

УДК 528.721.287:537.533.35

Мельник В., Волошин В.

Волинський державний університет імені Лесі Українки (м. Луцьк, Україна)

СТЕРЕОЛОГО-ПЛАНІМЕТРИЧНА ОБРОБКА РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ МЕТОДОМ КРАЙГІНГА

© Мельник В., Волошин В., 2003

В статті приведено метод отримання кількісних характеристик мікроструктури твердих тіл на основі РЕМ-знімків. Визначено процедуру підготовки РЕМ-моделей і алгоритми виконання стереологічного і планіметричного аналізу. Пропонується виконувати цифрову обробку на основі методу Крайгінга.

The method of deriving of quantitative characteristics of microstructure of rigid bodies on the basis of REM-images is surveyed in this paper. The procedure of preparation REM-samples and the algorithms of holding of the stereologic and planimetric analysis are determined. The digital handling of the REM-images is offered to be carried out on the basis of a Kriging method. The new approach to definition of dynamic measure of threshold segmentation of the REM-image is offered.

Розвиток растрової електронної мікроскопії, а також широке впровадження в практику мікроскопічних досліджень комп'ютерної техніки і методів цифрової обробки зображень привели до створення систем автоматизованого аналізу РЕМ-зображень, в результаті якого можна одержувати кількісні показники мікроструктури різних мікрооб'єктів. Але, незважаючи на наявність багатьох методів та наявної апаратури для кількісної оцінки мікроструктури зразків за їх РЕМ-зображеннями, все ще існує низка проблем, які утруднюють застосування цього аналізу або ставлять під сумнів достовірність отриманих результатів. Одна із головних проблем полягає в тому, що дослідження зазвичай проводяться при якомусь одному вибраному збільшенні. А це різко звужує можливості аналізу і не дозволяє вивчати полідисперсні зразки. Інша проблема – це питання необхідності і коректної реалізації порогових операцій при сегментації РЕМ-зображень.

Для вирішення першої проблеми з нашою участю був розроблений [6] програмний комплекс, що складається з РЕМ НІТАСІ S-800 з високою роздільною здатністю, який через інтерфейсний блок з'єднаний з ІВМ РС сумісним персональним комп'ютером. З допомогою цього комплексу можна проводити стереолого-планіметричний аналіз мікроструктури твердого тіла.

Стереолого-планіметричний аналіз мікроструктури проводиться за допомогою пакету прикладних програм СТИМАН. Головна відмінність математичного забезпечення СТИМАН від інших програм по обробці РЕМ-зображень полягає у можливості аналізу не одного, а серії різномасштабних зображень, які охоплюють весь діапазон зміни розмірів структурних елементів (пор, часток), які зустрічаються у досліджуваному зразку. Алгоритм знімання і накопичення інформації при різних збільшеннях був детально описаний раніше [1, 7]. Одним із головних моментів алгоритму є крок зміни збільшень, який в нашому випадку змінюється за правилом геометричної прогресії з показником 2. У випадку виконання умови однорідності мікроструктури дані про кількість, розмір та форму відслідкованих елементів при кожному наступному збільшенні приводяться до початкового збільшення. Таким чином, одержується інтегральна інформація про всі структурні елементи – від найменших до максимальних.

Отримання достовірних результатів при проведенні стереолого-планіметричного аналізу в основному визначається вибором правильної методики підготовки зразків та режимів роботи РЕМ. Найкращі результати досягаються при дослідженні полірованих аншлифів, попередньо просочених люмінісцюючим полімером [4].

Якщо мікроструктура зразка однорідна і ізотропна, то можна досліджувати любе випадкове січення. Якщо ж мікроструктура однорідна, але анізотропна (коли є домінуюча орієнтація структурних елементів), то доцільно вивчати січення, перпендикулярне цій орієнтації, бо в цьому випадку можна оцінити не тільки розмір, форму пор і часток, але і їх взаємне розміщення у просторі [7].

Не менш відповідальною процедурою при проведенні аналізу РЕМ-зображень є вибір відповідних режимів роботи. При перегляді аншлифів, просочених люмінесцентним полімером, потрібно використати режим катодолюмінісценції (рис.1,а). При вивченні непросочених аншлифів і зачищених поверхонь, на яких чітко видно межі між порами і частками, можна використати режим вторинних електронів (рис.1, б).

