

Измерение длины объектов на изображениях сканирующего зондового микроскопа с помощью детекторов кривизны

Павел Валентинович Гуляев

Удмуртский федеральный исследовательский центр, Уральское отделение РАН, Ижевск, Россия, lucac@inbox.ru

Аннотация. Рассмотрена задача автоматического определения продольных размеров объектов на изображениях, полученных с помощью зондовой микроскопии. Решение данной задачи может быть актуально в области производственного контроля материалов и изделий микроэлектроники, нанотехники. Проведено сравнение существующих инструментов измерения длины объектов на тестовом изображении, содержащем геометрические фигуры с известными размерами. Описаны преимущества измерения длин объектов непосредственно на полутоновом изображении посредством формирования остова объекта программным детектором кривизны поверхности, в частности программным двумерным детектором «Круг», основанном на анализе кривизны строчных и столбцовых профилограмм раstra изображения. Кривизну оценивали по площади фигуры, ограниченной профилограммой на определённом интервале. Рассмотрены особенности измерения длины объектов посредством формирования остова из локальных максимумов кривизны. Показано, что детектор кривизны позволяет точнее определять длины объектов с перекрывающимися контурами и значительным диапазоном яркости. Представлены алгоритмы работы детектора, формирования остова объекта и определения его длины. Приведены результаты исследований, подтверждающие работоспособность представленных алгоритмов. Сравнительный анализ с существующими инструментами измерения длин, выполненный на изображениях доменов магнитного диска и волокон нанополимера, показал корректную работу детектора по выделению остова объекта и измерению его длины.

Ключевые слова: сканирующий зондовый микроскоп, измерение длины, бинаризация, детектор кривизны, сегментация, тестовое изображение, полутоновое изображение

Для цитирования: Гуляев П. В. Измерение длины объектов на изображениях сканирующего зондового микроскопа с помощью детекторов кривизны // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 21–26. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-21-26>

Measuring the length of objects on scanning probe microscope images using curvature detectors

Pavel V. Gulyaev

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch Russian Academy of Science, senior researcher, Izhevsk, Russia, lucac@inbox.ru

Abstract. The article is devoted to the automatic measurement of objects longitudinal dimensions on images obtained by probe microscopy. The solution of this problem can be relevant for quality control of microelectronics, nanotechnology products and materials. Existing tools for objects length measuring are compared by means of test image containing geometric figures with known dimensions. The advantages of software surface curvature detectors, intended for objects lengths measuring directly on a halftone image by forming the skeleton of an object with a surface curvature detector, are shown. A two-dimensional "Circle" detector, based on the curvature analysis of raster images line and column profilograms, was used for the measuring. The curvature was estimated based on the area of the figure bounded by the profilogram at a predefined interval. Features of measuring the length of objects using curvature maxima are considered. It is shown that the curvature detector allows to more accurately determine the lengths of objects with overlapping contours and a significant brightness range. Algorithms of the detector operation, formation of the object skeleton and determination of its length are described. The results of investigation confirming the performance of the presented algorithms are presented. Comparative analysis with existing length measurement tools, performed on magnetic disk domains and nanopolymer fibers images, showed a more correct detector operation in skeletonization of object and measuring its length.

Keywords: scanning probe microscope; length measurement; binarization; curvature detector, segmentation, test image, halftone image

Введение. Контроль длины микро- и нанообъектов, расположенных на поверхности образцов (специализированных подложек), неразрывно связан с использованием

изображений и различных методов их обработки. Сканирующая зондовая микроскопия предоставляет широкие возможности получения изображений микро- и нанообъектов,

а программное обеспечение (ПО) сканирующих зондовых микроскопов содержит специализированные функции для определения геометрических характеристик объектов. Однако эти функции предназначены, как правило, для использования в полуавтоматическом режиме. В задачах производственного или технологического контроля, например при контроле размеров частиц [1, 2], поиске реперных объектов [3], наиболее востребованы процедуры автоматического выделения объектов и определения их геометрических параметров (площади, длины, объёма, высоты).

