

УДК 620.186 (084.127)

**А.В. Шостак, В.В. Божидарнік, О.В. Мельник, С.В. Синій, Ю.І. Дрозд**  
**ЗАСТОСУВАННЯ ВЕКТОРНОГО АНАЛІЗУ В РЕМ-ФОТОГРАММЕТРІЇ**

*У статті викладені теоретичні засади застосування векторів Гіббса в РЕМ-фотограмметрії, розглянуті питання визначення результуючих та комп'ютерно-програмованих диференціальних нахилів, вдосконалено методику кількісної рентгенографії в РЕМ.*

*Ключові слова: вектор Гіббса, фотограмметрія, растровий електронний мікроскоп. Форм. 21. Рис. 1. Літ. 10.*

**А.В. Шостак, В.В. Божидарнік, А.В. Мельник, С.В. Синій, Ю.І. Дрозд**  
**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА В РЭМ - ФОТОГРАММЕТРИИ**

*В статье изложены теоретические основы применения векторов Гиббса в РЭМ-фотограмметрии, рассмотрены вопросы определения результирующих и компьютерно-программируемых дифференциальных наклонов, усовершенствовано методику количественной рентгенографии в РЭМ.*

*Ключевые слова: вектор Гиббса, фотограмметрия, растровый электронный микроскоп.*

**A. Shostak, V. Bozhydarnyk, A. Melnik, S. Synii, J. Drozd**  
**APPLICATION OF VECTOR ANALYSIS IN REM PHOTOGRAMMETRY**

*In article the theoretical bases of Gibb's vectors using in REM-photogrammetry is interpreted. The questions of determination of resulting and computer-programmed differential gradients are considered. The methods quantitative X-ray is improved in REM.*

*Keywords: Gibb's vectors, photogrammetry, scanning microscope.*

**Постановка проблеми.** В растровій електронній мікроскопії (РЕМ) при вивченні процесів росту кристалів, наприклад, біогенної генези, дослідженнях їх кристалічної структури (рис. 1) і властивостей важливу роль відіграє коректне встановлення орієнтації кристала стосовно фіксованої системи координат (ФСК), а також розорієнтації сусідніх зерен [1, 6]. Якщо базис, використовуваний для опису ФСК, тотожний кристалографічному, тобто обидва вони є кубічними, гексагональними або якимись іншими, то взаємну їхню орієнтацію доцільно характеризувати оператором повороту  $\mathcal{B}$ , а для кількісної інтерпретації використовувати одне з можливих представлень цього оператора: матрицями або векторами Гіббса, кватерніонами, кутами Ейлера [3].

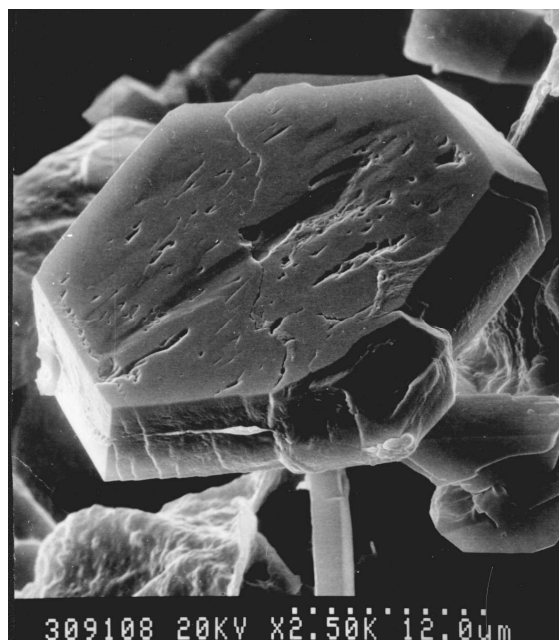
В електронній мікроскопії одержання матриці орієнтування, що забезпечує кристалографічну прив'язку не гірше як  $0,1^\circ$ , досягається обмірюванням координат значного числа відображень (опорних векторів), з наступним рішенням надлишкової системи нелінійних рівнянь [4]. Реалізація цієї схеми розрахунку виконується на основі громіздких чисельних методів і не завжди ефективна, принаймні в тих випадках, коли бажано оперативно обробляти й аналізувати одержувану інформацію, наприклад, при вивченні внутрізернової розорієнтації, статистичних дослідженнях границь зерен у полікристалах, тощо [9]. Постановку цих питань і шляхи їх вирішення можна простежити за матеріалами конференцій останніх років [2, 9].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналізуючи відомі досягнення електронної мікроскопії, зокрема мікро-дифракції (SAED) за останнє десятиліття, правомірно віднести методи електронної мікроскопії до розряду аналітичних, високотехнологічних і наукоємних. Інтеграція аналітичних методів просвітлювальної, растрової та комп'ютерної технологій – основа поглиблених досліджень на субмікронному рівні.

