$ , а кути  $\omega = \kappa = 0^\circ$ . На цифрових РЕМ-знімках поперечний паралакс точок стереопари незначний (до 3-5 пкс), оскільки електронний зонд під час сканування мікроповерхні об'єкта і отримання РЕМ-зображення, фактично ортогональний до поверхні. Таким чином, суттєво зменшується область пошуку відповідного образу точок стереопари.

3. Виконано оцінку часу виконання алгоритму ототожнення відповідних точок стереопари з використанням 2-3-х вікон пошуку різних розмірів. Визначено умови, за якими час роботи алгоритму з двома вікнами пошуку збігається з одновіконним більшого розміру. (Для трьох вікон-пошуку передбачено збіг з двохвіконним, де друге вікно такого самого розміру як третє). Результати розрахунку оцінки часу підтверджено порівнянням з фактичним часом роботи модуля обчислення кореляції. Загалом час на автоматичний пошук і ототожнення точок стереопари у 2-5 разів менший за час вимірювання необхідної кількості точок, який виконується за програмою «Dimicros». Тому застосування автоматизованого методу для цілей побудови ЦММР поверхні об'єкта, запропонованого нами є доцільним і ефективним.

4. Виконано аналіз розподілу різниць між значеннями висот, обчисленими за вимірними координатами точок стереопари і за вимірними координатами точок на лівому знімку та знайдених кореляційним способом відповідних точок на правому знімку. Чисельний результат кореляційного ототожнення із використанням окремих вікон-



пошуку та їх комбінацій показав, що максимальне значення відсотків 84,8% для різниць між висотами в межах допустимих різниць  $-2 < \Delta Z \leq 2$  мкм спостерігається для моделей з одним вікном-пошуку (131x21 пкс), комбінацій двох вікон-пошуку (41x15, 131x21 пкс) і трьох вікон-пошуку (41x15, 81x17, 131x21 пкс). Аналіз просторового розподілу показав, що застосування вікон більших розмірів (131x21 пкс), на рівнинних ділянках призводить до помилкових ототожнень, а комбінація з вікном меншого розміру (41x15 пкс) дозволяє покращити результати кореляційного способу.

5. Побудовано двома способами цифрові моделі мікроповерхні зразка сталі. У першому способі виконується автоматичне генерування точок на лівому знімку стереопари за регулярною сіткою (з інтервалами:  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс,  $\Delta x = \Delta y = 20$  пкс,  $\Delta x = \Delta y = 25$  пкс), у другому - точки генеруються за модулем градієнта. Відповідні точки на правому знімку у обох способах визначаються методом кореляційного ототожнення з використанням 2-х та 3-х пошукових вікон. Для усунення окремих аномальних значень висот застосовано процедуру адаптивної медіанної фільтрації до 3D моделей мікроповерхні. Розподіл по 5-ти класах різниць висот  $\Delta Z$  між тестовою моделлю та вищенаведеними двома типами моделей виявив, що найбільші розходження зосереджені на ділянках зі складною формою мікроповерхні. За рахунок щільного набору точок обидві моделі дозволяють відновити дрібну структуру мікроповерхні.

6. Результати числового аналізу по 5-ти класах різниць  $\Delta Z$  між двома 3D моделями, побудованими за точками згенерованими у вершинах регулярної сітки та за модулем градієнта збігаються у 88-89% в межах  $-2 < \Delta Z \leq 2$  мкм. (Після фільтрування за кореляційним критерієм 0,7: для регулярної сітки з інтервалом  $\Delta x = \Delta y = 15$  пкс залишилось 4260 точок; для сітки з інтервалом  $\Delta x = \Delta y = 10$  пкс

залишилось 9522 точок; за модулем градієнта залишилась 6531 точка). Карта розподілу по 5-ти діапазонах різниць  $\Delta Z$  дозволяє чітко виділити ділянки складної форми мікроповерхні, які потребують інтерактивного втручання оператора.

7. Перспективним напрямом подальших досліджень в цій проблематиці є розвиток і вдосконалення алгоритмів фільтрування для усунення помилок кореляційного ототожнення.

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНОЛОГІЯ ОПРАЦЮВАННЯ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЇЇ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

### 5.1. Узагальнена технологічна схема опрацювання РЕМ-зображень

В загальному вигляді технологію опрацювання РЕМ-зображень можна відобразити наступною блок-схемою (рис. 5.1):

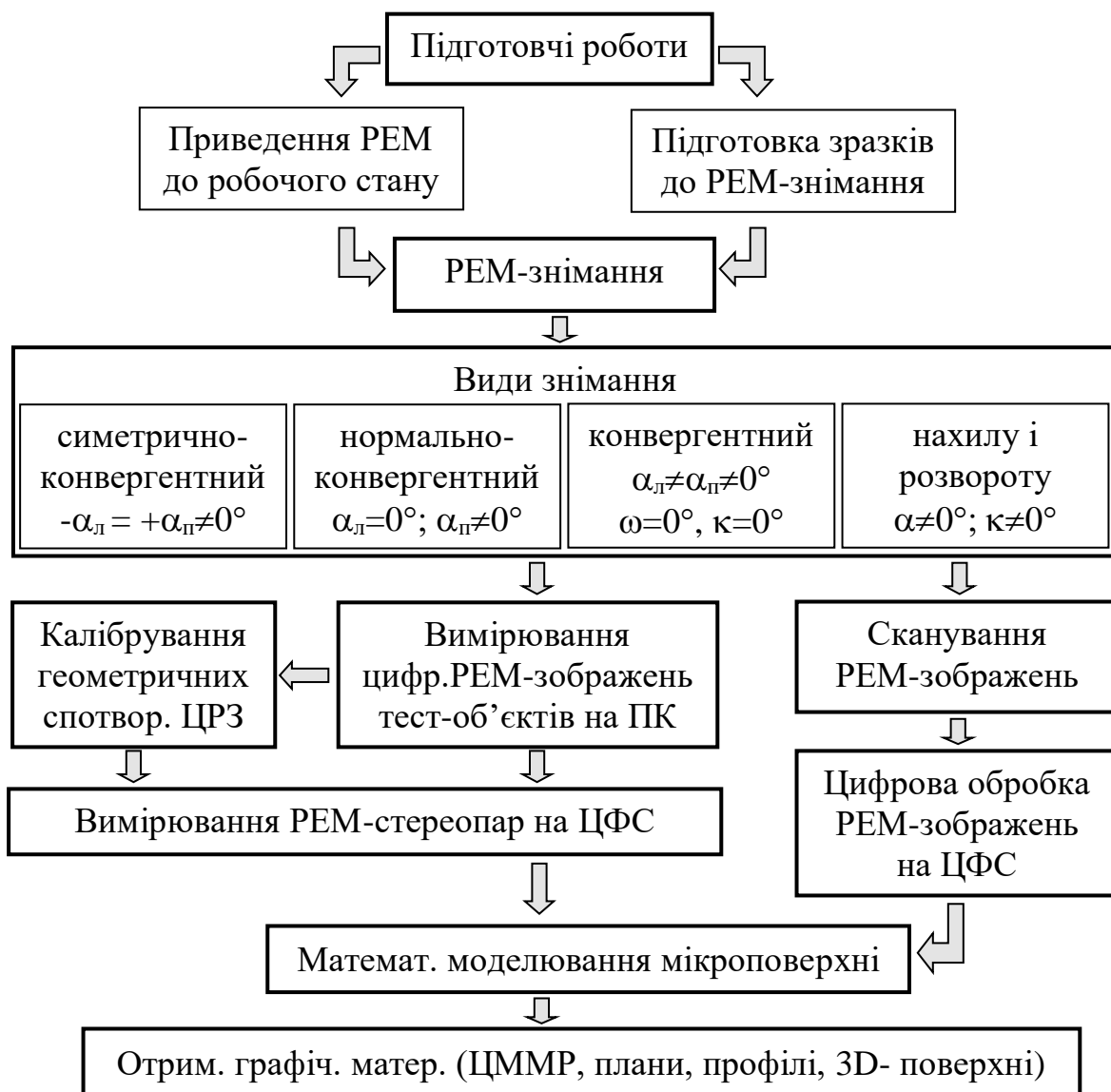


Рис 5.1. Технологічна схема методу.

Практична реалізація технології опрацювання РЕМ-зображень в кожному конкретному випадку залежить від наявності апаратури (мікроскопа), вимірювальної техніки (передусім ЦФС), технічних засобів

для приготування дослідного зразка, програмного комплексу та ін. Тому вважаємо доцільним коротко проаналізувати сучасний стан растрової електронної мікроскопії в Україні та за кордоном, передусім технічних засобів, що забезпечують РЕМ-знімання в широкому розумінні цього методу дослідження мікрооб'єктів.

5.2. Технічні характеристики вітчизняних і зарубіжних РЕМ та вимоги до них

Растрові електронні мікроскопи в Україні знаходяться, переважно, у великих наукових центрах міст Києва, Харкова, Дніпропетровська, Одеси, Львова, а також в ряді навчальних закладах, зокрема в НУ «Львівська політехніка» та інших. Це, насамперед, РЕМ вітчизняного виробництва Сумського заводу електронних пристроїв (тепер ПАТ «SELMІ»), зокрема моделі РЕМ-100 У, РЕМ-200 У і РЕМ 106 І. Вони різняться головними технічними параметрами, такими як гранична розрізняюча здатність РЕМ-зображення, діапазон збільшень, ступені прискорюючої напруги, прецизійність гоніометричного столика, можливості практичного застосування, тип фотосистеми та системи запису цифрового зображення, наявністю різноманітних автоматизованих пристроїв тощо.

Серед зарубіжних РЕМ в Україні є поодинокі прилади фірм «JEOL» (Японія), «Hitachi» (Японія), «Opton» (Німеччина), «Cam Scan» (Великобританія), «Stereoscan» (Великобританія), «Quickscan» (США), «Tesla» (Чехія), однак за нашими даними, вони лише зрідка використовуються виключно для наукових досліджень, а у вітчизняному виробництві, на жаль, РЕМ практично не застосовують.

В табл. 5.1 приведені основні технічні параметри ряду марок (типів) вітчизняних та зарубіжних РЕМ.

Однією з найважливіших характеристик РЕМ є максимальна розрізняюча здатність РЕМ-зображення, якої можна досягти при максимальному його збільшенні. Найбільш високоточні РЕМ мають розрізнення  $\approx 1$  nm. Однак більшість дослідників цілком влаштовує розрізнення у 10 разів менша, тобто  $r=10$  nm ( $100A^\circ$ ). Граничну роздільну здатність можна досягнути лише при граничних збільшеннях РЕМ у  $100000^\times \div 300000^\times$ . Зауважимо, що при таких збільшеннях фотографічні та метричні властивості РЕМ-зображень суттєво поступаються класичним фотознімкам.

В силу певних обмежень на практиці за таких великих збільшень дослідження не виконуються. Переважно діапазон збільшень під час досліджень мікроповерхонь різноманітних об'єктів знаходиться у межах  $500^\times$ - $25000^\times$  (крат).

Важливими для фотограмметристів є і ряд інших параметрів, зокрема діапазон лінійних переміщень  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  та кутових нахилів гоніометричного столика  $-\alpha^\circ \div +\alpha^\circ$ , на який кріпиться дослідний зразок. Сучасні РЕМ дозволяють встановлювати кути нахилу столика в діапазоні від  $-60^\circ$  до  $+90^\circ$  з точністю  $m_\alpha=0,1^\circ$ . Власне саме параметр  $m_\alpha$  найбільш суттєво впливає на точність визначення висот точок мікроповерхні  $m_{Z(h)}$  і, як показали розрахунки, його необхідно знати з точністю, бажано не нижчою, ніж  $m_{\alpha \min} < 0,2^\circ$ .

В даний час практично всі РЕМ дозволяють записувати РЕМ-зображення у цифровому вигляді у форматах JPEG, BMP і TIFF. Розгортка цифрових РЕМ-зображень переважно від  $800 \times 600$  пікселів (DSM 960A, фірми Carl Zeiss, Німеччина) до  $1280 \times 960$  пкс (РЕМ 106I, Суми, Україна),  $1280 \times 1024$  пкс (JSM 7100F, JEOL, Японія),  $1280 \times 1080$  пкс (JCM-5000 NeoScore, JEOL, Японія). Об'єм пам'яті 1 знімка – від 0,5 до 1,5 Мб.

Сучасні РЕМ оснащені цілим рядом автоматизованих пристроїв, які значно покращують фотографічні і метричні властивості РЕМ-знімків, виконуючи, зокрема, функції автофокусування, стабілізації контрасту, мінімізації аберацій та геометричних спотворень, контроль за стабільністю встановленого масштабу (збільшення) РЕМ, а також можливість запису РЕМ-зображення у цифровому виді для подальшої його цифрової обробки.

Питання технологічної схеми, які стосуються технічних засобів для приготування зразків, технології виготовлення тест-об'єктів для калібрування цифрових РЕМ-зображень і методика РЕМ-стереознімання нами і іншими вченими вже раніше у достатній мірі висвітлювалась [34, 55, 137], вони не є предметом досліджень дисертаційної роботи і тому винесені нами в додаток 1 до цього розділу.

