

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

На правах рукопису

МЕЛЬНИК
Володимир Миколайович

УДК 528.721.287:537.533.35

**ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА
ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ В
ЕЛЕКТРОННО-МІКРОСКОПІЧНИХ
ДОСЛІДЖЕННЯХ**

Спеціальність 05.24.02 - аерокосмічне знімання,
фототопографія і фотограмметрія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

³ Львів - 1995

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00778329 (-)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

На правах рукопису

МЕЛЬНИК
Володимир Миколайович

УДК 528.721.287:537.533.35

**ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА
ФОТОГРАМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ В
ЕЛЕКТРОННО-МІКРОСКОПІЧНИХ
ДОСЛІДЖЕННЯХ**

Спеціальність 05.24.02 - аерокосмічне знімання,
фотопографія і фотограмметрія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наук вищого ступеня
доктора технічних наук

Львів - 1995

Дисертація в рукописі

Робота виконана на географічному факультеті Волинського державного університету імені Лесі Українки.

Науковий консультант - доктор геолого-мінералогічних наук
Соколов Вячеслав Миколайович (МДУ ім. М.Ломоносова)

Офіційні опоненти :

1. Доктор технічних наук, професор
Куштин Іван Федорович
2. Доктор технічних наук, професор
Сердюков Віктор Михайлович
3. Доктор фізико-математичних наук, професор
Савицький Вадим Григорович

Провідна організація - Інститут "Укргеоінформ" (м.Київ)

Захист відбудеться 29.09. 1995 року о 14 год.
на засіданні спеціалізованої Вченої ради 2 04.06.14 державного університету "Львівська політехніка" за адресою:
290646, м.Львів-13, вул. С.Бендери, 12

В дисертацію можна ознайомитися в науковій бібліотеці державного університету "Львівська політехніка", вул.Професорська, 1.

Відгуки на автореферат просимо надсилати за вказаною адресою на ім'я вченого секретаря спеціалізованої ради.

Автореферат розісланий 28.08. 1995 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Вченої ради
кандидат технічних наук

 Ф.Д.Заблоцький

Львів ім. В. Стефаника
АН України

Загальна характеристика роботи.

Актуальність досліджень. Сучасне застосування растрової електронної мікроскопії (РЕМ) в мікроелектроніці, геології, металознавстві, біології та в інших областях науки потребує переходу на кількісний рівень. Оскільки для цього в загальному випадку необхідно розв'язувати тривимірні нелінійні та некоректні обернені задачі, то це накладає жорсткі вимоги на відповідність математичної моделі реальній фізичній картині та точність експериментальних даних. Відповідно необхідно зважати на всі аспекти математичної обробки даних та розробляти математичні методи, які б найбільш повно враховували апріорну інформацію про мікроструктуру об'єкту, використовуючи при цьому комп'ютерну техніку з розвиненими засобами графіки, відображення та обробки РЕМ-зображень.

Відомі способи визначення просторових характеристик мікрооб'єктів можна класифікувати як томографічні, фізичні, стереофотограмметричні та косоуго відтінення.

Математичний апарат томографічного методу досить складний, тому для спрощення припускається, що об'єкт складається з плоских перерізів, і тим самим тривимірна задача зводиться до двовимірної, що не завжди правомірно.

Фізичні методи базуються на феноменологічних моделях, в яких рельєфний контраст вторинних електронів співставляється з просторовою орієнтацією того елемента, який в даний момент був опромінений первинними електронами. Для поверхонь з розвинутим мікрорельєфом необхідні значні спрощення.

Зв допомогою фотограмметричних методів можна отримувати тривимірну оцінку нерівних поверхонь і значно розширити можливості РЕМ. Відомо, що методи прикладної фотограмметрії мають широкі можливості стосовно точності, достовірності та

оперативності. Вагомий вклад у розробку теорії і практики методів прикладної фотограмметрії внесли вітчизняні вчені О.М.Лосєнов, Ф.В.Дробишев, М.Д.Коншин, В.Ч.Фінковський, В.М.Свердлов, В.Б.Дубинівський, І.Ф.Кушнін, О.Л.Дорожанський, С.Г.Могильний та ін. Безпосередньо питанням застосування фотограмметрії в мікроскопії присвячені роботи В.І.Саркіна, І.С.Гареліка, П.П.Гончарова, П.М.Мельнича, Е.І.Калантарова, а також зарубіжних вчених Гуркхардта, Войда, Гоша, Нанківела та ін.

Фотограмметрична обробка електронно-мікроскопічних (ЕМ) зображень має ряд особливостей. Головні з них – це суттєве відхилення одержуваного на ФЕМ зображення від центральної проєкції, порівняно низька метрична густота зображення, відсутність фотограмметрично строго обґрунтованих алгоритмів обробки ФЕМ-зображень, слабка реалізація цифрових методів обробки та ін. Ці питання потребують подальшої розробки. Актуальність та важливість проведення таких досліджень неодноразово підкреслювались в працях вітчизняних та зарубіжних авторів, а також у рішеннях міжнародного товариства фотограмметрії та дистанційного зондування.

Мета і завдання роботи. 1) створення теорії, математичних моделей, алгоритмів і технологій аналітичної і цифрової фотограмметричної обробки електронно-мікроскопічних зображень, як теоретичного базису і методології ФЕМ-фотограмметрії; 2) розробка практичних основ розв'язку ФЕМ-фотограмметричними методами проблемних задач в прикладній геодезії, металознавстві, ґрунтознавстві, біомінералогії та інших науках.

Для досягнення цієї мети в роботі розв'язані наступні питання:

- запропоновано і теоретично обгрунтовано цілком новий метод електронно-мікроскопічного стереознімання;

- розроблено теорію оригінальних алгоритмів стереометрії кристалів, теоретично обгрунтовано метод тривимірної реконструкції об'єктів молекулярної біології при екстремальних збільшеннях;

- виконано детальний аналіз особливостей електронно-мікроскопічного стереопсису;

- вперше проведені дослідження емпіричної точності РЕМ-стереовимірювань за допомогою спеціально виготовлених тест-об'єктів;

- в практиці електронної мікроскопії вперше зроблено появу фотограмметричне калібрування метричних властивостей РЕМ-зображень, отриманих за допомогою мікроскопів провідних фірм світу;

- запропоновано та експериментально обгрунтовано як найбільш оптимальний метод визначення збільшення при проведенні електронно-мікроскопічних стереовимірювань;

- сформульовані методи і алгоритми побудови на ЕОМ цифрових моделей мікрооб'єктів і дано оригінальне тлумачення ряду спеціальних питань їх побудови, що при подальшому науково-практичному розвитку відкриває як зно новий напрямок тривимірної електронної мікроскопії;

- розроблені теорія і метод цифрової фотограмметричної обробки РЕМ-зображень в "on-file" режимі.

Наукова новизна. В дисертації вирішені проблеми тривимірної інтерпретації електронно-мікроскопічних зображень і наукове значення роботи полягає в наступному:

1. Розроблено єдиний підхід до фотограмметричної обробки ЕМ-зображень різного типу.

2. Розроблена технологія фотограмметричного калібрування РЕМ і метричних властивостей РЕМ-зображень.

3. Створено ефективний метод цифрової фотограмметричної обробки електронно-мікроскопічних зображень.

4. Розроблені нетрадиційні методи побудови і аналізу цифрових моделей мікрорельєфу.

5. Розроблені принципи і технології проведення фотограмметричних досліджень на мікрорівні у металознавстві, ґрунтознавстві, мінералогії і прикладній геодезії.

6. Запропоновані нові варіанти тривимірної інтерпретації РЕМ-зображень в медицині і біології.

Основні положення, що виносяться на захист:

- теорія електронно-мікроскопічної фотограмметрії;
- результати експериментальних досліджень метричних властивостей РЕМ-зображення;
- алгоритми побудови і аналізу цифрових моделей мікрорельєфу;
- теорія цифрової фотограмметричної обробки РЕМ-зображення;
- концепція застосування фотограмметрії в прикладних електронно-мікроскопічних дослідженнях.

Практичне значення роботи подана у наступному:

- розроблені методи РЕМ-фотограмметрії можуть бути застосовані для дослідження більшості об'єктів, що вивчаються при різних збільшеннях в електронній мікроскопії. Ці методи мають досить високу точність, достовірність, оперативність в отриманні кількісної інформації досліджуваних об'єктів;

- створена технологія досліджень цифрових фотограмметричних моделей мікрооб'єктів, яка включає методичну, алгоритмічну і програмне забезпечення і може бути з успіхом застосована

на не тільки в електронній мікроскопії, а й в оптичній, лазерній і конфокальній мікроскопії;

- розроблена (в співавторстві) цифрова фотограмметрична обробка РЕМ-зображень дозволяє суттєво збільшити можливості проведення мікроскопічних досліджень, особливо в режимі "in situ";

- запропоновані в дисертації алгоритми фотограмметричних вимірювань є основою для створення високоефективних цифрових фотограмметричних систем обробки електронно-мікроскопічної інформації;

- виконано поєднання методів РЕМ-фотограмметрії і ітераології, проведені практичні дослідження цієї проблеми.

Основні результати дисертаційної роботи знайшли своє застосування у ВДУ ім. Лесі Українки, МДУ ім. М.В.Ломоносова, науково-дослідному об'єднанні "Молот" (м.Москва), Липецькому заводі "Центроліт", Волчовському філіалі УкрНДІГІА ім. Соколовського, на Хмельницькій АЕО.

Апробація роботи. Основні і практичні результати дисертаційної роботи обговорювалися на Міжнародному фотограмметричному конгресі (м. Хельсінкі, 1976 р.), Всесоюзних конференціях з електронної мікроскопії (м. Москва, 1982, 1987, 1990 рр.), Всесоюзних симпозіумах з растрової електронної мікроскопії і аналітичних методів досліджень твердих тіл (м. Москва, 1981, 1984, 1989, 1993, 1994 рр.), наукових конференціях державного університету "Львівська політехніка" (м. Львів, 1983-1987 рр.), на I-му національному конгресі гістологів, анатомів, топографо-анатомів України (м. Івано-Франківськ, 1994 р.), Всесоюзній конференції по меліоративній географії (м. Ленінград, 1986 р.), Міждержавній конференції по біомінералогії (м. Луцьк, 1992 р.), на науково-

практичних радах ХАЕС.

В 1989 р. фотограмметричний метод дослідження мікро-структури геологічних об'єктів з використанням FEM демонструвався на ВДНГ СРСР, за що автора нагороджено срібною медаллю.

Особистий внесок автора в роботу. Теоретичні положення FEM-фотограмметрії, аналіз та оцінка геометричних спотворень, методи створення цифрових моделей мікрорельєфу та їх аналіз, методологічні засади застосування фотограмметрії у електронно-мікроскопічних дослідженнях автором розроблені самостійно. Концепція цифрової обробки FEM-зображень розроблена у співавторстві з колективом дослідників Московського державного університету, програмне забезпечення – за безпосередньою участю автора.

Публікації. Основний зміст дисертації відображений у 38 роботах, в тому числі в одній монографії.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти глав, висновків та бібліографії. Загальний обсяг роботи складає 287 стор., 93 мал., 33 таблиці. Список літератури включає 290 найменувань.

За час багаторічної роботи над дисертацією автор постійно спілкувався з багатьма представниками науки і виробництва, що плідно впливало на хід досліджень, надавало всім теоретичним дослідженням практичну значимість.

Автор висловлює ширю вдячність своєму вчителю професору доктору технічних наук В.Я.Фінковському за постійну творчу підтримку та науковому консультанту професору доктору геолого-мінералогічних наук В.М.Соколову за практичну допомогу, цінні поради і консультації на різних етапах виконання роботи.

В створенні програмного забезпечення дисертації приймали

участь О.В.Тумская, О.М.Іванчук, В.В.Крутоголовий, В.У.Во-
лошин, А.Р.Ханін. Цінні зауваження і пропозиції висловили під
час досліджень професори М.О.Урмаєв, В.І.Петров, В.Г.Джков,
О.Л.Дорожницький, І.Ф.Куштин, Р.А.Арцішевський, Д.Р.Вобро.
Всім їм автор складає глибоку подяку. Так само як і своїм ко-
легам по спільній роботі Т.М.Стовпник, Ф.П.Тараську, Т.В.Бу-
латецькій, Ю.С.Блінде, у, які допомагали в редагуванні та
оформленні дисертації. Особливу вдячність висловлюю Г.В.Оли-
шевській і М.С.Климу, які добрим словом і справами підтриму-
вали автора, розуміючи складність і важливість цієї роботи.

