

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING**

УДК 004.932  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-215-231>

Поступила в редакцию 12.07.2018  
Received 12.07.2018

**В. В. Рабцевич<sup>1</sup>, В. Ю. Цветков<sup>1</sup>, Т. А. Кузнецова<sup>2</sup>, С. А. Чижик<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>3</sup>*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**СЕГМЕНТАЦИЯ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ЛОКАЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ С ВЫБОРОМ ПИКСЕЛОВ В ПОРЯДКЕ УБЫВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ**

**Аннотация.** Разработан алгоритм сегментации изображений атомной силовой микроскопии (АСМ), использующий волновое выращивание областей вокруг локальных максимумов в результате присоединения к ним соседних пикселей, выбираемых в порядке убывания значений. Сущность алгоритма состоит в использовании порога яркости, постепенно изменяющегося от максимума к минимуму, для выбора точек роста или для присоединения к существующим областям. Особенности разработанного алгоритма сегментации являются итеративно расширяемые границы, выбор начальных точек роста и точек, присоединяемых к областям с ориентацией на значения порога с постепенным снижением от максимума к минимуму. Указанные особенности позволили устранить ошибки, характерные для алгоритмов маркерного водораздела, выращивания областей и водораздела по классическому алгоритму Винсента–Солли, которые обычно используются при сегментации АСМ-изображений. Разработанный алгоритм сравнивался со следующими стандартными алгоритмами: классический алгоритм водораздела, маркерный водораздел, выращивание областей. Сравнение проводилось на тестовых и оригинальных АСМ-изображениях. Алгоритмы реализовывались на Matlab и C++. Для количественной оценки ошибок сегментации использовался набор бинарных масок. Эксперименты показали, что разработанный алгоритм обеспечивает выделение границ областей без ошибок и более высокую скорость сегментации в сравнении с алгоритмами выращивания областей и водораздела Винсента–Солли. Полученный результат может быть использован для обработки АСМ-изображений поверхностей неорганических материалов в субмикро- и наноразмерном диапазоне.

**Ключевые слова:** сегментация изображений, атомная силовая микроскопия, выращивание областей, водораздел Винсента–Солли, локальный максимум, АСМ-изображения, маркерный водораздел

**Для цитирования:** Сегментация АСМ-изображений на основе волнового выращивания областей локальных максимумов с выбором пикселей в порядке убывания значений/ В. В. Рабцевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №2. – С. 215–231. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-215-231>

**V. V. Rabtsevich<sup>1</sup>, V. Yu. Tsviatkou<sup>1</sup>, T. A. Kuznetsova<sup>2</sup>, S. A. Chizhik<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>3</sup>*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**SEGMENTATION OF AFM IMAGES BASED ON WAVE REGIONS GROWING OF LOCAL MAXIMUMS WITH PIXELS SELECTION IN THE DECREASE ORDER OF VALUES**

**Abstract.** An algorithm for segmentation of images of atomic force microscopy is developed by using wave-growing regions around local maxima as a result of adjoining neighboring pixels to them, selected in descending order of values. The essence of the algorithm is to use the brightness threshold, gradually changing from maximum to minimum, to select growth points or to join existing areas. The features of the developed segmentation algorithm are iteratively expandable boundaries, the choice of initial growth points and points attached to regions with a focus on threshold values with a gradual

decrease from maximum to minimum. These features made it possible to eliminate the segmentation errors of the AFM images, characteristic of the algorithms of the marker watershed, the cultivation of areas and the watershed using the classical Vincent–Sollie algorithm, which are commonly used. The developed algorithm was compared with standard algorithms such as: classic watershed algorithm, marker watershed, growing areas. The comparison was carried out on test and original AFM images. The algorithms were implemented in Matlab and C++. A set of binary masks was used to quantify segmentation errors. The results showed that the developed algorithm provides the selection of the boundaries of the regions without errors and a higher segmentation rate in comparison with the algorithms of growing the regions and the Vincent–Sollie watershed. The result can be used to process AFM images of the surfaces of inorganic materials in the submicro and nano range.

**Keywords:** image segmentation, atomic force microscopy, growing areas, the Vincent–Sollie watershed, local maximum, AFM images, marker watershed

**For citation:** Rabtsevich V. V., Tsviatkou V. Yu., Kuznetsova T. A., Chizhik S. A. Segmentation of AFM images based on wave regions growing of local maximums with pixels selection in the decrease order of values. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 215–231 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-215-231>

**Введение.** Установление размера структурных составляющих является одной из ключевых задач материаловедения при определении зависимости «структура–свойства» [1–3]. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) часто выступает наиболее информативным методом исследования поверхности и результатов ее модификации в субмикро- и наноразмерном диапазоне [4–6]. При установлении размера структурных составляющих в автоматическом режиме одной из проблем является сегментация АСМ-изображений, позволяющая отделить одну частицу, фазу или зерно от другой [7, 8]. Проблема заключается в специфике АСМ-изображений, где яркость пикселей несет информацию о рельефе поверхности или об интенсивности силового воздействия со стороны поверхности на микрозонд [9–11]. Особенно сложно сегментировать АСМ-изображения в условиях, когда яркость границ не имеет значительного контраста с отделяемыми объектами и объекты сливаются.