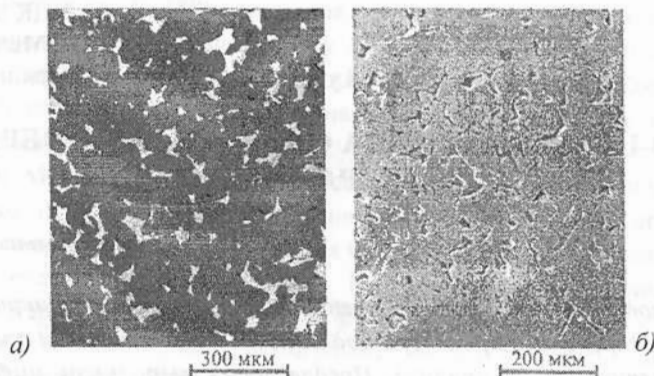


Рис. 1. Приклад РЕМ-зображення зразка твердого тіла (кераміки):
 а – просочений аніліф в режимі катодолумінісценції;
 б – непросочений аніліф в режимі вторинних електронів.

Вихідними даними в обох випадках для пакету СТИМАН є квадратні матриці яскравостей, одержаних в результаті оцифрування серії різномасштабних РЕМ-зображень досліджуваного зразка за 256 градаціями сірого тону. Розміри матриць довільні, але найбільш часто використовують розбиття на 256×256 , 512×512 і 1024×1024 піксели.

Введення зображення в комп'ютер здійснюється через інтерфейсний блок, що дозволяє проводити оцифрування зображень практично з любою роздільною здатністю, яка обмежується тільки оперативною пам'яттю комп'ютера. Введеним в комп'ютер зображенням присвоюється електронний паспорт, що зберігає інформацію про кількість зображень в даній серії, їх збільшення, розмірність матриць розбиття та ін.

Для кількісного аналізу отримані РЕМ-зображення перетворюються в бінарні. З цією метою пакет СТИМАН використовує метод порогової дискретизації, суть якої наступна.

Нехай N – множина натуральних чисел, (x, y) – координати точок цифрового зображення, $G = \{0, 1, \dots, I-1\}$ – множина невід'ємних цілих чисел, що представляють собою рівні яскравостей. Тоді зображення може бути визначене як відображення $f: N \times N \rightarrow G$. Яскравість елемента зображення з координатами (x, y) буде позначатися як $f(x, y)$.

Нехай $C \in G$ – деякий поріг, а $B = \{b_0, b_1\}$ – пара бінарних рівнів яскравостей і $b_0, b_1 \in G$. Результат застосування порогової операції до функції $f(\cdot, \cdot)$ (зображенню) на рівні яскравості t приводить до двозначної функції $f_t: N \times N \rightarrow B$, такий що

$$f_t(x, y) = \begin{cases} b_0, & \text{якщо } f(x, y) < C \\ b_1, & \text{якщо } f(x, y) \geq C \end{cases}$$

Таким чином, пороговий метод – це такий метод, який визначає значення величини C на основі певного (визначеного) критерію.

В останні роки розроблені багаточисельні порогові методи, проте для растрової електронної мікроскопії їх застосування незначне. Відомо [2, 7], що вибір рівня дискретизації – одне із слабких місць всього РЕМ-аналізу. Нами пропонується розв'язувати цю проблему на основі застосування математичного аналізу випадкових функцій і методу визначення найкращого ковзного середнього із значень інтенсивності в пікселях, оскільки наявність шумів та інших перешкод привносять у значення інтенсивності РЕМ-зображення випадкові компоненти. Тому функція інтенсивності рядка РЕМ- зображення $f(x)$ може бути представлена як випадкова функція.

Проте практичний інтерес при цифровій обробці представляють випадкові функції, що мають певні спеціальні властивості, зокрема апріорне припущення стаціонарності зміни приросту випадкової функції $f(x)$.