Растрові електронні мікроскопи провідних фірм світу та їх основні технічні параметри Таблиця 5.1

Країна виробник	Назва фірми виробника	Марка PEM	Основні технічні параметри PEM									Об'єм, Мб
			Мах розд. здат. <i>nm</i>	Діапазон збільшень М, крат	Напруга, кВ	Переміщення столика			Нахил столика $\pm\alpha^\circ$	Діаметр столика, мм	Розмір PEM-знімка	
						$\Delta X$ , мм	$\Delta Y$ , мм	$\Delta Z$ , мм				
Україна	Сумський з-д електронних пристроїв	PEM-103У	10	20÷200000	5,15,30,40	20	25	25	-5°÷+45°	60	60×60 мм	
		PEM-106І	4	15÷300000	0,5÷30	20	25	25	-5°÷+45°	60	1280х960	1,2
Японія	JEOL	JSM-880	1,5	10÷300000	1÷40	8	8	1	±60°			
		JSM-840А	4	10÷300000	0,2÷40	50	70	8÷48	-5°÷90°			
		JSM-7100F	1,2	10÷1000000	0,2÷30	±70	±40	3÷41	-5°÷70°	200	1280х1024	1,25
		JSM-T300	6	15÷200000	1÷30	40	80	8÷48	-10 90	32		
		JSM-T100	8	15÷100000	5,15,25	10	20	1248	-40 90			
		JCM-5000	15	10÷ 40000	5,10,15	10	20	1248	-60 90	70	1280х1080	1,32
	HITACHI	S-800	4÷6	10÷250000	1÷40	40	80	8÷48	-10 90		60х60 мм	
Німеччина	Carl Zeiss	DSM 960А	5	10÷200000	1÷30	25	25	25	-5÷45	70	800х600	0,5
Великобританія	Cam Scan	Series4-DV	5	15÷200000	1÷40	100	50	50	-5÷90			
	Stereoscan	S4-10	5	15÷200000	1÷40	100	50	50	-5÷90			
США	QuickScan	OS	10	20÷150000	1÷30	100	50	50	-5÷90			
Чехія	TESLA	BS-300	10	5÷200000	1÷49	10	10	45	-5÷60	30		

### 5.3. Приклади застосування технології опрацювання цифрових РЕМ-зображень на реальних об'єктах

#### 5.3.1. Побудова ЦММР поверхні хромованої сталі для подальших досліджень її деформацій в процесі експлуатації

Матеріал для досліджень нам був наданий працівниками науково-дослідної лабораторії електронно-мікроскопічних досліджень Свентокшиської Політехніки (м. Кельци, Польща).

РЕМ-стереознімання тест-об'єкту для калібрування геометричних спотворень РЕМ, а також отримання стереопар поверхні дослідного зразка хромованої сталі, яка зазнала деформацій термічного характеру, виконувалось сучасному РЕМ JSM 7100F (JEOL, Японія) при збільшенні  $M=750^x$ . Стереопара мікроповерхні дослідного зразка приведена на рис. 5.2.

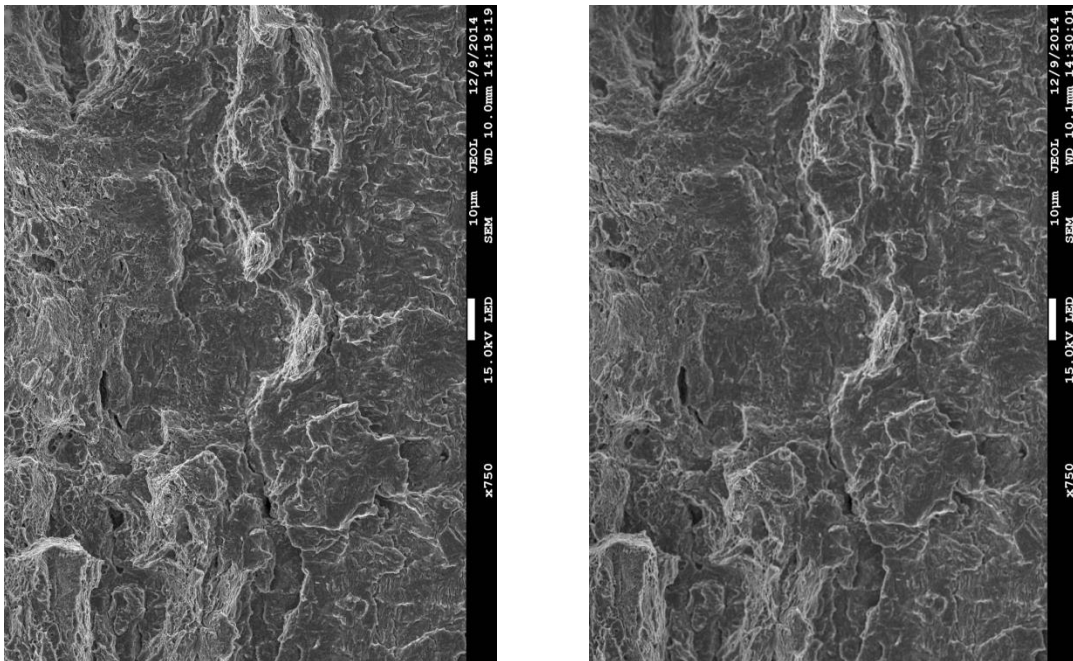


Рис. 5.2. Стереопара мікроповерхні хромованої сталі (РЕМ JSM-7100F,  $M=750^x$ ,  $\alpha_{дл} = 0^\circ$ ,  $\alpha_{п} = +8^\circ$ ).

Опрацювання цифрових РЕМ-зображень тест-об'єкту з розрізняючою здатністю  $r=1425$  лін/мм виконувалось з використанням програм «Test Measuring» і «Polycalc» програмного комплексу



«Dimicros» (детальний опис функцій програм комплексу наведений у додатку роботи.).

Результатом даного опрацювання стало встановлення дійсних збільшень РЕМ в діапазоні  $750^{\times} \div 30000^{\times}$  (крат) та характеру і величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень у цьому діапазоні. Детально дослідження з цього питання описані у підрозділі 3.4.4.

За програмою «Stereo-SEM» на ПК з використанням стереосистеми було виміряно 250 характерних точок мікроповерхні та отримано їх просторові координати з врахуванням геометричних спотворень. З використанням програми Surfer далі було створено ЦММР мікроповерхні і отримано її графічні зображення у вигляді горизонталей і 3D моделей (див. рис. 5.3). Найбільш доцільно в процесі побудови ЦММР для даного типу рельєфу застосовувати метод Крігінга з лінійною варіограмою (більш детально див. у підрозділі 4.2.).

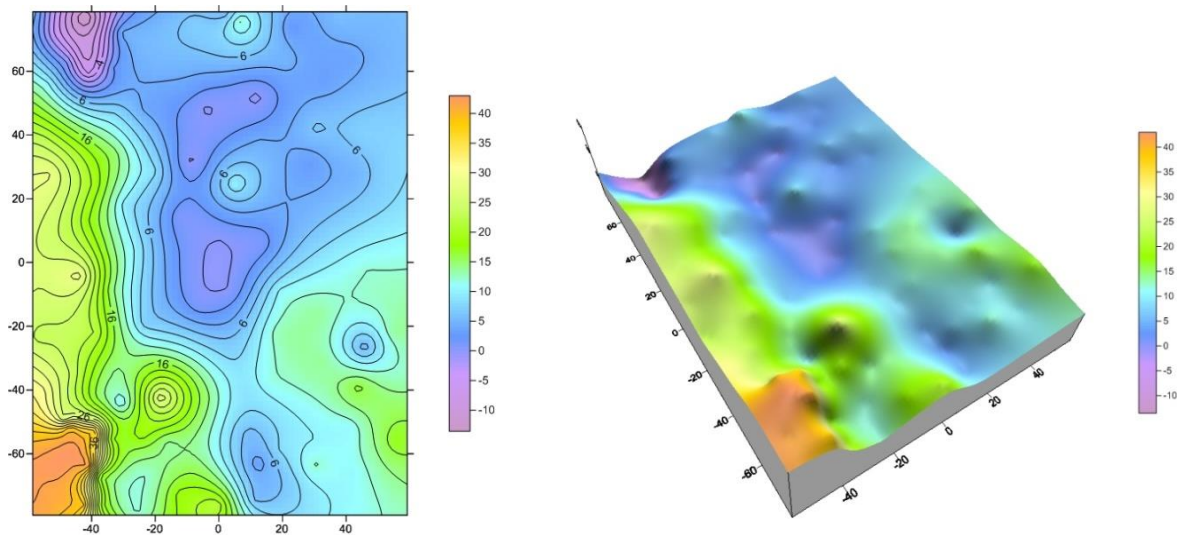


Рис. 5.3. Мікроповерхня хромованої сталі. Зліва – зображення рельєфу горизонталями, справа – просторова модель.

Перетин рельєфу горизонталями 2 мкм, перепад висот 60 мкм.

Досліджений фрагмент мікроповерхні має розміри  $100 \times 160$  мкм і перепад висот 60 мкм. Теоретична точність отримання висот точок для даних параметрів РЕМ-знімання складає приблизно  $m_z \approx 1,5$  мкм.

Практично нами отримано висоти точок з точністю  $m_z \approx 0,75$  мкм, тому горизонталі тут побудовані з кроком 2 мкм.

На рис. 5.3 добре видно деформовані ділянки поверхні, особливо у лівій нижній частині знімка. Така форма графічної інтерпретації мікроповерхні і каталог просторових координат точок дають спеціалістам вичерпну просторову інформацію про величини і характер деформацій.

5.3.2. Побудова ЦММР поверхонь втомних тріщин деталей металевих конструкцій для досліджень механізмів кінетики їх розвитку під дією механічних навантажень

Дане дослідження виконано на прохання проф. Ріпецького Є. Й. (Івано-Франківський національний університет нафти і газу), який надав декілька зразків тріщин (зламів) деталей металевих конструкцій під впливом змодельованого механічного навантаження.

РЕМ-стереознімання було нами виконано на вітчизняному РЕМ 106 І (м. Суми, ВАТ «SELMІ»), який знаходиться у лабораторії електронної мікроскопії НУ «Львівська політехніка». Перед РЕМ-зніманням нами вперше було виконане детальне дослідження характеру та величин геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на даному типі РЕМ.

Опрацювання РЕМ-зображень виконувалось за аналогічною методикою з використанням програм комплексу «Dimicros». Вимірювання стереопар виконувалось на ПК у стереорежимі.

Точність планових координат тут склала  $m_x = m_y = 0,01$  мм, а висот точок -  $m_{z(h)} = 0,05$  мм, яка повністю задовольнила дослідників.

Загалом на 2-х спряжених поверхнях було виміряно 500 точок, 450 з яких використано для 3D моделювання мікроповерхонь зламу, а 50 – для контролю точності.

РЕМ-стереопара одного з дослідних зразків приведена на рис. 5.4.

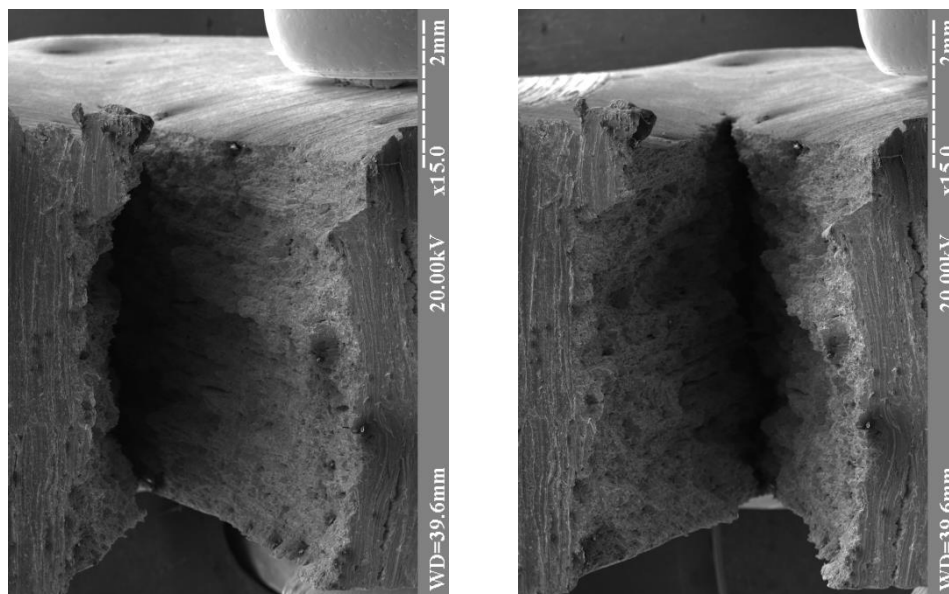


Рис. 5.4. Стереопара мікроповерхні тріщини (зламу) металевої деталі (РЕМ 106I,  $M=42,7\times$ ,  $\alpha_{\text{л}} = -6^\circ$ ,  $\alpha_{\text{п}} = +6^\circ$ )

За результатами вимірювань з використанням програми Surfer побудовано ЦММР мікроповерхні і отримано її графічні зображення у вигляді горизонталей і 3D моделей (див. рис. 5.5). Найбільш доцільно в процесі побудови ЦММР для даного типу рельєфу застосовувати метод Крігінга з лінійною варіограмою (більш детально див. у підрозділі 4.2.).

