

УДК 528.854

ЛИНЕЙНАЯ НОРМАЛИЗАЦИЯ ЯРКОСТИ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫРАВНИВАНИЕМ ВЫСОТ ОБЪЕКТОВ

В.В. РАБЦЕВИЧ¹, В.Ю. ЦВЕТКОВ¹, А.В. ШАБЛЮК²¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20 марта 2019

Аннотация. Предложен алгоритм линейной нормализации яркости полутоновых изображений атомно-силовой микроскопии выравниванием высот объектов, расположенных на поверхности. Проведено сравнение разработанного алгоритма с алгоритмами вычитания плоскости первого и второго порядков с помощью анализа трехмерных моделей поверхности.

Ключевые слова: нормализация яркости, выравнивание яркости, атомно-силовая микроскопия, вычитание плоскости первого и второго порядков.

Введение

Изображения, получаемые с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ-изображений), часто содержат различные искажения, приводящие к недостоверности получаемых данных о поверхности материалов. Одним из наиболее распространенных видов искажений является наклон поверхности. Он может появиться из-за неточной установки образца, температурного дрейфа или нелинейности перемещений пьезосканера [1].

Целью работы являлась модификация алгоритма нормализации яркостной составляющей изображения, в основе которого лежит нахождение и устранение разницы высот между наиболее схожими областями, и анализ его эффективности. Достоинства алгоритма заключаются в его линейности и учете морфологии изображения. Будет выполнено сравнение с распространенными алгоритмами выравнивания яркости, применяемыми при обработке АСМ-изображений, такими как вычитание плоскости первого и второго порядков [2]. Их реализации представлены в бесплатно распространяемой программе Gwyddion [3].

Алгоритмы выравнивания яркости для АСМ-изображений

Модификация алгоритма добавляет в исходный алгоритм выравнивая яркости АСМ-изображений по высотам их равноразмерных объектов [4] новые шаги для оптимизации получаемого результата. Исходные данные для разработанного авторами алгоритма – полутоновые изображения $F = \|f(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$, где $f(y, x) \in [0, 255]$. Алгоритм состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Сегментация исходного изображения F и получение матрицы сегментации S . Следует отметить, что выбор исходного алгоритма сегментации значительно влияет на конечный результат. Например, если ему свойственна недостаточная сегментация или получаемые области не коррелируют со значениями яркости на исходном изображении, необходимые данные для дальнейшей нормализации не будут получены. В данной реализации используется алгоритм регрессивного волнового выращивания областей АСМ-изображений с автоматическим обнаружением границ [5].

Шаг 2. Деление матрицы S на четыре равные части C_1, C_2, C_3, C_4 .

Шаг 3. Нахождение в каждой области C_1, C_2, C_3, C_4 наиболее равноразмерных сегментов g_1, g_2, g_3, g_4 , каждый из которых полностью принадлежит одной из областей.

Шаг 4. Нахождение самого яркого P_{\max} и самого тусклого P_{\min} пикселей, которые будут принадлежать сегментам g_1, g_2, g_3, g_4 .

Шаг 5. Нахождение приращения Δ на каждом шаге $\Delta = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}$, где x_1, x_2

и y_1, y_2 – координаты точек P_{\max} и P_{\min} .

Шаг 7. Определение ориентации в пространстве друг относительно друга двух областей с максимальной (P_{\max}) и минимальной (P_{\min}) яркостью. В алгоритме возможны три варианта ориентации: вертикальная, горизонтальная и диагональная. В изображениях со сложной морфологией возможны как автоматическое определение расположения областей, так и статическая установка необходимой ориентации.

Шаг 8. Определение точек, принадлежащих линии раздела, как средних между координатами центров двух сегментов. Расположение линии раздела на плоскости будет зависеть от ориентации, найденной ранее.

Шаг 9. Добавление или исключение на исходном изображении (начиная от линии раздела) $\Delta \times i$ при приближении к P_{\max} или P_{\min} соответственно. В результате работы алгоритма формируется новое изображение с выровненной яркостью. Алгоритм позволяет внести изменения в изображение, не нарушая его структуры [4].

Оценка эффективности алгоритмов выравнивания яркости

Для анализа использованы следующие алгоритмы, часто применяемые для устранения наклона образца: вычитание плоскости первого и второго порядков (значения пикселей изображения аппроксимируются полиномом заданного порядка, после этого выделяется и удаляется составляющая фона) [1].