Узагальнюючою характеристикою множини реалізацій випадкової функції зі стаціонарними приростами є структурна функція, що при цифровій обробці дорівнює половині дисперсії (Var) приростів інтенсивності

зображення $(f(x+h) - f(x))$ у залежності від заданої відстані між пікселами (h), яку називають ще варіограмою:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[f(x+h) - f(x)]. \quad (1)$$

Якщо відомо $N(h)$ пар значень досліджуваної характеристики, що знаходяться на відстані h , то оцінка варіограми або "емпірична" варіограма може бути визначена за формулою:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{k=1}^{N(h)} [f(x+h) - f(x)]^2 \quad (2)$$

Застосування варіограмного аналізу дозволяє проаналізувати зміну інтенсивності в окремому рядку зображення, що містить інформацію про компоненти мікрооб'єкта, фон і шуми та побудувати статистичну модель цієї зміни. За допомогою варіограмних моделей можуть бути оцінені також рівні і співвідношення закономірної складової цієї зміни, що привносяться відмінностями інтенсивності фону й об'єкта, і випадковою, обумовленою наявністю шумів. Це дає можливість оптимізувати вихідне зображення в кожному пікселі за методом відшукування найкращого ковзного середнього.

Використовуючи вихідні значення інтенсивностей у пікселях рядка, обчислюють значення емпіричної варіограми і апроксимують її теоретичною моделлю. Існує декілька найбільш вживаних типів модельних варіограм (лінійна, сферична, логарифмічна, гауссова та ін.). Найбільш повно умовам реальної зміни інтенсивності на вихідному РЕМ-зображенні задовольняють функції, які задаються математичними виразами (2) і (3) і отримали назву "сферичної" та "логарифмічної" моделей. Параметрами цих моделей є: C – поріг варіограми, загальна дисперсія інтенсивності зображення, що включає як випадкову, так і закономірну компоненти; зона впливу (a) – інтервал пікселів, за межами якого кореляційні зв'язки між значеннями інтенсивності відсутні.

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \times \left(1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & \text{при } 0 < h \leq a; \\ C + C_0 & \text{при } h > a; \\ 0 & \text{при } h = a. \end{cases} \quad (3)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0; \\ C \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left[1 - 2 \log \left(\frac{h}{a} \right) \right] & 0 < h \leq a; \\ C & h > 0. \end{cases} \quad (4)$$

На рис.2 показано графік емпіричної варіограми і деякі теоретичні моделі та дається графічна інтерпретація параметрів сферичної моделі, яка застосовувалась для обробки РЕМ-зображень, а саме: здійснювалась заміна в кожному пікселі вихідних значень інтенсивності на оптимальні за критерієм мінімізації дисперсії шумів за методом найкращого ковзаючого середнього. Практичне застосування методу полягає у визначенні вагових коефіцієнтів для обчислення середньозваженої величини інтенсивності в кожному пікселі маски розмірами 3×3 або 5×5 за формулою:

$$f_0 = \sum_{i=1}^n a_i f_i \quad \text{за умови, що } \sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad (5)$$

де f_0 – перетворене значення інтенсивності; a_i – вагові коефіцієнти; f_i – вихідні значення інтенсивності.

Розмір маски залежить від величини зони впливу, оскільки вагові коефіцієнти визначають вплив інтенсивності в сусідніх пікселях (у межах зони впливу) на значення інтенсивності у окремому пікселі зображення.

Для знаходження коефіцієнтів потрібно розв'язати систему лінійних рівнянь [3, 5](6,7)

$$\sum A = \sum 0 \quad (6)$$

де Σ – матриця коваріацій значень інтенсивності між пікселями, в межах зони впливу;

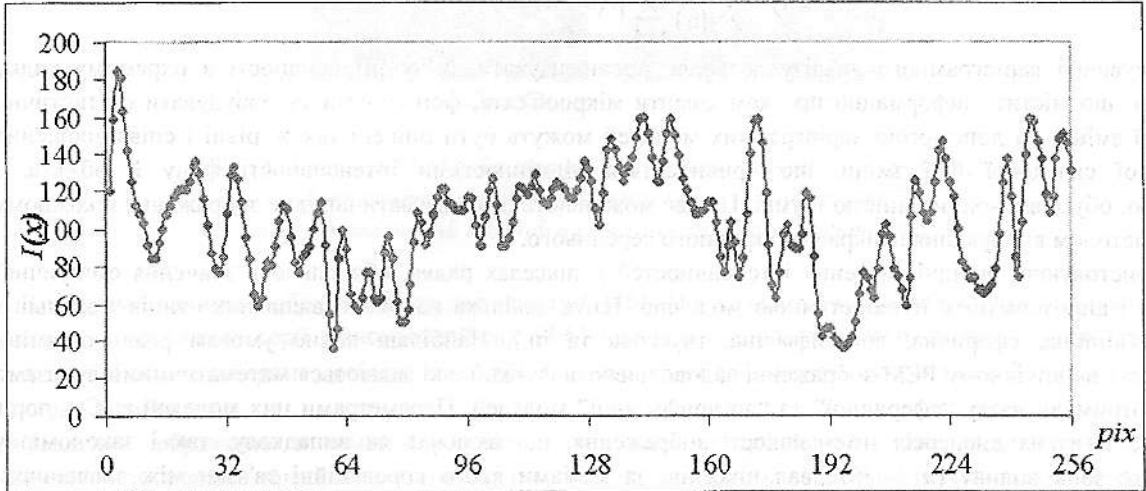
Σ_0 – вектор коваріацій значень інтенсивності між пікселами в межах зони впливу і центральним елементом;

