

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

# Коррекция влияния помех на результаты зондовой микроскопии вытянутых объектов с использованием прогнозных оценок рельефа

П.В. Гуляев

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 27.03.2025

Принята к печати 14.05.2025

Корректное измерение длины объектов на изображениях, искажённых воздействием помех, является важной задачей зондовой микроскопии. Существующие методы измерения не в полной мере учитывают специфику конкретной предметной области. Целью настоящей работы являлась разработка нетребовательного к вычислительным ресурсам алгоритма выделения остовов объектов, ориентированного на особенности изображений в сканирующей зондовой микроскопии. Ограниченное быстродействие зондового микроскопа, загрязнение поверхности образца, неидеальность зонда приводят к типовым помехам в виде полос,  $1/f$  шумов, флуктуаций яркости и вызывают дефрагментацию остовов объектов и снижение точности измерений длины. Предложенный в работе метод использует прогнозные оценки рельефа для устранения влияния этих помех. Прогноз определяется на основе экстраполяции информации из столбцов раstra уже отсканированной части изображения. Прогнозный интервал равен одному интервалу дискретизации изображения. Совокупность прогнозных оценок формирует прогнозное изображение, которое затем используется при определении длины объектов. Особенность прогнозных изображений заключается в увеличении резкости искажённых помехами областей. Это позволило при выделении объектов с помощью детекторов кривизны дефрагментировать остовы и точнее измерить их длину. Исследования показали, что увеличение интегральной ошибки прогнозирования является признаком необходимости дополнительной обработки изображений от низкочастотных или ударных помех. При этом использование прогнозных изображений снижает относительное отклонение количества нераспознанных остовов и среднее отклонение максимальной измеренной длины. Установлено, что управляющая информация в виде прогнозных оценок может использоваться при обработке изображений в зондовой микроскопии для детектирования и частичного устранения помех. Формирование прогнозных изображений усиливает резкость объектов и повышает вероятность их корректного выделения методами, основанными на анализе изменений функции яркости.

**Ключевые слова:** сканирующий зондовый микроскоп, прогнозное изображение, остовы, контроль длины

---

**Адрес для переписки:**

Гуляев П.В.  
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия  
e-mail: lucac@inbox.ru

**Address for correspondence:**

Gulyaev P.V.  
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian  
Academy of Sciences,  
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia  
e-mail: lucac@inbox.ru

---

**Для цитирования:**

П.В. Гуляев.  
Коррекция влияния помех на результаты зондовой микроскопии  
вытянутых объектов с использованием прогнозных оценок рельефа.  
Приборы и методы измерений.  
2025. Т. 16. № 2. С. 147–157.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

**For citation:**

Gulyaev P.V.  
Correction of Disturbances Influence on Results of Elongated Objects's  
Probe Microscopy Using Predictive Relief Estimates.  
Devices and Methods of Measurements.  
2025;16(2):147–157. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

# Correction of Disturbances Influence on Results of Elongated Objects's Probe Microscopy Using Predictive Relief Estimates

P.V. Gulyaev

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 27.03.2025

Accepted for publication 14.05.2025

## Abstract

Correct measurement of the distorted objects length in images is an important task of probe microscopy. Existing measurement methods do not fully take into account the specifics of a given subject area. The purpose of this work was to develop an algorithm for locating the objects skeletons adapted to the images peculiarities in scanning probe microscopy and does not require significant computing resources. The limited speed of the probe microscope, contamination of the sample surface, and Non-ideality of the probe lead to typical disturbances in the form of stripes,  $1/f$  noise, and brightness fluctuations and cause defragmentation of the skeletons of objects and a decrease in the accuracy of length measurements. The method proposed in this paper uses predictive relief estimates to eliminate the influence of these disturbances. The forecast is calculated based on extrapolation of information from the raster columns of the already scanned part of the image. The forecast interval is equal to the discretization interval of the image. The set of forecast estimates forms a predictive image, which is subsequently used to determine the length of objects. The peculiarity of predictive images is the sharpening of areas distorted by disturbances. This made it possible to defragment the skeletons and measure their length more accurately when locating objects using curvature detectors. Studies have shown that an increase in the integral prediction error is a indication of the need for additional image filtering from low-frequency or shock interference. At the same time, the use of predictive images reduces the relative deviation of the number of unrecognized skeletons and the average deviation of the maximum measured length. It has been established that control information in the form of forecast estimates can be used in image processing in probe microscopy to detect and partially eliminate disturbances. The formation of predictive images enhances the sharpness of objects and increases the probability of their correct selection using methods based on the analysis of changes in the brightness function.