Часто используемые в АСМ пороговые алгоритмы сегментации [12] обладают минимальной вычислительной сложностью, но позволяют получить корректные результаты только в случае простой топологии поверхности, разделяемой на объекты и фон, когда выбор порога не оказывает влияния на число выделяемых сегментов.

Для сегментации изображений со сложной топологией применяются, как правило, алгоритмы выращивания областей [13] с относительно низкой вычислительной сложностью, а также более сложные алгоритмы морфологического водораздела (с использованием градиента и маркерные [14]). В алгоритмах выращивания областей выбираются начальные точки роста, к которым присоединяются соседние пиксели со схожей яркостью. Алгоритмы градиентного водораздела (С. Буше [15], Винсента–Солли [16], П. Джеквей [17], Й. Вейкерт [18], С. Джанк–Я. Шаркански [19]) используют вычисление градиента для каждого пикселя изображения, определение локальных минимумов, обход пикселей с приоритетной очередью (приоритет определяется яркостью пикселей).

Алгоритмы маркерного водораздела используют морфологические операции открытия и закрытия для автоматической расстановки маркеров фона и объектов. При обработке АСМ-изображений со сложной топологией с помощью алгоритмов выращивания областей [13] часто проявляется недостаточная или чрезмерная сегментация, вызванная ошибками определения начальных точек роста областей, неточностью задания критериев завершения процесса их роста, неверной очередностью обработки областей. Аналогичные ошибки в рассматриваемых условиях характерны для алгоритмов градиентного и маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров [15–19]. Эти алгоритмы не в полной мере учитывают специфику АСМ-изображений, в которых яркость пикселей напрямую связана со значениями физических параметров, что приводит к погрешностям определения линий водораздела и местоположения маркеров.

Алгоритмы водораздела под контролем оператора [20] позволяют существенно уменьшить или полностью устранить ошибки сегментации за счет расстановки маркеров оператором, но требуют значительных временных затрат и эффективны поэтому для обработки АСМ-изображений поверхностей только с небольшим числом объектов.

Для устранения отмеченных недостатков предлагается связать процессы выбора начальных точек и роста областей с изменением значения порога яркости пикселей АСМ-изображения от

максимума к минимуму. Это обеспечит автоматический выбор и упорядочение начальных точек роста по яркости, одинаковую скорость роста областей вне зависимости от их локализации, размеров и формы, но с учетом их яркости, а также равномерное разделение всего изображения на области (полную сегментацию).

**Алгоритм волнового выращивания областей локальных максимумов.** Предложим алгоритм сегментации АСМ-изображений на основе волнового выращивания областей локальных максимумов с выбором пикселей в порядке убывания значений (ВОЛМА). Сущность алгоритма состоит в использовании изменяющегося от максимума к минимуму порога яркости для выбора пикселей АСМ-изображения, которые образуют точки роста областей (локальные максимумы) или присоединяются к существующим областям (смежные с пикселями, включенными в области и имеющими такую же или большую яркость). В отличие от классического выращивания областей [14], использующего последовательную обработку сегментов, в предложенном алгоритме границы всех областей расширяются итеративно (волнообразно) за счет присоединения необработанных смежных значимых пикселей, яркости которых удовлетворяют порогу, понижаемому после обработки всех значимых пикселей. В отличие от древовидно-волнового выращивания областей [21], определяющего все точки роста при инициализации и присоединяющего к областям смежные пиксели без учета их значений, в предложенном алгоритме выбор начальных точек роста и присоединяемых к областям смежных пикселей связан со значением порога, постепенно снижаемым от максимума к минимуму.

Алгоритм ВОЛМА волнового выращивания областей локальных максимумов состоит из следующих шагов.

1) Загрузка матрицы  $M_Z = \|m_Z(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  зондирования, в которой значение каждого  $B$ -разрядного элемента  $m_Z(y, x) \in [0, 2^B - 1]$  определяется высотой (трением или вязкостью) соответствующей точки поверхности, где  $Y, X$  – размеры матрицы зондирования по вертикали и горизонтали.

2) Формирование матрицы  $M_S = \|m_S(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  сегментации, элементы которой определяются с помощью выражения  $m_S(y, x) \leftarrow 0$  при  $y = 0, \overline{Y-1}, x = 0, \overline{X-1}$ . Счетчику  $C_S$  сегментов присваивается нулевое значение:  $C_S \leftarrow 0$ .

3) Счетчику  $C_Q$  циклов сегментации присваивается значение порога яркости, соответствующее верхнему уровню квантования значений пикселей АСМ-изображения:  $C_Q \leftarrow 2^B - 1$ .

4) Начало цикла сегментации. Формирование матрицы  $M_Q(C_Q) = \|m_Q(C_Q, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  значимости для значения  $C_Q$  порога яркости, элементы которой определяются с помощью выражения

$$\begin{cases} (m_Z(y, x) = C_Q) \Rightarrow (m_Q(C_Q, y, x) \leftarrow 1), \\ (m_Z(y, x) \neq C_Q) \Rightarrow (m_Q(C_Q, y, x) \leftarrow 0) \end{cases} \quad (1)$$

при  $y = 0, \overline{Y-1}, x = 0, \overline{X-1}$ .

5) Проверка матрицы значимости на ноль. Вычисляется сумма всех элементов матрицы  $M_Q(C_Q)$  значимости для значения  $C_Q$  порога яркости с помощью выражения

$$S_Q = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} m_Q(C_Q, y, x). \quad (2)$$

Если  $S_Q = 0$ , то осуществляется переход на окончание цикла сегментации (шаг 15).