A – вектор шуканих вагових коефіцієнтів.

Елементи матриці Σ і вектора Σ_0 визначаються за формулою:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{i0} = C - \gamma(h), \tag{7}$$

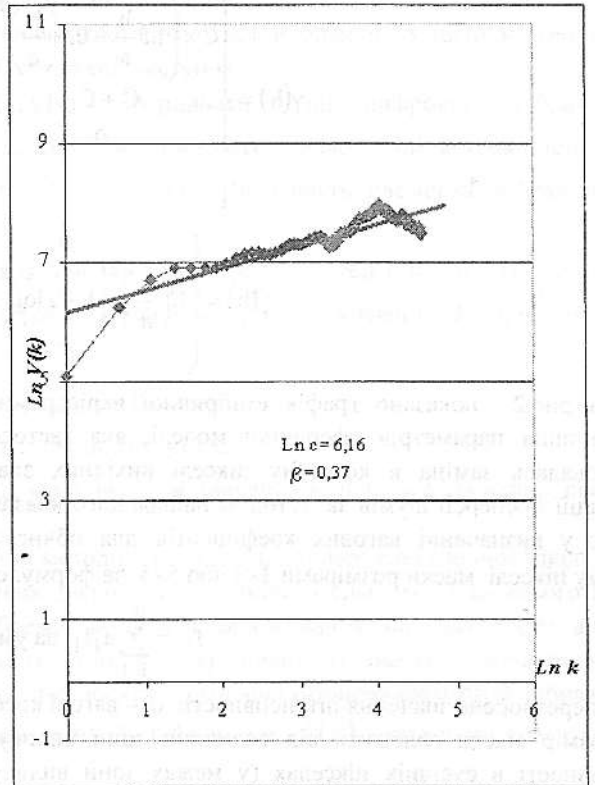
де C – поріг варіограми; $\gamma(h)$ – значення теоретичної варіограми в залежності від відстані h між пікселами.



а)



б)



в)

Рис.2. Профіль інтенсивності РЕМ-зображення (без фільтрації) (а); теоретичні модельні варіограми в системі координат $\gamma(h) - k$ (б); параметри показникової варіограми в системі координат $\ln V(k) - \ln k$ (за емпіричними даними) (в).

В матричному записі система (6) має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1N} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2N} \\ - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ \gamma_{N1} & \gamma_{N2} & \dots & \gamma_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ - \\ - \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ - \\ - \\ \gamma_N \end{bmatrix} \quad (8)$$

Для динамічного визначення порогу доцільно маску переміщати по рядку з кроком у один піксел. Відповідно для кожного положення маски обчислюється дисперсія значень інтенсивності

$$\sigma_f^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}{n-1} \quad (9)$$

За даними (8) обчислюється критерій граничного поділу за формулою

$$T = (f_{\min} + f_{\max})/2 \quad (10)$$

Подібний критерій визначається для кожного рядка окремо і є динамічним для всього зображення. Остаточна сегментизація виконується з використанням установленого критерію, що застосовується і для перетворення РЕМ-зображення в бінарний вигляд.

Після бінаризації РЕМ-зображення автоматизована система СТИМАН проводить пошук та вимірювання всіх структурних елементів, в результаті чого формуються масиви значень кількості структурних елементів (N_{se}), площ (S), периметрів (P) і факторів форми (K_f). Далі всю отриману інформацію обробляють за допомогою блоку статистичної обробки.