Не дивлячись на потенційні можливості, інтегральний підхід не знайшов на сьогодні ще

© А.В. Шостак, В.В. Божидарнік, О.В. Мельник, С.В. Синій, Ю.І. Дрозд



**Рис. 1. Мікрофотографія кристалічної структури біогенного походження**  
**Збільшення – 2500**

широкого практичного застосування. Тому вдосконалення окремих його аспектів – актуальна задача.

**Невирішені раніше частини загальної проблеми.** Коли досліджується значна кількість міжзернових та міжфазних границь, то використання матриці повороту як функції послідовних поворотів недоцільне, оскільки при такому підході розв'язок задачі починається з вибору кутів повороту, їх послідовності і напрямку обертання. В результаті розв'язок виявляється залежним від вибраних параметрів і може суттєво змінюватися при зміні, наприклад, послідовності поворотів. Тому доцільно, по можливості, відмовлятися від кутів послідовних поворотів як оцінюючих параметрів.

Найбільш економно представляти просторовий поворот у формі тривимірного вектора Гіббса [3], оскільки він є функцією трьох елементів і в явному вигляді містить три незалежних параметри орієнтації. Окрім цього, векторне вираження просторового орієнтування безпосередньо пов'язане з кватерніонним, яке найбільш зручне для геометрично-кристалографічних та деяких інших задач. Однак в РЕМ-фотограмметрії такий підхід не розглядався і потребує окремого дослідження.

**Метою дослідження** є розв'язок теоретичних та прикладних задач в РЕМ-фотограмметрії із застосуванням векторів Гіббса, шляхом послідовного вирішення наступних завдань:

- Отримати за МНК аналітичне рішення проблеми із застосування формалізму векторів Гіббса.

- Обґрунтувати методику реалізації такого підходу.

- Отримати в явній формі вирази для розрахунку оптимальних параметрів орієнтування в РЕМ (ПЕМ)–рентгенографічних дослідженнях.

**Виклад основного матеріалу.**

*1. Визначення в РЕМ операторів повороту на основі векторів Гіббса.*

В операторному вигляді математичний опис взаємного просторового розвороту (обертання) двох базисів (вихідного  $\{\vec{e}_i\}$  і поверненого  $\{\vec{e}'_i\}$ ) представляється як

$$\vec{e}'_i = \widehat{\Pi} \vec{e}_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

З фізичної точки зору будь-яке обертання – це поворот на кут  $\Omega$  навколо осі, що характеризується одиничним вектором  $\vec{C}$  з напрямними косинусами  $(C_1, C_2, C_3)$ .

Експериментальні методи визначення орієнтації кристала ґрунтуються на реєстрації координат вибраного опорного  $i$ -го вектора:  $i=1, 2, \dots, N$  (звичайно це нормаль до площини, що дала відображення) до (позначимо цей вектор  $\vec{g}(i)$ ) і після ( $\vec{r}(i)$ ) здійснення повороту об'єкта (кристала) як цілого. Математично перетворення  $\vec{g}(i)$  в  $\vec{r}(i)$  записується наступним чином:

$$\vec{r}(i) = \widehat{\Pi} \vec{g}(i). \quad (2)$$

Визначення координат вектора  $\vec{r}_i \{(r_{i1}, r_{i2}, r_{i3})\}$  завжди пов'язано з деякими похибками, рівень яких лімітується як можливостями приладу (класом шкал гоніометрів), так і ступенем досконалості самого об'єкта дослідження – кристала. Тому в ліву частину рівняння (2) реально підставляють не математично точне значення  $\vec{r}(i)$ , а його експериментальну оцінку. Позначимо її через  $\tilde{r}(i)$ .