6) Проверка счетчика сегментов на ноль. Если  $C_S = 0$ , то осуществляется переход на шаг 13 к поиску новых областей.

7) Счетчику  $C_W$  циклов волновой сегментации присваивается нулевое значение:  $C_W \leftarrow 0$ .

8) Начало цикла волновой сегментации. Формирование матрицы  $M_T(C_Q, C_W) = \|m_T(C_Q, C_W, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  выращивания областей для значения  $C_Q$  порога яркости и  $C_W$ -го уровня сегментации, элементы которой определяются с помощью выражения  $m_T(C_Q, C_W, y, x) \leftarrow 0$  при  $y = 0, \overline{Y-1}, x = 0, \overline{X-1}$ .

9) Волновое выращивание областей. Элементы матрицы  $M_T(C_Q, C_W)$  переопределяются с помощью выражения

$$\begin{aligned} (m_S(y, x) \neq 0) \wedge (m_Q(C_Q, y + j, x + i) = 1) \wedge (m_T(C_Q, C_W, y + j, x + i) = 0) \Rightarrow \\ \Rightarrow (m_T(C_Q, C_W, y + j, x + i) \leftarrow m_S(y, x)) \end{aligned} \quad (3)$$

при  $y = \overline{0, Y-1}$ ,  $x = \overline{0, X-1}$ ,  $j = \overline{-1, 1}$ ,  $i = \overline{-1, 1}$ .

10) Проверка условия выхода из цикла волнового выращивания областей. Определяется число  $S_T$  значимых элементов матрицы  $M_T(C_Q, C_W)$  с помощью выражения

$$S_T = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} m_T(C_Q, C_W, y, x) \quad (4)$$

при  $y = \overline{0, Y-1}$ ,  $x = \overline{0, X-1}$ .

Если  $S_T = 0$  (новых присоединяемых элементов нет), то осуществляется выход из цикла волновой сегментации и переход на шаг 13. Значение счетчика  $C_W$  циклов волновой сегментации указывает на число орбит роста.

11) Обновление матрицы сегментации. В матрицу сегментации  $M_S$  добавляются новые значимые элементы с помощью выражения

$$m_S(y, x) \leftarrow m_S(y, x) + m_T(C_Q, C_W, y, x) \quad (5)$$

при  $y = \overline{0, Y-1}$ ,  $x = \overline{0, X-1}$ .

12) Окончание цикла волновой сегментации. Значение счетчика  $C_W$  циклов волновой сегментации увеличивается на единицу:  $C_W \leftarrow C_W + 1$ , и осуществляется переход в начало цикла волновой сегментации на шаг 8.

13) Поиск новых областей. Элементы матрицы  $M_Q(C_Q)$ , удовлетворяющие условию

$$(m_Q(C_Q, y, x) = 1) \wedge (m_S(y, x) = 0), \quad (6)$$

сегментируются с помощью алгоритма выращивания областей [13]. В результате формируется матрица  $M_N(C_Q) = \left\| m_N(C_Q, y, x) \right\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$  новых областей для значения  $C_Q$  порога яркости, номера элементов которой  $m_N(C_Q, y, x) \in [1, C_N(C_Q)]$  указывают на изолированные совокупности единичных элементов матрицы  $M_Q(C_Q)$ , удовлетворяющих условию (1), где  $C_N(C_Q)$  – число сегментов, выделенных в матрице  $M_Q(C_Q)$ .

14) Дополнение матрицы сегментации новыми областями. Осуществляется перенос номеров из матрицы  $M_N(C_Q)$  новых областей в матрицу сегментации  $M_S$  и приращение счетчика сегментов с помощью выражений:

$$(m_N(C_Q, y, x) > 0) \Rightarrow (m_S(y, x) \leftarrow m_N(C_Q, y, x) + C_S) \quad (7)$$

при  $y = \overline{0, Y-1}$ ,  $x = \overline{0, X-1}$ ;

$$C_S = C_S + C_N(C_Q). \quad (8)$$

15) Окончание цикла сегментации. Значение счетчика  $C_Q$  циклов сегментации уменьшается на единицу:  $C_Q \leftarrow C_Q - 1$ , что соответствует уменьшению на единицу значения порога яркости. Затем счетчик  $C_Q$  циклов проверяется на отрицательное значение. Если  $C_Q \geq 0$ , то осуществляется переход в начало цикла сегментации (шаг 4 алгоритма). Если  $C_Q < 0$ , то осуществляется выход из цикла и завершение алгоритма.

В результате выполнения данного алгоритма формируется матрица  $M_S$  сегментации, номера элементов которой  $m_N(C_Q, y, x) \in [1, C_N(C_Q)]$  при  $y = \overline{0, Y-1}$ ,  $x = \overline{0, X-1}$  указывают на сегменты, к которым они принадлежат.

**Оценка результатов сегментации АСМ-изображений.** Для объективной оценки результатов сегментации АСМ-изображений сформирован набор  $\{M_T(j)\}_{(j=\overline{1, J})}$  из  $J = 3$  тестовых АСМ-

матриц  $M_T(j) = \|m_T(j, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  размером  $Y \times X$  по вертикали и горизонтали, элементы  $m_T(j, y, x)$  которых содержат информацию о расстояниях от подложки до поверхностей расположенных на ней тестовых объектов одинакового размера. Основания этих объектов лежат в параллельных плоскостях, а проекции их центральных точек на подложку находятся в узлах виртуальной квадратной сетки. Первая АСМ-матрица задает расположение 9 торов одинаковой высоты; вторая – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер; третья – комбинации 18 фрагментов сфер. На рис. 1 приведены тестовые АСМ-изображения, полученные в результате преобразования значения каждого элемента АСМ-матриц в яркость соответствующего пиксела.