Для оценки эффективности работы алгоритмов нормализации яркости были подобраны АСМ-изображения с заметным наклоном образца (рис. 1) и построены трехмерные модели их поверхностей (рис. 2). На рис. 3–5 представлены результаты нормализации яркости разработанным алгоритмом и при вычитании плоскости первого и второго порядков.

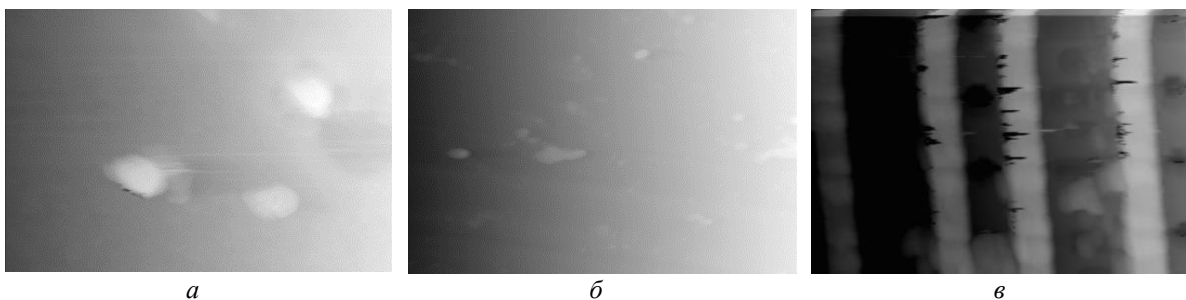


Рис. 1. Исходные АСМ-изображения: *a* – АСМ 1; *б* – АСМ 2; *в* – АСМ 3

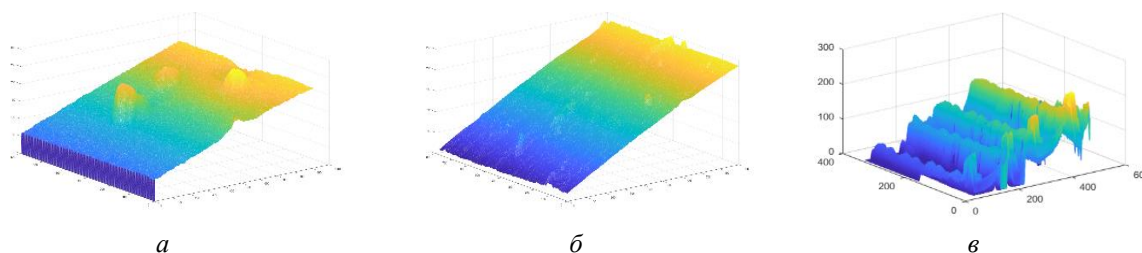


Рис. 2. Трехмерные модели поверхностей изображений 1 (*a*), 2 (*б*), 3 (*в*)

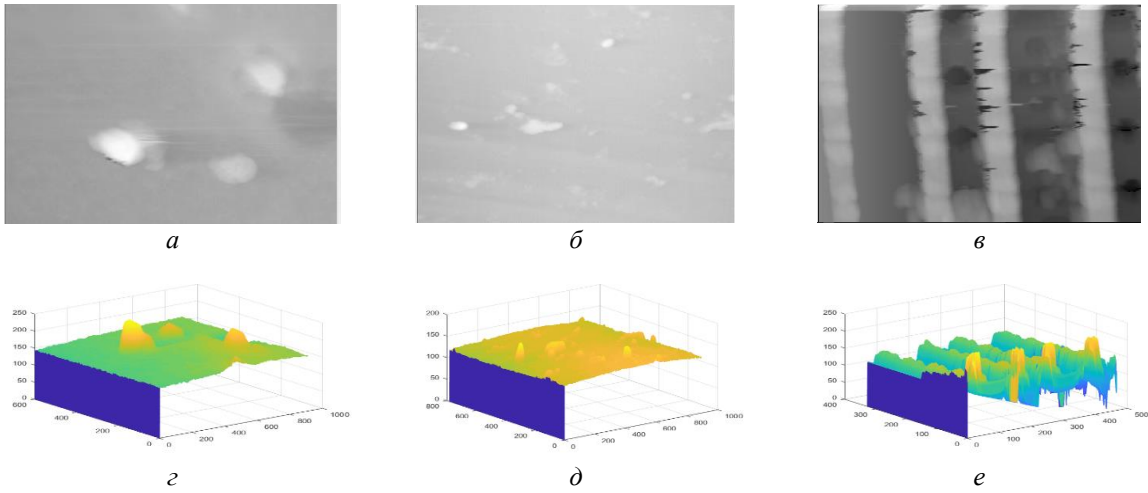


Рис. 3. Результаты нормализации яркости с помощью разработанных алгоритмов (*а, б, в*); и трехмерные модели поверхностей образца (*з, д, е*)