Зміст дисертації.

У вступі обгрунтована актуальність сформульованих задач і дається короткий зміст дисертаційної роботи.

В першій главі розроблена та обгрунтована узагальнена математична модель, що виключає коректний розв'язок прямих та обернених фотограмметричних задач

$$\tilde{R}_i = \tilde{R} + \tilde{V} + M_i \cdot \Lambda(G(\phi, \omega, \alpha)) \cdot \tilde{X}_i; \quad \Phi[\tilde{R}, \tilde{X}, G(\alpha, \omega, \alpha)], \quad i=0 \quad (1)$$

Передбачено вибір оптимальної математичної моделі $\Phi(G_i)$, яка описує фотограмметричний процес в РЕМ із деякого класу фотограмметричних моделей Φ^i , зокрема проєктивних та перспективно-афінних відображень.

1. Проективні моделі. В основу проєктивних моделей покладено відомі у фотограмметрії рівняння проєктивноі колінеарності:

$$\begin{aligned} x_{i1} &= (a_1^i X_i + a_2^i Y_i + a_3^i Z_i + a_4^i) / (a_9^i X_i + a_{10}^i Y_i + a_{11}^i Z_i + 1); \\ y_{i1} &= (a_5^i X_i + a_6^i Y_i + a_7^i Z_i + a_8^i) / (a_9^i X_i + a_{10}^i Y_i + a_{11}^i Z_i + 1). \end{aligned} \quad (2)$$

x_{i1}, y_{i1}, z_{i1} - просторові координати точки P_i ;

x_{i1}, y_{i1} - вимірні координати точки P_i на знімку;

a_1^i, \dots, a_{11}^i - параметри проєктивного траєформування i -го

знімка.

Із властивостей проєктивних перетворень випливає, що

$$f_1 = A_1 D_1 - B_1 C_1 = 0 ; \quad (3)$$

$$f_2 = (K_1 - F_1) D_1 + C_1^2 - B_1^2 = 0 ,$$

$$d) \quad A_1 = \sum_{i=1}^3 a_{1,i}^k a_{1,i}^l , \quad B_1 = \sum_{i=1}^3 a_{1,i}^k a_{1,i}^s , \quad C_1 = \sum_{i=1}^3 (a_{1,i}^k a_{1,i}^d)^2 ,$$

$$D_1 = \sum_{i=1}^3 (a_{1,i}^k a_{1,i}^s)^2 , \quad K_1 = \sum_{i=1}^3 (a_{1,i}^k)^2 , \quad F_1 = \sum_{i=1}^3 (a_{1,i}^k a_{1,i}^d)^2 .$$

Ці рівняння доцільно включати разом з основними рівняннями (†) у процес врівноваження, розглядаючи їх як псевдовимірювання. В порівнянні з перспективним проєктивним перетворенням дозволяють враховувати неоднакові масштаби вздовж координатних осей та їх неортогональність, що в математичній формі має такий вигляд. Якщо вектори $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$ мають компоненти

$$\vec{v}_1 = (a_1, a_2, a_3), \quad \vec{v}_2 = (a_5, a_6, a_7), \quad \vec{v}_3 = (a_9, a_{10}, a_{11}),$$

то $(\vec{v}_2 \times \vec{v}_3) \cdot (\vec{v}_1 \times \vec{v}_3)$ - характеризує неортогональність, а невиконання тотожності $|\vec{v}_1 \sin(\vec{v}_1, \vec{v}_3)| = |\vec{v}_2 \sin(\vec{v}_2, \vec{v}_3)|$ - відмінність масштабів. Розв'язок лінійно зв'язаних рівнянь (1) за методом найменших квадратів (МНК) для рівноточних вимірювань має вигляд:

$$X = [\begin{matrix} A^T & A \end{matrix}]^{-1} \cdot \begin{matrix} A^T \\ L \end{matrix} .$$

(11×1) (11×2n)(2n×11) (11×2n) (2n×1)

В умовах електронної мікроскопії невідомі параметри трансформування X_1 можна одержати тільки за допомогою ітерацій. При цьому ітеративний процес необхідно здійснювати за такою схемою: 1) - вгачення параметрів трансформування $\{a_i\}$:

$$[A_n(x'_i, X_1)]_B = b_n(X_1) ,$$

де $\vec{x}' = [x'_1 \dots x'_n]$ - вимірні координати; $\vec{x}_1 = [x'_1, x'_2, z'_1]$ - координати "опорних" точок; $[A_n(x'_i, X_1)]$ - матриця, елементи якої є функціями вимірних координат та контрольних точок;

$\bar{I}^* = [a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*]$ - початкові значення коефіцієнтів;

2) - визначення на основі прямої проєктивно-ї засічки виправлених координат точок мікрособ'єкту $\{X\}$:

$$[a_m(x_j^*, a^*)]X^* = d_m(X_j^*, I^*),$$

де m - кількість знімків; j - кількість точок ($j=1, 2, \dots, n$). Початкові значення координат точок мікрособ'єкту визначаються на основі простих формул перспективно-афінної проєкції. Перевірка викладеного алгоритму здійснювалася на спеціальному тест-об'єкті з відомими контрольними точками, що дозволило вичислити відладку відповідної програми та оцінити ефективність ітеративного методу проєктивних перетворень.

В дисертації розглянуті можливі в растровій електронній мікрокопії варіанти проєктивних моделей*. Вихідна проєктивна модель (1) доповнюється: 1) залежностями між параметрами проєктивних перетворень (2); 2) додатковим контролем визначення просторових координат, націклад, в процесі РЕМ-стереознімання плоскої тестової сітки; 3) використанням мікрокристалів, в яких відомі за даними рентгеноструктурного аналізу співвідношення просторових відрізків (без вивчення їх довжин) або значення двограних кутів.

2. Фотограмметричні моделі перспективно-афінного відображення. Принципова відмінність стереопари перспективно-афінного відображення полягає в тому, що кожному парі відповідних променів треба вважати одержанов в різних точках простору, тобто з різних об'єктів.

В узагальненому вигляді фотограмметрична модель, що відповідає концепції перспективно-афінного відображення і виключає умови колінеарності і компланарності, може бути записана такою системою рівнянь:

$$[x + \Delta x]_{i,j} = [M_{i,j}]_i \cdot [A_{\alpha, \omega, \varphi}^i]_i \cdot ([X]_{i,j} - [X_0]_{i,j}), \quad (4)$$

$$[B]_{i,j} \cdot ([R]_{i,j} \times [R]_{i,j}) = 0,$$

де

$$[R]_{i,j} = \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = [A]_{i,j} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$[B]_{i,j} = [A]_{i,j} \cdot [x]_{i,j} - [A]_{i,j} \cdot [x]_{i,j},$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}_{i,j} = \sum_{t=0}^{\pi} \sum_{t=0}^k \begin{bmatrix} a_{i,t} \\ b_{i,t} \end{bmatrix} x^{i-t} y^t,$$

$$N_i = \frac{([B]_{i,j} \times [R]_{i,j})_{i,j}}{([R]_{i,j} \times [R]_{i,j})_{i,j}}$$

Просторові фотограмметричні координати точок стереомоделі дорівнюють

$$[X]_{i,j} = [X_0]_{i,j} + [A_{\alpha, \omega, \varphi}^i]_{i,j} \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ -N_i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Використовуючи (4-6), в дисертації отримано в явному вигляді формули прямої фотограмметричної зв'язки для різних випадків РЕМ-стереознімання. Наприклад, для РЕМ-стереознімання методом поворотів:

$$\begin{aligned} X &= \left(x_1 - \frac{p}{2} \right) (\cos \varphi \cos \alpha + \frac{\sin \varphi \sin \alpha}{\cos \alpha}); & Y &= \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} y_1 - \frac{\cos \alpha}{\sin \varphi} \cdot \frac{p}{2}; \\ Z &= -\sin \alpha \sin \alpha x_1 + \sin \alpha \sin \alpha \left(x_1 - \frac{p}{2} \right) + \frac{\cos \alpha}{\sin \varphi \sin \alpha} (\cos \varphi \cos \alpha + \\ &+ \sin \varphi \sin \alpha \cos \alpha) \cdot \left(-\frac{p}{2} \right) + y_1 (2 \cos \varphi \sin \alpha - \sin \alpha \cos \alpha - 2 \sin \varphi \cos \alpha \cos \alpha). \end{aligned} \quad (7)$$

3. Моделі для опису стереомікроскопії кристалів отримані з урахуванням дифракційних та контрастних особливостей.

При цьому використаний формалізм векторів Гіббса для коректного опису просторових орієнтацій та результуючого нахилу. Розв'язок досягається мінімізацією функції

$$F(a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=1}^k [\delta \cdot (\hat{x}_{i,1} + \hat{z}_{i,1}) - (\hat{x}_{i,1} - \hat{z}_{i,1})]^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

яка лінійна по відношенню до визначуваних компонент вектора Гіббса $\delta(a_1, a_2, a_3)$. В роботі дається теорія програмованих

диференціальних нахилів, застосування яких перспективне в системах повнішої автоматизованого аналізу РЕМ-зображень, зокрема детально розглянуто застосування програмованих нахилів в рентгенографію шоротких зразків. Використовуючи стереоскопічні методи в режимі "in situ", можна визначити точну орієнтацію локальної поверхні маленької плоскої ділячки на шорсткому зразку, а потім реорієнтувати її таким чином, щоб ця ділячка була паралельна стандартним положенням. Як показує практика, це дозволяє суттєво підвищити точність кількісних рентгенографічних визначень.

4. Фотограмметричні моделі мікрооб'єктів (або йо з окремих ділянок), деталі яких не чітко окреслені. У випадку плавної зміни рівня сигналу можливі значні помилки стереовимірювань одиночної РЕМ-стереомоделі. Для цих випадків розроблено два варіанти багатократною фотограмметричною засічки: 1) на основі умов Гаусса з мінімізацією відстаней між перехресними прямими; 2) на основі оптимізації відстаней від точок, що визначаються на поверхні мікрооб'єкту, до kern-площин множини (більше двох) РЕМ-зображень.

5. Моделі для об'єктів, що мають низьку радіаційну стійкість до опромінення їх електронами. Для них звичайне багаторазове стереознімання утруднене. Припускаючи ідентичність в своїй сукупності множини мікрооб'єктів, наприклад макромолекул, на основі відомих положень проєктивною геометрії розроблено оригінальний метод ітераторного визначення за проєкціями на незначне число мікрофотографія.

6. Оптимізація умов РЕМ-стереосприймання. В практиці електронної мікроскопії часто зустрічаються випадки, коли стереоскопічне знімання застосовується тільки для візуального вивчення стереозображення та одержання інформації якісно-

го характеру. З врахуванням цього в дисертації дається загальний аналіз електронно-мікроскопічного стереопису та обґрунтовані рекомендації оптимальних умов електронно-мікроскопічного стереосприймання.

Глава II. Калібрування геометричних спотворень електронно-мікроскопічного зображення.

Фотознімання в РЕМ складається з трьох основних етапів: 1) відображення у об'єктному просторі; 2) формування зображення на електронно-променевої трубки (ЕПТ); 3) фотографічна реєстрація зображення, що отримується на екрані ЕПТ.

На кожному з цих етапів виникають спотворення РЕМ-знімків. При цьому, крім відомих у фотограмметрії спотворень, РЕМ-знімки мають ще і свої спотворення, що характерні тільки для цього способу формування зображення.

У дисертаційній роботі детально розглянуті основні джерела спотворень РЕМ-знімків, зокрема недосконале сканування, неоднорідність відхиляючих та фокусуємих магнітних полів, спотворення фотореєстрації і деякі інші. Зроблена оцінка їх впливу на геометричну точність РЕМ-зображення і аргументована необхідність врахування цих спотворень при розв'язанні фотограмметричних задач. Вперше зроблена теоретична оцінка дрейфу електронного вонду, який досить важко враховувати при скануванні поверхні мікрооб'єкту в РЕМ.