В результаті аналізу отримують такі інтегральні мікроагрегатні характеристики, як пористість, та питома поверхня. Можна отримати кількісні дані про розмір і форму структурних елементів, побудувати гістограми розподілу пор або часток за еквівалентними діаметрами, площами, сумарними площами, периметром, фактором форми, оцінити орієнтацію структурних елементів, розрахувати коефіцієнт звивистості порових каналів, провести Фур'є-аналіз та визначити інтегральні характеристики мікроструктури. Вся кількісна інформація про мікроструктуру зразка легко експортується у формати любого зовнішнього програмного забезпечення для подальшої обробки і досліджень.

Деякі результати кількісного стереолого-планіметричного аналізу РЕМ-зображень зразків ґрунту, які досліджувалися на протиерозійну стійкість, даються на рис.3, а, б. Для порівняння порогова дискретизація здійснювалася в інтерактивному режимі згідно алгоритму СТИМАН і за методом Кригінга. Пераваги останнього очевидні.

Крім оптимального вибору порогових значень, метод кригінга можна достатньо ефективно застосувати і в процесі оцифрування РЕМ-зображень. Для цього необхідно проаналізувати логарифмічну залежність варіограми. На рис.2, в показано таку залежність, тобто в системі координат $\ln V(k) - \ln k$, що відповідає показниковій моделі варіограми

$$V(k) = ck^\beta \quad (11)$$

Оскільки при значеннях k більше 10...15 кореляцією можна нехтувати, то лінійну залежність, тобто рівняння прямої лінії, можна визначити, починаючи з найменшої кількості точок (трьох і більше). На основі отриманої прямої визначаються β і $\ln C$ залежності (11). Оптимальний інтервал оцифрування можна записати у вигляді $\Delta d_{opt} = L \cdot \Delta d$. При цьому L визначається із наступного співвідношення [8]:

$$\frac{\sigma_{int.}^2}{C} = \left(L^\beta \right) \left(\frac{2 - 2^{\beta+1}}{2^{\beta+1}} \right), \quad (12)$$

а $\sigma_{int.}^2$ – із співставлення з пороговим значенням. Можна також вважати, що Δd_{opt} є наближеною оцінкою розмірів мікрооб'єктів в рядку.

Для підтвердження цієї тези обчислювалася середня квадратична похибка визначення розмірів мікрооб'єктів відносно одержаного значення Δd_{opt} . Такий аналіз проводиться в цілому по всьому зображенню і визначається середнє квадратичне значення параметрів мікрооб'єкту, тобто

$$m_d = \frac{\sqrt{\sum (d_{opt} - d_i)^2}}{n - 1}, \quad (13)$$

де m_d – середнє квадратичне значення розмірів мікрооб'єктів в цілому по знімку;

d_i – дійсний розмір мікрооб'єкта у i -тому рядку; n – число рядків.

Для експериментального підтвердження такого підходу були отримані макетні цифрові РЕМ-зображення формату 512x512 і трьох рівнів квантування 2^4 , 2^5 і 2^6 . Із виконаних досліджень отримані наступні середні квадратичні значення визначення розмірів мікрооб'єктів 2,21 піх, 1,12 піх і 1,02 піх відповідно.