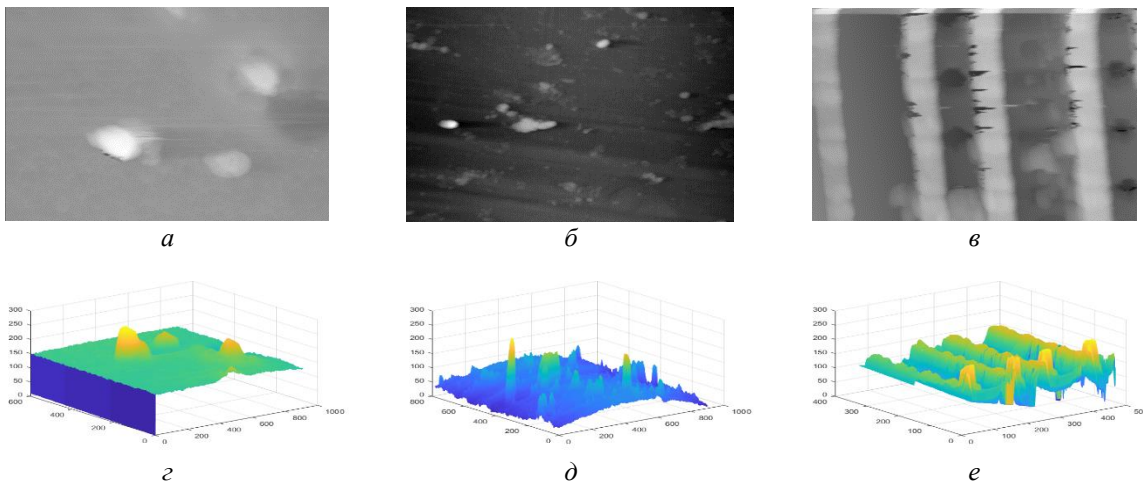


Рис. 4. Результат нормализации яркости при вычитании плоскости первого порядка (*а, б, в*); и трехмерные модели поверхностей образца (*з, д, е*)

Для оценки результатов нормализации яркости было выбрано контрольное тестовое изображение и выполнено увеличение и уменьшение его яркости на 10, 30 и 50 процентов (рис. 6), построены трехмерные модели поверхностей (рис. 7). На рис. 8–10 представлены результаты нормализации яркости контрольного изображения разработанным алгоритмом и при вычитании плоскости первого и второго порядка, соответственно.