Оскільки особливості формування РЕМ-зображення визначаються досить великою кількістю факторів, то встановити адекватну аналітичну залежність систематичних помилок РЕМ-знімків від спотворюючих факторів практично неможливо. В зв'язку з цим в дисертації здійснено математичне моделювання сумарних геометричних спотворень РЕМ-зображень, базуючись на результатах знімання та вимірювань тест-сітки. Такий тестовий

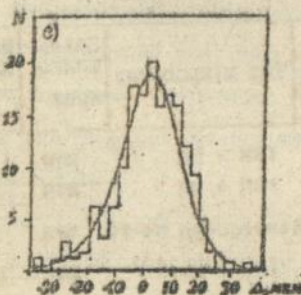
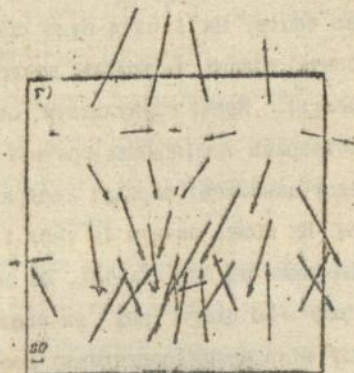
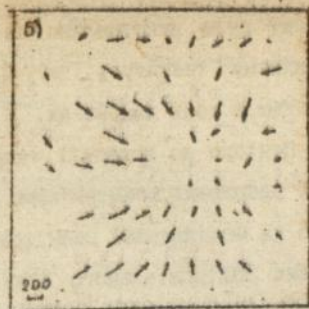
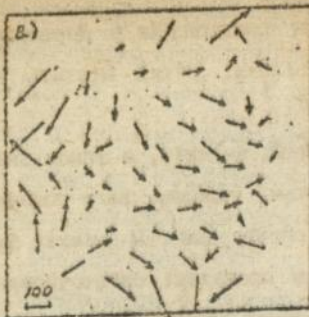
об'єкт було виготовлено за нашим замовленням у Державному оптичному інституті ім. С.І.Вавилова. Сітка містить 200 лін./мм в обох напрямках.

Подібно до корекції телевізійних знімків, в таких знімках, одержаних неметричними камерами, головну вагу зосереджено на моделюванні геометричних спотворень РЕМ-знімків функціями поліноміального виду. Були проведені багаточисельні експериментальні дослідження метричних властивостей РЕМ різних типів. Як і слід було сподіватись, помилки РЕМ-знімків досить значні і можуть досягати величин порядку 2000 мкм (мал.1). Кращі результати отримуються при апроксимуванні спотворень поліномами третьої степені (мал.2). У цьому випадку залишкові середні квадратичні помилки становлять 20-30 мкм. Як можна бачити із табл.1, винятком є корекція знімків, одержаних на РЕМ JKA-50A, що пояснюється спеціальним призначенням РЕМ цього типу як аналізатора, і, мабуть, для цього типу мікроскопу характерна особливо значна нелінійність при стрічкову скануванні вдовж осі x.

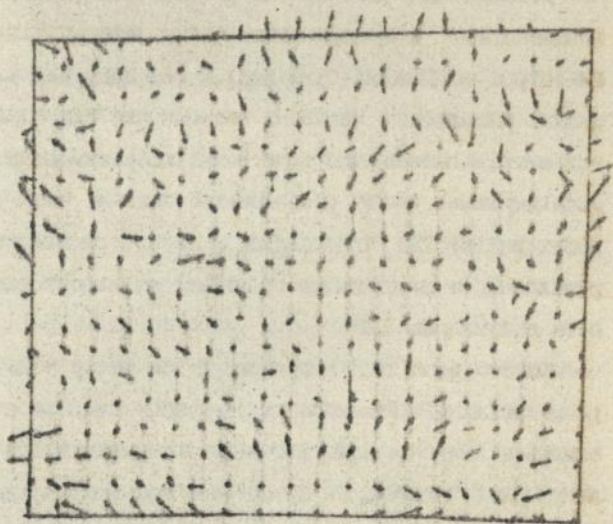
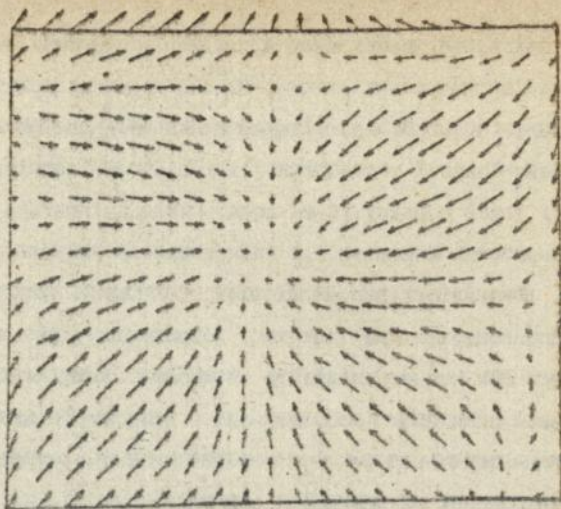
Таблиця 1.

№№ п/п	Тип мікроскопу	Збільшення, крат	Макс. помилки до калібр., мкм		Середні кв. помилки, мкм	
			Δx	Δy	δx	δy
1	ISM - U3	250	437	1271	32	30
2	ISM - U3	273	250	403	25	20
3	Stereoscan S4-10	323	645	820	40	31
4	JKA - 50 A	424	1020	2000	06	20
5	Quickscan	632	500	1070	43	50

Оскільки вимірювання РЕМ-знімків може виконуватись у різних робочих режимах, то з практичної точки зору досить важливо знати, як впливають основні робочі параметри (збільшення та робоча відстань) на метрику РЕМ-знімків. Результати прове-



Мал.1. векторні діаграми дисторсійних спотворень РЕМ:
 а) - JEM-U3; б) - S4-10; в) - JXA-50A; г) - Квіксан;
 д) - Хітачі С-800; е) - гістограма залишкових спотворень.



Мал.2. Векторні діаграми дисторсійних спотворень
РЕМ "Х" тачі С-800" до і після обліку поліномами
третьої степені.

дених експериментальних досліджень свідчать про те, що картина геометричних спотворень РЕМ-знімків в інтервалі збільшень 200...2000 крат (такий вибір інтервалу встановлений параметрами нашої тест-сітки) та у діапазоні вимірювання робочих відстаней порядку 15 мм досить мало змінюється при варіюванні робочих параметрів у вище вказаних інтервалах.

Результати виконаних нами досліджень дозволяють зробити висновок, що при строгому дотриманні ідентичності робочих умов РЕМ можна розглядати як досить стійку систему. Для підтвердження цього досліджувалась різномасштабність вздовж координатних осей за серіями РЕМ-знімків, отриманих на різних мікроскопах на протязі п'яти років.

Встановлено, що для різних типів РЕМ різномасштабність неодинакова: найменша (біля 1%) у РЕМ типу "СТЕРГОВСАН - В4-10", а найбільша (біля 20%) у РЕМ типу ЖА-50А. Виявлено значні розходження числових значень для РЕМ "QUICKSCAN", що пояснюється виконанням додаткових вступальних робіт. Особливо досліджувався дрейф різномасштабності у часі (на протязі трьох років) РЕМ "СТЕРГОВСАН - В4-10": встановлено, що він рівний 6%, в це свідчить про відносно високу надійність роботи даного типу РЕМ.

Багато дослідників притримуються тепер концепції фотографіметричного системного калібрування РЕМ, як складної системи в цілому. Ця концепція нами застосовувалась для дослідження РЕМ "НІТАСНІ - В-800" (Московський держуніверситет). Його збільшення може неперервно змінюватись від 20 до 100000 крат при робочій відстані приблизно 25 мм. Кут нахилу предметного столика змінюється в межах від 0° до 90° з кроком 0.2°, а кут повороту - у діапазоні 0° - 360°. Проводились дослідження на макетних та реальних знімках. Встановлено: 1)

при ретельному дотриманні умов староснімання сучасні РЕМ дозволяють відтворювати знімальні параметри як статистично стійкі; 2) залишкові помилки визначення просторових координат при рівні значущості 0.05 розподілені за нормальним законом.

Точність калібрування РЕМ-знімків, як задачі на знаходження апроксимуючої функції, залежить від розміщення та числа опорних точок тест-сітки. Припускаючи розміщення опорних точок рівномірним (подібний вибір точок при зніманні тест-сітки завжди можливий), в дисертації розглянуто випадок розміщення опорних точок рядами по n точок у кожному і отримані відповідні формули вагових коефіцієнтів, що характеризують точність поліноміального апроксимування спотворень. Також отримано формули середніх квадратичних помилок визначення поправок калібрування Δ_x , Δ_y . Зроблені за цими формулами розрахунки показують, що точність знаходження поправок в координати стабілізується для 60-80 опорних точок.

У дисертації розглянуто важливий у РЕМ випадок, коли опорні точки розглядаються як випадкові просторові вектори, а не як фіксовані точки. Подібний випадок має місце, коли у РЕМ можна згенерувати такі явні когерентні квадратні тестові системи. Згідно зробленим у дисертації теоретичним викладкам, при подібному обліку геометричних спотворень дисперсія поліноміальних перетворень пропорційна загальній дисперсії помилок вимірювання опорних точок та обернено пропорційна їх кількості; із порівняння біквадратної та афінної моделей випливає, що повільно застосовується перетворення того ж порядку, що і ступінь спотворення, в протилежному випадку перетворення більш високого порядку можуть лише збільшити невизначеність.

Абсолютне орієнтування РЕМ-стереомоделі і точність корекції геометричних спотворень залежить від точності визначення збільшення. Згідно проведенням у дисертації дослідженням, оптимальна точність визначення збільшення РЕМ-знімків повинна бути біля 5% (точність визначення збільшення за шкалами мікроскопу 10...15%). У роботі запропоновано два способи більш точного визначення збільшення: перший - по тестовій сітці; а другий - за допомогою монодисперсних полістерольних латексів.

Із результатів виконаних експериментів випливає, що оптимальна точність збільшення досягається за допомогою попередньо внесенних на досліджуваній мікрооб'єкт полістерольних латексів. Однак цей результат справе-лигий тільки для монодисперсного (або квазімонодисперсного) каліброваного полістеролу. Для виявлення дисперсності каліброваного полістеролу були проведені статистичні дослідження п'яти проб латексів різних розмірів. Встановлено, що відхилення фактичних розмірів від номінально вказаних можуть бути досить значними (до 13%), а тому застосування полістерольних латексів при стереозніманні повинна передувати їх атестація. Відповідно цьому в роботі запропонований оригінальний метод атестації на основі ймовірнісної моделі Ерланга. Такий метод атестації дозволяє, крім визначення середньостатистичних параметрів, попередньо розрахувати можливе число появи сфер полістеролу, діаметри яких перевищують заданий рівень ймовірності.

Глава III. Побудова цифрової моделі мікрорельєфу та її аналіз. Нехай в деякій області Ω в N точках з координатами $x_i^1, x_i^2 \in \Omega$ виміряні фотограмметричним шляхом значення невідомої функції мікрорельєфу $f(x, y)$, визначеної по всій області знімку $\Omega = \bigcup_{i=1}^N \Omega_i$, де $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset$ для $i \neq j$. При цьому подамо

мікрорельєф дискретно, тобто висота з точки визначається як функція U положення (відносно координат x і y). З урахуванням великої різноманітності поверхонь, що досліджуються на мікрорівні, в дисертації запропоновані різні методи побудови ЦММР.

1. Інтерполяційний слайд. При цьому задача відтворення функції розглядається як глобальна задача колокації, розв'язок якої зводиться до розв'язку системи n рівнянь виду

$$L_f = f, \quad (9)$$

де L - стовпчик з n вихідних функціоналів L_i (зокрема, значень функції, що вивчається, в вузлах частинної сітки); f - стовпчик вимірених значень f_i цих функціоналів L_i ; f - шукана функція, що являє собою елемент деякого нескінченного гільбертова простору H . Розв'язок $f(x, y)$ має вигляд:

$$f(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i^t(x, y) \ln r_i^t(x, y) + a_0 + a_1 x + a_2 y, \quad (10)$$

де $r_i(x, y)$ - відстань між поточною точкою P області Ω та фіксованою точкою B (вузол регулярної сітки, в якій відтворюються значення функції). Основним недоліком цього методу є діляна заповненість матриці коефіцієнтів системи рівнянь.