Контроль геометрических параметров объектов подразумевает их локализацию и распознавание на изображениях. Для выполнения указанных процедур применяются широко распространённые методы бинаризации [4], контурного анализа [5], сравнения с шаблоном [6], морфологические преобразования [7] (например, выделение остова). ПО серийно выпускаемых микроскопов, например Nova, Altami Studio, а также ПО, предназначенное для обработки изображений микроскопов, например SPIP (Scanning Probe Image Processor), содержит инструменты для автоматического выделения объектов и определения их длины, площади. Как правило, эти инструменты подразумевают предварительную бинаризацию изображения и эффективно работают на качественных изображениях обособленных объектов. Для частиц и их ансамблей, имеющих различную яркость и пересечение контуров, эффективность методов выделения объектов, основанных на бинаризации, существенно снижается.

Рассмотрим пример снижения эффективности при использовании ПО Nova v.1.026.134, Altami Studio v.3.5, SPIP v.4.4.6 в ручном и автоматическом режимах на тестовом изображении (рис. 1). Тестовое изображение содержит 4 сферических тестовых объекта (далее – сферы) радиусом $R_{об} = 15$

пикселей (пикс.) и 6 эллиптических тестовых объектов (далее – эллипсоидов) длиной $l_{об} = 60$ пикс., два из которых имеют наложение контуров. Изображение получается следующим образом. Сначала формируется фон $F[x, y]$, имитирующий влияние неидеальности сканера на изображении 256×256 :

$$F[x, y] := 255 - 2R_{об} + \{R_{об} / [2\sin(0,5\pi/128)] + R_{об} / [2\cos(0,5\pi/128)]\}.$$

Затем случайным образом выбираются координаты x_0, y_0, z_0 тестовых объектов. Для всех точек x, y , находящихся в окрестности центра x_0, y_0 и удовлетворяющих условию

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 < R_{об}^2, \quad (1)$$

формируется изображение $Q[x, y]$ сферы радиусом $R_{об}$:

$$Q[x, y] = z_0 + 2\sqrt{R_{об}^2 - (x - x_0)^2 - (y - y_0)^2}. \quad (2)$$

Для эллипсоидов с продольным и поперечными размерами $4R_{об}$ и $0,5R_{об}$ выражения (1), (2) выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{[(x - x_0)\cos\alpha - (y - y_0)\sin\alpha]^2}{R_{об}^2} + \\ & + \frac{[(x - x_0)\sin\alpha - (y - y_0)\cos\alpha]^2}{16R_{об}^2} \leq 1; \\ Q[x, y] = z_0 + 2R_{об} & \left\{ 1 - \frac{[(x - x_0)\cos\alpha - (y - y_0)\sin\alpha]^2}{R_{об}^2} - \right. \\ & \left. - \frac{[(x - x_0)\sin\alpha - (y - y_0)\cos\alpha]^2}{16R_{об}^2} \right\}^{1/2}. \end{aligned}$$

Таблица 1

Результаты измерений (в пикс.) диаметра $D_{изм}$ сфер (объекты 1–4) и длины $l_{изм}$ эллипсоидов (объекты 5–10) различным ПО

Номер объекта	Фиксированный порог бинаризации		Регулируемый порог бинаризации			Детектор «Круг» [1]
	Nova	Altami Studio	Nova	Altami Studio	SPIP	
1	13	25,6	25	28,3	25,9	29,0
2	21	27,5	27	29,3	27,13	29,0
3	24	28	28	29,4	27,7	29,4
4	30	29,7	28	29,5	28,9	30,0
5	58	58,8	58	58,8	58,1	63,1
6	58	59	58	58,3	58,1	63,1
7	58	59	58	58,4	58,1	62,7
8	58	59	59	59	58,1	62,7
9	91	91,4	91	91,5	92,9	58,7
10	–	–	–	–	–	58,2