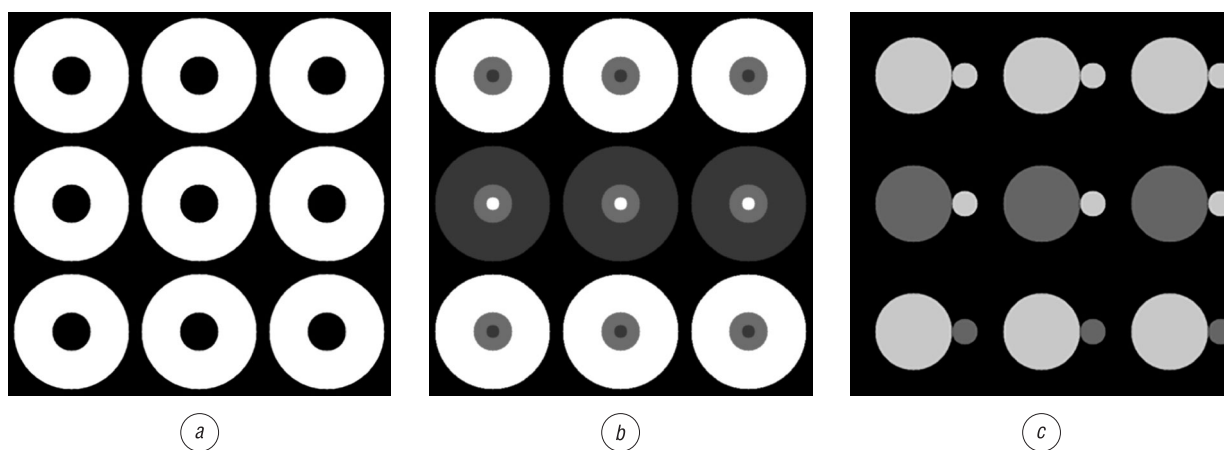


Рис. 1. Тестовые АСМ-изображения: *a* – АСМ-1, *b* – АСМ-2, *c* – АСМ-3

Fig. 1. Test AFM-images: *a* – AFM-1, *b* – AFM-2, *c* – AFM-3

Для каждого тестового АСМ-изображения на рис. 2 приведены по три горизонтальных профиля яркости. Профили получены вдоль прямых, проходящих через центры горизонтальных проекций тестовых объектов. Результатом неполной сегментации тестовых АСМ-изображений с прерыванием процесса обработки на уровне подложки должна быть матрица, в которой элементы, соответствующие поверхностям тестовых объектов, принимают значения номеров сегментов (от 1 до 9 для тестовых АСМ-изображений, приведенных на рис. 1, *a, b*; от 1 до 18 для тестового АСМ-изображения, приведенного на рис. 1, *c*), а элементы, соответствующие пространству между тестовыми объектами (подложке), принимают нулевые значения (эталонная матрица неполной сегментации).

Результатом полной сегментации тестовых АСМ-изображений должна быть матрица, в которой элементы, соответствующие поверхностям тестовых объектов и примыкающим к ним фрагментам подложки, принимают значения номеров сегментов (от 1 до 9 для тестовых АСМ-изображений, приведенных на рис. 1, *a, b*; от 1 до 18 для тестового АСМ-изображения, приведенного на рис. 1, *c*) (эталонная матрица полной сегментации).

Для оценки ошибок сегментации используется набор бинарных масок (рис. 3). Три маски представляют собой проекции тестовых объектов на подложку, формируются в результате бинаризации эталонных матриц сегментации и предназначены для оценки ошибок неполной сегментации. Одна маска формируется в результате разделения эталонной матрицы сегментации на 9 квадратов одинакового размера. Она предназначена для оценки ошибок полной сегментации. Полученные посредством различных алгоритмов матрицы сегментации сопоставляются с масками, и вычисляется нормированная ошибка  $E_S$  сегментации с помощью выражения  $E_S = E_O + E_I$ ,

$$\text{где } E_O = \frac{\sum_{i=1}^9 S_O(i)}{S_E} \text{ – нормированная ошибка избыточной сегментации; } E_I = \frac{\sum_{i=1}^9 S_I(i)}{S_E} \text{ – нормированная}$$

ошибка недостаточной сегментации;  $i$  – порядковый номер тестового объекта;  $S_E$  – число значимых элементов маски;  $S_O(i)$  – число пикселей сегмента, принадлежащих  $i$ -му тестовому объекту и попадающих на незначимые элементы маски;  $S_I(i)$  – число значимых элементов маски, соответствующих  $i$ -му тестовому объекту и не попадающих на пиксели соответствующего сегмента.