2. Перетворення Фур'є-Хартлі. В багатьох випадках є потреба відобразити мікрорельєф в просторово-частотній ділянці, де Z визначається як сума гармонік. В цілях метов доцільно застосувати двомірне перетворення Фур'є (ДФ). Нехай ЦММР є регулярна з матрицею висот розміру $N \times M$. Тоді пряме і зворотне перетворення відповідно мають такий вигляд:

$$G_{k..l} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} Z_{i..j} W_N^{i..k} W_M^{j..l} \quad (11)$$

$$(n=0, 1, 2, \dots, N-1, \quad m=0, 1, 2, \dots, M-1),$$

$$Z_{k..l} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} G_{i..j} W_N^{i..k} W_M^{j..l} \quad (12)$$

$$(k=0, 1, 2, \dots, N-1, \quad l=0, 1, 2, \dots, M-1),$$

де $w_n = e^{i \cdot 2\pi \cdot n}$; $w_m = e^{i \cdot 2\pi \cdot m}$.

Коефіцієнти $a_{n,m}$ (включаючи уявну та дійсну компоненти) у порядку їх індексів n і m - це і є просторово-частотне зображення рельєфу. При цьому модуль комплексних коефіцієнтів двовірного ДКФ характеризує спектральну потужність досліджуваної ЦМР, що визначається як $|a_{n,m}|$ і являє собою розподіл амплітуд гармонік за частотами. Застосування двовірного ДКФ та алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШКФ) потребує, щоб дані були розміщені через регулярні проміжки, що не завжди можливо.

Базуючись на працях Брейсуелла, нами застосовано перетворення Хартлі для побудови ЦМР. Головна перевага перетворень Хартлі полягає в тому, що вони виконуються однаково на відміну від перетворень Фур'є, які проводяться прямо і зворотно за різними формулами при використанні комплексних чисел. В перетвореннях Хартлі беруть участь тільки дійсні величини, що значно економить машинний час. Із врахуванням властивостей перетворення Хартлі можна стверджувати, що ці перетворення перспективні і можуть досить ефективно застосовуватись в аналітичній РЕМ-фотограмметрії, особливо при обробці в режимі реального часу і дослідженні мікрооб'єктів нестійких до дії електронного зонду.

3. Використання випадкових функцій. Мікрорельєф, що вивчається в РЕМ, можна розглядати як реалізацію деякого випадкового процесу. Виходячи з цього припущення, інтерполяційна функція ЦМР має вигляд:

$$Z_i = f(x_i, y_i) + \xi_i, \quad (13)$$

де Z_i - відмітка довільної точки з координатами x_i, y_i ; $f(x, y) = (a_0 + a_1 x + a_2 y)^n$ - поліномі степеня n ; ξ_i - випадкова величина з математичним очікуванням $M(\xi_i) = 0$ та заданою коре-

ляційною функцією $K_{ij} = \Phi(x_i, y_i, x_j, y_j)$. За умови мінімуму суми квадратів випадкових величин ξ_i та співпадіння інтерполяційної функції в опорних точках рівняння (13) можна записати:

$$Z_i = (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i)^2 + K_{ij} \lambda^i, \quad (14)$$

де $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ - множники Лагранжа, що разом з коефіцієнтами (a_0, a_1, a_2) , визначаються за методом найменших квадратів. Питання вибору кореляційної функції K_{ij} має самостійне значення. В дисертації подано можливі розв'язки:

1) на основі розрахунку емпіричних коваріацій:

$$K'(r) = \frac{1}{(N-q)N} \sum_{i=1}^q \left[\sum_{j=1}^N (j_{i,1}), (j_{i,2}, \dots, j_{i,q}) \right],$$

$$K''(r) = \frac{1}{(N-q)N} \sum_{i=1}^M \left[\sum_{j=1}^N (j_{i,1}), (j_{i,2}, \dots, j_{i,q}) \right], \quad (15)$$

$$K(r) = [N(M-q)K'(r) + M(N-q)K''(r)] / [(M-q)N + M(N-q)],$$

де $K'(r)$, $K''(r)$ - коваріації, орієнтовані за сторонами MA та NA відповідно; $(j_{i,1}), \dots$ - значення функцій, що вивчаються, центральних відносно їх середнього значення в області Ω ; $r = qA$ ($q=0, 1, 2, \dots$). Після цього можна виконати впроєктування емпіричної автоковаріаційної функції (АКФ) за допомогою відомих базисних функцій. Як базисні функції для впроєкції АКФ можна взяти функції Лагерра, Хевра, Услова, Чебишева, Лежандра, Ерміта.

2) Інший підхід полягає в наближеному описі емпіричних коваріацій $K(r)$ за допомогою кореляційних функцій вигляду:

$$\left. \begin{aligned} K_1(r) &= \sigma^2 \exp(-\alpha |r|^p) \\ K_2(r) &= \sigma^2 \exp(-\alpha |r|^p) \cos \beta r \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

де $(p=1, 2, \dots)$; σ^2 - дисперсія; α - показник затухання кореляційного зв'язку. Практично використовуються функції при $p=1$ та 2 .

3) Більш строгий підхід полягає у визначенні локальних коваріацій цих функцій за результатами апроксимації ЦММР. Нехай в ділянці Ω фізичні поля $f_1(x, y)$ і $f_2(x, y)$, Ω вивчаються, ізотропні та однорідні. Тоді в точках $P \in \Omega$ і $Q \in \Omega$, віддалених одна від одної на малу відстань r , коваріація між $f_1(P)$ і $f_2(Q)$ може бути визначена як:

$$K(P, Q) = K(r) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \int_{\Omega} f_1(x, y) f_2(x', y') dx dy,$$

де $r^2 = (x-x')^2 + (y-y')^2 = \text{const}$.

Як показують дослідження, вигляд коваріаційної функції в (14) впливає помітно на точність інтерполяції в проміжних точках p_i ($i=1, 2, \dots, m$) ЦММР.

В дисертації детально розглянуто питання опису шорстких поверхонь ЦММР з допомогою моделей випадкового поля і одержані конкретні залежності для ЦММР, що апроксимуються суперпозицією синусоїдально-профільованих поверхонь. Зокрема отримана матриця сукупності мікроскопічних параметрів випадкової ЦММР загального вигляду:

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} 2m_0/\Delta_1 & 0 & 0 & 3m_2/2\Delta_1 & 0 & 3m_2/2\Delta_1 \\ 0 & 1/m^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/m^2 & 0 & 0 & 0 \\ 3m_2/2\Delta_1 & 0 & 0 & 9\Delta_2/4m_4\Delta_1 & 0 & -3\Delta_3/4m_4\Delta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3/m_4 & 0 \\ 3m_2/2\Delta_1 & 0 & 0 & -3\Delta_3/4m_4\Delta_1 & 0 & 9\Delta_2/4m_4\Delta_1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

де $\Delta_1 = (2m_0m_4 - 3m_2^2)$, $\Delta_2 = (m_0m_4 - m_2^2)$, $\Delta_3 = (m_0m_4 - 3m_2^2)$; m_0, m_2, m_4 - моменти спектральної функції.

4. Алгоритм побудови ЦММР інтеграцією фотogramетричних та фотометричних вимірювань. В узагальненій формі математична модель цього методу має виг. ад:

$$\hat{V}_i = G(x, y) - T_i^{k^2} [E_i(T_i^k(x, y))] \quad (18)$$

де $g(x, y)$ - рівень оптичної щільності в точці об'єкту;

T^F - оператор фотометричного трансформування;

T^G - оператор фотогамметричного трансформування.

Припустимо, що оператор фотометричних спотворень лінійний $T^F = r_0 + r_1(g(x, y))$, а виміряну оптичну щільність $\bar{g}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ розглядаємо як функцію "рельєфу" (\bar{z}), елементів орієнтування (\bar{a}) та параметрів (\bar{b}) моделі. Здійснюючи за цих умов лінеаризацію (18), запишемо:

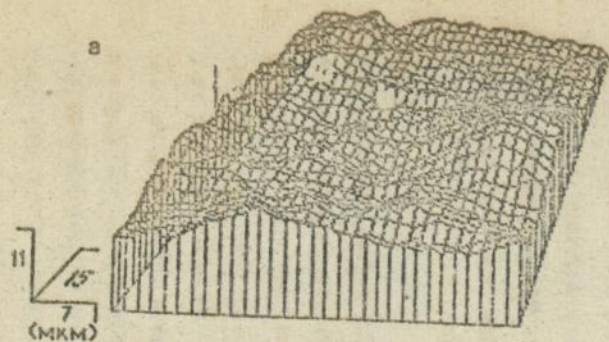
$$\begin{aligned} V = & g - \bar{g}(z_0, a_0, b_0) - \left[\frac{\partial \bar{g}}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial a} + \frac{\partial \bar{g}}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial a} \right] \Delta a - \\ & - \left[\frac{\partial \bar{g}}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial b} + \frac{\partial \bar{g}}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial b} \right] \Delta b - \left[\frac{\partial \bar{g}}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial z} + \frac{\partial \bar{g}}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial z} \right] \Delta z. \end{aligned} \quad (19)$$

В дисертаційній роботі всі обчислювальні процеси цього методу детально розглянуті.

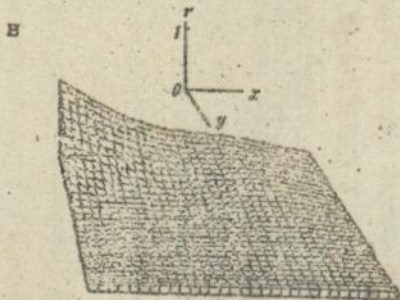
5. Побудова ЦММР в використанні методу регуляризації акад. Тихонова А.М. У випадку, коли побудова ЦММР ускладнена мікроструктурними особливостями і слабо обумовлена, в дисертації зроблено метод знаходження регуляризованого розв'язку. При цьому припускається, що за міру гладкості взято функціонал першого порядку - середня величина скалярного градієнту шуканої функції мікрорельєфу:

$$S = - \frac{1}{4\pi} \int_V (\bar{\nabla} g)^2 d\bar{V}, \quad (20)$$

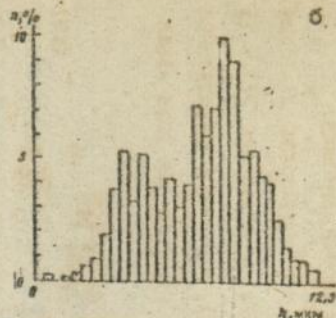
6. Аналіз ЦММР. Побудована цифрова модель мікрорельєфу слугує базові дані для визначення мікротопографічних параметрів, які характеризують геометричні властивості поверхні. Такими параметрами можуть бути висота, крутизна, кривизна, АКФ, спектральна щільність та ін. Методи визначення цих характеристик досить детально розглянуті в дисертації. На мал. 2, а, б, в, г приведено ізометричний блок-діаграму, що одержана за допомогою програмного продукту "Памір-1" після низькочастотної фільтрації двовірним фільтром Тьхті, гістограму висот, просторову АКФ та гістограму значень яркості ЦММР. Крім



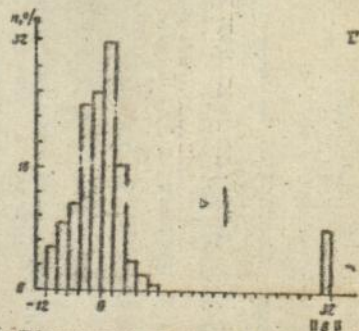
Мал.3,а. Ізометрична блок-діаграма цифрової моделі мікрорельєфу ЦМР.



Мал.3,б. Блок-діаграма автокореляційної функції ЦМР; x, y - координати, r - коефіцієнт кореляції ($-1 \leq r \leq 1$).



Мал.3,в. Гістограма значень висотних відміток ЦМР; n - кількість вимірювань; h - висота мікрорельєфу.



Мал.3,г. Гістограма значень кривини ЦМР. $|W|$ - кривина.

методики визначення мікротопографічних параметрів, в дисертації розв'язані питання стереометрії ЦММР, побудованої за методом триангуляції, зокрема визначення розподілу площ граней (фасеток) ЦММР за кутами нахилу (мал.4) та характеристика просторової анізотропії ЦММР.

Оскільки одним із методів класифікації поверхонь, який досить часто застосовується для розв'язку різних прикладних задач, є аналіз профільних січень, в дисертації розроблена ефективна процедура аналізу профільних січень ЦММР за допомогою функції Уолла. Суть такого аналізу полягає в застосуванні перетворень Уолла до профілів інтенсивності $f_1(t)$ і $f_2(t)$:

$$\begin{aligned} f_1(t) &= a_0(t)WAL(n,t) + \sum_{k=1}^{n-1} a_k(t)WAL(n,t), \\ f_2(t) &= b_0(t)WAL(n,t) + \sum_{k=1}^{n-1} b_k(t)WAL(n,t), \end{aligned} \quad (21)$$

де a_0, a_k, b_0, b_k - коефіцієнти ряду Уолла.