**Keywords:** scanning probe microscope, predictive imaging, skeletons, length monitoring

---

### Адрес для переписки:

Гуляев П.В.  
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия  
e-mail: lucac@inbox.ru

### Address for correspondence:

Gulyaev P.V.  
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian  
Academy of Sciences,  
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia  
e-mail: lucac@inbox.ru

---

### Для цитирования:

П.В. Гуляев.  
Коррекция влияния помех на результаты зондовой микроскопии  
вытянутых объектов с использованием прогнозных оценок рельефа.  
Приборы и методы измерений.  
2025. Т. 16. № 2. С. 147–157.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

### For citation:

Gulyaev P.V.  
Correction of Disturbances Influence on Results of Elongated Objects's  
Probe Microscopy Using Predictive Relief Estimates.  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2025;16(2):147–157. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

## Введение

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) позволяет получать прямые топографические изображения поверхности, которые могут использоваться для определения геометрических размеров объектов, например, длины молекул, частиц волокон, искусственных формирований. Программное обеспечение серийных микроскопов (Nova, Altami Studio), а также специализированные программы для обработки изображений (SPIP, ImageJ, MountainsSPIP) содержат инструменты для автоматизированного поиска объектов и определения их длины. Однако эти инструменты, как правило, требуют предварительной обработки изображений. Некоторая часть процессов обработки (удаление наклона, удаление высокочастотных помех) может быть автоматизирована. Другая часть обработки, например, сглаживание, выравнивание яркости выполняется под контролем оператора, поскольку в автоматическом режиме форма и геометрические параметры объектов могут быть искажены. Тем не менее, даже после обработки изображения зачастую содержат помехи, способные повлиять на результаты измерения. Например, изображения могут содержать выпадающие строки, ступеньки, вызванные виброакустическими воздействиями, контактом зонда с поверхностью, множественными микровыступами на вершине зонда, а также неоптимальными настройками цепи регулирования СЗМ [1, 2]. Такие искажения влияют на определение длины вытянутых объектов за счёт их фрагментации. При этом фрагментация проявляется сильнее, если для отсева фоновых элементов изображения применяется пороговая фильтрация по яркости.

Наиболее распространены следующие подходы к определению длины объектов на изображениях. Первый подход связан с предварительной сегментацией изображения [3] и последующим определением размеров сегментов посредством формирования контуров [4] или аппроксимацией геометрическими примитивами, например, отрезками с помощью преобразования Хафа или с помощью нейросетей [5]. Такой подход применяется для объектов с типовыми, достаточно простыми формами. Для других объектов распространён подход,

связанный с выделением остова и определением его длины.

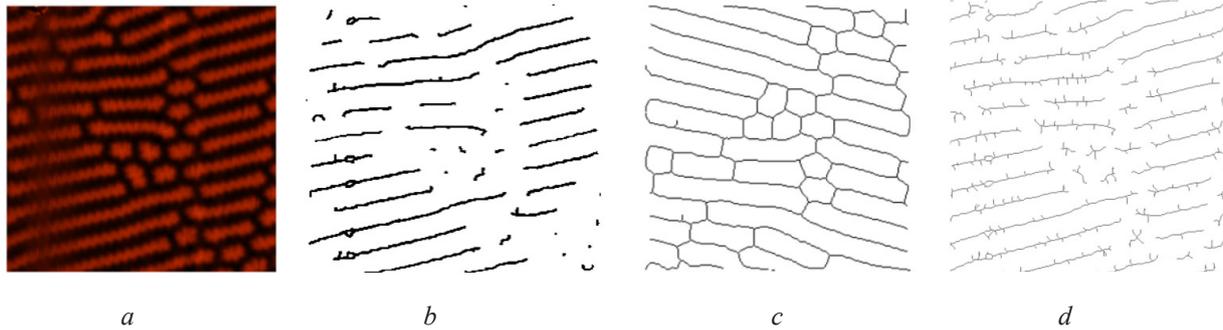
Существующие методы выделения остовов можно разделить на классические [6] и нейросетевые [7]. Нейросети требуют значительных ресурсов и разрабатываются для более массовых в отличие от зондовой микроскопии приложений, поэтому их применение для коррекции измерений длины объектов можно считать избыточным. Обзор классических методов выделения остовов [8–10] показал, что наиболее распространены менее требовательные к ресурсам и основанные, как правило [8], на морфологических операциях обработки методы. Это подтверждается их реализацией в составе программного пакета ImageJ с открытыми архитектурой и набором подключаемых библиотек. Недостатки этих методов заключаются в следующем.

1. Методы с бинаризацией (например, плагин BoneJ пакета ImageJ) плохо работают на слабоконтрастных изображениях, изображениях с перепадами яркости (рисунок 1а). Это приводит к фрагментации остовов (рисунок 1б).

2. Остовы плотно упакованных или накладывающихся объектов могут смыкаться (плагин BoneJ пакета ImageJ, рисунок 1с).

3. Остовы объектов с неоднородностями ширины могут иметь отростки (плагин Skeletonise 2D/3D, рисунок 1д).

Представленные недостатки во многом обусловлены краевыми шумами, вариациями формы, яркости объектов [11], а также нечёткостью их границ [12]. Для их устранения разрабатываются различные специализированные алгоритмы, ориентированные под определённый класс задач. Однако они применяются на изображениях после процедуры бинаризации и структуризации остова, которая при наличии некомпенсированных помех может привести к появлению существенных разрывов, не устраняемых морфологическими преобразованиями. В связи с этим представляется актуальной задача выделения и дефрагментации остовов объектов непосредственно на полутоновом изображении. Целью настоящей работы являлась разработка нетребовательного к ресурсам алгоритма выделения остовов объектов, ориентированного на особенности изображений в сканирующей зондовой микроскопии.