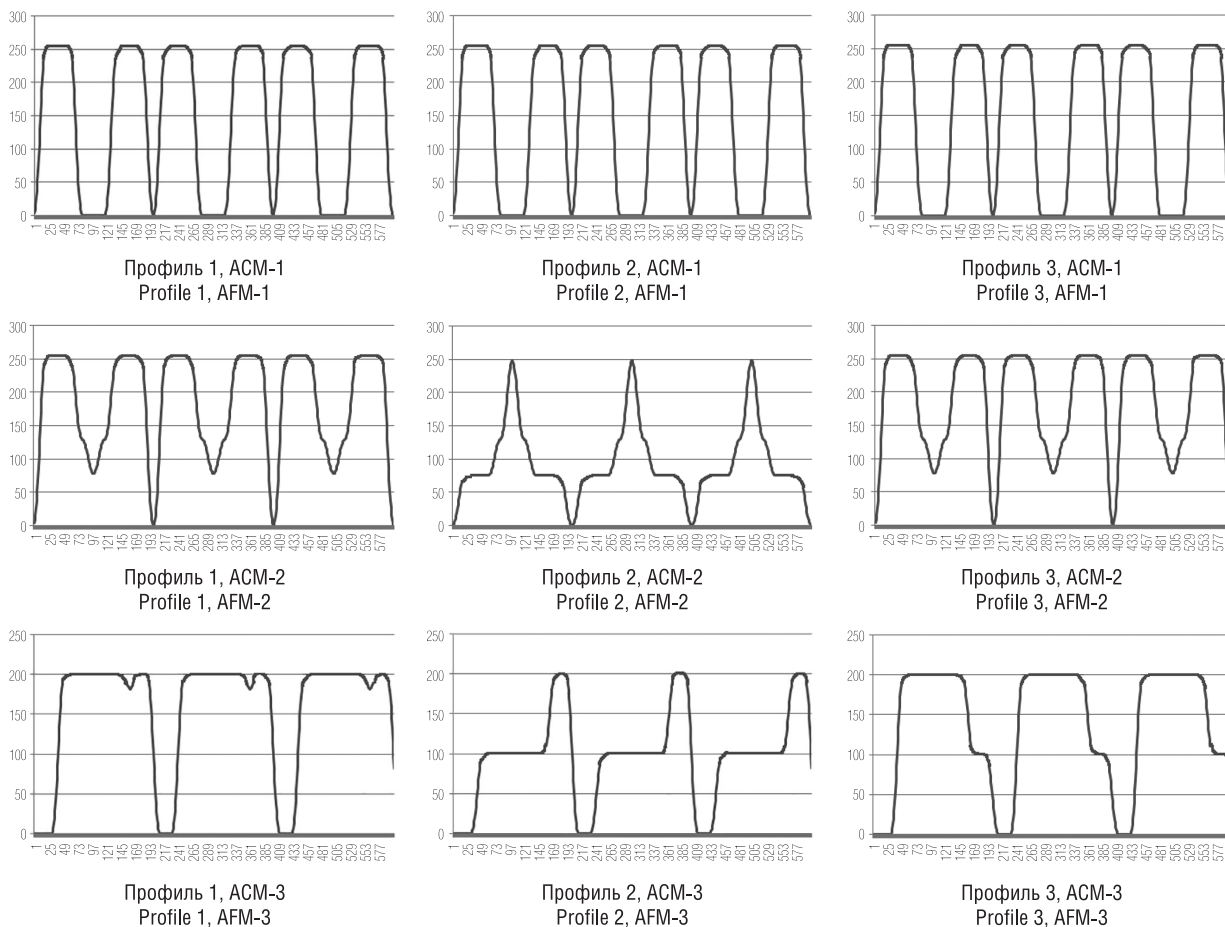


Рис. 2. Профили яркости тестовых АСМ-изображений  
Fig. 2. Brightness profiles of test AFM-images

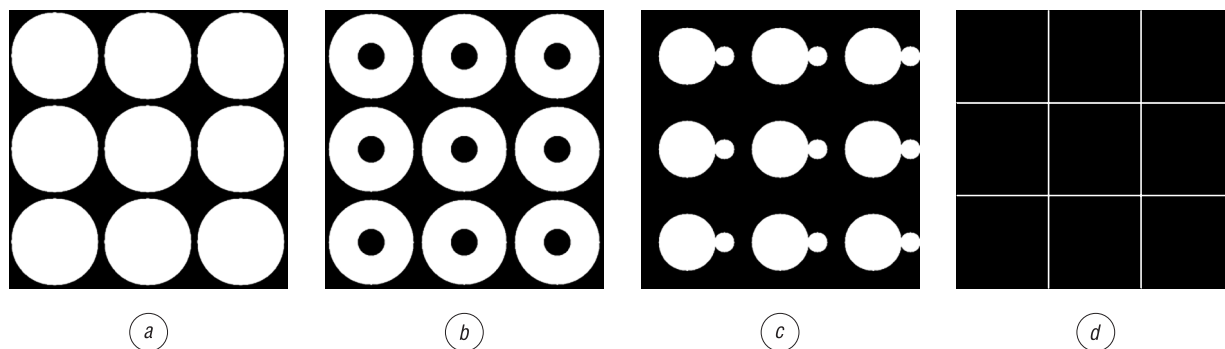


Рис. 3. Бинарные маски: *a* – для АСМ-1, *b* – для АСМ-2, *c* – для АСМ-3 при неполной сегментации, *d* – для АСМ-1 – АСМ-3 при полной сегментации  
Fig. 3. Binary masks: *a* – for AFM-1, *b* – for AFM-2, *c* – for AFM-3 with incomplete segmentation, *d* – for AFM-1 – AFM-3 with complete segmentation

Для маски, эквивалентной тестовым АСМ-изображениям фрагментов сфер (см. рис. 1), значение  $S_E$  вычисляется с помощью выражения  $S_E = \lceil 2\pi R_E i \rceil$ , где  $R_E$  – наибольший радиус фрагмента сферы или тора (в пикселах) на уровне подложки;  $\lceil \cdot \rceil$  – операция округления до ближайшего целого с избытком.