Оператор повороту незалежно від способу його представлення описується трьома незалежними параметрами, а інші шість отримують з умови ортогональності і нормованості її рядків. Отже, для обчислення параметрів повороту необхідно експериментально поміряти як мінімум три незалежні величини. В кристалографії орієнтація вектора  $\tilde{r}(i)$  визначається двома незалежними параметрами, наприклад кутами  $\tilde{\omega}$  і  $\tilde{\varphi}_i$ , тому для однозначного розрахунку трьох компонентів повороту необхідно проміряти координати щонайменше двох опорних векторів:  $i=1, 2$ . Однак для підвищення точності необхідно знати якомога більше опорних векторів. Надлишкові системи рівнянь звичайно розв'язують методом найменших квадратів шляхом мінімізації квадрата відхилення поміряних величин від розрахункових  $(\tilde{r}(i) - \vec{r}(i))$ :

$$\sum_{i=1}^N [\tilde{r}_{(i)} - \hat{\Pi} \cdot g_{(i)}]^2 \xrightarrow{\hat{\Pi}} \min. \quad (3)$$

У будь-якому представленні оператора  $\hat{\Pi}$  мінімізація функціонала (3) зводиться до рішення системи нелінійних рівнянь, для чого необхідна попередня лінеаризація та ітеративний метод розв'язку. Водночас застосування формалізму векторів Гіббса  $G$  дозволяє отримати розв'язок в явному вигляді.

Вектори Гіббса, як відомо [3], задаються трьома компонентами  $G_1, G_2, G_3$ . Так, для вищезгаданих базисів  $\vec{G} = G_1 \vec{e}_1 + G_2 \vec{e}_2 + G_3 \vec{e}_3 = G'_1 \vec{e}'_1 + G'_2 \vec{e}'_2 + G'_3 \vec{e}'_3$ . Компоненти вектора  $\vec{G}$  за визначенням пов'язані з кутом повороту  $\Omega$  і напрямними косинусами  $(C_1, C_2, C_3)$  одиничного вектора  $\vec{C}$ , орієнтованого уздовж осі повороту. Цей зв'язок має вигляд [1]:

$$\vec{G} = \vec{C} \operatorname{tg} \frac{\Omega}{2}. \quad (4)$$

Закон перетворення вектора  $\vec{g}_{(i)}$  в  $\vec{r}_{(i)}$  записується в такий спосіб:

$$\vec{r}_{(i)} = \cos^2 \frac{\Omega}{2} \left[ \left( 1 - |G|^2 \right) \vec{g}_{(i)} + 2(\vec{G} \cdot \vec{g}_{(i)}) \vec{G} + 2\vec{G} \times \vec{g}_{(i)} \right]. \quad (5)$$

Тут векторний і скалярний добутки слід розписувати за звичайними формулами, а вектори  $\vec{g}_{(i)}$ ,  $\vec{r}_{(i)}$  і  $\vec{G}$  задавати в єдиній системі координат.

Для рішення системи (5) можна застосувати наступний прийом, недостатньо строгий математично, але задовольняючий за точністю кінцевого результату більшість практичних задач.

Використаємо для розрахунку компонентів  $\vec{G}$  не рівняння (5), а наступну властивість векторів Гіббса, що безпосередньо випливає з визначення:

$$\vec{G} \times (\vec{r}_{(i)} + \vec{g}_{(i)}) = (\vec{r}_{(i)} - \vec{g}_{(i)}). \quad (6)$$

Відповідно до цієї властивості будемо мінімізувати різницю

$$F(G_1, G_2, G_3) = \sum_{i=1}^N \left[ \vec{G} \times (\vec{r}_{(i)} + \vec{g}_{(i)}) - (\vec{r}_{(i)} - \vec{g}_{(i)}) \right]^2 \xrightarrow{G_1, G_2, G_3} \min. \quad (7)$$

Співвідношення (7) – лінійне стосовно  $G_1, G_2$  і  $G_3$ .