**Рисунок 1** – Исходное изображение вытянутых объектов  $5 \times 50 \times 1$  мкм (a) и результаты выделения остовов с дефрагментацией (b), смыканием (c) и образованием отростков (d)

**Figure 1** – The initial image of elongated objects of  $50 \times 50 \times 1$   $\mu\text{m}$  (a) and results of skeletons' separation with defragmentation (b), skeletons closing (c) and skeletons' branches formation (d)

Для выделения остовов объектов непосредственно на полутоновом изображении в зондовой микроскопии могут использоваться детекторы кривизны [13]. Такие детекторы анализируют профилограммы (строки или столбцы) изображения посредством вписывания в локальные окрестности окружности или сферы, размеры которых определяют степень кривизны поверхности. Преимущества детекторов по сравнению с существующими методами, описанными выше, заключаются в следующем.

1. Функция кривизны имеет локальные экстремумы в месте расположения объектов, например, частиц или волокон. Это позволяет детектировать объекты различной яркости (фоновые и расположенные на переднем плане) на слабоконтрастных изображениях.

2. Поиск экстремумов кривизны и точек остова в детекторе происходит вдоль строк и столбцов раstra изображения, исключая эффект смыкания.

3. Для каждого поперечного сечения объекта, аппроксимированного окружностью, определяется одна точка остова, что исключает формирование отростков.

В настоящей работе рассмотрим решение задачи дефрагментации остовов объектов с помощью аппарата прогнозирования, используемого в СЗМ для увеличения быстродействия микроскопа за счёт упреждающего управления, повышения сохранности зондов [14], снижения уровня помех на изображениях.

## Прогнозные изображения и их применение

Рассмотрим основные принципы прогнозирования и построения прогнозных изображений в зондовой микроскопии. Большинство алгоритмов прогнозирования основываются на взаимосвязи уровней яркости смежных точек изображения и определяют прогнозную оценку  $\bar{Z}_n$  в виде линейной комбинации яркостей  $m$  этих точек [14, 15]:

$$\bar{Z}_n = \sum_{i=1}^m \alpha_i Z_{n-i},$$

где  $Z(x, y)$  – двумерная функция яркости.

Исследования [14] показали, что при величине прогнозного интервала  $\Delta y$  в один интервал растровой сетки изображения полином первой степени имеет достаточную для управления сканированием зондового микроскопа точность. Этот полином описывает поведение поверхности на участке столбца  $[y_{i-1}, y_i]$ , а прогнозирование заключается в его экстраполяции до точки  $y_{i+1}$  (рисунок 2):

$$Z(y + \Delta y) = \sum_{j=0}^1 a_j (y + \Delta y)^j. \quad (1)$$

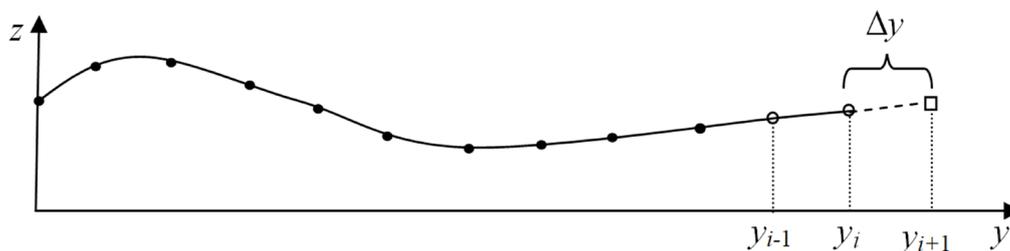
Поскольку интервалы между  $y_{i+1}$ ,  $y_i$ ,  $y_{i-1}$  равны, выражение (1) можно упростить и записать в форме, соответствующей рисунку 2:

$$Z(y_{i+1}) = 2 \cdot Z(y_i) - Z(y_{i-1}). \quad (2)$$

Согласно рисунку 2 на основе двух измеренных строк (профилограмм) СЗМ-изображения

можно получить прогнозную профилограмму, которая используется для управления сканированием. После полного завершения

сканирования из набора прогнозных профилограмм формируется прогнозируемое изображение.



**Рисунок 2** – Прогнозирование рельефа поверхности вдоль столбца раstra СЗМ-изображения: ● – измерительные точки; ○ – измерительные точки, используемые для прогноза; □ – прогнозная точка

**Figure 2** – Predicting the surface relief along the raster column of a SPM image: ● – measuring points; ○ – measuring points used for forecasting; □ – forecast point

Перепишем выражение (2) в следующем виде:

$$Z(y_{i+1}) = Z(y_i) + \frac{\partial Z}{\partial y} \Delta y. \quad (3)$$

Согласно (3) операция прогнозирования эквивалентна пропорционально-дифференциальному звену. Если представить профилограмму в виде сигнала и подать на вход такого звена, то на выходе получим сигнал, в котором колебания яркости в области пересечения объектов будут усилены. Это означает повышение резкости в прогнозном изображении и повышение вероятности выделения таких перепадов, например, детекторами кривизны.