В табл. 1 приведены результаты измерений длины $l_{изм}$ эллипсоидов и диаметра $D_{изм}$ сфер (см. рис. 1), полученные с помощью серийного ПО, а также с помощью программного детектора кривизны поверхности «Круг» [1]. Программный детектор кривизны поверхности «Круг» (подробно будет описан далее в статье) разработан при участии автора и доработан автором для выделения остовов объектов и измерения длин объектов по выделенному остову. Истинное значение $D_{об}$ диаметра сфер (объекты 1–4 в табл. 1 и на рис. 1) составляет 30 пикс., истинное значение длины $l_{об}$ эллипсоидов (объекты 5–10 в табл. 1 и на рис. 1) – 60 пикс. Из табл. 1 следует, что серийное ПО детектировало два накладывающихся эллипсоида (объекты 9, 10, см. рис. 1) как один (объект 9, см. табл. 1). Кроме того, измерение размеров при фиксированном пороге бинаризации может привести к увеличению относительного отклонения ε результата измерений

от истинного значения при уменьшении яркости объекта. Значение ε при этом для сфер и эллипсоидов определяется согласно выражениям

$$\varepsilon_c = |D_{\text{изм}} - D_{\text{об}}| / D_{\text{об}}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_\varepsilon = |l_{\text{изм}} - l_{\text{об}}| / l_{\text{об}}. \quad (4)$$

Так, например, ПО Nova определило диаметр наименее ярких объектов 1–3 (см. табл. 1) с относительным отклонением $\varepsilon = 0,56; 0,30; 0,20$. При регулируемом (адаптивном) пороге бинаризации эти значения уменьшаются до 0,17; 0,10; 0,07 соответственно.

Результаты применения серийного ПО на тестовом изображении показали, что определение длины объектов после бинаризации может привести к объединению накладывающихся объектов и увеличению погрешности определения длины. Логичным путём уменьшения погрешности является выделение остова объекта непосредственно на полутоновом изображении, например, по его скелету (линии максимальной кривизны поверхности). Для этой цели можно использовать методы, основанные на анализе кривизны поверхности [1] или профилограмм изображения [1,2].

Выделение остова объекта детектором кривизны «Круг». Детекторы кривизны можно разделить на плоские и объёмные. Плоские детекторы анализируют кривизну профилограмм, содержащихся в строках (строчный детектор) и столбцах (кадровый детектор) растрового изображения. Объёмные детекторы анализируют кривизну поверхности и больше подходят для оценки геометрических параметров сосредоточенных объектов, например частиц. Для определения длины вытянутых объектов предлагается использовать плоские детекторы. Среди плоских детекторов наилучшей помехоустойчивостью обладает детектор «Круг».

Принцип работы детектора «Круг» заключается в следующем. Из изображения формируется набор профилограмм, которые представляют собой одномерные массивы значений функции яркости, сформированные из строк и столбцов раstra изображения. Каждая профилограмма из набора обрабатывается детектором, схема работы которого представлена на рис. 2. Согласно рис. 2 окружность радиусом r с центром в точке A перемещается вдоль профилограммы. Для оценки кривизны R профилограммы используется показатель площади S части окружности D , ограниченной сверху профилограммой $Z(x)$. Кривизна R определяется согласно выражению [8]:

$$R = 4r / (3\pi v),$$

где $v = |S - \bar{S}| / \max(S, \bar{S})$; $\bar{S} = \pi r^2 - S$.

Для рассмотрения только выпуклых областей проверяется неравенство:

$$S < \pi r^2 / 2.$$

Для каждой точки профилограммы x_i из диапазона $\Delta x = [x_A - r \dots x_A + r]$ определяются верхняя z_B и нижняя z_H границы окружности детектора (см. рис. 2), а также высота z_{B1} точки z_B относительно точки A , используемые для численной оценки величины S :