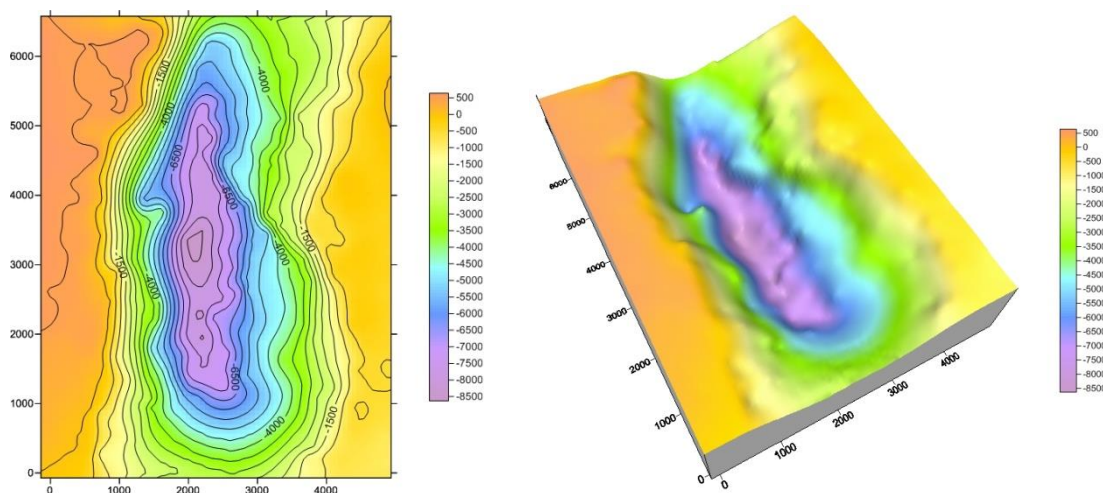


Рис. 5.5. Мікроповерхня тріщини (зламу) металевої деталі. Зліва – зображення рельєфу горизонталями, справа – просторова модель.

Перетин рельєфу горизонталями 0,5 мм, перепад висот 9 мм.

### 5.3.3. Побудова ЦММР поверхні лесового ґрунту для подальших досліджень її мікроструктури та характеру мікрорельєфу

Дані дослідження виконані на прохання проф. Соколова В.М. (МНУ ім. М. Ломоносова, м. Москва, Росія). Власне РЕМ-знімання зразків мікроповерхні лесового ґрунту було виконано ще в середині 80-х років минулого століття на РЕМ «Hitachi S-800» і РЕМ-знімки отримані фотографічним шляхом на фотоплівку фабрики «Свема» (ширина плівки 60 мм). Розмір РЕМ-знімків з інформацією про параметри знімання склав 70x56 мм. Для експериментальних досліджень ці знімки нами були відскановані на фотограмметричному сканері фірми «Геосистема» (м. Вінниця, Україна) з розрізнявальною здатністю 2400 dpi. Таким чином розмір пікселя цифрових РЕМ-зображень тут складає близько 0,01 мм.



Рис. 5.6. Стереопара мікроповерхні лесового ґрунту, отримана на РЕМ «Hitachi» S-800 при  $M = 1000\times$  і кутах нахилу гоніометричного столика  $\alpha_{\text{п}} = 0^\circ$ ,  $\alpha_{\text{п}} = +8^\circ$ .

Опрацювання РЕМ-стереопар виконано за аналогічною методикою, як і попередні зображення, з використанням програмного комплексу «Dimicros». Вимірювання характерних точок мікроповерхні виконувалось на ПК стереоскопічно з використанням стереосистеми.

Загалом виміряно 950 точок, 850 з яких використано для моделювання мікроповерхні, а 100 – для контролю точності. На рис. 5.7 – результати графічної інтерпретації поверхні лесового ґрунту.

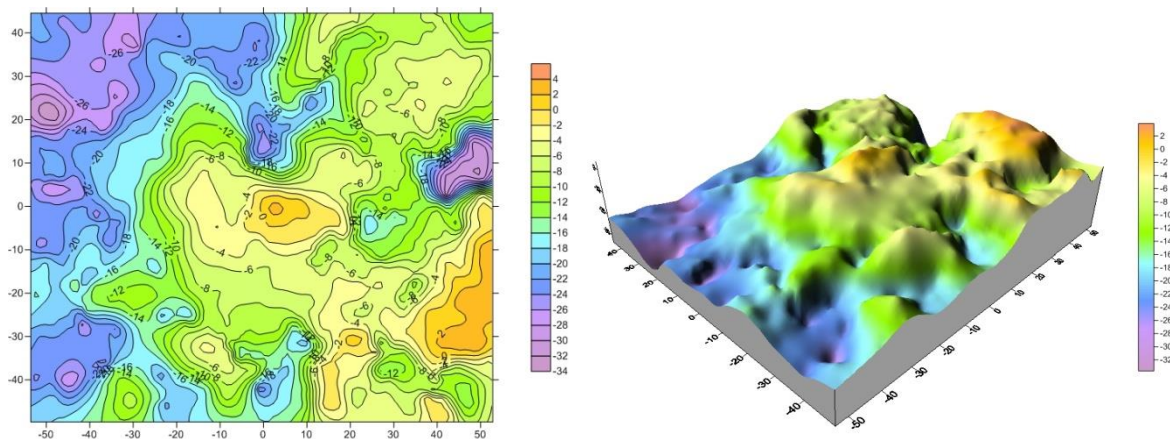


Рис. 5.7. Мікроповерхня лесового ґрунту. Зліва – зображення рельєфу горизонталлями, справа – просторова модель. Перетин рельєфу горизонталлями 2 мкм, перепад висот 42 мкм.

Дана форма графічної ілюстрації мікроповерхні лесового ґрунту наочно показує його морфоструктуру і дозволяє робити подальші висновки (разом з даними механіко-кінематичних досліджень) про його стійкість до вертикальних навантажень, зміни структури під впливом фізичних чинників, зокрема тиску, вологості тощо.

Теоретична точність отримання висот точок для даних параметрів РЕМ-знімання складає близько  $m_z \approx 1$  мкм, практична –  $m_z \approx 0,7$  мкм які цілком задовольняють дослідників.

#### 5.4. Висновки

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

2. Численні експериментальні дослідження довели коректність основних теоретичних положень і підтвердили ефективність опрацьованих методик.

3. Сфера застосування описаних технологій та діапазон досліджень мікроповерхонь різноманітних об'єктів є дуже широким. Тому вимоги до точності отримання їх просторових параметрів коливається від 50 мкм до 0,01 мкм. Це дозволяє вести контроль за якістю їх отримання на різних технологічних рівнях – від мікро- до нанорівня.

4. Опрацьовані методики і технології доцільно застосовувати у різних галузях виробництва, зокрема у машинобудуванні, літакобудуванні, мікроелектроніці, матеріалознавстві та багатьох інших.

## Загальні висновки

Основними результатами дисертаційної роботи можна вважати:

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

2. 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. Розроблені і досліджені нові підходи, методика та технологія калібрування цифрових РЕМ-зображень для визначення величин геометричних спотворень та ефективного їх врахування.

4. Вперше, на підставі значного обсягу 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.

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 низку додаткових кількісних показників, які притаманні виключно даному типу РЕМ та використати їх для більш ефективного калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень.

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

7. 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.

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

9. 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.

10. Застосовано 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.

11. 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.

12. 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.

## Література.

1. Анищенко В. С. Лекции по нелинейной динамике: Учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. “Радиофизика и электроника” и “Физика” / В. С. Анищенко, Т. Е. Вадивасова. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010. - 322 с.
2. Аристов В. В. Формирование изображения микрорельефа поверхности в растровой электронной микроскопии / В. В. Аристов, В. В. Казьмирук, Н. Г. Ушаков, А. А. Фирсова // Поверхность. - 1989. - №4. - С.120-127.
3. Баканова Е. С. Периодические тест-объекты для РЭМ / Е. С. Баканова, Л. Н. Невзорова, Н. Н. Щитов // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по РЭМ, Звенигород. - Москва: 1984. - С. 20.
4. Барабаш Т. К. Анализ методом фрактальной параметризации эволюции геометрии доменных структур сегнетоэлектриков при электронном облучении / Т. К. Барабаш, А. Г. Масловская // Сб. тр. 11-ой Межд. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом». – Минск, 2015. – С. 36-38.
5. Бобро Ю. Г. Принципы фрактальности в механике разрушения металлов / Ю. Г. Бобро, В. Н. Мельник, В. У. Волошин, А. В. Шостак // Изв. РАН. Металлы, 1997. - №2. - С. 119-122.
6. Бобро Ю. Г. Новый метод компьютерного фрактографического анализа микроструктуры твердых тел по их РЭМ-изображениям / Ю. Г. Бобро, А. В. Шостак // Материалы 38-го межд. семинара по моделированию и оптимизации композитов. - Одесса, 1999.
7. Бобро Ю. Г. Определение фрактальности поверхностей по данным РЭМ-стереоизмерений / Ю. Г. Бобро, В. Н. Мельник, А. В. Шостак // Изв. РАН. Металлы, 1999. - №3.

8. Бобро Ю. Г. РЕМ-стереофрактографія поверхонь зносу та злому дробометальних лопаток / Ю. Г. Бобро, А. В. Шостак // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. наук. ст., напрямок «Інженерна механіка».- Луцьк, 1999. - Вип. 5.
9. Бурштинська Х. Застосування кореляційно-спектрального аналізу для вибору інтервалу при побудові цифрової моделі рельєфу / Х. Бурштинська, О. Тумська, Д. Лелюх / Матеріали 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика - сучасні технології і перспективи розвитку». – Львів-Краків. – 2000. – С. 98-102.
10. Бурштинська Х. В. Порівняльний аналіз побудови цифрових моделей рельєфу з використанням апроксимаційних функцій / Х. В. Бурштинська // Геодезія, картографія і аерофотознімання. - 2001.- Вип. 61. - С. 137-148.
11. Бурштинська Х. В. Моделювання рельєфу з застосуванням диференціальних сплайнів / Х. В. Бурштинська, О. С. Заяць // Матеріали VI Міжн. наук.-техн. симпоз. «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища, GPS та GIS-технології». - Алушта, 2001. - С.66-68.
12. Бурштинська Х. В. Дослідження точності побудови цифрових моделей рельєфу на основі картометричних даних / Х. В. Бурштинська, О. С. Заяць // Вісник геодезії і картографії. - 2002. - №2. - С. 26-31.
13. Бурштинська Х. В. Колокація з умовами у цифровому моделюванні рельєфу / Х. В. Бурштинська // Геодезія, картографія і аерофотознімання. - 2002. - Вип. 62. - С. 103-110.
14. Бурштинська Х. В. Теоретичні основи та експериментальні дослідження математичних функцій для побудови цифрових

- моделей рельєфу / Х. В. Бурштинська, О. С. Заяць // Вісник геодезії і картографії. - 2002. - №4. - С. 32-37.
15. Бурштинська Х. В. Основні чинники впливу на точність побудови цифрових моделей рельєфу / Х. В. Бурштинська // Матеріали VII Міжн. наук.-техн. симпоз. «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища, GPS та GIS-технології». - Алушта, 2002. - С. 10-17.
  16. Бурштинська Х. В. Теоретичні та методологічні основи цифрового моделювання рельєфу за фотограмметричними та картометричними даними: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук / Бурштинська Х. В. - Львів, 2003. - 36 с.
  17. Вайншток В. А. Применение стереоскопической фрактографии для анализа сопротивления развитию трещин / В. А. Вайншток, А. Я. Красовский, Г. Н. Надеждин, В. А. Степаненко // Проблемы прочности. - 1978. - №11. - С. 101-108.
  18. Вайншток В.А. Экспертная оценка трещиностойкости конструкционных сталей с помощью количественной фрактографии / В. А. Вайншток, А. Я. Красовский, В. А. Степаненко // Проблемы прочности. - 1980. - №7. – С. 19-20.
  19. Валиев Р. З. Кристалло-геометрический анализ межкристаллитных границ в практике электронной микроскопии / Р. З. Валиев, А. Н. Вергазов, В. Ю. Герцман. - Москва: Наука, 1991. - 225 с.
  20. Васичев Б. Н. Анализ изображений в РЭМ / Б. Н. Васичев, Г. М. Мурашко // Изв. АН СССР. Сер. физическая. - 1974. - 38. - №7. - С. 1398-1402.
  21. Васичев Б. Н. Современное состояние и перспективы растровой электронной микроскопии / Б. Н. Васичев, А. Н. Кабанов // Изв. АН СССР. Сер. физическая. - 1977. - 41. - №7. - С. 1513-1524.

22. Васичев Б.Н., Абрамов Г.Л. Стереовидение в растровой электронной микроскопии / Б. Н. Васичев, Г. Л. Абрамов // Оптико-механ. промышленность, 1979. - №8. - С. 5-8.
23. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. - Москва: Наука, 2001. - 575 с.
24. Визильтер Ю. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, А. В. Бондаренко, М. В. Ососков, А. В. Моржин. – Москва: Физматкнига, 2010. – 672 с.
25. Волк Ч., Чорнев Е., Новаков Ю. и др. Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрического диапазонов для измерения размеров элементов СБИС на растровых электронных микроскопах / Ч. Волк, Е. Чорнев, Ю. Новаков // Микроэлектроника, 2002. - Т. 31. - №4. - С. 243-262.
26. Волошин В. У. Розробка методів РЕМ-фотограмметрії та морфолого-фрактального аналізу / В. У. Волошин // Волинський державний університет імені Лесі Українки. Луцьк, 2008. - С. 11-33.
27. Волчок И. Сопротивление разрушение стали и чугуна / И. Волчок. - Москва: Metallurgy, 1993. - 192 с.
28. Гарелик И. В. Стереофотограмметрическая съемка в электронной микроскопии: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук / Гарелик И.В. - Москва: 1967. - 18 с.
29. Голубев В. П. Исследование телевизионных методов обработки изображений в растровой электронной микроскопии: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук / Голубев В. П. - Москва, 1980. - 20 с.
30. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс // Москва: Техносфера, 2005. – 1072 с.

31. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс // Москва: Техносфера, 2006, - 616 с.
32. Гончаров П. П. Стереофотограмметрический метод определения микроструктур при износе шлифовальных материалов и пластической деформации металлов: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук / Гончаров П. П. - Москва, 1974. - 22 с.
33. Горбачёв В. А. Разработка алгоритмов высокодетального моделирования объектов на основе анализа цифровых изображений : дис. канд. физ.-мат. наук / Горбачёв В. А. - МФТИ (ГУ). - Москва, 2014.
34. Гоулдстейн Дж. Практическая растровая электронная микроскопия / Дж. Гоулдстейн, Х. Яковиц и др. - Москва: Мир, 1978. - 656 с.
35. Гоулдстейн Дж. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин и др. В 2-х кн. - Москва: Мир. - 1984. - с.
36. Грузман И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 352 с.
37. Грузман І. С., Цифрова обробка зображень в інформаційних системах / І. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косих, Г. І. Перетягин, А. А. Спектор // Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Харків, 2001. - С. 28-51.
38. Дехтяр И. Я. Применение методов картографии в обработке снимков, полученных в растровом электронном микроскопе / И. Я. Дехтяр, В. Т. Адонкин, М. Д. Смолин, В. М. Стеценко, Б. М. Онысько, В. В. Стаценко // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по РЭМ, Звенигород. – Москва, 1984. - С. 21.

39. Дицман С. А. Применение тест-объектов с латексными сферами в РЭМ / С. А. Дицман, В. А. Злобин, Л. Н. Невзорова, Л. П. Фаворская // Изв. АН СССР. Сер. физическая. - 1982. - 46. - №12. - С. 2388-2390.
40. Дорожинський О. Л. Аналітична та цифрова фотограмметрія: Навч. посібник / О. Л. Дорожинський. - Львів: НУ «Львівська політехніка», 2002. - 164 с.
41. Дорожинський О. Л. Фотограмметрія / О. Л. Дорожинський, Р. Тукай. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2008.- 330 с.
42. Дунин-Барковский И. В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. - Москва: Машиностроение, 1978. - 232 с.
43. Дусевич В. М. О точности стереоизмерений в растровой электронной микроскопии // Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по электронной микроскопии / В. М. Дусевич. - Москва-Сумы, 1987. - Том 2. - С. 510-512.
44. Дусевич В. М. О стереоизмерениях в растровой электронной микроскопии / В. М. Дусевич // Зав. лаб., 1989. - №5. - С. 38-42.
45. Дюков В. Г. Растровая электронная микроскопия поверхностного потенциала рельефа и ее применение / В. Г. Дюков // Поверхность. Физ., химия, мех. - 1982. - С. 1-15.
46. Дюков В. Г. Растровая оптическая микроскопия / В. Г. Дюков, Ю. А. Кудеяров. - Москва: Наука, 1992. - 207 с.
47. Журба А. А. Анализ изменений фрактальной размерности и ее распределения в процессе формирования композитной структуры быстрорежущей стали / А. А. Журба, А. И. Михалев, С. И. Губенко, Е. А. Черноиваненко // «Системные технологии», 4(81), 2012. – С. 155-164.
48. Иванова В. С. Разрушение металлов / В. С. Иванова. - Москва: Металлургия, 1979. - 168 с.

49. Иванова В. С. Механика и синергетика усталостного разрушения / В. С. Иванова // Физико-химическая механика материалов, 1986. - Т. 22. - №1. - С.62-67.
50. Иванова В. С. Количественная фрактография // Усталостное разрушение / В. С. Иванова, А. Шанявский. - Челябинск: Металлургия, 1988. - 400 с.
51. Иванчук О. М. Стереοфотограмметрическая обработка РЭМ-изображений / О. М. Иванчук, В. Н. Мельник, В. Н. Соколов // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по РЭМ. – Москва, 1984. - С.45.
52. Иванчук О. М. Дослідження точності визначення збільшення (масштабу) РЕМ-знімків за допомогою тест-сіток з різною роздільною здатністю / О. М. Иванчук, В. М. Мельник // Матеріали наук.-практ. конф. - Львів, 1996. - С. 92-94.
53. Иванчук О. М. Фотограмметричний метод оперативного опрацювання РЕМ-стереопар для кількісної оцінки мікроповерхонь твердих тіл / О. М. Иванчук // Вісник геодезії та картографії. - Київ, 1998. - №2. - С. 51-53.
54. Иванчук О. М. Вибір оптимальних параметрів РЕМ-знімання при дослідженнях шорсткості шліфованих поверхонь твердих тіл стереοфотограмметричним методом / О. М. Иванчук // Матеріали міжнар. наук. конф. -Львів, 2000. - С. 256-259.
55. Иванчук О. М. Методи оперативного фотограмметричного опрацювання знімків, отриманих на растрових електронних мікроскопах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Иванчук О. М. - Львів, 2000. - 18 с.
56. Иванчук О. М. Застосування стереοфотограмметричного методу опрацювання РЕМ-зображень для досліджень біологічних об'єктів в медицині / О. М. Иванчук // Матеріали 2-ї міжн. наук.-практ. конф.



- «Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика - сучасні технології і перспективи розвитку». - Львів, Краків, 2000. - С. 170-173.
57. Іванчук О. Застосування методу фотограмметричного опрацювання РЕМ-стереопар для досліджень мікроповерхонь геологічних об'єктів та ґрунтів / О. Іванчук // Kataster, fotogrametria, geoionformatyka: 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.
58. 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.
59. Іванчук О. М. Дослідження точності встановлення параметру «збільшення» РЕМ-зображень на растрових електронних мікроскопах / О. М. Іванчук // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. – Зб. наук. праць. - Львів: Ліга Прес, 2003. - С. 246-251.
60. 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.
61. 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. П(16). - С. 111-116.
62. 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.
63. Іванчук О. Дослідження точності визначення дійсних величин збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) фірми JEOL / О. Іванчук // Геодезія, картографія і аерознімання : міжвід. наук.-техн. зб. – Львів, 2012. Вип. 76. - С. 80-84.
64. 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. Геєг, В. Гегер // Геодезія, картографія і аерознімання : між від. наук.-техн. зб. – Львів, 2013. Вип. 78. - С. 120-126.
65. Іванчук О. М. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) та їх апроксимація / О. М. Іванчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна. – Донецьк, 2013. Вип. 1(18). - С. 91-97.
66. Іванчук О. М. Дослідження похибок збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106І (Суми, Україна) за допомогою спеціальних тест-об'єктів / О. М. Іванчук, М. В. Чекайло // Геодезія, картографія і аерознімання : міжвід. наук.-техн. зб. – Львів, 2014. Вип. 79. - С. 82-88.
67. Іванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106 І (Суми, Україна) / О. Іванчук // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2014. Вип. II (28). - С. 74-77.
68. 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.
69. 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 : міжвід. наук.-техн. зб. – Львів, 2015. Вип. 81. - С. 101-109.
70. 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.
71. 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.
72. 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.
73. Іванчук О. М. Технологія опрацювання цифрових РЕМ-зображень мікроповерхонь твердих тіл / О. М. Іванчук // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. – Київ: КНУБА, 2017. Вип. 63. - С. 170-184.
74. Іванчук О. Порівняльний аналіз статистичних та скейлінгових характеристик цифрових 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.
75. 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.
76. Казьмирук В. В. Методы и аппаратура растровой электронной микроскопии / В. В. Казьмирук // Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по электронной микроскопии, Сумы. – Москва, 1987. - С. 71-72.
77. Калантаров Е. И. Фотограмметрическая обработка электронно-микроскопических снимков / Е. И. Калантаров, М. Ж. Сагындыкова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1982. - №2. - С. 82-85.
78. Калантаров Е. И. Фотограмметрическая калибровка электронных микроскопов / Е. И. Калантаров, М. Ж. Сагындыкова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1983. - №4. - С. 76-81.
79. Калинин Р. С. Влияние эксплуатационных факторов на износ лопаток дробебетных аппаратов / Р. С. Калинин // Литейное производство, 1964. - №4. - С. 196-199.
80. Калиниченко А. В. Эпиполярная геометрия и оценка ее достоверности по результатам восстановления трехмерной сцены алгоритмами факторизации / А. В. Калиниченко, Н. В. Свешникова, Д. В. Юрин // Московский государственный университет. - Москва, 2008. - С. 15-25.
81. Карелин Н. М. Анализ микротопографии при помощи парносимметричного детектора в растровом электронном

- микроскопе / Н. М. Карелин, Э. Н. Рау, Г. В. Спивак // Изв. АН СССР. Сер. физическая, 1977. – Т. 41. - №5. - С. 922-927.
82. Карташев А. И. Шероховатость поверхности и методы ее измерения / А. И. Карташев. - Москва: Изд-во стандартов. - 1964. - 163 с.
83. Карупу В. Я. Электронная микроскопия /В. Я. Карупу. - Киев: Вища школа. - 1984. – 208 с.
84. Квашонкин В. И. Набор тест-объектов для калибровки увеличений и проверки разрешающей способности электронных микроскопов / В. И. Квашонкин, Д. А. Агиевский, Ю. Е. Егоров // Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по электронной микроскопии, Сумы. – Москва, 1987. - С. 78.
85. Кендалл М. Геометрические вероятности / М. Кендалл, П. Моран. - Москва: Наука, 1972. - 192 с.
86. Ковбаса С. Н. Количественная интегральная оценка структурных параметров твердых тел по изображениям / С. Н. Ковбаса, В. Н. Соколов, М. Д. Толкачев // Изв. АН СССР. Сер. физическая, 1984. - Т. 48, №12. - С. 2423-2426.
87. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. - Москва: Наука, 1973. - 681 с.
88. Костышин М. Т. Квантовая электроника / М. Т. Костышин, К. С. Мустафин. - 1982. - Вып. 23. - С.29-33.
89. Крагельский И. В. Трение и износ /И. В. Крагельский. - Москва: Машгиз, 1962. - 338 с.
90. Красовский А. Я. Применение растровой электронной микроскопии для количественной стереофрактографии усталостных изломов / А. Я. Красовский, В. А. Степаненко, Н. Д. Бега // Проблемы прочности, 1977. - №6. - С. 35-38
91. Красовский А. Я. Изучение механизма распространения трещины усталости в никеле методом количественной стереоскопической

- фрактографии / А. Я. Красовский, В.А. Степаненко // Проблемы прочности, 1978. - №11. - С. 86-94.
92. Краус К. Фотограмметрия. Основы та стандартні методи. Із доповненнями П. Вальдгойзеля / К. Краус. – Том 1. – Львів: Львів. астр.-геод. тов., 2001. – 428 с.
93. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах / Р. М. Кроновер. - Москва: Техносфера, 2006. - 488 с.
94. Крымский Л.Д., Нестайко Г.В., Рыбалов А.Г. Растровая электронная микроскопия сосудов и крови.- М.: Медицина.-1976.-168 с.
95. Кульков С. Н. Фрактальная размерность поверхности при деформационном мартенситном превращении в никелиде титана / С. Н. Кульков, Ю. П. Миронов // Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. Журнал технической физики, 2004, том 74, вып. 4.
96. Латыпова Н. В. Компьютерная обработка данных. Фракталы: учеб. пособие / Н. В. Латыпова. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. – 78 с.
97. Любарский И. Металлофизика трения / И. Любарский, Л. Палатник. - Москва: Металлургия, 1976. - 176 с.
98. Лялько И. С. Просвечивающий электронный микроскоп нового поколения ПЭМ-100 / И. С. Лялько, Г. Д. Кисель, В. И. Удальцов, Р. А. Гришин, В. Г. Веприк, Ю. М. Воронин, Ю. Ф. Щетнев, В. Г. Копылов, И. И. Спинов, Д. С. Алексеенко, А. В. Бульба // Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по электронной микроскопии, Сумы. – Москва, 1987. - С. 5-6.
99. Масловская А. Г. Расчёт скейлинговых характеристик РЭМ-изображений доменных структур сегнетоэлектриков методами фрактальной параметризации / А. Г. Масловская, Т. К. Барабаш //

- Сб. тр. 11-ой Межд. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом». – Минск, 2015. – С. 39-46.
100. Мельник В. Н. К теории обработки электронномикроскопических стереопар / В. Н. Мельник // Сборник научных работ аспирантов Львовского политехнического института. Изд-во Львовского университета. – Львов, 1974. - №7. - С. 216-222.
101. Мельник В. Н. Определение увеличения при стереоскопической съемке в электронной микроскопии / В. Н. Мельник, В. И. Чих // Заводская лаборатория. - 1974. - №9. - С. 1118-1120.
102. Мельник В. Н. К вопросу фотограмметрической обработки стереопар, полученных на электронном микроскопе / В. Н. Мельник // Изв. вузов, серия «Геодезия и аэрофотосъемка». - 1975. - Вып. 6. - С. 103-109.
103. Мельник В. Н. Метрические свойства растровых электронномикроскопических снимков / В. Н. Мельник, И. Н. Любимов // Заводская лаборатория. - 1977. - №3. - С. 288-291.
104. Мельник В. Н. Применение РЭМ для изучения поверхности трения / В. Н. Мельник, М. П. Шебашинов, П. П. Сбитнев, Н. С. Маглаперидзе // III Всесоюзный симпозиум по РЭМ и аналитическим методам исследования твердых тел. – Москва, 1981. - С. 44-45.
105. Мельник В. Н. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов, О. М. Иванчук, О. В. Тумская, М. П. Шебашинов // Рук. деп. в ВИНТИ. - 1984. - №528. - С. 18.
106. Мельник В. Н. Определение микротопографических параметров шероховатых поверхностей / В. Н. Мельник, М. П. Шебашинов, Е. В. Болдырев // Технология роботизированного производства. – Рига, 1987. - С. 79-87.