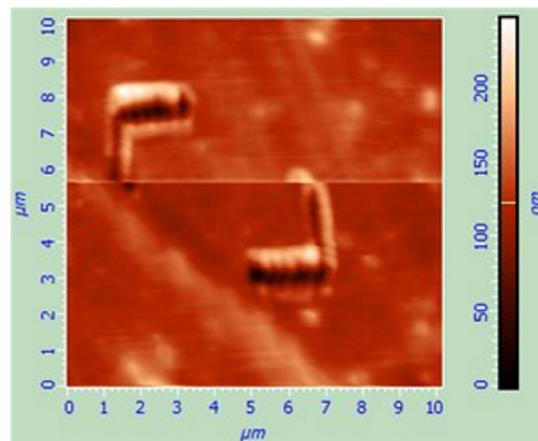
Повышение резкости не единственная полезная опция прогнозирования при обработке СЗМ-изображений. Так расхождение прогнозных оценок и измеренных значений может считаться признаком воздействия внешних помех. На рисунке 3а приведено изображение со смещением строк раstra, вызванным ударной помехой. На рисунке 3b приведены измеренная (кривая 1) и прогнозная (кривая 2) профилограммы изображения в смещённой строке, а также график (кривая 3) интегральной ошибки прогнозирования профиля:

$$\varepsilon_j = \sum_{i=1..j} \frac{|Z_i^m - Z_i^p|}{|Z_i^m|},$$

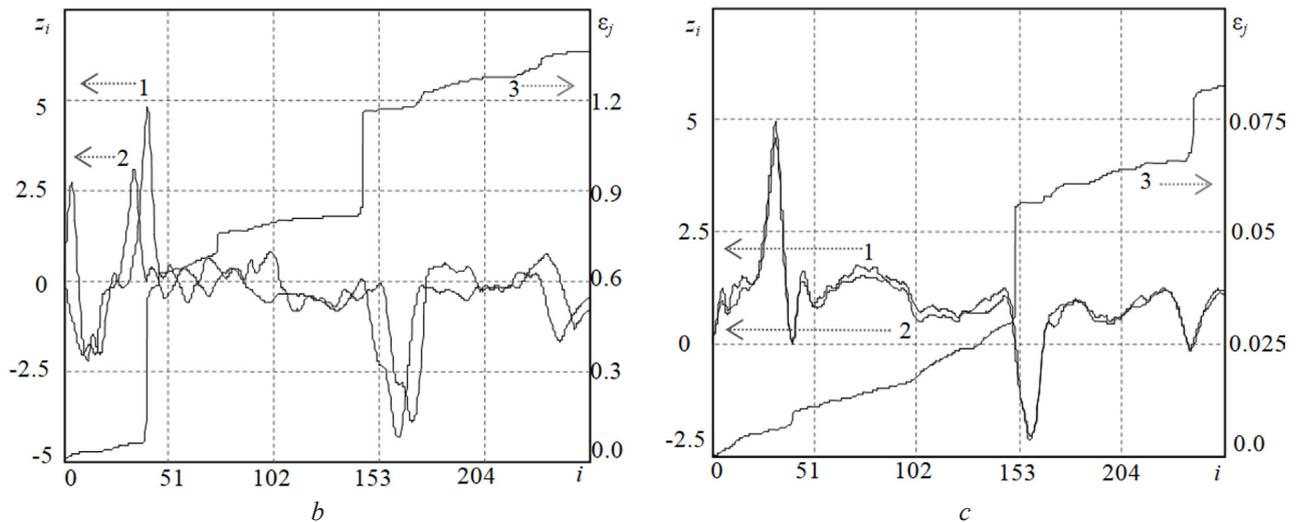
где  $j = 1..N$ ;  $N$  – количество пикселей в строке изображения ( $N = 256$ );  $Z_i^m$  – измеренное

значение;  $Z_i^p$  – прогнозное значение. Сравнение графиков (рисунок 3b) с аналогичными графиками (рисунок 3c) для строки изображения, полученной без помех, показали существенное увеличение интегральной ошибки прогнозирования, что является косвенным признаком воздействия помех и может быть причиной для дополнительной обработки изображения и корректировки результатов измерений.

Рассмотрим, как обработка прогнозных изображений влияет на результат выделения остовов удлинённых объектов. На рисунке 4а представлено изображение триоксида молибдена (<http://www.ntmdt-china.com/resources/scan-gallery/material-science-1/moo3.htm>, режим доступа: 20.12.2024) и отмечена строка изображения, для которой построены реальная 1 и прогнозная 2 профилограммы (рисунок 4b).