$$z_{B1} = \sqrt{r^2 - (x_i - x_A)^2};$$

$$z_H = Z(x_A) - z_{B1};$$

$$z_B = Z(x_A) + z_{B1}.$$

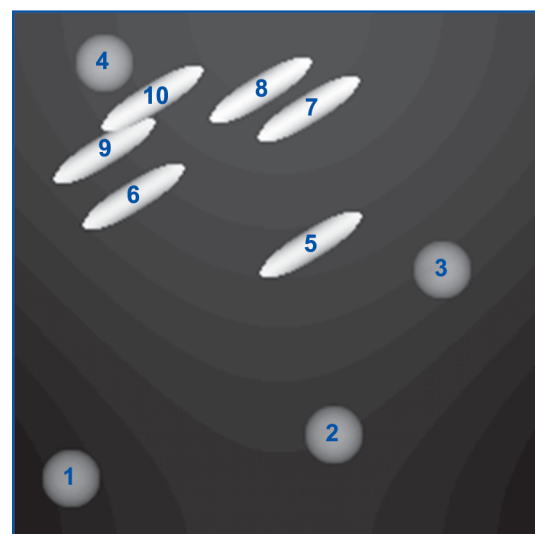


Рис. 1 Тестовое изображение:

1–4 – сферические тестовые объекты; 5–10 – эллипсоидные тестовые объекты

Fig. 1. Test image:

1–4 – spherical test objects; 5–10 – ellipsoid test objects

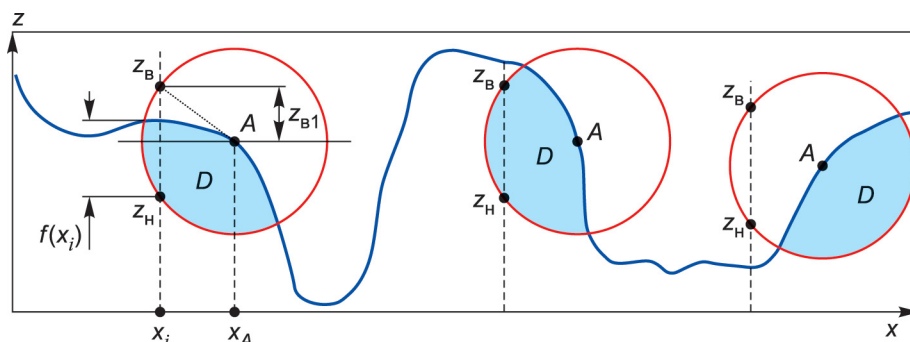


Рис. 2 Схема вычисления кривизны детектором «Круг»

Fig. 2. Scheme for curvature calculating by the "Circle" detector

Площадь S фигуры D определяется как

$$S = \iint_D dD \approx \sum_{x_i \in \Delta x} f(x_i),$$

где в соответствии с рис. 2:

$$f(x_i) = \begin{cases} Z(x_i) - z_H, & z_H < Z(x_i) < z_B; \\ 2z_{B1}, & Z(x_i) \geq z_B; \\ 0, & Z(x_i) \leq z_H. \end{cases}$$

В результате обработки всех строчных профилограмм изображения формируется множество значений функции R_x , на основе которого формируется карта (массив) кривизны W_x . Размерность карты соответствует размерности изображения, а в её ячейки, соответствующие локальным (в окрестности 4 пикс.) максимумам кривизны R_x , записываются «1».

Последовательности «1» представляют собой остовы объектов. Дескриптором остова являются координаты начала и конца, а также длина. Дополнительно дескриптор может содержать координаты точек пересечения с остовами, сформированными детектором по другому направлению.

Уточнение остова. Одним из недостатков плоских детекторов, в том числе детектора «Круг», является следующее. При строчном направлении прохода детектора затруднено выделение остова вертикально ориентированных объектов, что проявляется в нескольких коротких отрезках остова вместо одного длинного. Аналогичная ситуация складывается для горизонтально ориентированных объектов и кадрового направления прохода детектора.