На рис. 4–11 приведены изображения матриц сегментации трех тестовых АСМ-изображений (значения элементов матриц сегментации преобразованы в яркости соответствующих пикселей).

На рис. 4, 5 показаны неполная и полная сегментация с помощью предложенного алгоритма ВОЛМА (реализации в среде Matlab и на языке программирования C++ с использованием

библиотеки OpenCV); на рис. 6 – неполная сегментация с помощью алгоритма МВА маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров переднего и заднего фона на основе градиента, морфологических операций открытия и закрытия (реализация в Matlab) [20]; на рис. 7 – неполная сегментация с помощью алгоритма МВО маркерного водораздела под контролем оператора (реализация на С++) [22]; на рис. 8 – неполная сегментация с помощью алгоритма ВО выращивания областей с выбором начальных точек на основе гистограммы (реализация в Matlab) [13]; на рис. 9 – неполная сегментация с помощью алгоритма ВО (реализация на С++); на рис. 10 – неполная сегментация с помощью алгоритма ВСГ Винсента–Солли с предварительным вычислением градиента в восьмисвязной области (реализация в Matlab) [24]; на рис. 11 – сегментация с помощью алгоритма ВСК Винсента–Солли с выделением контуров областей и последующим их заполнением (реализация на С++) [25].

Для исследуемых алгоритмов в табл. 1 приведены значения нормированных ошибок  $E_O$ ,  $E_I$  и  $E_S$  неполной сегментации, а в табл. 2 – время обработки. Из табл. 1 следует, что предложенный алгоритм ВОЛМА обеспечивает неполную сегментацию без ошибок. Остальные алгоритмы сегментируют все тестовые АСМ-изображения с ошибками. Реализация алгоритма ВСК не позволяет сегментировать АСМ-3. Ошибки полной сегментации АСМ-изображений с помощью предложенного алгоритма проявляются только на АСМ-1 (значение ошибки 0,6). Другие исследуемые алгоритмы полную сегментацию АСМ-изображений не обеспечивают.

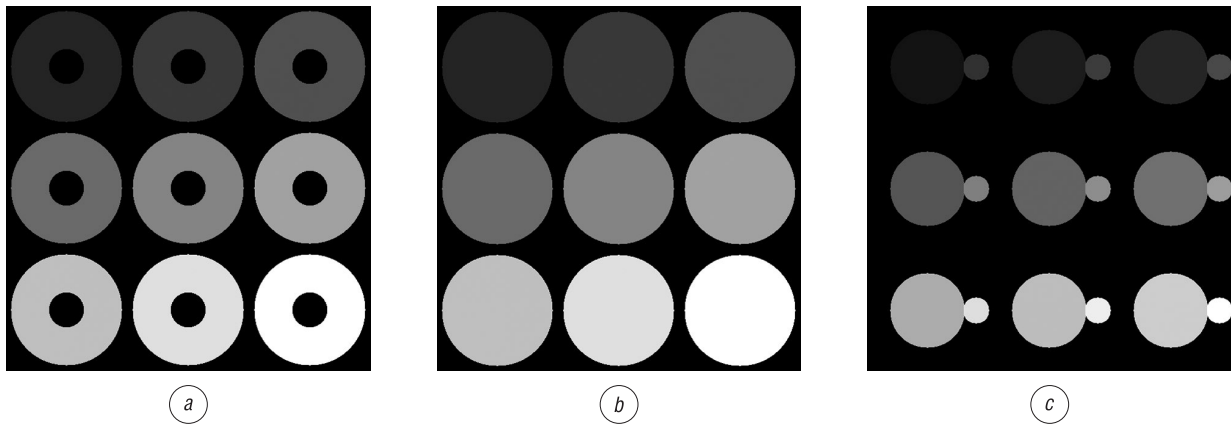


Рис. 4. Результаты неполной сегментации тестовых АСМ-изображений для предложенного алгоритма ВОЛМА (Matlab, OpenCV): *a* – 9 торов одинаковой высоты, *b* – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер, *c* – комбинация 18 фрагментов сфер  
 Fig. 4. Results of incomplete segmentation of test AFM images for the proposed VOLMA algorithm (Matlab, OpenCV): *a* – 9 tori of the same height, *b* – 9 tori and pyramids from spheres fragments, *c* – the combination of 18 spheres fragments