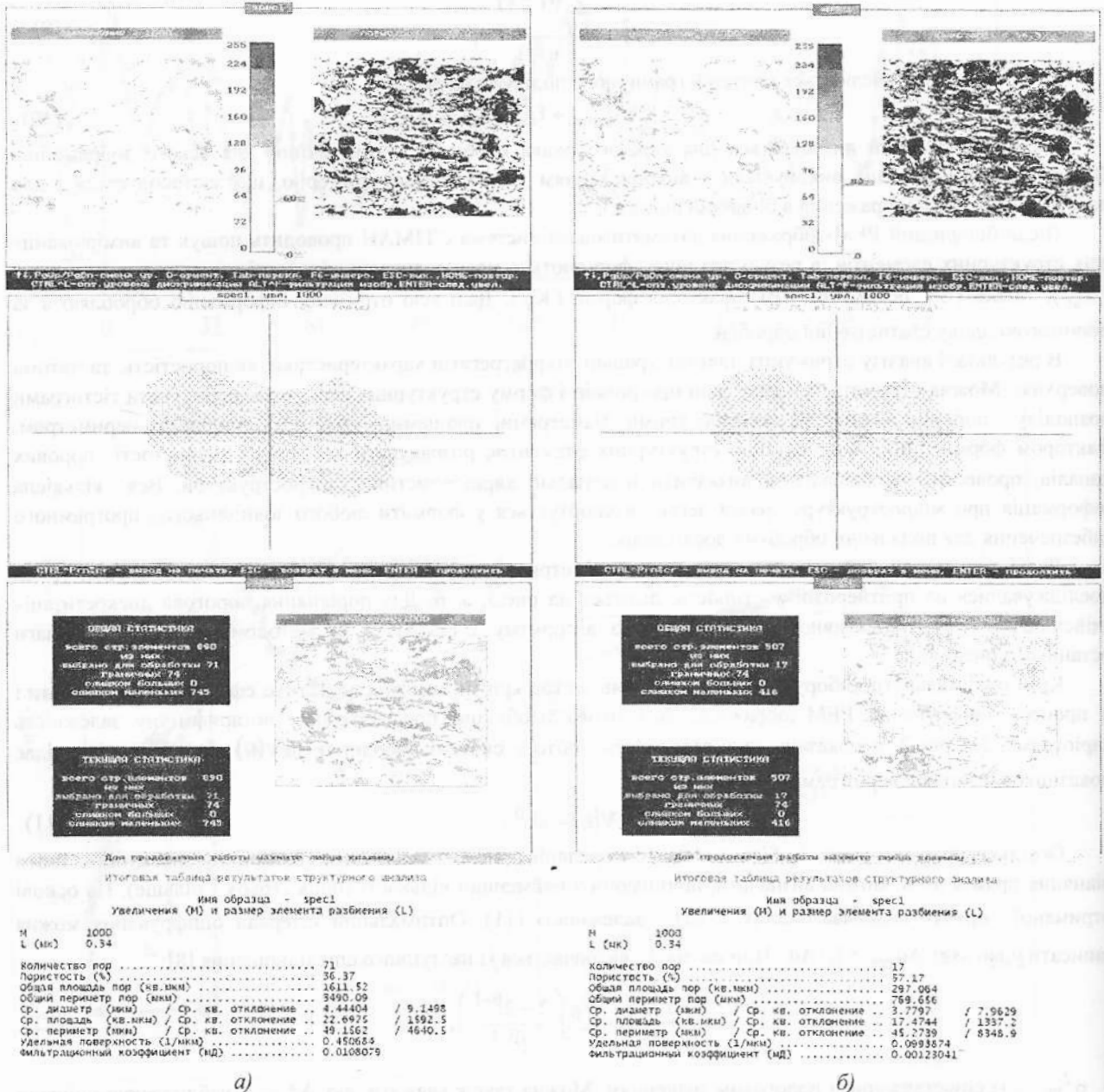
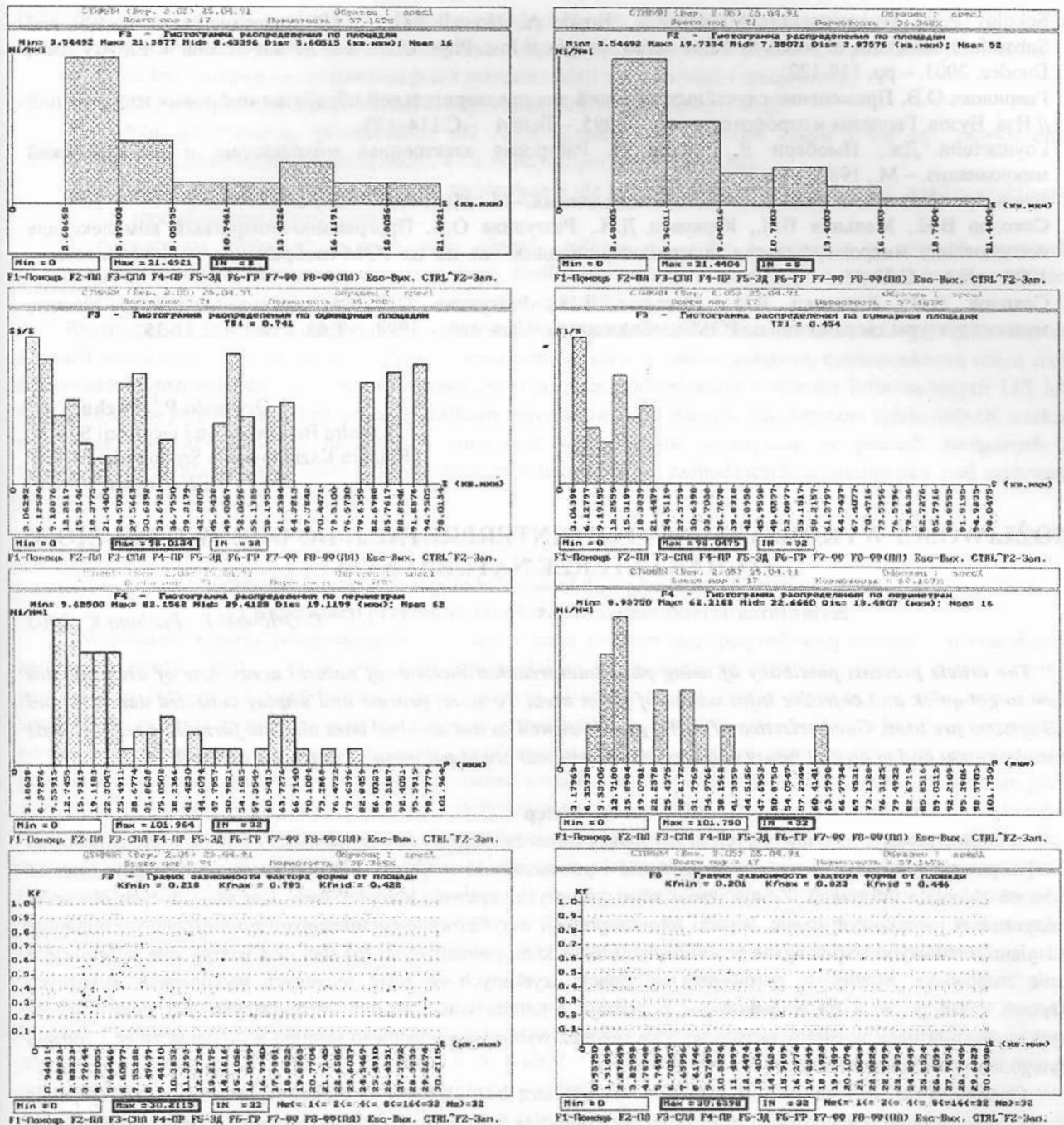