Для корректного выделения и определения длины объекта предлагается использовать данные о кривизне поверхности, полученные как для кадрового, так и строчного направления детектирования. При этом необходимо учитывать следующие допущения:

либо строчный, либо кадровый детекторы позволяют корректно выделять остов объекта;

короткий остов, пересекающий длинный, может быть исключён из дальнейшего анализа;

координаты пересечения остовов одного объекта, полученные строчным и кадровым детекторами, совпадают с координатами локальных максимумов суммы кривизны профилограмм строк и столбцов изображения.

Таблица 2

Среднее значение относительного отклонения $\bar{\varepsilon}$ измерений на тестовом изображении при обработке различным ПО с учётом и без учёта промахов измерений

Промех измерений	Nova	AltamiStudio	SPiP
Учтён	0,114815	0,081481	0,113407
Неучтён	0,064583	0,026042	0,059042

В связи с этим помимо строчной карты кривизны W_x составляется аналогичная карта для кадрового направления W_y , а также карта W_{xy} суммы кадрового R_y и строчного R_x значений функции кривизны. Карта W_{xy} позволяет обнаружить точки пересечения строчных и кадровых остовов одного и того же объекта.

Алгоритм выделения остова состоит из следующих шагов.

Шаг 1. При последовательном просмотре карты кривизны нахождение «1» запускает процедуру следящего поиска цепочки экстремумов (единичных элементов). Для этого смежная окрестность 3×3 пикс. каждой текущей «1» просматривается на наличие соседней «1» в направлении, соответствующем движению детектора. При обнаружении «1» поиск продолжается, в противном случае заканчивается.

Шаг 2. При обнаружении соседней «1» изменяются текущие координаты экстремума с одновременным увеличением расстояния в пикселях, при этом предыдущий элемент цепочки «1» в карте кривизны обнуляется.

Шаг 3. Осуществляется поиск пересечений с остовом, полученным в перпендикулярном направлении. Координаты пересечений также запоминаются.

Шаг 4. При обнаружении пересечений более короткие остовы отсеиваются.

Результаты. Предварительный анализ показал, что длина $l_{изм}$ остова объекта, измеренная по карте кривизны, может оказаться больше реальной длины вследствие отклонений экстремумов кривизны от реального положения остова. Поэтому для прямолинейных объектов их длина должна вычисляться по начальной (x_1, y_1) и конечной (x_2, y_2) точкам остова:

$$l_{изм} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (5)$$

Полученные результаты (см. табл. 1) показали, что выделение остова по максимумам кривизны на полутоновом изображении позволило выделить накладывающиеся объекты 9, 10 и определить их длину по отдельности.

В табл. 2 представлено среднее относительное отклонение $\bar{\varepsilon}$ измеренных длин объекта от истинного значения, рассчитанное для результатов измерений, полученных ПО Nova, Altami Studio, SPiP (см. табл. 1). Анализ табл. 2 показал следующее. Значение $\bar{\varepsilon}$ для серийного ПО существенно больше значения $\bar{\varepsilon}$ для детектора «Круг» ($\bar{\varepsilon} = 0,024667$), если учитывать промах измерений этого ПО – грубую погрешность измерения длины накладывающихся объектов (объект 9 в табл. 1, объекты 9, 10 на рис. 1). Без учёта промаха значения $\bar{\varepsilon}$ для детектора и серийного ПО сопоставимы.

На реальных изображениях детектор «Круг» по сравнению с серийным ПО позволяет точнее определять длины объектов в результате более корректного выделения остовов (особенно удлинённых объектов). Например, в серийном ПО затруднено определение длины объектов с незамкнутым контуром, в то время как степень завершенности контура не имеет для детектора «Круг» никакого значения. Кроме того, при бинаризации изображения в остове объекта могут возникать разрывы (фрагментация объекта),