Функції $f_1(t)$ та $f_2(t)$ перетворюються в пару рядків, позначених векторами $\vec{A}(t)$ і $\vec{B}(t)$ з коефіцієнтами ряду Уолла як елементами вектор-рядків:

$$\begin{aligned} \vec{A}(t) &= [a_0(t), a_1(t), a_2(t), a_3(t), a_4(t), a_5(t), a_6(t), a_7(t), a_8(t)] \\ \vec{B}(t) &= [b_0(t), b_1(t), b_2(t), b_3(t), b_4(t), b_5(t), b_6(t), b_7(t), b_8(t)] \end{aligned} \quad (22)$$

Задача опівствавлення профілів зводиться до аналізу векторів $\vec{A}(t)$ і $\vec{B}(t)$.

7. Для моделювання та аналізу особливо складних поверхонь пропонується застосовувати методи фрактальної геометрії. Ці методи відносно нові і ще недостатньо вивчені, але їх перспективність у визначенні мікрорельєфу досить велика. В дисертаційній роботі для аналізу конкретних фрактальних поверхонь пропонується два алгоритми (програмне забезпечення розроблене м.н.с. Волошином В.У.). Перший алгоритм, що непл-

ивається комірчатим, полягає в наступному: проводиться по трьох ковах "зповнення" або покриття поверхні мікрорельєфу миски-нов кубів $N(n)$, довжина ребер яких дорівнює 4ϵ , 2ϵ , ϵ , $\epsilon/2$, а далі на основі графічної залежності між довжиною ребра та кількістю кубів вираховується фрактальна розмірність. Другий алгоритм, що має назву "золотий", передбачає попереднє викреслення горизонталей та розрахунок їх фрактальної розмірності. Розрахунки, які виконані двома методами, дають близькі, але нетотожні результати. Це видно в даних, які наведені в табл.2.

Таблиця 2.

№	№ мікрособ'єкту	D_f першого алгоритму	D_f другого алгоритму
1	248609	2.097	2.156
2	291712	2.068	2.066
3	68212	2.120	2.062
4	85823	2.141	2.326

8. Програмне забезпечення аналітичної РЕМ-стереометрії.
 Реалізація аналітичної стереообробки РЕМ-зображень здійснена таким чином: розроблено пакет прикладних програм, об'єднаних в програмний продукт (ПП) "Памір-1". Програму склав та від-лягодив м.н.с. Крутоголовий В.В. ПП "Памір-1" розроблено для комп'ютерів IBM PC і мікроЕОМ, сумісних з IBM PC. Пакет програм дозволяє обробити результати стереовимірювань, визначити основні характеристики ЦММР (АКФ, спектральну щільність, градієнти крутизни, значення кривини, екстремуми, коефіцієнти Фур'є-перетворення, параметри структурної функції, метри...і параметри), виділяти гармоніки, проводити фільтрацію, згущувати регулярну сітку ЦММР, профілювати в будь-якому напрямку. За допомогою графічної частини пакету можна

будути графіки, звичайні та об'ємні гістограми, проводити тривимірну реконструкцію мікрорельєфу досліджуваних поверхонь, відображати ЦММР ізолініями та картографіями. Програмне забезпечення стереометрії ЦММР, побудоване за методом т'ягулятора, складають програми HISTO та ANISO (в розробці цих програм брала участь к.ф.-м.наук Хенін О.Г.).

Четверта глава присвячена питанням цифрової обробки РЕМ-зображень. Цифрова обробка РЕМ-зображення може бути стереологічною або стереометричною. Стереологічна обробка припускає отримання кількісних характеристик просторової структури на основі одиночних РЕМ-зображень, що представляють собою проєкції перетинів просторової структури. Стереометрична реконструкція базується на використанні фотограмметричних методів, головним чином, - стереометодів.

Цифрове РЕМ-зображення можна отримати безпосередньо у процесі знімання на РЕМ або у процесі обробки знімків, записаних на фотоплівку. У першому випадку процес формування зображення можна подати як перетворення "вихідного" поля яскравостей $I(x, y)$ між'єкту деяким оператором

$$P(p_1, p_2) = Q \{ I(x, y), m \}, \quad (23)$$

де $P(p_1, p_2)$ - результуюче цифрове зображення; m - збільшення зображення. В іншому випадку процес отримання цифрового зображення проходить за декілька етапів. Припускаючи лінійність систем, цей процес можна представити як послідовність операторних перетворень:

$$I(x, y) \xrightarrow{Q_1} I'(i, j) \xrightarrow{Q_2} P(x, y) \xrightarrow{Q_3} P(p_1, p_2), j=1, \dots, k, \quad (24)$$

де Q_1, Q_2, Q_3 - оператори; $I(x, y)$ - вихідне поле яскравості об'єктного простору; $I'(i, j)$ - первинне "дискретне зображення"; $P(x, y)$ - візуалізоване зображення в аналоговому вигляді; $P(p_1, p_2)$ - цифрове зображення, отримане дискретизацією та

квантуванням за допомогою сканера.

Для проведення стереологічного аналізу в нашому участку у лабораторії електронної мікроскопії МДУ під керівництвом доктора г.-м.наук Соколова В.М. створений комплекс ПЕМ "Хітачі В-300" - ЕОМ "ІВМ РС/АТ", що дозволяє виконувати в режимі реального часу цифрову стереологічну обробку ПЕМ-зображення за допомогою програмного забезпечення на основі інтегрованого пакету програм - УТІМ'Н.

Нами були виконані теоретичні розрахунки, які показали, що точність стереологічних вимірювань досить суттєво залежить від кількості ліній розкладу при растровій розгортці. В деяко меншій мірі точність залежить від форми та розмірів вимірюваних ділянок, а також від їх орієнтації відносно ліній растрової розгортки.

У дисертації розглянуті іа загальних позицій питання застосування у ПЕМ-фотограмметрії алгоритмів ототожнювання ідентичних точок методами найменших квадратів та динамічного програмування. Точність визначення координат за МК порівняно невисока (для $n=3$ $\sigma_x=0.53$ і $\sigma_y=1.21$). Як показали експериментальні дослідження, використовуючи МК, можна отримати задовільні результати, коли досліджується відносно гладка поверхня, що відповідає умовам неперервності, та поверхні без гострих ребер (граней). Крім того не кожен випадок можна використати для кореляції, бо в результаті невдалих кореляційних обчислень можливе отримання нереалістичних піків, а цифрова обробка ПЕМ-зображень поверхонь кристалів за допомогою МК взагалі проблематична. Це підтверджує необхідність мати в пакеті цифрової стереообробки ПЕМ-зображень декілька альтернативних методів.

Формально, задача ототожнювання методом динамічного про-

грамування вводиться до дошки оптимального в розумінні мінімуму "вартості" шляху від вузла $O(0,0)$ до $K(n,m)$. Оптимальний шлях визначається мінімізацією функціоналу $Cost(I,K) = \min d(I,K)$. Виконані в роботі дослідження показали, що спеціфікація країв (ребер), їх орієнтація відносно екіполярних ліній є вирішальними для використання цього методу, а точність ототожнення досить сильно залежить від текстурних особливостей зображення та кількості РЕМ-зображень, що обробляються.

Труднощі, що виникають у наведених вище методах, можна уникнути за допомогою розробленого за нашої участі оригінального методу комп'ютерного аналізу РЕМ-стереозображень, який реалізований програмно-апаратним комплексом, що складається із РЕМ "нітасні 3-800", з'єднаного через інтерфейсний блок в персональний комп'ютером типу ІВМ РС/АТ. Оцифровка напівтонових РЕМ-зображень здійснюється на 256 рівнях сірого в потрібному масиві дискретизації від 128×128 до 1024×1024 пікселів.

Тривимірна реконструкція мікрорельєфу поверхні производится за допомогою спеціально розробленого під керівництвом д. г.-м. наук Соколова В.М. пакету прикладних програм "СТЕРЕОКОН". Метод полягає в наступному. На першому етапі оператор отримує в РЕМ стереозображення досліджуваної поверхні та через інтерфейсний блок за допомогою спеціальної програми пакету СТЕРЕОКОН здійснює їх оцифровку з потрібним розбиттям. Отримані стереозображення забезпечуються додатковим інформацією (паспортом), необхідною при проведенні аналізу: назва вразки, збільшення РЕМ, кути стереознімання, дата отримання стереоспарі і т.і. Два стереозображення разом з паспортом є основним вихідним матеріалом для пакету СТЕРЕОКОН.

Стереозображення також можуть вводитись в ПЕОМ через програмний блок інтерфейсу із зовнішніми пристроями та програмами у вигляді файлів, попередньо записаних на магнітних дисках як за допомогою пакету СТЕРЕОКОН, так і інших програм (драйверів різних пристроїв вводу).

На другому етапі роботи проводиться попередній аналіз якості стриманих стереозображень. При цьому контролюються такі їх параметри як роз'єділ яскравості, контрастності, оцінюється анізотропія зображень. Якщо якість вихідних стереозображень незадовільна (наприклад, в багатьох ділянках, на яких не опостерігаються зміни яскравостей, і, звичайно, немає можливості розрізнити суцільні, локально-ідентичні елементи зображень), то доцільно або встановити інші режими ввічання, або змінити ділянку досліджуваного з'єзку. Сильну анізотропію зображення можна компенсувати за допомогою програми компресії зображення вздовж осі анізотропії.

Якщо попередній аналіз не виявляє дефектів стриманих стереозображень, то можна переходити до третього етапу - проведення тривимірної реконструкції мікрорельєфу.

Алгоритм об'ємної реконструкції побудований за трипроковою схемою. На першому кроці проводиться попередня обробка стереозображень, яка складається в фільтрації та вибору початкових точок. Операції фільтрації здійснюються вгортоків вхідного зображення F в оператором або маскою H :

$$G(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 F(x-2+i, y-2+j) * H(i, j), \quad (25)$$

Якщо $H(i, j)$ має різний вигляд в залежності від відношення сигнал/шум, але частіше застосовується оператор Собеля:

$$H_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad ; \quad H_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} .$$

Особливістю системи (ТЕРЕОКОН) є те, що оператор в інтер-активному режимі здійснює прив'язку алгоритму розрахунку, вибираючи на лівому та правому зображеннях точки, які в зображеннях одного і того ж елементу досліджуваної поверхні. Для того, щоб полегшити такий пошук ЕОМ особливим чином обирає декілька можливих претендентів, звужуючи в результаті коло пошуку. Вибір претендентів здійснюється за допомогою кутових масок, детально описаних у дисертації. В задачах обробки РЕМ-зображень використання кутових масок має ряд суттєвих переваг у порівнянні з іншими методами, оскільки дозволяє обирати початкові точки незалежно від умов освітленості кожного із стереозображень та рівня їх контрастності.

Коротко суть методу кутових масок полягає в послідовному порівнянні околів розмірності 5x5 всіх пікселів лівого та правого зображень з еталоном, який представляє собою кутову маску. Центри околів, максимально кореляційних з еталоном, розглядаються як можливі претенденти. При цьому на екрані монітору оператор бачить два стереозображення, на які нанесені червоні відмітки точок-претендентів. У залежності від особливостей РЕМ-зображень оператор може варіювати типом еталону, вибираючи його серед 16-ти можливих кутових масок, добиваючись, таким чином, найбільшої подібності претендентів на лівому і правому зображеннях.

У принципі ЕОМ сама може вибрати ідентичні початкові точки, що і було реалізовано деякими зарубіжними дослідниками. Однак, вибір початкових точок оператором за пропонуваними претендентами дозволяє не тільки прискорити процес ототожнення, але й підвищити надійність роботи всього алгоритму.

Після вибору оператором початкових точок програма оцінює ідентичність двох пар претендентів за рівнем кореляції їх

околу і, якщо він досить високий, то відбувається перехід до наступного, найбільш складного і відповідального кроку в процесі реконструкції - пошуку всіх ідентичних точок на кожному з стереозображень.

При цьому передбачено два можливих підходи до розв'язку цього завдання: контурний та кореляційний.