Рис.3. Порівняльна характеристика кількісного аналізу мікроструктури тестового зразка в залежності від рівня дискримінації напівтонового зображення:
 а) – рівень дискримінації 60; б) – оптимальний рівень дискримінації 82.



a)

b)

Рис.3. (продовження).

Із виконаних досліджень можна зробити такі висновки:

Метод Крайнінга дозволяє здійснювати коректну реалізацію порогових операцій при сегментації РЕМ-зображень, що підвищує повноту і точність автоматизованої стереолого-планіметричної обробки.

Варіограмний аналіз достатньо ефективний в процесі попередньої цифрової обробки РЕМ-зображень.

Алгоритм визначення найкращого ковзного середнього маски в кожному рядку РЕМ-зображення уможливило наблизити метричну оцінку розмірів мікрооб'єктів

Література

1. Sergeev Y.M., Osipov V.I., Sokolov V.N. Quantitative morphological analysis of complex SEM-image // J. Of Microscopy. – 1984. – V.135. – P.13-24.

2. Sokolov V.N., Yurkovets D.I., Melnik V.N., Boyde A., Howell P.G. 3D reconstruction of surface and Subsurface Structures of solids by SEM stereo images // Inst. Phys. Conf. Ser. №168: Section 4. EMAG 2001, Dundee, 2001. – pp. 119-122.
3. Гаврилова О.В. Применение случайных функций для предварительной обработки цифровых изображений // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1995. – Вып.4 . – С.114–123.
4. Гоулдстейн Дж., Ньюберн Д., Эчлин П. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. – М., 1984. – Кн.1. – 303 с.
5. Дэвис Дж. Статистика и анализ геологических данных. –М.: Мир, 1997. – 571 с.
6. Соколов В.Н., Мельник В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В. Программно-аппаратный комплекс для исследования микроморфологии поверхности твердых тел по их РЭМ-изображения // Поверхность. – 1998. – №1. – С.33-41.
7. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Мельник В.Н., Разгулина О.В. Метод количественного анализа микроструктуры твердых тел по РЭМ-изображениям // Зав. лаб. – 1998. – Т.63. – №9. – С.31-35.