Після переходу від векторної до координатної форми і покомпонентної мінімізації, отримаємо:

$$\sum_x^N \{ [G_2(r_{i3} + g_{i3}) - G_3(r_{i2} + g_{i2})] - [r_{i1} - g_{i1}] \}^2 \Rightarrow \min.$$

$$\sum_y^N \{ [G_3(r_{i1} + g_{i1}) - G_1(r_{i3} + g_{i3})] - [r_{i2} - g_{i2}] \}^2 \Rightarrow \min.$$

$$\sum_z^N \{ [G_1(r_{i2} + g_{i2}) - G_2(r_{i1} + g_{i1})] - [r_{i3} - g_{i3}] \}^2 \Rightarrow \min.$$

Із виконання умов екстремуму  $\frac{\partial F}{\partial G_1} = \frac{\partial F}{\partial G_2} = \frac{\partial F}{\partial G_3} = 0$  і відповідних перетворень система нормальних рівнянь має вигляд:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{де: } a_{11} &= \sum_{i=1}^N [(\bar{r}_{i2} + g_{i2})^2 + (\bar{r}_{i3} + g_{i3})^2]; \quad a_{22} = \sum_{i=1}^N [(\bar{r}_{i1} + g_{i1})^2 + (\bar{r}_{i3} + g_{i3})^2]; \\ a_{33} &= \sum_{i=1}^N [(\bar{r}_{i1} + g_{i1})^2 + (\bar{r}_{i2} + g_{i2})^2]; \quad a_{lm} = \sum_{i=1}^N [(\bar{r}_{il} + g_{il})^2 + (\bar{r}_{im} + g_{im})^2], \quad l \neq m; \\ b_1 &= 2 \sum_{i=1}^N (g_{i2}\bar{r}_{i3} - g_{i3}\bar{r}_{i2}); \quad b_2 = 2 \sum_{i=1}^N (g_{i3}\bar{r}_{i1} - g_{i1}\bar{r}_{i3}); \quad b_3 = 2 \sum_{i=1}^N (g_{i1}\bar{r}_{i2} - g_{i2}\bar{r}_{i1}). \end{aligned}$$

У праві частини входять тільки параметри опорних векторів в двох системах координат, що визначаються експериментально, тобто  $\tilde{r}_{[i]}$  і  $\bar{g}_{[i]}$ . За оцінку точності доцільно використовувати середньоквадратичне розсіювання помірених величин, тобто:

$$S = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tilde{r}_{(i)} - \bar{r}_{(i)})^2, \quad (9)$$

де  $\bar{r}_{(i)}$  обчислюється за формулою (2).

2. *Результуючий нахил* має принципове значення при дослідженні кристалів і просторової структури складних дислокаційних конфігурацій, коли зразку необхідно придати заздалегідь вибрані нахили. Це питання розглянемо в наступній постановці.

Нехай поворот навколо жорсткої осі характеризується вектором  $\vec{w}$ , напрямком якого збігається з віссю обертання, а модуль дорівнює  $|\vec{w}| = tg \Omega/2$ , то вектор результуючого нахилу визначається за формулою:

$$\vec{w} = \frac{\vec{w}_1 + \vec{w}_2 - \vec{w}_1 \times \vec{w}_2}{1 - \vec{w}_1 \cdot \vec{w}_2}. \quad (10)$$

Якщо послідовність поворотів  $\varphi \rightarrow \psi$ , тобто здійснюється навколо взаємно перпендикулярних осей, то:

$$\begin{aligned} \vec{w}^2 &= \vec{w}_1^2 + \vec{w}_2^2 + (\vec{w}_1 \times \vec{w}_2)^2 - 2\vec{w}_1(\vec{w}_1 \times \vec{w}_2) - 2\vec{w}_2(\vec{w}_1 \times \vec{w}_2) = \\ &= \vec{w}_1^2 + \vec{w}_2^2 + (\vec{w}_1 \times \vec{w}_2)^2, \end{aligned}$$

оскільки  $\vec{w}_1 \cdot \vec{w}_2 = \vec{w}_1(\vec{w}_1 \times \vec{w}_2) = \vec{w}_2(\vec{w}_1 \times \vec{w}_2) = 0$ .

Остаточно

$$tg \Omega/2 = |\vec{w}| = \sqrt{tg^2 \varphi/2 + tg^2 \psi/2 + tg^2 \varphi/2 \cdot tg^2 \psi/2}. \quad (11)$$

Знаючи результуючий нахил, подальші перетворення можна обчислити за формулою (5).