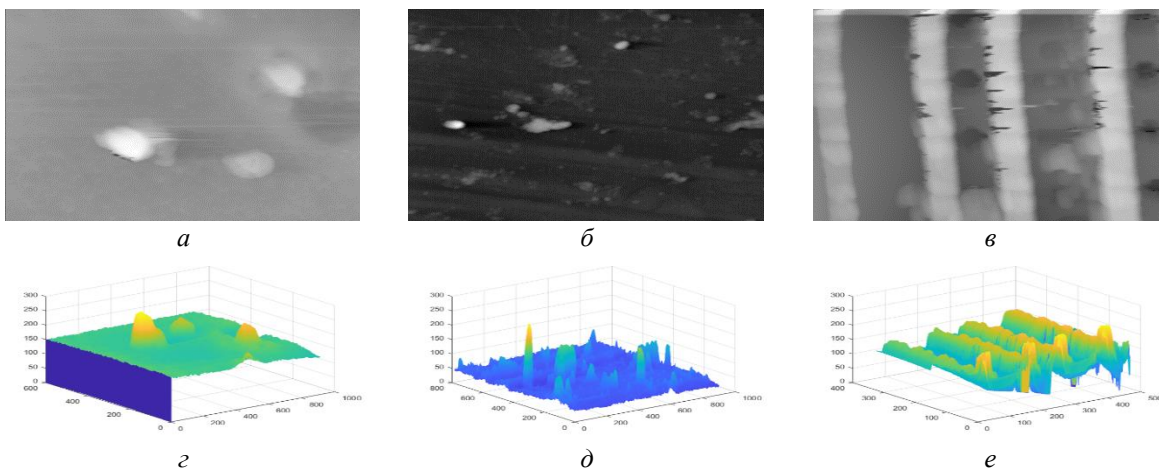


Рис. 5. Результат нормализации яркости при вычитании плоскости второго порядка (*а, б, в*); и трехмерные модели поверхностей образца (*з, д, е*)

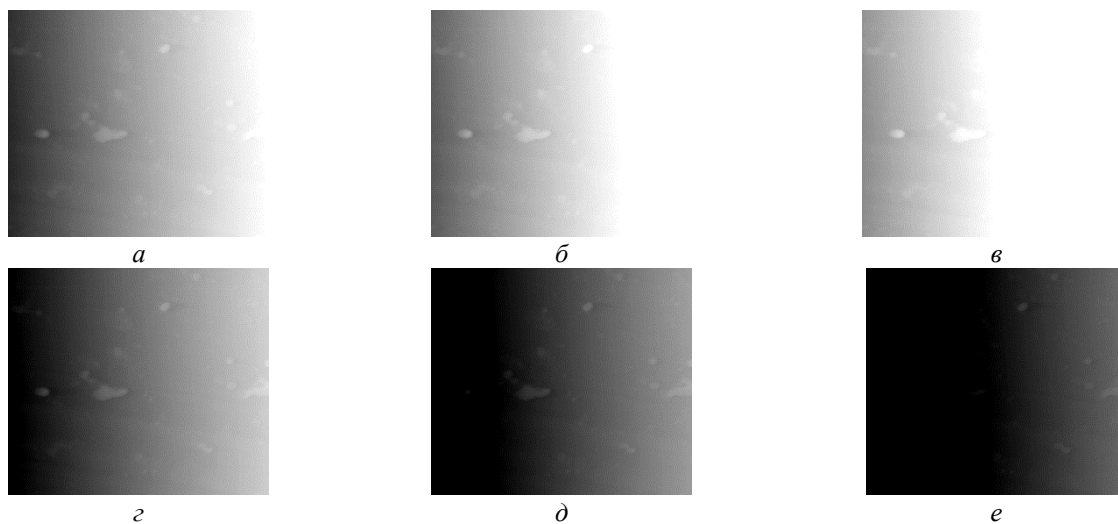


Рис. 6. Контрольное изображение с увеличенной на 10 % (а), 30 % (б), 50 % (в), и уменьшенной на 10 % (з), 30 % (д), 50 % (е) яркостью

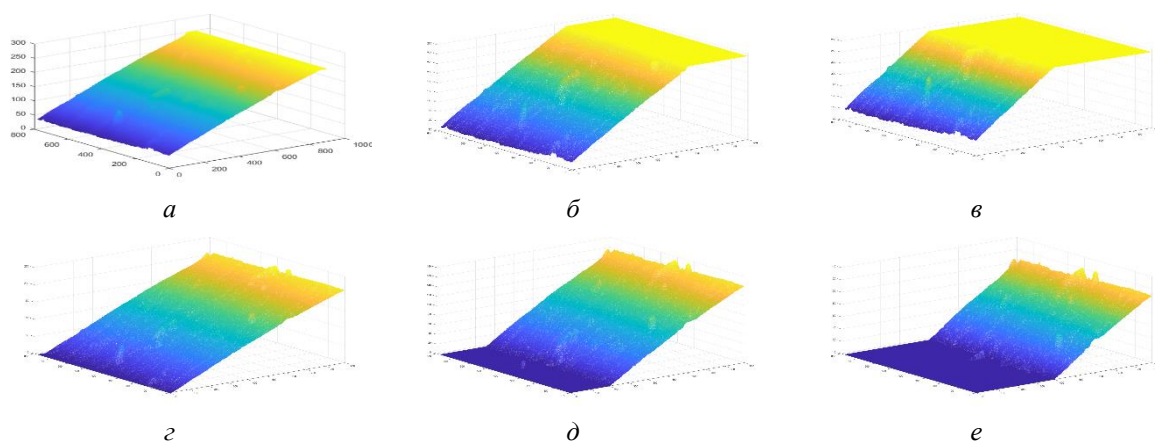


Рис. 7. Трехмерная поверхность контрольного изображения с увеличенной на 10 % (а), 30 % (б), 50 % (в), и уменьшенной на 10 % (з), 30 % (д), 50 % (е) яркостью