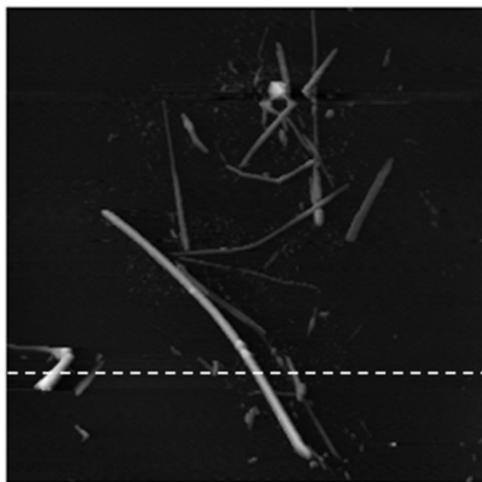


a

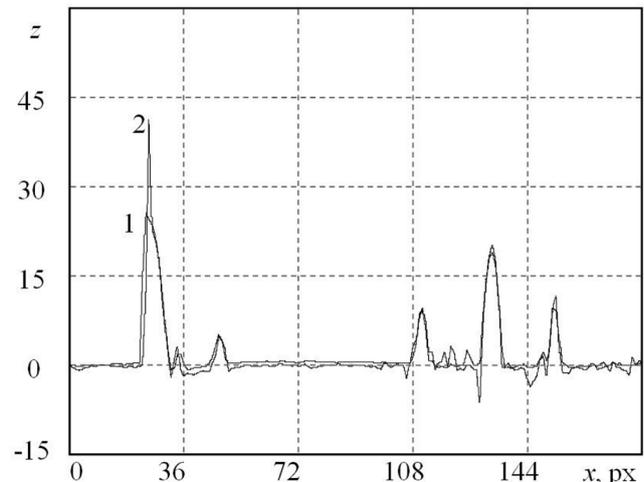


**Рисунок 3** – Изображение со смещённой строкой (a), профилограммы и интегральная ошибка в искажённой (смещённой) строке (b), профилограммы и интегральная ошибка в неискажённой строке (c); 1 – измеренная, 2 – прогнозная кривая; 3 – интегральная ошибка прогнозирования профиля

**Figure 3** – Image with shifted row (a), profilograms of shifted row and integral error for shifted row (b), profilograms of shifted row and integral error for normal row (c); 1 – measured, 2 – forecast curve; 3 – integral error of profile prediction



a



b

**Рисунок 4** – Изображение  $30 \times 30 \times 0,15 \mu\text{м}$  (a) и профилограммы (b) вдоль штриховой линии (1 – реальная; 2 – прогнозная)

**Figure 4** – Image  $30 \times 30 \times 0.15 \mu\text{m}$  (a) and its profilograms (b) along the dashed line (1 – real; 2 – forecasted)

Согласно (3) прогнозная профилограмма отличается большим диапазоном колебаний на участках с резким изменением яркости, что повышает вероятность локализации таких участков детектором кривизны и точность выделения остовов исследуемых объектов на основе прогнозного изображения.

## Результаты и их обсуждение

Преимущества совместного использования прогнозных профилограмм и детекторов кривизны заключаются в следующем:

- использование одного набора данных (строка или столбец растра изображения)

позволяет избежать дополнительного согласования количественных результатов обработки;

– нет необходимости в дополнительных вычислениях, т. к. прогнозное изображение формируется в процессе сканирования;

– усиление изменений яркости на объектах в прогнозной профилограмме повышает вероятность детектирования остова.

Результаты выделения остовов объектов на исходном и прогнозном изображении приведены в таблицах 1 и 2 и на рисунках 5–8. В частности, на рисунке 5 показано изображение

плёнки феррит-граната ([www.ntmdt-china.com/resources/scan-gallery/ferrite-garnet-film/ferrite-garnet-film.htm](http://www.ntmdt-china.com/resources/scan-gallery/ferrite-garnet-film/ferrite-garnet-film.htm), режим доступа: 20.12.2024), а также результат выделения остовов. Из рисунков 5b и 7b следует, что детектор кривизны позволил выделить остовы целевых объектов только с существенными разрывами. Применение прогнозных изображений (рисунок 6a) позволило существенно дефрагментировать остовы (рисунок 6b). Аналогичная ситуация наблюдается на оригинальном и прогнозном изображениях (рисунки 7, 8) трубок триоксида молибдена и результаты выделения остовов.

Таблица 1 / Table 1

**Результаты измерения остовов объектов на исходном (рисунок 5a) и прогнозном (рисунок 6a) изображениях**

**Results of the objects skeletons measuring in the initial (Figure 5a) and forecasted (Figure 6a) images**

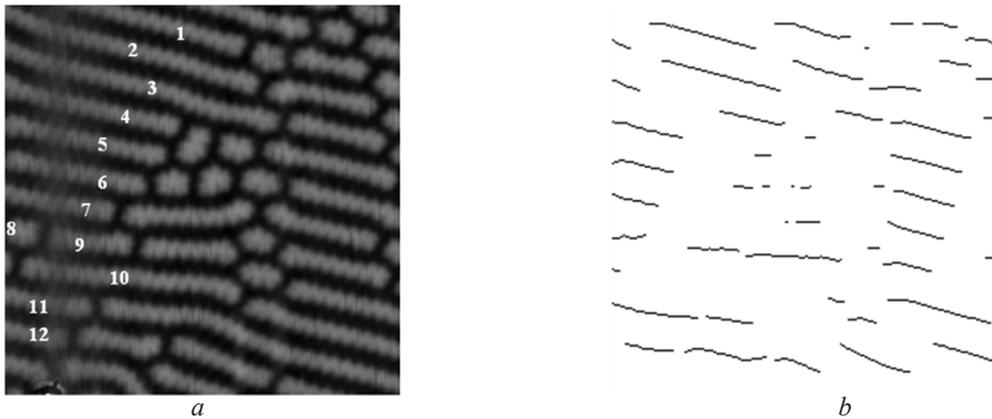
Номер объекта на рисунке 5a The number of the object in Figure 5a	Длина остова, пиксель / Skeleton length, pixel		
	Истинная / True	Измеренная без использования прогноза / Measured without using a prediction	Измеренная с использованием прогноза / Measured using a prediction
1	101	48	51
2	160	13 (78)*	141
3	170	13 (76)*	172
4	110	16 (40)*	110
5	101	46 (12)*	104
6	97	43 (10)*	102
7	85	33 (11)*	87
8	15	19	19
9	64	29	65
10	130	10	135
11	49	53	55
12	36	36	37