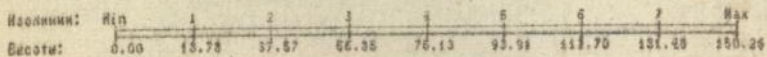
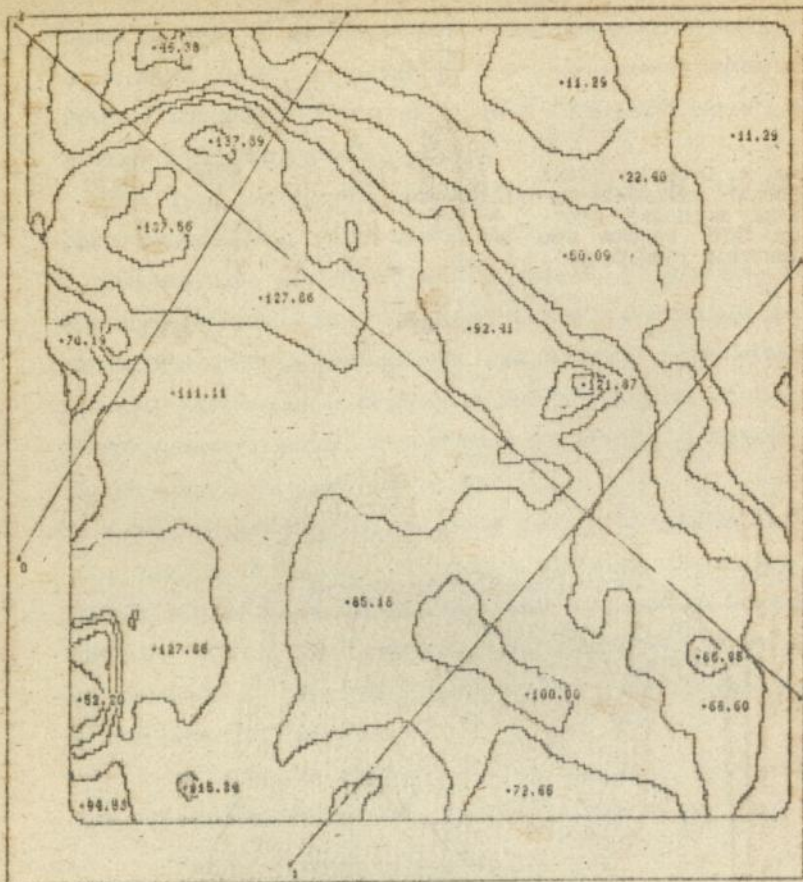
Основна ідея контурного методу полягає у виявленні на стереозображеннях ідентичних контурів, які утворюються характерними змінами яскравостей. Використання цього методу найбільш афективне для обробки зображень поверхонь зі слабо розчленованим рельєфом, коли кількість контурів, що виявляється, мала, а їх форма досить проста.

Однак, в практиці РЕМ-досліджень найчастіше виникає проблема виявлення поверхонь з інтенсивно розчленованим мікрорельєфом, що робить практично неможливим використання контурних алгоритмів. Тому в дисертації реалізований другий метод, що базується на виявленні ідентичних точок за максимальним рівнем кореляції їх околу.

В цьому алгоритмі використано метод кореляції, а коефіцієнт кореляції околів точок а і б визначається за формулою:

$$K_{a,b} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (g_a(i,j) - \mu_a)(g_b(i,j) - \mu_b)}{\left[\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (g_a(i,j) - \mu_a)^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (g_b(i,j) - \mu_b)^2 \right) \right]^{1/2}}, \quad (26)$$

де m, n - розміри околів точок а і б по горизонталі та вертикалі відповідно, $g_a(i,j), g_b(i,j)$ - рівні яскравостей елементів, що знаходяться в i -тих стовпцях та j -тих рядках околів а і б відповідно, μ_a, μ_b - середні значення яскравостей в цих околах.



Мал. 5, б. Карта ізоліній, яка одержана за допомогою втягуючої, з лініями профільних вічень.

Для проведення аналізу стереозображень оператор задає параметри роботи кореляційного алгоритму. До них відносяться ступінь стійкості, що визначає розмір корельованого околу (може змінюватися від мінімальної - 3×3 піксела до максимальної - 13×13 пікселів), та розмір зони пошуку (мала : велика), величина якої визначає кількість претендентів при пошуку ідентичних точок. Установка режиму роботи алгоритму реконструкції в мінімальним ступенем стійкості підвищує його чутливість до дрібних деталей зображень, що обробляються, тобто покращує роздільну здатність. Режим максимального ступеня стійкості дозволяє досягати більш високої точності одержаних результатів, а для аналізу стереозображень поверхонь з дуже розчленованим мікрорельєфом рекомендується встановлювати більшу зону пошуку.

Процес роботи алгоритму відображається на дисплеї ЕОМ у вигляді карти паралаксів (зміщення між знайденими ідентичними точками) і карти інформативності, що відображає ступінь достовірності одержаної карти паралаксів.

Третім, остєнім кроком роботи програми тривимірної реконструкції мікрорельєфу є обчислення висот за одержаними величинами паралаксів та побудова карти висот. Результати аналізу представлені у вигляді кольорової карти висот, карти ізоліній, профілів мікрорельєфу вздовж будь-якого заданого напрямку та тривимірної блок-діаграми (мал.5,а,б). Ця інформація може бути відображена на будь-якому пристрої виводу.

Час проведення аналізу залежить від типу ЕОМ, масиву розбиття напівтонових зображень та вибраних параметрів розрахункового алгоритму. Залежність часу роботи від цих параметрів подана в табл.3. У відповідності з метою розв'язува-

Месиз розбиття	Розмір зони пошуку	Ступінь стійкості алгоритму	Час реконструкції на IBM PC/AT 386DX-40 год:хв:сек	Час реконструкції на IBM PC/AT 486DX2-40 год:хв:сек
256*256	Мала	Мін.	00:01:03	00:00:19
256*256	Велика	Мін.	00:01:19	00:00:22
256*256	Мала	Макс.	00:01:50	00:00:33
256*256	Велика	Макс.	00:02:35	00:00:46
512*512	Мала	Мін.	00:03:04	00:00:55
512*512	Велика	Мін.	00:03:25	00:01:01
512*512	Мала	Макс.	00:06:28	00:01:56
512*512	Велика	Макс.	00:08:04	00:02:25
1024*1024	Мала	Мін.	00:08:16	00:02:29
1024*1024	Велика	Мін.	00:10:20	00:03:06
1024*1024	Мала	Макс.	00:14:30	00:04:21
1024*1024	Велика	Макс.	00:20:40	00:06:11

ного завдання оператор може вибрати оптимальне співвідношення часу виконання роботи та отриманої якості тривимірної реконструкції.

З метою збільшення кількості відміток ЦМР в дисертації запропоновано метод згущення відміток поверхні, виміряної в скінченній множині точок. Метод базується на ідеї апроксимації ЦМР сумов циліндричних компонент

$$Q(x) = \sum_{i=0}^{c-1} Q_i(x), \quad (27)$$

де $Q_i(x)$ - циліндрична функція виду:

$Q_i(x) = \sigma_i(x \cos \alpha_i + x_j \sin \alpha_i)$, де x_i, x_j - координати x ; $\sigma_i(t)$ - кусково-лінійна функція на ділянках від $T(j, k)$ до $T(j, k+1)$ змінного нахилу $U_{i, j, k}$. Задача інтерполяції зводиться до вибору змінних $U_{i, j, k}$, які задовольняють умову мінімізації квадратичного функціоналу "дії"

$$W = \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{n-1} U_{j,k} [T(j,k+1) - T(j,k)] \quad (28)$$

У п'ятій главі даються приклади практичної реалізації фотограмметричного аналізу РЕМ-стереопар в фрактографії, ґрунтознавстві, прикладній геодезії, медицині та біології.

1. РЕМ-стереофрактографія. В фрактографії та трибології приділяється багато уваги вивченню факторів, що впливають на чистоту оброблюваної поверхні. Чистота обробленої поверхні залежить від багатьох факторів, а її регулювання – складний процес. Важливим фактором, що впливає на високу чистоту та точність обробки поверхні, є відтворення на цій поверхні профілю ріжучого краю інструменту. В дисертації запропоновано оригінальний розв'язок залежності чистоти обробки поверхні відтворення (відображення) на ній профілю ріжучого краю інструменту та одержання коректної оцінки цієї залежності. Розв'язок базується на аналізі спектральних даних ЦММР:

$$B(f) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\tau) r'(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (29)$$

де f – частота; $R(\tau)$ – автокореляційна функція; D – кореляційне вікно; τ_m – довжина автокореляційної функції,

$$D = \begin{cases} \frac{1 + \cos(\pi\tau/\tau_m)}{2}, & |\tau| \leq \tau_m \\ 0, & |\tau| > \tau_m \end{cases}$$

1.1. В дисертаційній роботі теоретично розв'язане і більш загальна задача: визначення на основі МНК відображення ЦММР поверхні u_1^3 , наприклад, різда що найбільш близько (в розумінні візьмої функції) апроксимує ЦММР поверхні u_2^3 (наприклад, виробу). Ця задача розв'язана на основі конформного відображення і зведена до мінімізації біквадратичної форми, яка, в свою чергу, зводиться до проблеми власних значень симетричної матриці перетворень. Крім того, одержано математично обґрунтований критерій допустимої шорсткості за резу-

льтатом побудови ЦММР обробленої поверхні.

1.2. На виробничому матеріалі РЕМ-стереофрактографічним шляхом вивчено знос дробометальних лопаток, а також здійснено детальний кількісний електронно-стереофрактографічний аналіз поверхонь вламів металів, розроблено алгоритм оцінки форми та орієнтації структурних елементів (наприклад, карбідних включень у чавуні) за бінарними РЕМ-зображеннями.

Механізм руйнування багатьох матеріалів включає в себе зародження та розповсюдження тріщин, як початкових дефектів (пори, включення і т.п.), до критичного розміру, коли відбувається повне руйнування. При цьому багато дослідників визнають існування масштабного ефекту, проте обмежуються тільки констатацією, оскільки його важко кількісно оцінити, бо часто побічних факторів спотворюють результати, імітуючи масштабний ефект. З цих причин строгої математичної моделі, здатної описати геометрію руйнування, поки що не існує. В дисертації зроблена спроба дати оцінку масштабного ефекту на феноменологічному рівні шляхом розрахунку на основі ЦММР фрактальної розмірності мікрорельєфу поверхні руйнування.

2. В рамках угоди про творчу співдружність з УНДІГІА ім.Соколовського (м.Харків) нами впродовж декількох років проводились дослідження ерозії ґрунтів для умов Волинського Полісся. При цьому була розроблена нетрадиційна концепція вивчення ерозії ґрунтів на трьох рівнях: мікро, мезо та макро. В дисертації дається детальний виклад мікрорівня, що передбачає стереологічне вивчення порового простору ґрунтів та РЕМ-стереометричну оцінку їх мікроструктурних особливостей, зокрема міру та ентропії невпорядкованості (неупорядкованості) мікрорельєфу поверхні зразків. Останнє дозволяє охарактеризувати стан ґрунту та взаємовідношення його з впливом зов-

нішніх факторів, або, іншими словами, оцінити протиерозійну стійкість ґрунтів.

3. Прогнозування осідань споруд з врахуванням даних РЕМ-стереометричного та стереологічного аналізу ґрунту. В прикладній геодезії, як відомо, досить складними питаннями вважають ся питання надійності прогнозування інженерних споруд. Запропоноване в дисертації рішення передбачає проведення високоточних геодезичних вимірювань та РЕМ-стереометричних досліджень фізико-механічних властивостей ґрунту. Результатом подібної інтеграції є фізико-геометрична модель, в основу якої покладено відоме рівняння з механіки ґрунтів:

$$St = \mu \rho \left[1 + \int_0^t k(t-t_0) dt - \frac{B}{\pi^2} \sum \frac{1}{m^2} \Phi(t) \right], \quad (30)$$

де $\Phi(t)$ – функція консолідації двофазового ґрунту. Аналітичний вид функції $\Phi(t)$ визначається так званим ядром г'звучості або функцією впливу $k(t-t_0)$. На практиці часто застосовується функція впливу виду $k(t) = \delta \cdot e^{-\delta_1 t}$, де δ і δ_1 – параметри г'звучості, які нами пропонується визначати на основі кореляційних залежностей стереологічно-стереометричних вимірювань та фізико-механічних властивостей ґрунту. Фізико-геометричний метод передбачає спільне використання результатів геодезичних і електронно-мікроскопічних досліджень для одержання прогнозних моделей.