107. Мельник В.Н. Метод фотограмметрии в РЭМ: теория, возможности, ограничения / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов, О. М. Иванчук. – Москва, 1987. - С. 523-524.
108. Мельник В. Н. Анализ погрешностей стереоизмерений в растровой электронной микроскопии / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов, М. П. Шебатинов, О. М. Иванчук // Изв. АН СССР. Сер. физическая. - 1987. - №3. - С. 468-474.
109. Мельник В. Н. Стереофотограмметрическая оценка микрорельефа поверхности износа металлов / В. Н. Мельник, М. П. Шебатинов, Е. И. Болдырев // Заводская лаборатория, 1988. - №5. - С. 49-54.
110. Мельник В. Н. Стереофрактографическая обработка снимков, полученных с помощью РЭМ / В. Н. Мельник, М. П. Шебатинов, В. И. Крестьянов, В. В. Крутоголовый // ППО. - 1990. - С. 50-53.
111. Мельник В. Н. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков / В. Н. Мельник, О. М. Иванчук, Ю. Й. Максимюк // Геодезия и фотограмметрия. - Ростов н/Д : Рост. инж.-строит. ин-т. - 1990. - С. 37-44.
112. Мельник В. Н. Стереофрактографическая обработка РЭМ-снимков / В. Н. Мельник, М. П. Шебатинов // Сборник «Вопросы оборонной техники». - 1990. - №3. - С. 37-45.
113. Мельник В. Н. Аналитическая РЭМ-стереометрия / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов, В. В. Крутоголовый // Изв. АН СССР. Сер. физическая. - 1991. - №8. - С. 1577-1583.
114. Мельник В. М. Стереометричний метод вивчення онтогенних особливостей біогенних мінеральних утворень / В. М. Мельник, Ю. Й. Максимюк, Т. В. Мелешко // Мінералогічний збірник Львів. ун-ту. - 1991. - №45. - С. 55-59.



115. Мельник В. Н. Математическое моделирование микрорельефа шероховатых поверхностей / В. Н. Мельник, М. П. Шебастинов, В. И. Крестьянов // ППО. - 1991. - №1. - С. 26-29.
116. Мельник В. Н. Некоторые вопросы стереофрактографической обработки РЭМ-снимков / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов // Изв. РАН. Сер. физическая. - 1992. - №3. - С. 122-126.
117. Мельник В. Н. Фрактальная и стереометрическая оценки РЭМ-изображений / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов // Изв. РАН. Сер. физическая. - 1993. - №8. - С.99-105.
118. Мельник В. Н. Некоторые вопросы цифровой обработки РЭМ-изображений / В. Н. Мельник, В. А. Михайлюк // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1993. - №4. - С. 73-82.
119. Мельник В. Н. Исследование шероховатости шлифованной поверхности методом аналитической РЭМ-стереометрии с применением модели случайного поля / В. Н. Мельник, А. В. Шостак, В. А. Кищун. - Рук. деп. в ГНТБ Украины. - 1993. - №1391.- Ук. 93. – 12 с.
120. Мельник В. Н. РЭМ-стереометрическая характеристика отображения микронеровностей резца обрабатываемой поверхности / В. Н. Мельник, А. В. Шостак. - Рук. деп. в ГНТБ Украины. - 1993. - №1231.-Ук. 93. – 11 с.
121. Мельник В. Н. Теоретические и прикладные основы РЭМ-фотограмметрии / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов // VIII Симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследований твердых тел. - Черноголовка, 1993. - С. 8
122. Мельник В. М. Методи стереологічної та стереометричної оцінки структури кістки в пре- та постнатальному онтогенезі ссавців / В. М. Мельник, Р. Й. Лихотоп // 1-й Національний Конгрес анатомів,

- гістологів та топографоанатомів України. - Івано-Франківськ, 1994. - С. 118-119.
123. Мельник В. Н. Метод трехмерной реконструкции микрорельефа поверхности твердых тел по их РЭМ-стереоизображениям / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов, А. А. Лебедев // Изв. РАН. Сер. физическая, 1995. - №2. - С. 28-34.
124. Мельник В. М. Теорія і практика фотограмметричних методів в електронно-мікроскопічних дослідженнях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук / Мельник В. М. - Львів. - 1995. - 51 с.
125. Мельник В. М. Стереолого-стереометрична оцінка анізотропних структур / В. М. Мельник, Ю. Г. Бобро, А. В. Шостак // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник наук. ст., напр. «Інженерна механіка». - Вип. 4. - Луцьк, 1998.
126. Мельник В. Н. Пространственное моделирование и применение современных методов стереологической и стереометрической оценок в биологии и медицине / В. Н. Мельник, Р. И. Лихотоп // Укр. ж-л медич. техніки і технологій, 1998. - №3. - С. 19-20.
127. Мельник В. М. Методи кількісної характеристики мікроструктури ґрунту / В. М. Мельник, В. У. Волошин, Ф. П. Тарасюк, Ю. С. Бліндер // Вісн. Львів. держ. ун-ту. Серія географічна / Львів. держ. ун-т ім. Івана Франка; голов. ред. С. П. Позняк. – Львів, 1999. – № 25. – С. 24–27.
128. Мельник В. М. Синтаксичний метод стереоототожнювання / В. М. Мельник, В. У. Волошин, Т. В. Волошина // Зб. наук. пр. «Геодезія, моніторинг, геодинаміка і рефрактометрія на межі ХХІ ст.». - Львів, 2001. - С. 130-137.
129. Мельник В. М. Оцінка деструктивних змін кісткової тканини методами структурної функції та фрактального аналізу / В. М.

- Мельник, В. У. Волошин // Наук. вісник ВДУ, 2002. - №3. - С. 166-171.
130. Мельник В. М. Стереолого-планіметрична обробка РЕМ-зображень методом Кригінга / В. М. Мельник, В. У. Волошин // Міжвідом. наук. техн. зб. «Геодезія, картографія і аерознімання». - Львів, 2003. - С. 155-162.
131. Мельник В. М. До питання розробки феноменологічної моделі протиерозійної стійкості / В. М. Мельник, Ю. С. Бліндер // Зб. наук. пр. «Генеза, географія та екологія ґрунтів». - Львів, 2003. - С. 231-235.
132. Мельник В. М. До теорії РЕМ-фотограмметрії / В. М. Мельник, В. У. Волошин // Вісник геодезії і картографії, 2006. - №5. - С. 26-29.
133. Мельник В. М. Застосування векторів Гіббса в РЕМ-фотограмметрії в РЕМ-фотограмметрії / В. М. Мельник, О. В. Мельник // Вісник НУВГ та ПК, Рівне, 2006. - Вип. 4(36). -ч. 1. - С. 356-364.
134. Мельник В. М. Цифрова обробка РЕМ-зображень / В. М. Мельник, А. В. Шостак, О. В. Мельник // Наук. нотатки ЛДТУ, Луцьк, 2007. - С. 299-304.
135. Мельник В. М. Деякі питання РЕМ-фотограмметрії наведеного струму / В. М. Мельник, А. В. Шостак // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2008. - №68. - С. 129-135.
136. Мельник В. М. До теорії дисторсійних спотворень РЕМ-зображень / В. М. Мельник, А. В. Шостак // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2008. - №68. - С. 261.
137. Мельник В. М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія. Монографія / В. М. Мельник, А. В. Шостак. – Луцьк: «Вежа», 2009. - 469 с.
138. Мельник В.М. Кількісна стереомікрофрактографія: монографія / В. М. Мельник, А. В. Шостак. – Луцьк: ПВД «Твердиня», 2010. - 460 с.

139. Мельник В. Фрактальна теорія ерозії ґрунту / В. Мельник, О. Шостак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2014. – Вип. II (28). – С. 78-81.
140. Мельник Ю. А. Оцінка мікрорельєфу механічно сформованих поверхонь методом структурної функції / Ю. А. Мельник // Наук. нотатки. Міжвуз. зб. наук. ст. - Луцьк, 2011. - Вип. 32. - С. 233-238.
141. Мельник Ю. А. Метод виділення прямолінійних сегментів на напівтонових зображеннях / Ю. А. Мельник, В. Д. Рудь // Міжвуз. зб. «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». - Луцьк, 2011. - Вип. 7. - С.72-76.
142. Мельник Ю. А. Тривимірна фрактографічна характеристика геометрично правильних і рандомізованих поверхонь / Ю. А. Мельник // Зб. наук. праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». - Рівне, 2012. - Вип. 24. - С. 356-365.
143. Мельник Ю. А. Корелятивно-диспарантний метод ідентифікації фрактографічних поверхонь / Ю. А. Мельник // Вісник Львів. націон. аграрного університету. - Львів, 2012. - №16. - С. 249-254.
144. Мельник Ю. А. Визначення структури та мікротопографії характеристичних поверхонь матеріалів методом 3D реконструкції: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Мельник Ю. А. - Луцьк, 2013. - 20 с.
145. Мельник Ю. А. Цифрове моделювання мікрорельєфу робочих органів поліномами Чебишева / Ю. А. Мельник, С. В. Синій, М. Я. Варголяк // Сільськогосподарські машини, 2014. - С. 67-76.
146. Микроанализ и растровая электронная микроскопия. (Под ред. Ф. Морис, Л. Мени, Р. Тилье). - Москва: Металлургия, 1985. - 408 с.
147. Митрофанов А. В. Тест-объект для растровой и растровой просвечивающей микроскопии на основе полимерных ядерных

- фильтров Флерова / А. В. Митрофанов, М.Н. Филиппов // Изв. РАН. Сер. физическая, 1992. - №3. - С. 112-115.
148. Могильний С. Г. Проблеми побудови мереж аналітичної фото-триангуляції / С. Г. Могильний // Вісник геодезії та картографії, 2000. - №1. - С. 23-27.
149. Невзорова Л. Н. Проблема линейных измерений с помощью РЭМ /Л. Н. Невзорова, В. И. Петров, Н. Н. Щитов // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1982. - №11. - С. 124-128.
150. Неежмаков К. П. Особенности калибровки растрового электронного микроскопа РЭМ-106 / К. П. Неежмаков // Метрологія. - Харків, 2012. - С. 468-470.
151. Павленко П. А. Растровый электронный микроскоп с возможностью рентгеновского микроанализатора автоматизированный РЭММА-202 М / П. А. Павленко, Б. К. Волнухин, Е. А. Шаповалов, И. А. Бульба, В. К. Остапов, А. В. Падусенко, Ю. И. Вакал, А. И. Новак // Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по электронной микроскопии, Сумы. - Москва: 1987. - С. 8-9.
152. Пилянкевич А. Н. Электронные микроскопы А. Н. Пилянкевич, А. П. Климовицкий. - Київ: Техніка, 1976. -168 с.
153. Пилянкевич А. Н. Способ определения увеличения электронного микроскопа / А. Н. Пилянкевич, А. М. Климовицкий, В. А. Кобыляков, В. И. Крухмалев // Бюл. изобр. - 1982. - №11. МКУ Н01 J 37/26.
154. Потапов А. А. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, А. А. Пахомов, В. А. Герман. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
155. Практические методы в электронной микроскопии. (Под ред. Одри М. Глоэра. Пер. с англ. под ред. В. Н. Верцнера). - Ленинград: Машиностроение, 1980. - 375 с.

156. 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.
157. Рудий Р. М. Методи дослідження рельєфу земної поверхні: автореф. дис. на здоб. наук. ст. докт. техн. наук / Рудий Р. М. - Львів, 1999. - 38 с.
158. Рудь В. Д. Стереологія реальних структур порошкових матеріалів / В. Д. Рудь, Ю. А. Мельник // Наук. журнал «Вісник Тернопільського національного технічного університету». - Тернопіль, 2015. - №4. - С. 58-67.
159. Сагындыкова М. Ж. Разработка методики микростереофотограмметрической съёмки: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук / Сагындыкова М. Ж. – Москва, 1983. - 22 с.
160. Салига Ю. С. Електронна мікроскопія біологічних об'єктів / Ю. С. Салига, В. В. Снітинський. - Львів: Світ, 1999. - 151 с.
161. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. - М.: Металлургия, 1976. -271 с.
162. Саркин В. И. Микростереоскопический метод исследования чистоты поверхности: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук / Саркин В. И. - М., 1949.- 4 с.
163. Смирнов Ю. С. Тест-объект для растрового электронного микроскопа / Ю. С. Смирнов, Б. Н. Васичев, А. А. Скородумова // ОМП. - №2. - 1984. - С. 47-50.
164. Смирнова А. В. Электронная микроскопия в металловедении. Справочник / А. В. Смирнова, Г. А. Кокорин, С. М. Полонская и др. - Москва: Металлургия, 1985. - 191 с.

165. Современная электронная микроскопия в исследовании вещества. [Сб.статей] (АН СССР, Научн. совет по электроннои микроскопии, Ин-т кристаллографии). - Москва: Наука, 1982. - 284 с.
166. Соколов В. Н. Использование комплекса РЭМ микро-ЭВМ для количественного анализа поверхности и структуры микрообъектов / В. Н. Соколов, О. В. Дементьева, А. Ю. Сасов // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1982. - №11. - С. 111-123.
167. Соколов В. Н. Количественная интегральная оценка структурных параметров твердых тел по изображениям / В. Н. Соколов, С. И. Ковбаса, М. П. Толкачев // Изв. АН СССР, сер. физическая, 1984. -Т. 48, №12. - С. 2423-2426.
168. Соколов В. Н. Особенности проведения количественного анализа структуры твердых тел по их РЭМ-изображениям / В. Н. Соколов, Н. А. Румянцева, С. И. Ковбаса // Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по электронной микроскопии, Сумы. – Москва, 1987. - С. 485-487.
169. Соколов В. Н. Оценка ориентации структурных элементов в бинарных структурах / В. Н. Соколов, Ю. М. Гальперин // Изв. АН СССР, сер. физическая, 1991. -Т. 55, №8. - С. 1650-1654.
170. Соколов В. Н. Метод трехмерной реконструкции микрорельефа поверхности твердых тел по их РЭМ-стереоизображениям / В. Н. Соколов, А. А. Лебедев, В. Н. Мельник // Изв. РАН. Сер. физическая, 1995. - №2. - С. 28-34.
171. Соколов В. Н. Анализ РЭМ-стерео-изображений / В. Н. Соколов, В. Н. Мельник, Д. И. Юрковец // Изв. АН СССР. Сер. физическая, 1996. - Т. 60. -№2. - С. 55-64.
172. Соколов В. Н. Количественный анализ микроструктуры горных пород по их изображениям в растровом электронном микроскопе / В. Н. Соколов // Соросовский образов. ж-л, 1997. - №8. - С. 72-78.