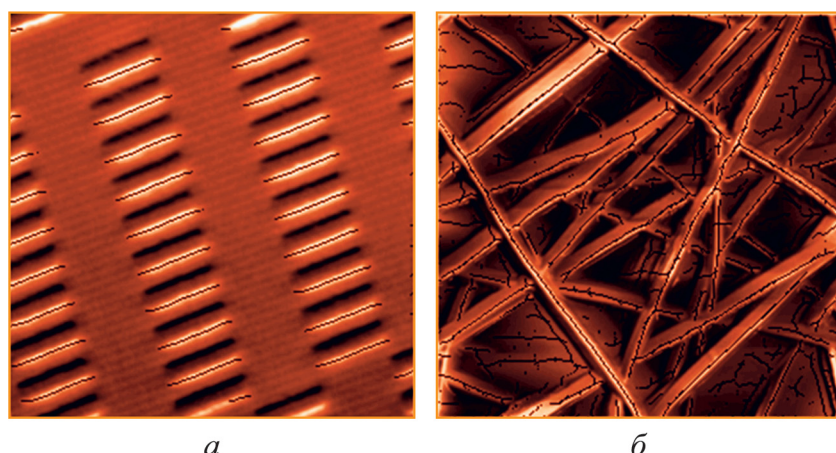


Таблица 3

Количество объектов разных размеров на рис. 3, определённых с помощью различного ПО

$l_{\text{изм}}, \text{ пикс.}$	Altami Studio	Nova	SPIP	Детектор «Круг»
Магнитные домены жёсткого диска (см. рис. 3, а)				
0–10	0	3	0	3
10–20	0	5	0	3
20–30	1	4	1	3
30–40	2	2	0	2
40–50	3	20	18	3
50–60	16	2	0	19
Волокна полимера (см. рис. 3, б)				
1–20	94	120	122	31
20–40	16	2	13	45
40–60	2	1	4	20
60–80	1	0	1	11
80–100	4	0	0	5
100–120	1	0	0	4
120–140	3	0	0	5
140–160	0	0	1	0
160–180	0	0	0	2
180–200	0	1	0	0
200–220	0	0	1	0
220–240	0	0	0	1

Рис. 3. Остовы магнитных доменов жёсткого диска (а) и волокон полимера (б)

Fig. 3. Skeletons of hard drives disk magnetic domains (а) and polymer fiber skeletons (b)

обусловленные неравномерностью функции яркости. Морфологические преобразования, например дилатация, могут устранить разрывы, изменив при этом геометрические параметры остова и результат измерения длины. В данном случае использование функции кривизны позволяет детектору выделять остовы менее ярких объектов или фрагментов этих объектов.

Пример выделения остовов на изображении (256×256 пикс.) доменов магнитного диска (NT-MDT. Галерея сканов: [сайт]. URL: <https://www.ntmdt-si.ru/resources/scan-gallery/magnetic-materials-1/magnetic-domains-on-hard-disk>) детектором кривизны представлен на рис. 3, а. Результаты измерения длины объектов (магнитных доменов жёсткого диска) различным ПО представлены в табл. 3. Откуда следует, что бинаризация с последующим контурным анализом выделенных объектов, реализованным в ПО Altami, SPIP, затрудняет регистрацию и измерение длины объектов с незамкнутыми контурами. Это проявляется в отсутствии коротких (до 20 пикс.) объектов в результатах измерений ПО Altami и SPIP. Однако этот недостаток достаточно просто устраняется совершенствованием алгоритмов формирования контуров либо аппроксимацией выделенных после бинаризации областей геометрическими фигурами, как это сделано в программе Nova.

В табл. 3 показано, что на качественных, высококонтрастных, малозашумлённых изображениях применение детектора кривизны не даёт особых преимуществ перед традиционными методами обработки за исключением отсутствия необходимости регулировки параметров обработки, например, порога бинаризации. На менее контрастных, зашумлённых изображениях с множеством пересекающихся объектов преимущества детектора кривизны более очевидны. Применение серийного ПО на таких изображениях приводит либо к объединению накладывающихся объектов, либо к их фрагментации. Детектор кривизны в результате работы непосредственно на полутоновом режиме позволяет избежать фрагментации и объединения объектов.