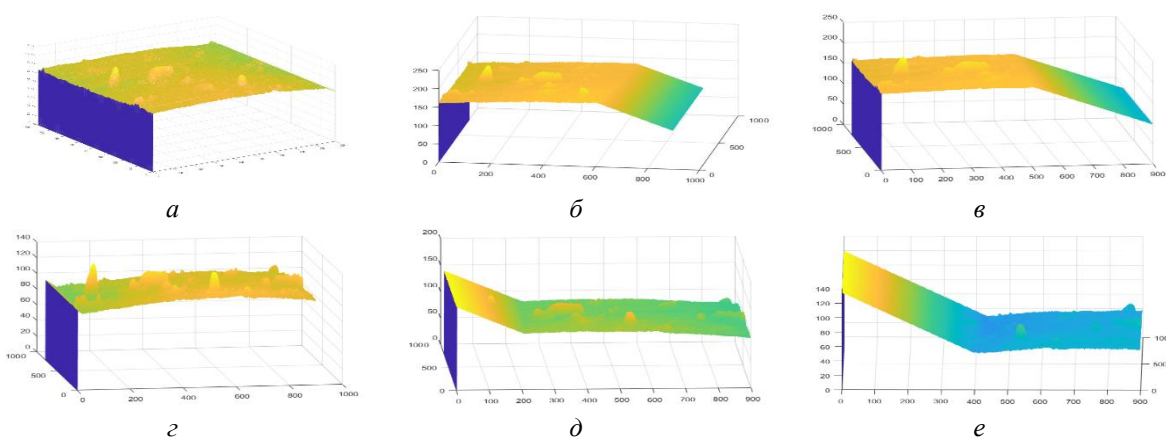


Рис. 8. Трехмерные поверхности контрольного изображения с увеличенной на 10 % (а), 30 % (б), 50 % (в), и уменьшенной на 10 % (з), 30 % (д), 50 % (е) яркостью после нормализации яркости разработанным алгоритмом

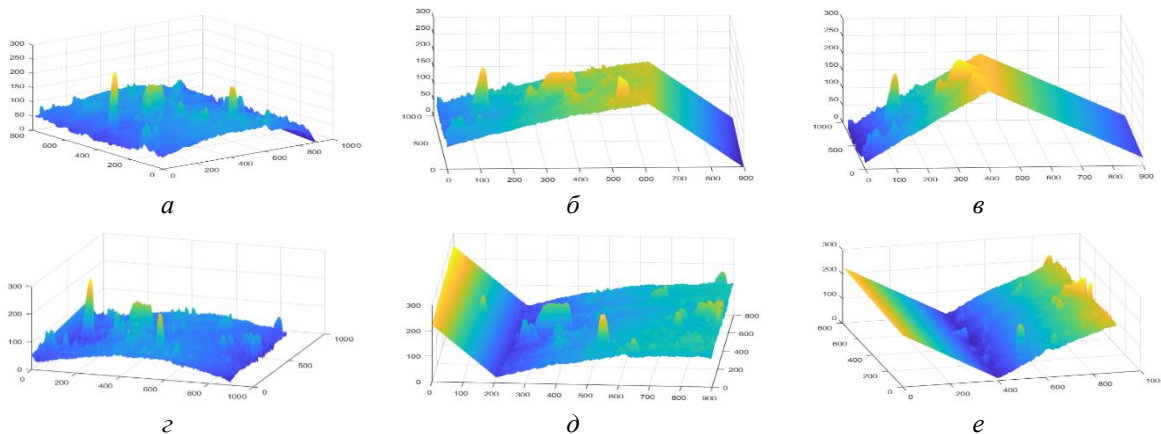


Рис. 9. Трехмерные поверхности контрольного изображения с увеличенной на 10 % (а), 30 % (б), 50 % (в), и уменьшенной на 10 % (г), 30 % (д), 50 % (е) яркостью после вычитания плоскости первого порядка