Прогнозне співвідношення, що враховує початкові умови, має вигляд:

$$\tilde{S}_{t_0+t_1} = \left[\tilde{S}_{t_0+t_1} + \mu \Phi(R_0, \gamma, \dots) \right], \quad (31)$$

де $\tilde{S}_{t_0+t_1}$ – запрогнозоване за геодезичними даними значення осідання; $\Phi(R_0, \gamma, \dots)$ – деякий коректуючий оператор, що враховує фактичні фізико-механічні дані на виході, які входять

до моменту складання прогнозу; (K_0, γ) - модуль загальної деформації та пористість ґрунту, що визначаються за результатами стереологічно-стереометричних досліджень; μ - коректуючий коефіцієнт. Для оператора $\Phi(K_0, \gamma, \dots)$ прийнято аналітичний вираз:

$$\Phi(K_0, \gamma, \dots) = (1 - e^{-\alpha \sigma t_i}) \sum_{i=1}^n h_i \frac{V_i}{K_{0i}} P_{i,z} \quad (32)$$

Тут: $\alpha \sigma$ - коефіцієнт відносного стиснення ґрунту; t_i - час прогнозу; $P_{i,z}$ - навантаження; h_i - товщина i -го шару.

Враховуючи те, що характер процесу осідання в багатьох випадках близький до стаціонарного, обмежимо порівняно просток геодезичною моделлю Гуляєва Ю.П. S_{i+1} в просторі стану

$$\tilde{S}_i = \Phi X_i + B U_i + \Gamma W_i \quad (33)$$

де W - випадковий процес (шум).

Ідентифікація параметрів Φ та B здійснюється на еріді основні $k=1, 2, \dots, N$ мінімізацією функціоналу

$$F(\Phi, B) = \sum_{k=1}^N (X_k - \tilde{X}_{k/k-1})^2 \quad (34)$$

Практична реалізація такого комплексного підходу нами впроваджується при проведенні досліджень на КАЕО. Крім цього, в дисертації приведені важливі практичні результати електронно-мікроскопічних досліджень ерекції ґрунту тіла греблі КАЕО, які, по-перше, переконливо ілюструють перспективність фізико-геометричного підходу при геодезичному дослідженні відповідних інженерних споруд, по-друге, дозволили виявити аварійно небезпечні і негативні процеси, що мають місце на об'єкті дослідження..

4. РЕМ-стереометрія біолітів та кісткової тканини.

1. У відомих працях, присвячених дослідженню біолітів традиційно основна увага надається різним аспектам їх мінералогічного складу. Разом з тим добре відомо, що детальне

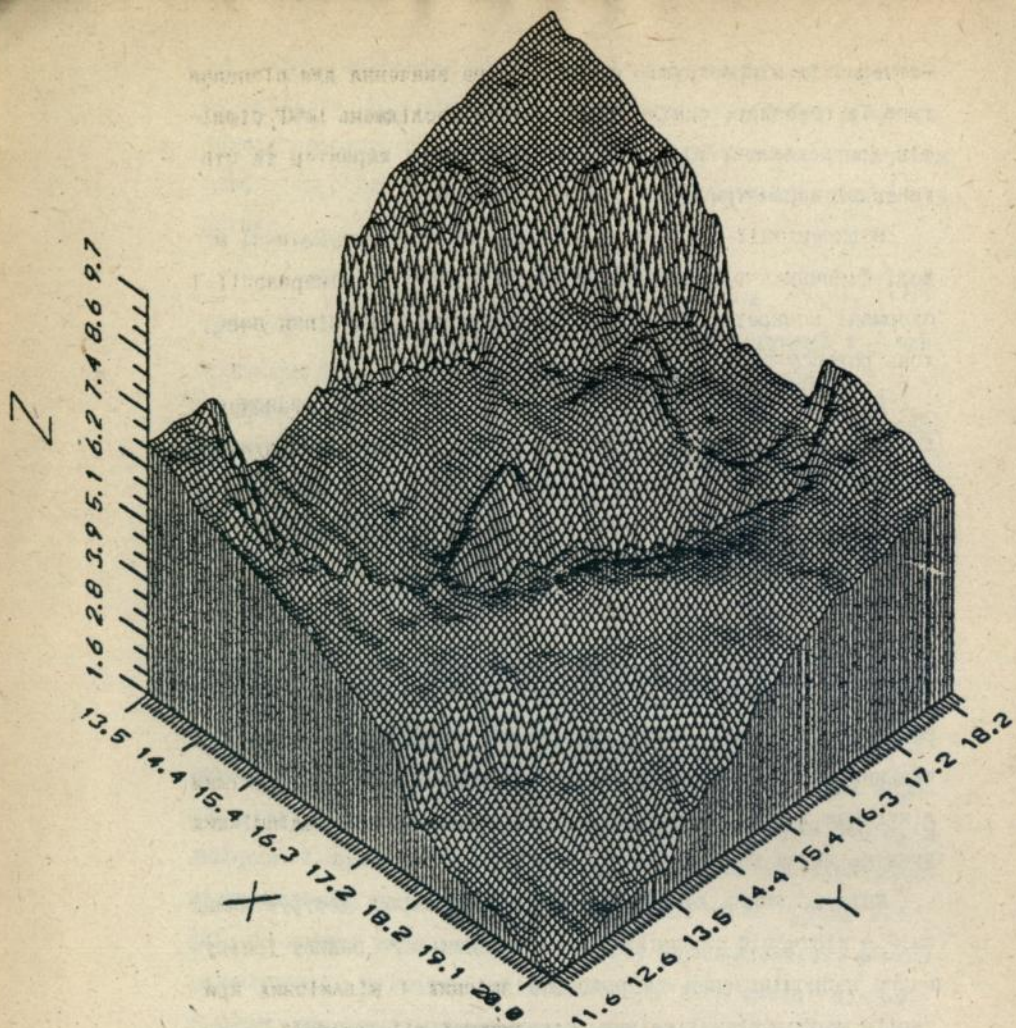
вивчення їх мікроструктури має важливе значення для пізнання умов їх генезису, оскільки результати досліджень ІДМР біолітів дають важливу кількісну інформацію про характер та статистичні параметри механізму їх утворення.

В дисертації розглянуті найбільш можливі математичні моделі фізичних механізмів формування ІДМР в біомінералогії і одержані конкретні емпіричні характеристики і оцінки показь рельєфу біолітів.

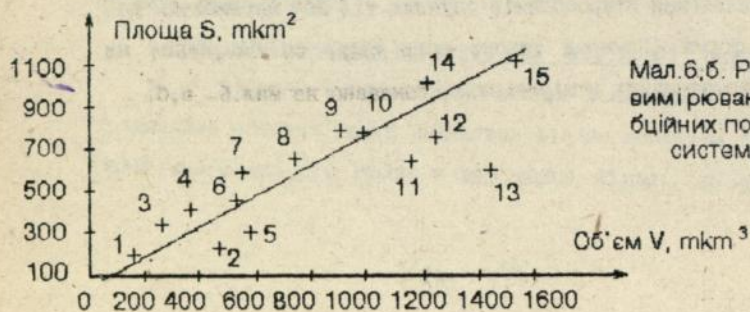
2. РЕМ-стереометрична морфометрія та об'ємні визначення деструктивних змін кісткової тканини. Вплив іонізуючого випромінювання на кісткову тканину та процеси її регенерації - предмет підвищеної уваги дослідників на протязі багатьох років. Кісткова тканина найбільш стійка до дії зовнішнього іонізуючого випромінювання, але в ній можуть накопичуватись радіоактивні елементи з великим періодом напіврозпаду, що може бути догочотривалим внутрішнім джерелом іонізуючого випромінювання. Тому оцінка структури компонентів кісткової тканини надзвичайно важлива для розробки оптимальної тактики лікування хворих профілактики ускладнень після радіаційних уражень людей та прогнозу їх стану.

Мета об'ємних визначень - визначити вплив деструктивних змін в кістковій тканині, що зазнала сильного впливу іонізуючого випромінювання та розробка якісних і кількісних критеріїв морфологічної оцінки пошкоджуючої дії радіації.

Відповідно до цього в дисертації запропоновано два алгоритми визначення мікрооб'ємів опуклих тіл або заглиблень довільної форми. Приклад такого розв'язку, що базується на РЕМ-стереометричних вимірюваннях, показано на мал.6, а,б.



Мал. 6, а. Тривимірна реконструкція ураженої кісткової тканини. Розміри у мкм.



Мал. 6, б. Результати вимірювання ресорційних порожнин у системі "V-S".

З метою вдосконалення існуючих і розробки нових методів застосування фотограмметричних вимірювань в мікроскопії в дисертації виконані теоретичні дослідження, знайдені практичні рішення, зроблені висновки і отримані рекомендації в таких питаннях.

1. Розроблені основні теоретичні положення фотограмметрії РЕМ-зображень ;

- запропоновано новий вид формул для визначення просторових фотограмметричних координат, розглянуті питання взаємного орієнтування РЕМ-стереозображень при аналітичній і цифровій обробці;

- з врахуванням дифракційних и контрастних властивостей чор. Злена теорія електронної стереомікроскопії кристалів;

- запропоновано фотограмметричний метод тривимірної реконструкції мікрооб'єктів в просвічуючій електронній мікроскопії в діапазоні збільшень, коли принципи диспертності не можуть бути застосовані;

- розроблені теорія та алгоритми визначення просторових координат для особливих випадків електронно-мікроскопічних стереовимірювань;

- розроблена методологія фотограмметричного системного калібрування РЕМ;

- виконано аналіз електронно-мікроскопічного стереоспису, досліджені спотворення передачі просторової моделі в РЕМ стереоскопічного типу;

II. Теоретично і експериментально досліджені геометричні властивості РЕМ-зображень;

- розроблені методи та виконаний великий обсяг експериментальних досліджень метричних властивостей РЕМ-знімків і

Їх корекції

- встановлена оптимальна поліноміальна апроксимація;
 - досліджене вливе в мікроскопію питання: як змінюється в часі (на протязі декількох років) різномасштабність вздовж координатних осей;
 - вперше зроблена кількісна оцінка впливу дрейфу електронного зонду при формуванні зображення в РЕМ;
 - теоретично досліджена чутливість точності апроксимування помилки РЕМ-знімків від кількості опорних точок;
 - розглянуто питання застосування когерентних тестових систем з метою їх впровадження в калібрувальні процедури аналітичної растрової електронної мікроскопії;
 - розроблені і випробувані різноманітні за технологією виготовлення калібрувальні тест-об'єкти;
 - запропоновано ефективний статистичний метод інтегральної оцінки параметрів латексних сфер, який рекомендується використовувати для калібрування збільшення РЕМ-стереозображень.
- III. Розроблені методи з алгоритми побудови на ЕОМ цифрових моделей мікрорельєфу (ЦММР) об'єктів, що становлять основу автоматизованих комплексів фотограмметричного забезпечення тривимірної реконструкції електронно-мікроскопічних зображень;
- розглянуті питання побудови ЦММР на основі реалізацій апарату випадкових функцій, онлайн-апроксимації та поліномів Чебишева;
 - запропоновані алгоритми побудови ЦММР на основі перетворень Фур'є-Хартлі та функцій Уолша;
 - розроблені теоретичні основи побудови ЦММР з використанням методу регуляризації вк. д. Тілонова А.М.;
 - запропонована концепція та розроблено алгоритмічне за-

безпечення побудови ЦММР інтеграцією фотограмметричних та фотометричних вимірювань;

- використовувачи і знання стереології, дається розв'язок ряду питань морфометрії ЦММР;

- з врахуванням особливої важливості у фрактографії та трибології аналізу шорстких поверхонь, розроблені строгі принципи їх опису на основі ЦММР і моделі випадкового поля;

- розроблені методи обчислювальних процедур визначення мікротопографічних параметрів і фрактальної розмірності ЦММР.

За допомогою спеціально виготовлених просторових тест-об'єктів здійснена шірична оцінка точності РЕМ-стереовимірювань. Результати виконаних досліджень такі: середні квадратичні помилки окремого виміру порядку 0.20 мкм; середні квадратичні помилки середнього по окремій стереопарі - 0.04 мкм; середні квадратичні помилки середнього з усіх вимірюваних стереопар - 0.015 мкм.