173. Соколов В. Н. Метод количественного анализа микроструктуры твердых тел по их РЭМ-изображениям / В. Н. Соколов, Д. И. Юрковец, О. В. Разгулина, В. Н. Мельник // Заводская лаборатория, 1997. - №9. - Т. 63. - С. 5-35.
174. Соколов В. Н. Программно-аппаратный комплекс для исследования микроморфологии поверхности твердых тел по РЭМ-изображениям / В. Н. Соколов, Д. И. Юрковец, О. В. Разгулина // Поверхность, 1998. - №1. - С. 33-41.
175. Соколов В. Н. Автоматизированная система морфологического анализа скелетного компонента микроструктуры по РЭМ-изображениям / В. Н. Соколов, Д. И. Юрковец, О. В. Разгулина, В. Н. Мельник // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, 2002. - №10. - С. 66-69.
176. Соколов В. Н. Экспресс-метод измерения высот микрообъектов в РЭМ / В. Н. Соколов, Д. И. Юрковец, О. В. Разгулина, В. Н. Мельник // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, 2003. - №3. - С.27-31.
177. Соколов В. Н. Метод оценки округлостей микрообъектов по РЭМ-изображениям / В. Н. Соколов, Д. И. Юрковец, О. В. Разгулина, В. Н. Мельник // Изв. РАН. Сер. физическая, 2005. - Т. 69. - №4. - С. 533-536.
178. Спасский М. Н. Количественный анализ структуры кристаллов методом стереофотограмметрической обработки их дефокусированных темнопольных электронных изображений / М. Н. Спасский, А. О. Меттус // Заводская лаборатория, 1978. - №11. - С. 1350-1356.
179. Спасский М.Н. Применение стереоизмерений для количественного анализа электронных изображений тонкой структуры или



- поверхности кристаллов / М. Н. Спасский // Заводская лаборатория, 1984. - №3. - С. 19-24.
180. Степаненко В. А. Растровая и трансмиссионная стереоскопическая фрактография усталостных изломов / В. А. Степаненко // Проблемы прочности, 1979. - №12. - С. 89-91.
181. Степаненко В. А. Исследование особенностей вязкого разрушения никеля методом стереофрактографии / В. А. Степаненко, А. С. Штукатурова // Проблемы прочности, 1981. - №2. - С.26-30.
182. Степаненко В. А. Методика прицельной электронной фрактографии по репликам / В. А. Степаненко // Заводская лаборатория, 1982. - №3. - С. 35-36.
183. Степаненко В. А. Фрактография и кинетика развития усталостных трещин в чугунных коленчатых валах / В. А. Степаненко, М. Н. Султани, В. В. Хильчевский, Ю. М. Шелиган // Проблемы прочности, 1983. - №5. - С. 85-89.
184. Степаненко В. А. Метод та практичне застосування стереоскопічної фрактографії / В. А. Степаненко // Металознавство та обробка металів, 1995. - №1. - С. 51-54.
185. Тарасов С. Ю. Применение фракталов к анализу процессов трения / С. Ю. Тарасов, А. В. Колубаев, А. Г. Липницкий // Письма в ЖТФ, 1999, том 25, № 3.
186. Торхов Н. А. Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального *n*-GaAs в локальном пределе / Н. А. Торхов, В. Г. Божков, И. В. Ивонин, В. А. Новиков // Физика и техника полупроводников, 2009, т. 43, вып. 1.
187. Тумська О. В. Дослідження автоматичного розпізнавання ідентичних точок стереопари / О. В. Тумська, В. Я. Янчак // Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, 2001. - V.11. - pp. 70-75.

188. Гумська О. В. Дослідження автоматичної побудови цифрової моделі рельєфу VLL-методом за матеріалами аерофотознімання / О. В. Гумська, М. Т. Процик, В. Я. Янчак // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2004. – Вип. 65. - С. 96–104.
189. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. - Москва: Мир, 1992. - 260 с.
190. Финковский В. Я. Исследование геометрических искажений снимков, полученных на растровом электронном микроскопе / В. Я. Финковский, В. Н. Мельник // Геодезия и картография, 1977. - №6. - С. 38-44.
191. Финковский В. Я. Фотограмметрическая обработка снимков, полученных на растровом электронном микроскопе / В. Я. Финковский, В. Н. Мельник // Геодезия и картография, 1978. - №9. - С. 46-52.
192. Финковский В. Я. К теории фотограмметрической обработки РЭМ-снимков / В. Я. Финковский, В. Н. Мельник, О. М. Иванчук // Геодезия и картография, 1984. - №2. - С. 29-33.
193. Форсайт Д. А. Компьютерное зрение. Современный поход / Д. А. Форсайт, Ж. Понс // Москва: Издательский дом «Вильямс», 2004. - С. 340-349.
194. Хирш П. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови и др. - Москва: Мир, 1973. - 284 с.
195. Хлюпин А. Н. Фрактальный анализ трехмерной микроструктуры пористых материалов / А. Н. Хлюпин, О. Ю. Динариев // Журнал технической физики, 2015, том 85, вып. 6. – С. 17-22.
196. Ходжер Т. А. Информационная система фотограмметрического моделирования микрообъектов для биологических исследований: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук /Ходжер Т. А. - Иркутск, 2008. - 20 с.

197. Хокс П. Электронная оптика и электронная микроскопия / П. Хокс. - Москва: Мир, 1974. - 319 с.
198. Хусу А. П. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход / А. П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В. А. Пальмов. - Москва: Наука, 1975. - 343 с.
199. Чернявский К. С. Стереология в металловедении / К. С. Чернявский. - Москва: Металлургия, 1977. - 279 с.
200. Шанявский А. А. Количественная растровая электронная фрактография / А. А. Шанявский // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по растровой электронной микроскопии, Звенигород-Москва, 1984. - С. 211.
201. Широков В. В. Підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь швидкозношувальних деталей будівельних машин та устаткування дифузійним буруванням / В. В. Широков, А. Є. Стецько, О. В. Широков, Ю. А. Мельник // Зб. «Містобудування та територіальне планування». - Київ, 2012. - Вип. 45. - С. 335-345.
202. Шостак А. В. Математичне моделювання шорстких поверхонь за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) / А. В. Шостак // Наукові нотатки: Міжвуз. збірн. наук. ст., напрямок «Інженерна механіка». - Вип. 4. - Луцьк, 1998. - С. 67-85.
203. Шостак А. В. До питання комп'ютерної ідентифікації мікротріщин за даними цифрової обробки РЕМ-зображень / А. В. Шостак // Металознавство та термічна обробка металів. - Київ, 1999. - №1.- С. 112-123.
204. Шостак А. В. Деякі питання фотограмметричного моделювання фрактографічних поверхонь / А. В. Шостак, О. М. Іванчук // Геодезія, картографія та аерофотознімання. - Львів, 1999. - №59. - С. 89-94.

205. Шостак А. В. Аналітична та експериментальна оцінка впливу складу структури і рельєфу поверхонь тертя на функціональні особливості зносостійких Cr-чавунів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Шостак А. В. – Луцьк, 1999. - 21 с.
206. Шостак А. В. Комп'ютерне тривимірне моделювання зламів / А. В. Шостак, О. М. Іванчук // Міжн. журнал ФХММ. - Львів, 2000. - №1. - С. 107-110.
207. Шостак А. В. Моделювання мікрорельєфу фрактографічних поверхонь методом триангулятора і скінчених елементів / А. В. Шостак // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». - Луцьк, 2001. - Вип. 8. - С. 285-291.
208. Шостак А. В. Автоматизація фрактографічного аналізу мікроструктури чавунів за РЕМ-зображенням / А. В. Шостак // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк, 2002. - Вип. 5. – С. 210-212.
209. Шостак А. В. Аналіз в РЕМ механічно сформованих поверхонь методом структурної функції / А. В. Шостак // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». - Луцьк, 2003. - Вип. 13. - С. 386-393.
210. Шостак А. В. РЕМ-фотограмметрична оцінка мікрорельєфу поверхонь / А. В. Шостак // Вісник геодезії і картографії. - Київ, 2011. - Вип. 1. - С. 30-34.
211. Шостак А. В. Принципи кількісного аналізу РЕМ-зображень із застосуванням діаграм Вороного та геодезичної метрики / А. В. Шостак // Інженерна геодезія. - Київ, 2011. - Вип. 56. - С. 257-267.
212. Шостак А. В. Непаралактичний метод фотограмметричного опрацювання РЕМ-зображень / А. В. Шостак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2011. №1(21). - С. 178-181.

213. Шостак А. В. Оцінка дисперсних ґрунтів та їх основних реологічних властивостей / А. В. Шостак // Містобудування та територіальне планування. Київ, 2011. - Вип. 39. - С. 465-475.
214. Шостак А. В. Принципи реології в інженерно-геодезичному моделюванні деформацій / А. В. Шостак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2011. - №2(22). - С. 156-159.
215. Шостак А. В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук / Шостак А. В. - Київ, 2012. - 28 с.
216. Шостак А. В. До питань застосування принципів фрактальної геометрії в задачах метало- та матеріалознавства / А. В. Шостак, Ю. А. Мельник // Наук. вісник «Нові технології». - Кременчук, 2012. - №1. - С. 68-73.
217. Шостак А. В. Визначення методами Фур'є-Хартлі мікротопографічних параметрів фрактографічних поверхонь / А. В. Шостак, Ю. А. Мельник // Наук. вісник ВНУ ім. Лесі Українки. - Луцьк, 2012. - С. 68-76.
218. Шостак А. В. Триplet-стереомікрофрактографія поверхонь хонінгування ЦПГ / А. В. Шостак, Ю. А. Мельник // Зб. «Містобудування та територіальне планування». - Київ, 2012. - Вип. 44. - С. 563-575.
219. Шостак А. В. Метод РЕМ-аналізу механічно-сформованих поверхонь деталей конструкцій сільськогосподарських машин / А. В. Шостак, В. М. Мельник, Ю. А. Мельник // Зб. наук. ст. «Сільськогосподарські машини». - Луцьк, 2013. - Вип. 24. - С. 467-474.
220. Шостак А. В. Смола О.Ю. Кількісний аналіз мікроструктури в трибоматеріалознавстві із застосуванням Фур'є-аналізу та функцій

- Уолша / А. В. Шостак, В. В. Широков, В. М. Мельник, Ю. А. Мельник // Наук. нотатки. Міжвуз. зб. наук. ст. - Луцьк, 2013. - Вип. 42. - С. 324-329.
221. Электронно-микроскопическая фрактография. Альбом. Под ред. д.т.н. Утевского Л.М. - Москва: Metallurgiya, 1973. - 44 с.
222. Электронномикроскопические изображения дислокаций и дефектов упаковки. Справ. рук-во. под ред. Косевича В. М. и Палатника Л. С. - Москва: Наука, 1976. - 223 с.
223. Badii R. Hausdorff dimension and uniformity of strange attractors / R. Badii, A. Politi // Phys. Rev., 1984. - Lett. 52. - P. 1661-1664.
224. Bovik Al. Handbook of Image and Video Processing. – Academic Press., A Harcourt Science and Technology Company, 2000. – 891 p.
225. Boyde A. Practical problem and methods in the three dimensional analysis of Scanning electron microscope images // In: Proc. 3 rd Annual SEM Symposium, Chicago, III.-1970.-P.105-112.
226. Boyde A. Quantitative Photogrammetric analysis and qualitative stereoscopic analysis of SEM images // J.Microscopy.-1973.-98.-№3.-P.452-471.
227. Boyde A., Ross H.F. Photogrammetry and Scanning electron microscopy // Photogrammetric Record.-1975.-Vol.8.-№46.-P.408-457.
228. Burkhardt R. Dreidimensionale Auswertung von nach Blodern und Lange aufgenommenen elektronen mikroskopischen Stereobildern // Optik.-1978.-50.-№4.-S.279-296.
229. Burkhardt R. Vereinfachter numerischer Verzeichnung-Ausgleich für Aufnahmen am Raster-Elektronen-Mikroskop // Z. für Vermessungswesen.-1978.-№8.-S.357-369.
230. Burkhardt R. Untersuchungen zur kalibrierung eines Elektronen mikroskopes // Mitt. geod. Inst. Techn. Univ. Graz.-1980.-№35.

231. Cromley, R. G. Digital Cartography. // Robert G. Cromley, 1992 by Prentice-Hall. 317 p.
232. El-Soudani S.M. Profilometric analysis of fractures // Metallography, 1978. - №11. - P. 247-336.
233. Finkovski V.J., Melnik V.N. Investigation of the raster electronic microstereophotogrammetric survey accuracy // Proc. XIII the Congress of the Internat. Soc. Photogrammetry. Helsinki. - 1976. -P. 1-10.
234. Ghosh S. K. Photogrammetric calibration of electron microscope // Photogrammetria. - 1975. -31. -3. - P. 91-114.
235. Ghosh S. K. Future possibilities of precision mapping with electron microscopy // International Society for photogrammetry. - 1980. - Hamburg. - P. 244-251.
236. Ghosh S. K., Nagaraja H. Scanning Electron Micrography and Photogrammetry // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. - 1976. - Vol. 42. - №5. - P. 649-657.
237. Ghosh S.K. Volume Determination with an Electron Microscope // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. - 1971. -Vol. 37. - №2. - P. 187-191.
238. Gotthardt E. Zur raumlichen Ausmessung von objekten mit dem Elektronenmikroskop // Z. Phys. - 1942. - 118. - P. 714-717.
239. Helmeke I.G. Theorie und Praxis der elektronenmikroskopischen Stereoaufnahmen // Optik. -1955. -12. -№6. - P. 253-273.
240. Helmeke I.G., Klein W., Burkhardt R. Qualitative Elektron Mikroskopy // Photogrammetric Engineering. -1975.-31,7. - P. 796-806.
241. Howel P.G., Boyde A. Comparison of Various Methods for Reducing Measurements from Stereo-pair Scanning Electron Micrographs to Real 3-D data // Scanning Electron Microscopy. - 1972. - Symposium, Chicago. - III.-Part 1-2. - P. 233-240.