3. *Комп'ютерно-програмовані диференціальні нахили*. В даний час в електронній мікроскопії ведуться розробки по створенню систем повністю автоматизованого аналізу РЕМ-зображень [7, 10]. Такі системи аналізу особливо потрібні, наприклад, при РЕМ-дослідженнях зразків, коли необхідно обстежити дуже велику площу в пошуках декількох мікрооб'єктів, і 2) дослідженні зразків з високою щільністю мікрооб'єктів, коли потрібно виконати надзвичайно велику кількість вимірів. Прикладами таких робіт можуть бути: аналіз і пошук мікрослідів вогнепальної зброї, включення в сплавах, геологічних зразках та ін.

Серед низки питань по автоматизації РЕМ для нас найбільший інтерес представляють особливості програмованих нахилів. Припустимо, що одиничний вектор  $\vec{N}_0$ , що співпадає у вихідному положенні з віссю Z одиничної сфери, обертається навколо X і Y осей у послідовності  $\varphi \rightarrow \psi$ . Цим поворотам відповідає перетворення координат

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \sin \psi \\ -\sin \varphi \\ \cos \varphi \cdot \cos \psi \end{bmatrix} \quad (12)$$

З іншої сторони. Із диференціальної геометрії відомо, що  $dS^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ , тому згідно (11)  $dS^2 = d\varphi^2 + \cos^2 \varphi d\psi^2$ . Позначимо  $\Psi' = \frac{d\psi}{d\varphi}$ . Тоді запишемо:

$$dS = (1 + \Psi'^2 \cdot \cos^2 \varphi)^{1/2} d\varphi \quad (13)$$

Це відомий в математиці [3] еліптичний інтеграл 2-го роду, табличне значення якого має вигляд:

$$S = (1 + a^2)^{1/2} \cdot E(k, \varphi), \quad (14)$$

де  $a - const$ ;  $k = a(1 + a^2)^{-1/2}$ ;  $E(k, \varphi) \Rightarrow$  табульовані значення еліптичних інтегралів 2-го роду.

Диференціальні зміни координат  $dX, dY, dZ$  обумовлені малими змінами кутів  $\Delta\varphi$  і  $\Delta\psi$ , можна розглядати як нескінченно малий приріст вектора  $\vec{N}$  в тривимірному просторі. Їх неважко визначити за відомими правилами векторної алгебри [3]. Це загальне рішення. Для прикладу розглянемо застосування керованих нахилів у рентгенографії шорсткуватих зразків.

4. *Кількісна рентгенографія в РЕМ* майже завжди здійснюється в режимі "in situ" і на плоских полірованих поверхнях. Як стандартні, так і невідомі зразки мають першокласне полірування й утримуються у фіксованій орієнтації стосовно до електронного зонда до рентгенівського спектрометру. Коли здійснюється рентгенографія (рентгенівський аналіз) на шорстких поверхнях, отриманих, наприклад, у результаті зламу, то виникають ускладнення [5, 8], що ставлять результати в залежність скоріше від мікрорельєфу, ніж від концентрації досліджуваних елементів, оскільки виділення і поглинання рентгенівської енергії в зразку сильно залежить від орієнтації потрібної локальної області стосовно напрямку електронного зонду.

Використовуючи стереоскопічні методи в РЕМ, адаптовані до режиму "in situ", можливо визначити точну орієнтацію локальної поверхні маленької плоскої області на шорсткуватому зразку, а потім реорієнтувати її таким чином, щоб ця область була рівнобіжною стандартним положенням. Якщо це виконано, то можна виміряти інтенсивність рентгенівських променів і точно визначити кількісний склад.

Рішення задачі визначення просторової орієнтації площини в режимі реального часу простіше виконати, скориставшись циліндричною системою координат  $(r, \varphi, z)$ , у якій рівняння площини приймає вид:

$$z = A \cdot r(\varphi) \cos \varphi + B \cdot r(\varphi) \sin \varphi + C. \quad (15)$$

Положення шуканої площини будемо визначати за МНК, мінімізуючи функцію

$$\Phi = \sum_{i=1}^n [A \cdot r(\varphi_i) \cos \varphi_i + B \cdot r(\varphi_i) \sin \varphi_i + C - z_i]^2 \quad (16)$$

Тут  $z_i, \varphi_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) - апліката і полярний кут  $i$ -ої точки, визначені стереометодом;  $n$  - кількість точок.