IV. Розроблена теорія і запропоновані фотограмметричні принципи цифрової обробки РЕМ-зображень;

- проведено аналіз відомих методів і алгоритмів цифрової обробки зображення з метою їх впровадження в растрову електронну мікроскопію. Найбільш перспективним визнано кореляційно-екстремальний метод кількісного аналізу РЕМ-зображення в поєднанні з попередньою растровою фільтрацією;

- одержані основні співвідношення цифрової РЕМ-стереофотограмметрії, побудовані процедури виділення вузлових, кінцевих та ізольованих точок, розроблено ефективний алгоритм з простовою структурою обчислень попередньої цифрової обробки РЕМ-зображення;

- запропоновано варіант згущення відміток поверхні, який

дозволяє побудувати на екрані монітору суміщене цифрове та реальне РЕМ-зображення при нульовому нахилі. В інтерактивному режимі це дає можливість визначати грубі і милки в фотографіметричних вимірюваннях.

У. На базі системних досліджень побудовано методологічний фундамент застосування РЕМ-фотограмметрії в різних галузях науки і техніки, зокрема, на основі теоретичних та практичних розробок отримані слідчі результати.

1. Розроблено і здійснено принципово новий підхід до дослідження мікроструктури ґрунтів. Він базується на комплексному вивченні морфометричних, геометричних та стереометричних ознак структури, що вивчається на мікроскопічному субрівні. З участю автора розроблено методику коректного аналізу РЕМ-зображення. Вона включає в себе: а - вибір правильного способу підготовки зразків, який запобігав би спотворенню при цьому їх природної мікроструктури; б - вибір оптимального режиму роботи РЕМ, з одного боку, вірогідно відображаючого реальну мікроструктуру зразка, а з другого - відповідального формальним вимогам аналізу, тобто одержання бінарного зображення з чіткими межами між твердими структурними елементами і порами; в - обґрунтування шляхом тестування доцільності кількісного аналізу РЕМ-зображень для отримання усереднених показників морфометричних і геометричних ознак мікроструктури.

2. Запропоновано та практично реалізовано принципово новий підхід в ерозіознавстві ґрунтів. Він базується на спільному застосуванні стереологічного вивчення порового простору ґрунтів та аналітичної РЕМ-стереометрії. Вивчення значної групи зразків різного віку з гальваносу дозволило встановити певні закономірності будови порового простору найбільш поши-

рених ґрунтів півдня Волинського Полісся.

3. Розроблені принципи інтеграції геодезичних і електронно-мікроскопічних досліджень деформацій та осідань крупних інженерних споруд. Цей підхід реалізовано на практиці при виготовленні високоточних геодезичних робіт при спостереженні за станом земляної греблі особливо великої протяжності водосховища ХАЕС. За допомогою запропонованого методу вдалося отримати ряд дуже важливих результатів, досить надійно ототожнюючих процеси осідання. Застосування кількісного аналізу мікроструктури по РЕМ-зображенням для розрахунку складу та фізико-механічних властивостей дозволило виконати науково обґрунтовану прогностичну оцінку змін властивостей і деформаційної поведінки тіла греблі.

4. Теоретично і експериментально обґрунтовані основні положення РЕМ-стереофрактографії: розроблені питання кількісної оцінки густоти оброблених поверхонь; математично обґрунтовано критерій допустимої шорсткості; в нових позиціях вивчено механізм руйнування дробометальних лопаток; розроблено алгоритм оцінки форми і орієнтації структурних елементів чавунів. На основі положень фрактальної геометрії та теорії міцності запропоновано варіанти кількісної інтерпретації масштабного ефекту в фрактографії.

5. Розроблена методика РЕМ-стереометричної морфометрії та об'ємних визначень деструктивних змін кісткової тканини. Такі визначення дуже важливі при дослідженнях впливу іонізуючого випромінювання на кісткову тканину та процеси її регенерації, що актуально для оцінки соціоекологічного стану України.

Основні публікації по темі дисертації.

Монографія

1. Геодезические и электронно-микроскопические исследования осадок и деформаций крупных инженерных сооружений. -Деп. в ГИГБ Украины, 1993, № 1927-Ук 93, деп., с. 271.

Статті

2. Определение увеличения при стереоскопической съемка в электронной микроскопии //Зав. лаб. -1974.-№ 9.-С. 1118-1120 (соавтор - Чех В.И.),

3. Pilyavskiy V.J., Melnik V.N. Investigation of the gage effect on microstereophotogrammetric survey accuracy //Proc. VIII th Congress of the Internat. Soc. Photogrammetri, Helsinki, -1970. -P.1-10.

4. Метрические свойства растровых электронно-микроскопических снимков //Зав. лаб. -1977.-№ 3 -С. 288-291 (соавтор Лубимов И.Н.),

5. Исследование геометрических искажений снимков, полученных на растровом электронном микроскопе //Геодезия и картография. -1977. -№ 6, -С. 38-44 (соавтор Финковский В.Я.),

6. Фотограмметрическая обработка снимков, полученных на растровом электронном микроскопе //Геодезия и картография. -1978. - № 9, -С. 46-52 (соавтор Финковский В.Я.),

7. Применения РЭМ для изучения поверхности трения //III Всесо. симпозиум по РЭМ и аналитическим методам иссл. твердых тел. -М.: 1981. -С. 44-45 (соавторы Шебастинов М.П., Сбитнев П.П. Магладеридзе Н.О.),

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

9. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков. -Рук. деп. в ВИНТИ. -1984, №528. -С.18 (соавторы Иванчук О.М., Тумская О.В.),

10. Определение микротопографических параметров шероховатых поверхностей //Технология роботизированного производства. -Рига: 1987. -С. 79-87 (соавторы Шебастинов М.П., Волдырьев Е.В.),

11. Анализ погрешностей стереонамерений в растровой электронной микроскопии //Изв. АН СССР. Сер. Физическая. -1987. -№ 3. -С.468-474 (соавторы Соколов В.Н., Шебастинов М.П., Иванчук О.М.),

12. Стереофотограмметрическая оценка микро рельефа поверхности износа металл //Зав. лаб. -1988.-№ 5.-С. 49-54 (соавторы Шебагин М.П., Болдырев Е.И.).

13. Стереофрактографическая обработка снимков, полученных с помощью РЭМ //ЛПО.-1990.-№ 1.-С. 50-53 (соавторы Шебагин М.П., Крестьянов В.И., Крутоголов В.В.).

14. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков //Геодезия и фотограмметрия. -1990. -С. 37-45 (соавторы Максимук Д.И., Иванчук О.М.).

15. Стереофрактографическая обработка РЭМ-снимков //Об. Вопросы оборонной техники. -1990. -№ 3. -С. 37-45 (соавтор Шебагин М.П.).

16. Аналитическая РЭМ-стереометрия //Изв. АН СССР. Сер. Физическая. -1991. -№ 8. С. 1577-1583 (соавторы Соколов В.Н., Крутоголов В.В.).

17. Стереометрический метод вивчення онтогенічних особливостей біогенних мінеральних утворень //Мінералогічний зб. "Звіст. у-ту. -1991. -№ 45. -С. 55-59 (співавтори Максимук Д.І., Мелешко Т.В.).

18. Математическое моделирование микро рельефа шероховатых поверхностей //ЛПО.- 1991.-№ 1.-С. 26-29 (соавторы Шебагин М.П., Крестьянов В.И.).

19. Некоторые вопросы стереофрактографической обработки РЭМ-снимков //Изв. РАН. Сер. Физическая.-1992. -№ 3. -С.122-126 (соавтор Соколов В.Н.).

20. Some problems of stereofractographic processing of SEM-Pictures // Bull. Academy Sciences USSR. Physical Series. -1992. -56(3). -P.215-219 (Sokolov V.N.).

21. Фрактальная и стереометрическая оценки РЭМ-изображений шероховатых поверхностей //Изв. РАН. Сер. Физическая. -1993. -№ 8. -С. 99-105 (соавтор Соколов В.Н.).

22. Некоторые вопросы цифровой обработки РЭМ-изображений //Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. -1993. -№ 4. -С.73-82 (соавтор Михайлюк В.А.).

23. Аналіз геодезичних спостережень за зміщеннями земляної греблі ХАЕС //Геодезія, картографія і аерофотознімання. -1993. -Вип. 55. -С. 67-73 (соавторы Стовбичук Т.М., Максимук Д.І.).

24. Стереологическая стереометрическая оценка микро структуры грунта. -Рук. деп. в ДНТБ України, 1993, № 1390-Ук 93, деп., с.

(співавтори Тарасюк Ф.П., Петровичук І.М.).

25. Исследования шероховатости шлифованной поверхности методом аналитической РЭМ-стереометрии с применением модели случайного поля. -Рук. деп. в ГИТБ Украины, 1993, № 1391-Ук 93, деп., с. (соавторы Шостак А.В., Кищун В.А.).

26. РЭМ-стереометрическая характеристика отображения микрорельефов резца обрабатываемой поверхности. -Рук. деп. в ГИТБ Украины, 1993, № 1231 -Ук 93, деп., с. (соавтор Шостак А.В.).

27. Нечіткі множини та їх застосування в геоінформаційних системах. -Рук. деп. в ДНТБ України, 1993, №1926-Ук93, деп.10с.

28. Теоретические и прикладные основы РЭМ-фотограмметрии //VIII Симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. -Черноголовка: 1993. -С. 8 (Соколов В.Н.).

29. Количественный анализ РЭМ-стереоизображений //VIII Симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. -Черноголовка: 1993. -С.57-58 (соавторы Соколов В.Н., Лебедев А.А.).

30. Методи стереологічної та стереометричної оцінки структури кістки в пре- та постнатальному онтогенезі ссавців //1-й Національний Конгрес анатомів, гістологів та топографоанатомів України. -Івано-Франківськ: 1994. -С. 118-119 (співавтор Лихотоп Р.М.).

31. Метод трехмерной реконструкции микрорельефа поверхности твердых тел по их РЭМ-стереоизображениям //Изв. РАН. Сер. Физическая. -1995. -№2. -С. 28-34 (соавторы Соколов В.Н., Лебедев А.А.).

32. История пространственного моделирования и применение современных методов стереологической оценки этапов морфогенеза в зоологии. I. Стереологическая оценка //Вестник зоологии. -Киев, Наукова думка, 1995, №2 (в друці) (соавтор Лихотоп Р.М.).

33. История пространственного моделирования и применение современных методов стереологической оценки этапов морфогенеза в зоологии. I. Стереометрическая оценка //Вестник зоологии. Киев, Наукова думка, 1995, №3 (в друці) (соавтор Лихотоп Р.М.).

Авторські свідчення

1. Чутун //Авторське свідчення №1047985. -1982 (ср

авторы Шебатинов М.П., Ситнев П.П.).

2. Чугун //Авторское свидетельство № 1033564. -1983. (соавторы Шебатинов М.П., Ситнев П.П., Брон Д.П.).

3. Чугун //Авторское свидетельство № 1096299. -1983. (соавторы Шебатинов М.П., Прохоренко Н.Д., Ситнев П.П.).

4. Чугун //Авторское свидетельство № 4288549. -1988. (соавторы Шебатинов М.П., Ушаков Ю.Ф.).

Мельник В.Н. Теория и практика фотограмметрических методов в электронно-микроскопических исследованиях. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.24.02 - аэрокосмическая съемка, фототопография и фотограмметрия. Госуниверситет "Львовская политехника", Львов, 1995. Создана общая теоретическая основа фотограмметрической обработки электронно-микроскопических изображений. Разработана концепция системной фотограмметрической калибровки электронных микроскопов, исследованы метрические свойства РЭМ-изображений. Изложены алгоритмы построения цифровых моделей микрорельефа. Дана теория и обоснованы принципиально новые методы цифровой фотограмметрической обработки РЭМ-изображений. Приведены результаты практического применения РЭМ-фотограмметрии.

V.N.Melnik. The theory and the practice of the photogrammetry methods in the electron microscope investigations.

The dissertation for Doctor of Science in Technique; specific field: 05.24.02- aerospace survey, aerophototopography and photogrammetry, State University "Lvivska politechnika", Lviv, 1995.

The general theoretical principles of the photogrammetry processing of the scanning electron microscope (SEM) images are established. The system photogrammetry calibration conception of the electron microscopes is developed and the metric parameters of the SEM-images are studied. The algorithms of the micror relief digital models are described. The new theory is considered and modern methods of the digital photogrammetry processing of the SEM-images are validated. There are a lot of practical examples for using SEM photogrammetry.

Ключові слова: фотограмметрія, растрова електронна мікроскопія, цифрові моделі мікрорельєфу, цифрова обробка зображень.

3077-233 100

Підписано до друку 30 березня 1995 р.

Формат 60x24/16. Замовл. 288.
Тираж 100.



AB 32.902