\* – распознано два остова, длина второго приведена в скобках

\* – two skeletons are recognized, the length of the second is given in parentheses

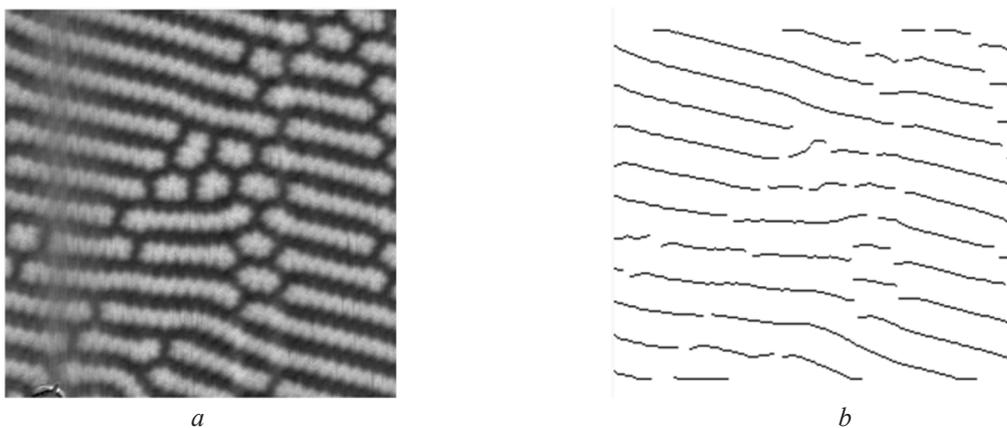
Анализ таблиц 1 и 2 показал, что использование прогнозного изображения позволило повысить качественный (число верно распознанных остовов) и количественный (погрешность определения длины остова)

показатели распознавания. Качественный показатель  $\varepsilon_N$  определялся как относительное отклонение количества нераспознанных остовов  $N$  от общего числа  $N_0$ :  
$$\varepsilon_N = N/N_0.$$



**Рисунок 5** – Исходное изображение плёнки феррит-граната (a) и выделенные остовы (b)

**Figure 5** – Initial image of the ferrite-garnet film (a) and localized skeletons (b)



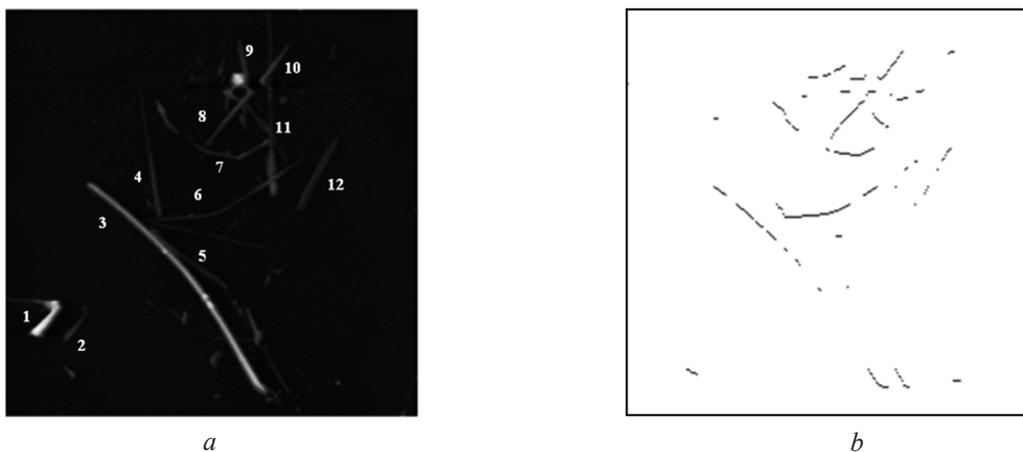
**Рисунок 6** – Прогнозное изображение плёнки феррит-граната (a) и выделенные остовы (b)

**Figure 6** – Forecasted image of the ferrite-garnet film (a) and localized skeletons (b)

Количественным показателем распознавания являлась величина  $\varepsilon_L$ , которая определялась как среднее отклонение максимальной измеренной длины  $i$ -го остова  $L_i$  от истинного значения  $L_{0i}$ :