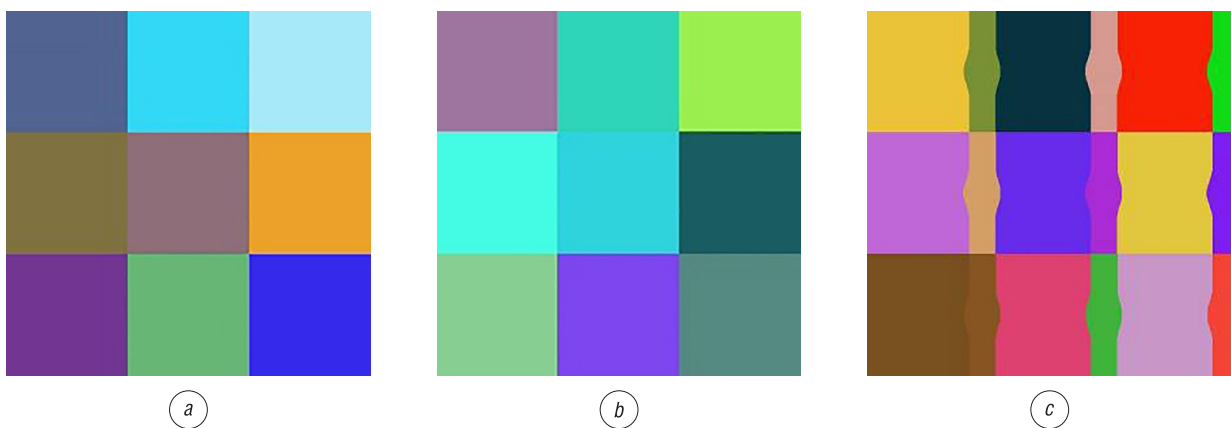


Рис. 5. Результаты полной сегментации тестовых АСМ-изображений для предложенного алгоритма ВОЛМА (Matlab, OpenCV): *a* – 9 торов одинаковой высоты, *b* – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер, *c* – комбинация 18 фрагментов сфер  
 Fig. 5. Results of complete segmentation of test AFM images for the proposed VOLMA algorithm (Matlab, OpenCV): *a* – 9 tori of the same height, *b* – 9 tori and pyramids from spheres fragments, *c* – the combination of 18 spheres fragments

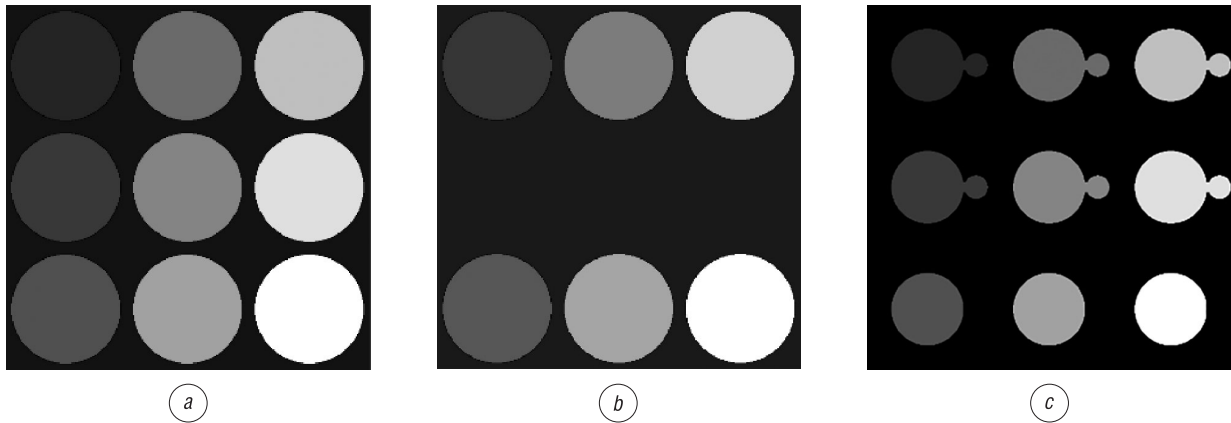


Рис. 6. Результаты неполной сегментации тестовых АСМ-изображений для алгоритма МВА маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров (Matlab): *a* – 9 торов одинаковой высоты, *b* – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер, *c* – комбинация 18 фрагментов сфер

Fig. 6. Results of incomplete segmentation of test AFM images for the algorithm of the marker watershed with automatic placement of markers (Matlab): *a* – 9 tori of the same height, *b* – 9 tori and pyramids from spheres fragments, *c* – the combination of 18 spheres fragments

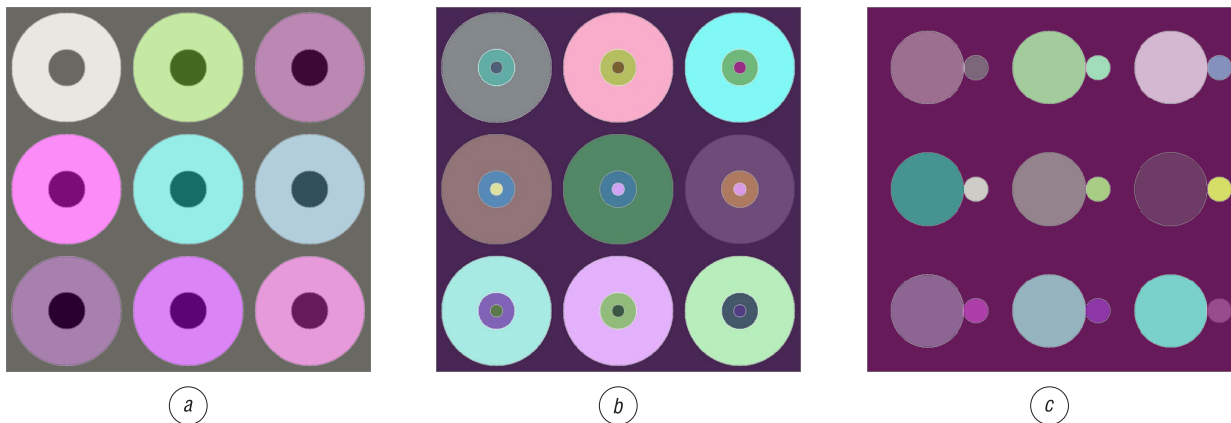


Рис. 7. Результаты неполной сегментации тестовых АСМ-изображений для алгоритма МВО маркерного водораздела под контролем оператора (C++): *a* – 9 торов одинаковой высоты, *b* – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер, *c* – комбинация 18 фрагментов сфер