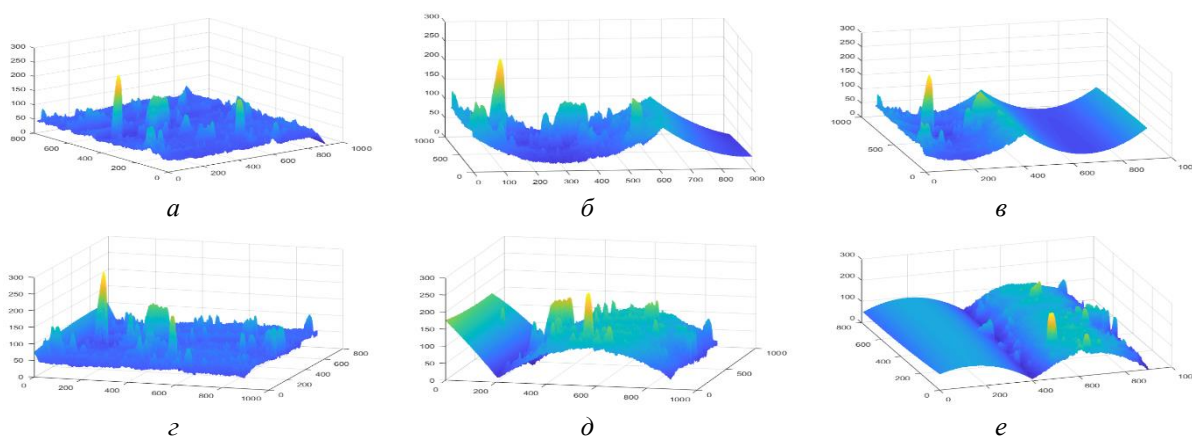


Рис. 10. Трехмерные поверхности контрольного изображения с увеличенной на 10 % (а), 30 % (б), 50 % (в), и уменьшенной на 10 % (г), 30 % (д), 50 % (е) яркостью после вычитания плоскости второго порядка

На основе анализа представленных трехмерных поверхностей можно сделать вывод о том, что все алгоритмы способны убрать наклон и нормализовать поверхность, однако при внесении дополнительных яркостных искажений только разработанный алгоритм сохраняет линейность формы трехмерной поверхности изображения. Остальные методы способны внести дополнительные нелинейные искажения, которые, в свою очередь, могут привести к искривлению границ частиц, расположенных на поверхности.

Заключение

Результат работы созданного алгоритма сильно зависит от метода сегментации, выбранного на начальном этапе. При недостаточной сегментации исходного изображения будет невозможно выполнить все последующие шаги нормализации

На основе анализа представленных трехмерных поверхностей можно сделать вывод о том, что использование алгоритмов вычитания плоскости первого и второго порядков может оставить искривление поверхности и исказить границы исходных объектов. Применение разработанного алгоритма линейной нормализации не меняет форму поверхности при внесении дополнительных искажений.

LINEAR BRIGHTNESS NORMALIZATION OF AFM-IMAGES BY HEIGHT LEVELLING OF OBJECTS

V.V. RABTSEVICH, V.Yu. TSVIATKOU, A.V. SHABLIUK

Abstract. The algorithm for half-tone images of atomic force microscopy linear brightness normalization, by leveling the heights of objects located on the surface, is proposed. The developed algorithm is compared with the first and second order levelling algorithms using the analysis of three-dimensional models of the surface.

Keywords: brightness normalization, brightness levelling, atomic force microscopy, subtraction of a plane, the first and second order, levelling.

Список литературы

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии Нижний Новгород: РАН Институт физики микроструктур, 2004.
2. Eaton P., West P. Atomic Force Microscopy London: Oxford University Press, 2011. P. 105–108.
3. Gwiddion [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gwiddion.net> (дата обращения: 02.03.2019).
4. Рабцевич В.В., Цветков В.Ю., Ловецкий М.Ю. // Матер. XVII Междунар. конф. «Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации» Минск, 20 сентября 2018 г. С. 190–195.
5. Рабцевич В.В., Цветков В.Ю. // Сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. «BIG DATA and Advanced Analytics» Минск, 13–14 марта 2019 года В 2 ч. Ч.2. Минск, БГУИР, 2019. С. 203–209