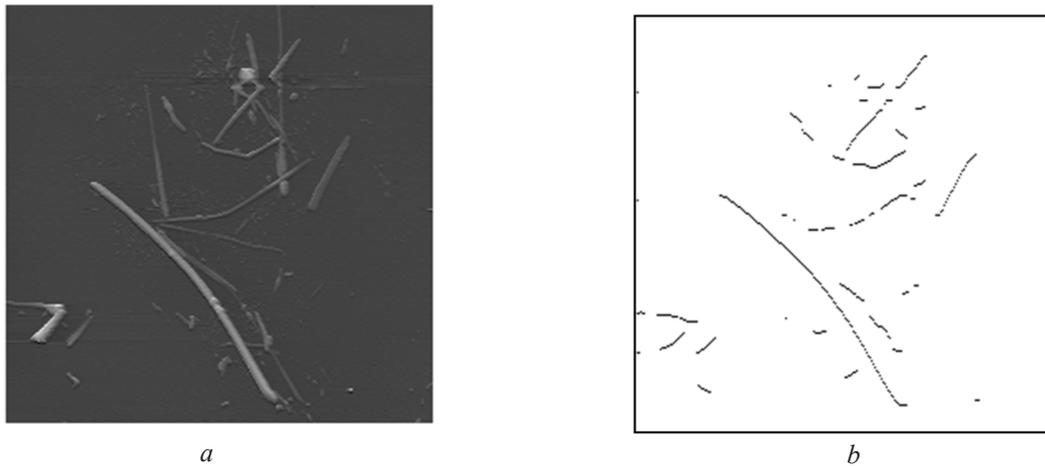
$$\varepsilon_L = \sum_{i=1..N} (|\max(L_i) - L_{0i}|) / N.$$

Расчёт величин  $\varepsilon_N$  и  $\varepsilon_L$  для рисунков 5 и 7 показал следующее.



**Рисунок 7** – Исходное изображение триоксида молибдена (a) и выделенные остовы (b)

**Figure 7** – Initial image of molybdenum trioxide (a) and localized skeletons (b)



**Рисунок 8** – Прогнозное изображение триоксида молибдена (a) и выделенные остовы (b)  
**Figure 8** – Predictive image of molybdenum trioxide (a) and localized skeletons (b)

Таблица 2 / Table 2

**Результаты измерения остовов объектов на исходном (рисунок 7a) и прогнозном (рисунок 8a) изображении**

**Results of the objects skeletons measuring in the initial (Figure 7a) and forecasted (Figure 8a) images**

Номер объекта на рисунке 5a The number of the object in Figure 5a	Длина остова, пиксель / Skeleton length, pixel		
	Истинная / True	Измеренная без использования прогноза / Measured without using a prediction	Измеренная с использованием прогноза / Measured using a prediction
1	24	н/р	19
2	22	н/р	14
3	168	77	164
4	76	н/р	н/р
5	49	н/р	16
6	92	59	77
7	47	30	31
8	41	40	40
9	20	н/р	н/р
10	27	23	26
11	113	н/р	н/р
12	45	34	43

Примечание: н/р – не распознано  
Note н/р – not recognized

Для искажённых помехой объектов, представленных и пронумерованных на рисунке 5a, применение прогнозного изображения позволило снизить величину  $\varepsilon_L$  с 0,48 до 0,1 (таблица 1). В другом случае (рисунок 7a, таблица 2) использование прогнозного изображения

снизило величину  $\epsilon_N$  с 0,5 до 0,25, а величину  $\epsilon_L$  с 0,64 до 0,40.

## Заключение

Установлено, что управляющая информация в виде прогнозных оценок может использоваться при обработке изображений в сканирующей зондовой микроскопии. В частности, увеличение интегральной ошибки прогнозирования является признаком необходимости дополнительной обработки изображений от низкочастотных или ударных помех, оказывающих влияние на отображение удлинённых объектов. Кроме того, формирование и применение при измерениях прогнозных изображений позволяет нивелировать влияние таких помех, увеличить число верно распознанных остовов, а также снизить погрешность определения длины.

## Список использованных источников

1. Persky E., Vardi N., Shperber Y., Kalisky B. Improving the sensitivity of scanning probe microscopy with mechanical vibrations. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 113, p. 173101. **DOI:** 10.1063/1.5051620

2. Eaton P., West P. *Atomic Force Microscopy*. Oxford university press, 2010.

**DOI:** 10.1093/acprof:oso/9780199570454.001.0001

3. Ronneberger O., Fischer Ph., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham., 2015, vol. 9351, pp. 234–241.

**DOI:** 10.1007/978-3-319-24574-4\_28

4. Ramadevi Y., Sridevi T., Poornima B., Kalyani B. Segmentation And Object Recognition Using Edge Detection Techniques, *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 2010, vol. 2, pp. 153–161. **DOI:** 10.5121/IJCSIT.2010.2614

5. Okunev A.G., Mashukov M.Y., Nartova A.V., Matveev A.V. Nanoparticle Recognition on Scanning Probe Microscopy Images Using Computer Vision and Deep Learning. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 7, p. 1285. **DOI:** 10.3390/nano10071285

6. Saha K., Borgfors G., di Baja G.S. A survey on skeletonization algorithms and their applications. *Pattern Recognition Letters*, 2016, vol. 76, pp. 3–12.