242. Howell, P. A practical method for the correction of distortions in SEM photogrammetry // Proc. Of the Annual Scanning Electron Microscope Symposium. Chicago, Illinois. - 1975. - P. 199-206.
243. Hubeny K. Beitrage zur Nah- und Mikrobildmessung // Photogrammetrische Korrespondenz. -1949. -85. - S. 51-57.
244. Hubeny K. Uber die Ausmessung von elektronenmikroskopischen Stereobildpaaren // Fotografische Korrespondenz. - 1959. - Band 95. - S. 72-77.
245. Hubeny K. Probleme der Stereophotogrammetrie in der Mikroskopie und Elektronenmikroskopie // Invited Paper V. Int. K. für Photogrammetrie.- London: 1960. - S. 118-130.
246. 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.
247. 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.
248. 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.
249. 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 // Cartography and Aerial photography. - Lviv, 2017. Vol. 85. - P. 53-64.



250. Kalisperakis, I., Karras, G., and Petsa, E.: An euclidean formulation of interior orientation constraints imposed by the fundamental matrix// ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume III-1, 2016 XXIII ISPRS Congress, 2016, Prague, Czech Republic. P.14-78.
251. Karagiannis, G., Antón Castro, F., and Mioc, D.: Automated photogrammetric image matching with SIFT algorithm and Delaunay triangulation, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., III-2, 23-28, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-2-23-2016,2016>.
252. Kolednic O. A contribution to stereophotogrammetry with the scanning electron microscope // Practical Metallography. - 1981. - v. 18. - №11. - P. 562-573.
253. Lacmann O. Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nichttopographischen Gebieten. – Leipzig, 1950.
254. Mandelbrot, B. The fractal geometry of nature. N. Y.: Freeman, 1983. - 469 p.
255. Maune D. F. Photogrammetric Self-Calibration of a Scanning Electron Microscope: Ph.D. dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio. - 1973.
256. Meakin P. Scaling properties for the growth probability measure and harmonic measure of fractal structures // Phys. Rev., 1987. - Lett. A35. - P. 2234-2245.
257. Melnik V. Some problems of stereofractographical processing of SEM-Pictures / V. Melnik, V. Sokolov // Bul. Academy Sciences USSR. Physical Series. - 1992. – 56 (3). - P. 215-219.
258. Melnik V. Automatic “Sewing together” of REM-images with use of Walsh descriptors / V. Melnik, V. Voloshin, T. Voloshina // 3-nd Intern. Conf. of Cadaster, photogram. technologies of development perspectives. - Cracow, 2001. - P. 519-526.

259. Murray S., Gillham C., Windle A. Characterization and correction of distortion encountered in scanning electron micrographs // *J. of Physics E.* - 1973. - P. 381-384.
260. Nagaraja H.N. Application Studies of Scanning Electron Microscope Photographs for Micro-Measurements and Three Dimensional Mapping: Ph.D. dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio.-1974.
261. Nankivell I.F. The theory of electron Stereomicroscopy // *Optik.* - 1963. - 20. - №4. - P. 171-198.
262. Nankivell I.F. Determination of directed distances in objects examined in the electron microscope // *Optic.*-1966.-23.-№6.-P.505-516.
263. Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Sys., Man.* -1979. Cyber. 9. - P. 62-66.
264. Re C., Roncella R., Forlani G., Cremonese G., Naletto G.: Evaluation of area-based image matching applied to DTM generation with Hirise images // *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. and Spatial Inf. Sci.*, I-4, pp. 209-214, 2012.
265. Richardson, L. The Problem of Contiguity: An Appendix of Statistic of Deadly Quarrels. *General Systems Year Book.* - 1961. – 6. - P. 139-187.
266. Ritter M. A landmark-based method for the geometrical 3D calibration of scanning microscopes: Dissertation PhD. - Berlin, 2007. - 131 p.
267. Shahbazi, M., Sohn, G., Théau, J., and Ménard, P.: Revisiting intrinsic curves for efficient dense stereo matching, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, III-3, 123-130, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-123-2016>, 2016.
268. Sokolov V., Yurkovets D., Rasgulina O., Melnik V. Computer-Controlled System for the Study of Micromorphology of the Surface of Solids by SEM images // *Surface Investigation*, 1998. - Vol. 14. - pp. 33-41.
269. Sokolov V. 3D reconstruction of surface and Subsurface structures of Solids by SEM stereo images / V. Sokolov, D. Yurkovets, V. Melnik, A.

- Boyde, P. Hovell // Inst. Phys. Conf. Dundee, 2001. - №168. - Section 4. - P. 119-122.
270. Some problems of stereofractographical processing of SEM-Pictures // Bull. Academy Sciences USSR. Physical Series. - 1992. - №56 (3). - P. 215-219.
271. Vizilter, Yu. V. Geometrical correlation and matching of 2D image shapes / V. Yu. Vizilter, S. Yu. Zheltov // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., I-3, pp.191-196, <https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-3-191-2012>, 2012.
272. Waldhausl P. An Approximate Solution for the Restitution of Stereo Electron Micrographs // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. - 1978. - Vol. 44. - №8. - P. 1005-1009.
273. Wang, J., Lindenbergh, R., Shen, Y., and Menenti, M.: Coarse point cloud registration by egi matching of voxel clusters, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., III-5, 97-103, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-5-97-2016>, 2016.
274. Zhang, Yanfeng, Zhang, Yongjum, Zhang, Yi, and Li, Xin. Automatic extraction of DTM from low resolution DSM by two-steps semi-global filtering // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., III-3, pp. 249-255, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-249-2016>, 2016.
275. Zhou, W., Wang, Z. L. Scanning Microscopy for Nanotechnology. Techniques and Application. University of New Orleans, New Orleans, Louisiana, 2006. – 521 p.

**Додаток.** Структура та функції програмного комплексу «Dimicros» для опрацювання цифрових РЕМ-зображень на ПК та цифровій фотограмметричній станції (ЦФС)

Комплекс програм “Dimicros” складений спеціалістом з геоінформатики Хрупіним І.В. на об’єктно-орієнтованій мові програмування С# (читається «сі-шарп»), яка використовує бібліотеку класів Microsoft .NET Framework 2.0 за теоретичними положеннями і алгоритмом дисертанта [55]. Написання коду програми виконувалось в інтегрованому середовищі розробки (IDE) Microsoft Visual Studio 2005.

Даний комплекс складається з трьох програмних модулів:

- “Test-Measuring”
- “Polycalc”
- “Stereo-SEM”

Інтерфейс комплексу реалізований на трьох мовах: українській (за замовчуванням), російській та англійській.

Д.1. Класи підпрограм, які використані при створенні ПК “Dimicros”

Для створення трьох модулів програмного комплексу, насамперед, було створено 5 класів підпрограм: Picture, DataView, Variables, Polynom, Matrix, опис яких та функції за браком місця нами не приводяться.

Окрім вищеперелічених класів під час розробки було створено велику кількість методів, що працюють безпосередньо в тілі програми. Загальний обсяг програмного коду комплексу сягає більше 150 сторінок друкованого тексту.

Д.2. Опис програмного модуля “Test-Measuring” і послідовності роботи в ньому



Рис. Д.1. Логотип модуля «Test-Measuring»

Даний модуль призначено для вимірювання координат точок перетинів ліній тест-сіток (вузлів тест-об'єкту) в системі координат знімка і визначення відхилень вимірних координат точок тест-сіток від дійсних. Нижче (рис. Д.2.2) подано спрощений вигляд блок-схеми модуля.

*Блок-схема модуля*



Рис. Д.2. Блок-схема модуля «Test-Measuring»

Вигляд інтерфейсу програми:

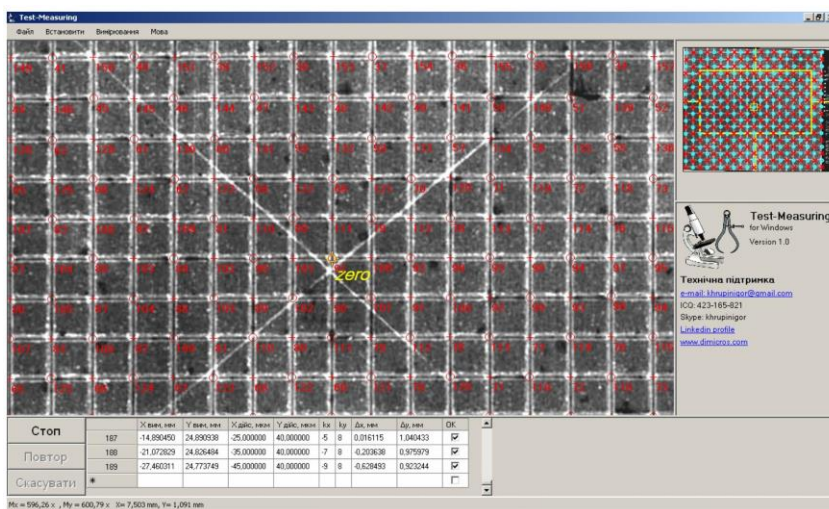


Рис. Д.3. Інтерфейс модуля «Test-Measuring»

Послідовність роботи в модулі «Test-Measuring»:

1. Запуск модуля (Test-Measuring.exe)
2. Відкриття файлу зображення тест-сітки (файл → **Відкрити зображення**).

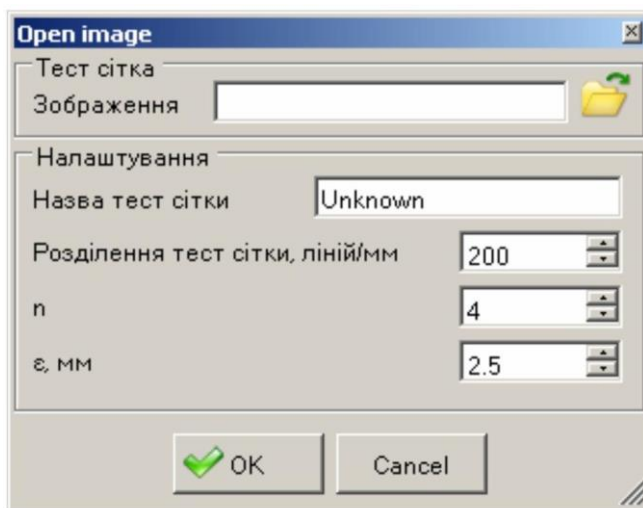


Рис. Д.4. Діалог відкриття зображення тес-сітки

В цьому діалозі необхідно вказати:

- Шлях до файлу зображення.
- Назву тест-сітки.

- Роздільну здатність тест-сітки (ліній на мм).
- Число “n”, яке дорівнює  $l_x = l_y$  (рис. Д.5). Воно необхідно для визначення дійсних збільшень (масштабів) зображення вздовж осей  $x$  та  $y$ .
- Значення константи “ $\epsilon$ ”, допустимої різниці між вимірною і істинною координатами одноіменних точок в мм. Наприклад коли  $\epsilon \leq 2,5$  мм, то при  $\Delta x = \Delta y \geq 2,5$  мм – точки відбраковуються як такі, що виміряні з грубими помилками.

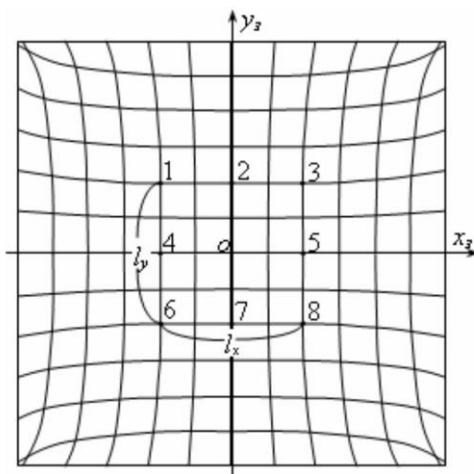


Рис. Д.5. Схема розташування точок при калібруванні збільшень РЕМ-зображень

3. Після натиснення «ОК» зображення відкриється і відобразиться в робочому полі. Також в навігаційному вікні відобразиться зменшене зображення з «навігаційною фігурою».

4. Встановлення початку системи координат знімка. Для цього необхідно натиснути на **Встановити** → **Початок системи координат**.

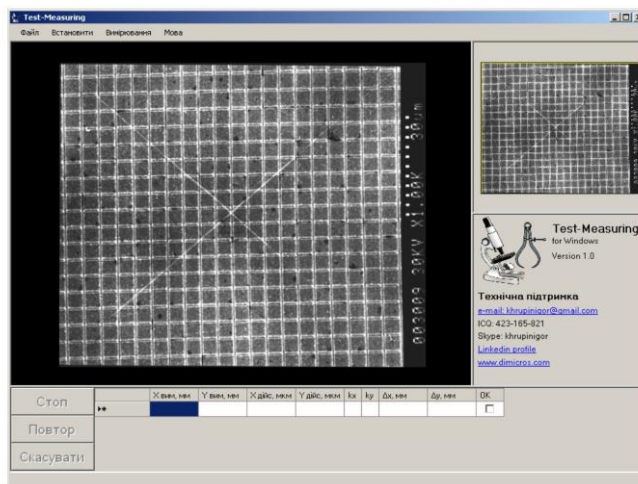


Рис. Д.6. Масштабоване зображення тест-сітки з роздільною здатністю  
 $r=200$  лін/мм

Після цього зображення в робочому полі масштабується таким чином, щоб було видно все зображення. Користувачу необхідно намалювати дві прямі таким чином, щоб їх перетин вказував приблизне розташування початку системи координат.