Например, на рис. 3, б приведён пример выделения остовов на изображении (256×256 пикс.) нановолокон полимера (NT-MDT. Галерея сканов [сайт]. <https://www.ntmdt-si.ru/resources/scan-gallery/polymers-and-thin-organic-films-1/nanofibers-of-polymer-polyvinyl-alcohol>) детектором кривизны. Результаты измерения длины объектов (нановолокон полимера) различным ПО также представлены в табл. 3. Из полученных результатов следует, что количество коротких (до 20 пикс.) фрагментированных объектов значительно меньше при выделении их с помощью детектора кривизны, а количество длинных (более 100 пикс.) – значительно больше. Это подтверждает утверждение о меньшей предрасположенности детектора кривизны к фрагментации остова удлинённых объектов.

Закключение. Представленные в настоящей работе результаты свидетельствуют о том, что принцип работы программного двумерного детектора «Круг» позволяет успешно применять его для решения задачи выделения остовов объектов и определения их длины непосредственно на полутоновом изображении. Сравнение с существующими инструментами показывает, что точность определения размеров объекта рассмотренным детектором находится на уровне существующих методов, а количество промахов или недостоверно детектированных объектов существенно меньше.

Список литературы

1. Гуляев П. В., Шелковников Е. Ю., Тюриков А. В., Осипов Н. И., Кизнерцев С. Р. Особенности применения детекторов кривизны поверхности для анализа размеров наночастиц. // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15. № 1. С. 138–143.
2. Гейдаров П. Ш. Алгоритм определения расположения и размеров объектов на основе анализа изображений объектов // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 2. С. 275–280.
3. Гуляев П. В. Применение реперных отметок для координатной привязки к поверхности в сканирующей зондовой микроскопии // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. № 3. С. 470–476. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-641>
4. Исрафилов Х. С. Исследование методов бинаризации изображений // Вестник науки и образования. 2017. № 6. С. 43–50.
5. Бардин Б. В., Манойлов В. В., Чубинский-Надеждин И. В., Васильева Е. К., Заруцкий И. В. Определение размеров локальных объектов изображений для их идентификации // Научное приборостроение. 2010. Т. 20. № 3. С. 88–94.
6. Цветков О. В., Тананыкина Л. В. Метод предварительного кодирования изображений в корреляционно-экстремальных системах // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 5. С. 738–743. <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-5-738-743>
7. Gonzalez R., Woods R., *Digital image processing*, 3rd Ed., Pearson Education, 2008, 954 p.

8. Каркищенко А. Н., Лепский А. Е., Безуглов А. В. Об одном способе векторного и аналитического представления контура изображения // Изв. ТРТУ. 1998. Т. 8. № 2. С. 107–111.

References

1. Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Osipov N. I., Kiznertcev S. R., *Chemical Physics and Mesoscopy*, 2013, vol. 15, no. 1, pp. 138–143 (in Russian).
2. Geidarov P. S., *Computer Optics*, 2011, vol. 35, no. 2, pp. 275–280 (in Russian).
3. Gulyaev P. V., *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 7, pp. 470–476 (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-641>
4. Israfilov Kh. S., *Science and Education Bulletin*, 2017, no. 6, pp. 43–50 (in Russian).
5. Bardin B. V., Manoilov V. V., Chubinsky-Nadezhdin I. V., Vasilieva E. K., Zarutsky I. V., *Nauchnoie Priborostroenie*, 2010, vol. 20, no. 3, pp. 88–94 (in Russian).
6. Tsvetkov O. V., Tananykina L. V., *Computer Optics*, 2015, vol. 39, no. 5, pp. 738–743 (in Russian). <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-5-738-743>
7. Gonzalez R., Woods R., *Digital image processing*, 3rd Ed., Pearson Education, 2008, 954 p.
8. Karkishenko A. N., Lepsky A. E., Bezuglov A. V., *Izvestia TRTU*, 1998, vol. 8, no. 2, pp. 107–111 (in Russian).

Статья поступила в редакцию 13.11.2020;
принята к публикации 24.12.2020.