Необхідною умовою мінімуму функції  $\Phi$  є виконання рівностей:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial B} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial C} = 0, \quad (17)$$

які з врахуванням (15) приймають вигляд:

$$\begin{aligned} A \sum_{i=1}^n x_i^2 + B \sum_{i=1}^n x_i y_i + C \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n z_i x_i, \\ A \sum_{i=1}^n x_i y_i + B \sum_{i=1}^n y_i^2 + C \sum_{i=1}^n y_i &= \sum_{i=1}^n z_i y_i, \\ A \sum_{i=1}^n x_i + B \sum_{i=1}^n y_i + nC &= \sum_{i=1}^n z_i, \end{aligned} \quad (18)$$

де  $x_i = r(\varphi_i) \cos \varphi_i$ ;  $y_i = r(\varphi_i) \sin \varphi_i$

Якщо рішення системи (18) відомо, то рівняння шуканої площини має вид:

$$z = A \cdot r \cos \varphi + B \cdot r \sin \varphi + C \quad (19)$$

Потім визначаються напрямні косинуси:

$$\cos \alpha = A / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}; \quad \cos \beta = B / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}; \quad \cos \gamma = C / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}; \quad (20)$$

Напрямні косинуси (20) використовуються для обчислення кутів обертання і нахилу, що повинні бути застосовані до зразка для того, щоб привести досліджувану область у стандартне положення (під кутом  $45^\circ$ ). Ці кути легко одержати з простих геометричних співвідношень:

$$\rho_1^\circ = \arctg \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}; \quad \tau_q^\circ = 45^\circ - \varphi^\circ. \quad (21)$$

### Висновки.

1. Викладений метод має ту перевагу, що перехід від матричного представлення обертання до формалізму векторів Гіббса дозволяє значно простіше вирішувати прикладні РЕМ-фотограмметричні задачі і дає можливість їх наочної картографічної інтерпретації, наприклад, в стереографічній проекції.

2. Реалізація стереометодів в РЕМ-рентгенографії дозволяє оперативно, тобто в режимі "in situ", визначати просторову орієнтацію досліджуваних зразків, виконувати їх поворот навколо заданих просторових напрямків, здійснювати коректний рентгенівський аналіз шорсткуватих поверхонь.

(Робота виконана за підтримки МОН України (держреєстраційний номер теми № 0112U000290)).

1. *Валиев Р.* Кристалло-геометрический анализ межкристаллитных границ в практике электронной микроскопии [Текст] / Р. Валиев, А. Вергасов, В. Герцман. – М.: Наука. – 1991. – 230 с.
2. *В. Календин, Ю. Новиков, А. Раков, П. Тодуа* // Растровая электронная микроскопия. Дальнейшие пути развития [Текст] // Всероссийская конф. по электр. микроскопии. Черноголовка. – 2004. – С. 96-97.
3. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука. – 1974. – 830 с.
4. *В. Рыбин, У. Литвинов, А. Самойлов, Ю. Титовец* // Использование формализма векторов Гиббса для описания ориентировок и розориентировок [Текст] // Зав. лаб. – 1990. – №6. – С. 65-69.
5. *Bomback J.* Stereoscope techniques for SEM specimens [Text] / J. Bomback // Proc. of Sixth Annual Scanning Electron Microscope Symposium. Chicago. – 1973. – pp. 97-104.
6. *Chon C., Dicks K., Rolland P.* Interactive and Quantitative Pole Figures [Text] / C. Chon, K. Dicks, P. Rolland // Materials Science Forum. – 2002. – V.408-412. – С. 131-136.
7. *Edwards R.* Fully Automated SEM Image Analysis [Text] / R. Edwards, J. Lebedzik, G. Stone // Scanning. – 1986. – V.8. – С. 221-231.
8. *Fecher K.* The Determination of Surface orientation – a simple AID in Quantitative Analysis on Rough Surfaces [Text] / K. Fecher // Scanning. – 1985. – V.7. – P. 297-302.
9. *Frosch G.* Texture analysis using EBSD-automated, quantitative method using consecutive inverse pole figures [Text] / G. Frosch // XX Российская конф. по электр. микроскопии. Черноголовка. – 2004. – P. 131.
10. *Konitz H.* Mathematische Gesichtspunkte beim Gebrauch von Doppelkippeinrichtungen in der Elektronenmikroskopie [Text] / H. Konitz // Optic. – 1975. – V. 43-41. – №1. – С. 71-78.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2013.