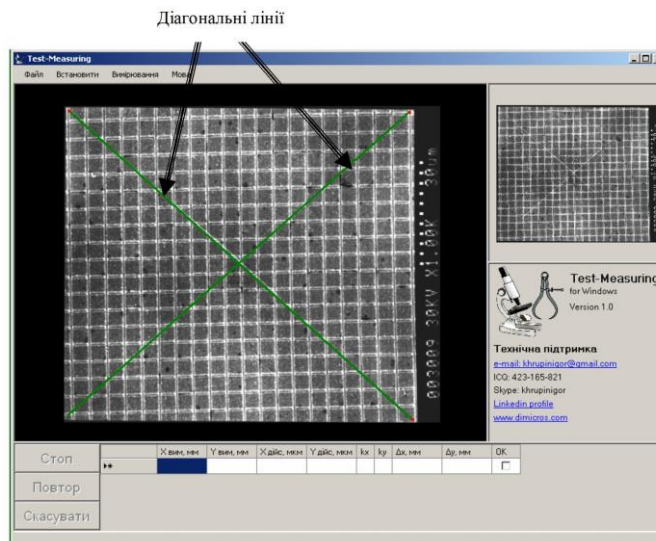


Рис. Д.7. Визначення розташування початку системи координат

Потім зображення тест-сітки масштабується в місці перетину двох прямих. Оператору залишається навести на точку, яка буде початком системи координат і натиснути ліву клавішу миші. Після цього початок системи координат встановлено. В робочому полі і навігаційному вікні



з'явиться маркер, що символізує початок системи координат. При переміщенні курсору по поверхні робочого поля в статусній стрічці будуть відображатись біжучі координати курсору в мм в системі координат знімку.

5. Визначення величин дійсних збільшень (масштабів) вздовж осей абсцис і ординат  $M_x$  та  $M_y$ .

Для цього необхідно натиснути на **Встановити→Збільшення (масштаб) зображення**. Після активування режиму користувачу необхідно зафіксувати 8 точок згідно рисунку (рис. Д.5). Але обов'язково в такій самій послідовності, як вказано на рисунку. Після фіксування точок буде визначено величини істинних збільшень (масштабів) вздовж осей абсцис і ординат  $M_x$  та  $M_y$ . Значення масштабів відобразиться в статусній стрічці програми.

6. Вимірювання координат «точок розв'язку». Запуск режиму відбувається через **Вимірювання→Точки розв'язку**. Після збору усіх точок потрібно натиснути на «Стоп». Потім відкриється діалог збереження файлу координат «Точок розв'язку».

7. Вимірювання координат «контрольних точок». Запуск режиму відбувається через **Вимірювання→Контрольні точки**. Після збору усіх точок потрібно натиснути на «Стоп». Потім відкриється діалог збереження файлу координат «Контрольних точок».

На цьому робота модулю закінчується.

**Примітка.** Під час збору точок існує вірогідність зафіксувати неправильне положення точки. Як змінити координати точки? Для цього необхідно в таблиці точок виділити відповідну точку. Після цього робоче поле масштабується на вибраній точці і активується кнопка «Повтор».

Необхідно натиснути на неї і після цього зафіксувати «правильне» положення точки. Значення координат будуть перезаписані. Якщо клік в таблиці був зроблений випадково або Ви прийняли рішення не міняти координати точки, то необхідно натиснути «Скасувати».

Структура файлів \*.TMS та \*.TMC

\*.TMS – Test-Measuring solution points file

Файл складається з:

- заголовка, в якому міститься інформація про програму і її версію;
- блоку з інформацією про властивості тест-сітки, що вимірюється;
- блоку координат «точок розв'язку».

\*.TMC – Test-Measuring control points file

Файл складається з:

- заголовка, в якому міститься інформація про програму і її версію;
- блоку з інформацією про властивості тест-сітки, що вимірюється;
- блоку координат «контрольних точок».

Д.2.3. Опис програмного модуля “Polycalc” і послідовності роботи в ньому.

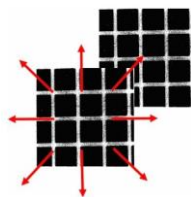


Рис. Д.8. Логотип модуля «Polycalc»

Даний модуль призначено для обчислення коефіцієнтів поліному загального виду 3-го степеня і оцінки точності апроксимації геометричних спотворень РЕМ-зображень цим поліномом.

Нижче подано спрощений вигляд блок-схеми модуля (рис. Д.10).

Вигляд інтерфейсу програми:

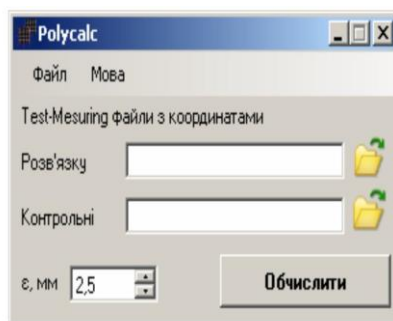


Рис. Д.9. Вигляд інтерфейсу модуля «Polycalc»

*Блок-схема модуля*

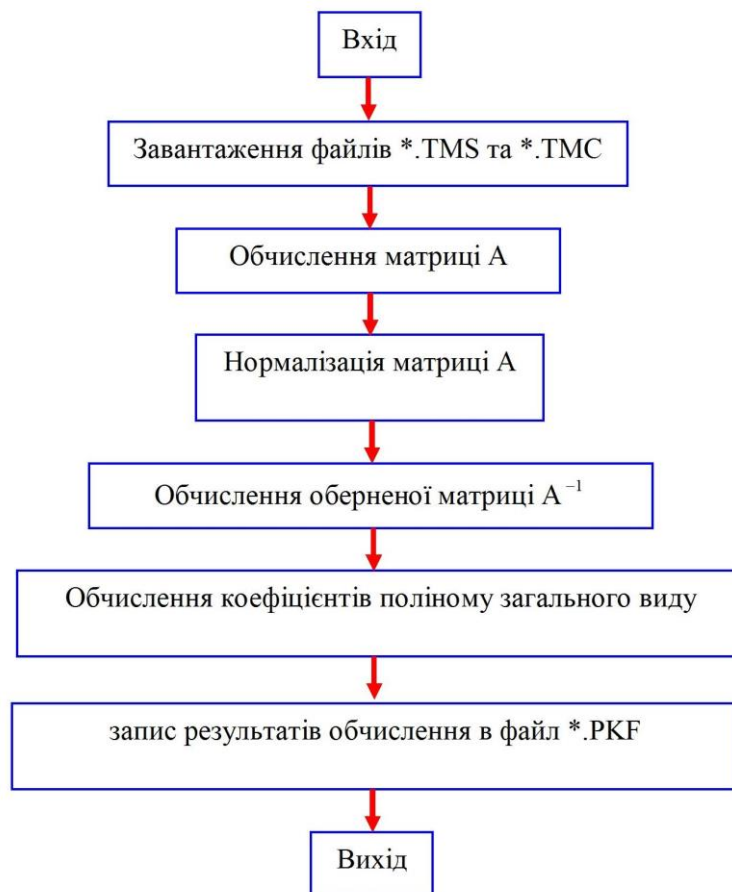


Рис Д.10. Блок-схема модуля «Polycalc»

Послідовність роботи в модулі “Polycalc”:

1. Запуск модуля (Polycalc.exe)
2. Відкриття файлів \*.TMS та \*.TMC
3. Натиснути кнопку «Обчислити». Після чого з’явиться діалог збереження результатів обчислення.

Робота модуля завершена.

Структура файлів \*.PKF

\*.PKF – Polycalc coefficients file

Файл складається з:

- заголовка, в якому міститься інформація про програму і її версію;
- блоку з інформацією про властивості тест-сітки, що вимірюється;
- блоку обчислених коефіцієнтів поліному загального виду;
- блоку оцінки точності визначення коефіцієнтів поліному загального виду;
- блоку виправлених координат контрольних точок в \*.DAT форматі.

Д.4. Опис програмного модуля “Stereo-SEM” і послідовності роботи в ньому.

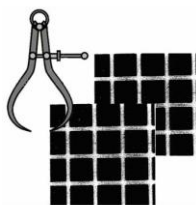


Рис. Д.11. Логотип модуля «Stereo-SEM»

Даний модуль призначено для вимірювання РЕМ-зображень в стереоскопічному режимі. Під час вимірювання в координати точок «на льоту» вносяться поправки за геометричне спотворення РЕМ-зображень. Потім за формулами РЕМ-стереофотограмметрії [2.11-2.13], обчислюються просторові координати точки на поверхні досліджуваного об'єкту. Нижче подано спрощений вигляд блок-схеми модуля.

### Блок-схема модуля



Рис. Д.12. Блок-схема модуля «Stereo-SEM»

Вигляд інтерфейсу програми:

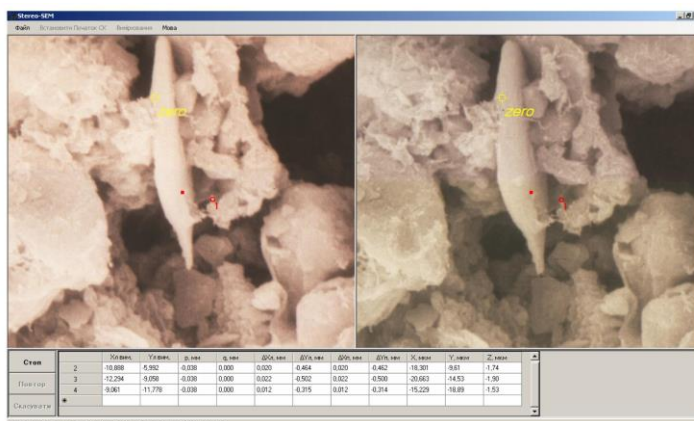


Рис. Д.13. Вигляд інтерфейсу модуля «Stereo-SEM»

*Послідовність роботи в модулі “Stereo-SEM”:*

1. Запуск модуля (Stereo-SEM.exe)
2. Відкриття зображення лівого і правого РЕМ-знімка та відповідних файлів \*.PKF.

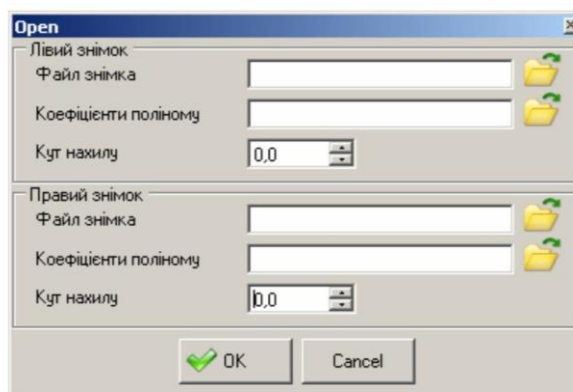


Рис. Д.1414. Діалог відкриття вхідних даних для модуля «Stereo-SEM»

3. Стереоскопічне встановлення початку системи координат.  
Пункт **Встановити початок СК**

#### 4. Вимірювання поверхні моделі в стереоскопічному режимі.

##### Пункт **Вимірювання**

Для переміщення двох знімків необхідно натиснути ліву клавішу миші і перетягнути знімки.

Для більш точнішого наведення користуйтеся курсорами “Up”, “Down”, “Left” і “Right”.

Для переміщення тільки правого знімку необхідно тримати натиснутою клавішу “Ctrl”.

Для фіксування положення точки необхідно натиснути праву клавішу миші.

**Примітка.** Під час збору точок існує вірогідність зафіксувати неправильне положення точки. Як змінити координати точки? Для цього необхідно в таблиці точок виділити відповідну точку. Після цього робоче поле масштабується на вибраній точці і активується кнопка «Повтор. Необхідно натиснути на неї і після цього зафіксувати «правильне» положення точки. Значення координат будуть перезаписані. Якщо клік в таблиці був зроблений випадково або Ви прийняли рішення не міняти координати точки, то необхідно натиснути «Скасувати».

*Структура файлів \*.SSF*

\*.PKF – Stereo-SEM file

Файл складається з:

- заголовка, в якому міститься інформація про програму і її версію;
- блоку з інформацією про зображення лівого та правого знімків;
- блоку координат виміряних точок;
- блоку просторових координат виміряних точок (X, Y, Z у мкм) в \*.DAT форматі.

## Висновки

1. Створений програмний комплекс «Dimicros» дозволяє виконувати опрацювання цифрових РЕМ-зображень на ПК та ЦФС «Дельта».

2. ПК «Dimicros» пройшов успішну апробацію на ПК та ЦФС «Дельта» під час опрацювання цифрових РЕМ-зображень тест-сіток, отриманих на 4-х типах РЕМ та РЕМ-стереопар мікроповерхні лесового ґрунту, хромованої сталі отриманих на РЕМ «Hitachi», РЕМ JSM F7100 і може бути рекомендований для практичного використання на високотехнологічному виробництві та для наукових досліджень мікроповерхонь твердих тіл.

3. Опрацювання РЕМ-зображень на ЦФС з застосуванням ПК «Dimicros» значно скорочує час та підвищує точність отримання просторових характеристик мікроповерхонь дослідних об'єктів у порівнянні з аналітичними методами.