**DOI:** 10.1016/j.patrec.2015.04.006

7. Shen W. [et al.]. DeepSkeleton: Learning Multi-Task Scale-Associated Deep Side Outputs for Object Skeleton Extraction in Natural Images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, vol. 26, pp. 5298–5311.

**DOI:** 10.1109/tip.2017.2735182

8. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений. Изд. 3-е, испр. и доп. / Пер. с англ. Л.И. Рубанова, П.А. Чочиа. М.: Техносфера, 2012, 1104 с.

9. Sultane C., Bhalerao M., Bonde S. Character recognition based on skeletonization: a survey. *International Journal of Advanced Research*, 2017, vol. 5, pp. 1503–1519. **DOI:** 10.21474/IJAR01/4564

10. Russ J.C., Neal F.B. *The Image Processing Handbook*. CRC Press, 2017. 7<sup>th</sup> Edition. 1056 P.

**DOI:** 10.1201/b18983

11. Sebastian T.B., Klein P.N., Kimia B.B. Recognition of shapes by editing their shock graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2024, vol. 26, no. 5, pp. 550–571.

**DOI:** 10.1109/TPAMI.2004.1273924

12. Liu Wenping [et al.]. Distance Transform-Based Skeleton Extraction and Its Applications in Sensor Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, vol. 24, no. 9, pp. 1763–1772.

**DOI:** 10.1109/TPDS.2012.300

13. Гуляев П.В. Сегментация изображений фрагментированных реперных меток с использованием комбинированных детекторов кривизны поверхности в зондовой микроскопии / П.В. Гуляев, Е.Ю. Шелковников // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2023. – Т. 25. – № 1. – С. 5–12.

**DOI:** 10.15350/17270529.2023.1.1

14. Липанов А.М. Применение аппарата прогнозирования в сканирующих устройствах растрового типа / А.М. Липанов, Ю.К. Шелковников, М.Р. Гафаров, П.В. Гуляев // *Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика*. – 2010. – № 7. – С. 59–64.

15. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: Диалог-МИФИ, 2002. – 384 с.

## References

1. Persky E, Vardi N, Shperber Y, Kalisky B. Improving the sensitivity of scanning probe microscopy with mechanical vibrations. *Appl. Phys. Lett.* 2018;(113): 173101. **DOI:** 10.1063/1.5051620

2. Eaton P, West P. *Atomic Force Microscopy*. Oxford university press, 2010.

**DOI:** 10.1093/acprof:oso/9780199570454.001.0001

3. Ronneberger O, Fischer Ph, Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham. 2015;(9351):234-241.

**DOI:** 10.1007/978-3-319-24574-4\_28

4. Ramadevi Y, Sridevi T, Poornima B, Kalyani B. Segmentation And Object Recognition Using Edge Detection Techniques, International Journal of Computer Science and Information Technology. 2010;(2):153-161. **DOI:** 10.5121/IJCSIT.2010.2614
5. Okunev AG, Mashukov MY, Nartova AV, Matveev AV. Nanoparticle Recognition on Scanning Probe Microscopy Images Using Computer Vision and Deep Learning. Nanomaterials. 2020;10(7):1285. **DOI:** 10.3390/nano10071285
6. Saha K, Borgefors G, di Baja GS. A survey on skeletonization algorithms and their applications. Pattern Recognition Letters. 2016;(76):3-12. **DOI:** 10.1016/j.patrec.2015.04.006
7. Shen W. [et al.]. DeepSkeleton: Learning Multi-Task Scale-Associated Deep Side Outputs for Object Skeleton Extraction in Natural Images. IEEE Transactions on Image Processing. 2016;(26):5298-5311. **DOI:** 10.1109/tip.2017.2735182
8. Gonzalez RC, Woods RE. Digital image processing. Pearson Education. 2008;954 p.
9. Sultane C, Bhalerao M, Bonde S. Character recognition based on skeletonization: a survey. International Journal of Advanced Research. 2017;(5):1503-1519. **DOI:** 10.21474/IJAR01/4564
10. Russ JC, Neal FB. The Image Processing Handbook. CRC Press, 2017. 7<sup>th</sup> Edition. 1056 P. **DOI:** 10.1201/b18983
11. Sebastian TB, Klein PN, Kimia BB. Recognition of shapes by editing their shock graphs. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2024;26(5):550-571. **DOI:** 10.1109/TPAMI.2004.1273924
12. Liu Wenping [et al.]. Distance Transform-Based Skeleton Extraction and Its Applications in Sensor Networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2013;24(9):1763-1772. **DOI:** 10.1109/TPDS.2012.300
13. Gulyaev PV, Shelkovnikov EY. Segmentation of Fragmented Reference Labels Images Using Combined Surface Curvature Detectors in Probe Microscopy. Chemical Physics and Mesoscopy. 2023;25(1):5-12. (In Russ.). **DOI:** 10.15350/17270529.2023.1.1
14. Lipanov AM, Shelkovnikov YuK, Gafarov MR, Gulyaev PV. Application of the forecasting device in raster scanning devices. Management, Control, Diagnostics. 2010;(7):59-64. (In Russ.).
15. Vatolin D, Ratushnyak A, Smirnov M, Yukin V. Data compression methods. Archiver device, image and video compression. M.: Dialog-MIFI. 2002;384 p.