Fig. 7. Results of incomplete segmentation of test AFM images for the algorithm of the marker watershed under operator control (Matlab): *a* – 9 tori of the same height, *b* – 9 tori and pyramids from spheres fragments, *c* – the combination of 18 spheres fragments

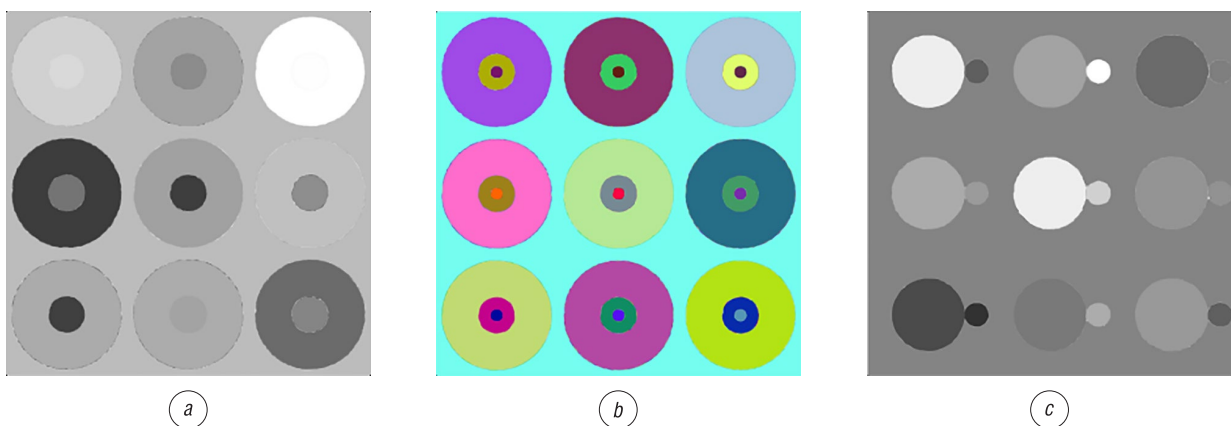


Рис. 8. Результаты неполной сегментации тестовых АСМ-изображений для алгоритма ВО выращивания областей (Matlab): *a* – 9 торов одинаковой высоты, *b* – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер, *c* – комбинация 18 фрагментов сфер

Fig. 8. Results of incomplete segmentation of test AFM images for the algorithm of growing regions (Matlab): *a* – 9 tori of the same height, *b* – 9 tori and pyramids from spheres fragments, *c* – the combination of 18 spheres fragments



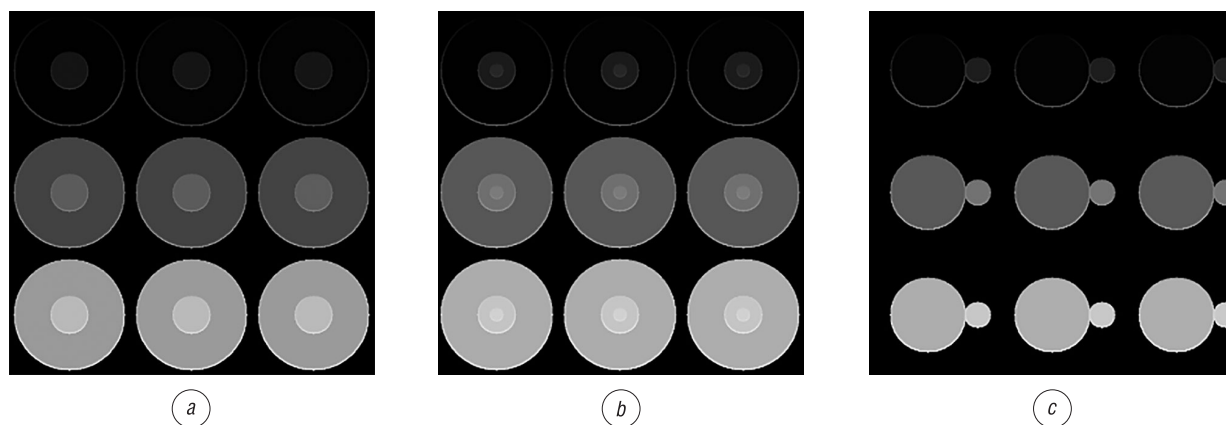


Рис. 9. Результаты неполной сегментации тестовых АСМ-изображений для алгоритма ВО выращивания областей (C++): *a* – 9 торов одинаковой высоты, *b* – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер, *c* – комбинация 18 фрагментов сфер  
 Fig. 9. Results of incomplete segmentation of test AFM images for the algorithm of growing regions (Matlab): *a* – 9 tori of the same height, *b* – 9 tori and pyramids from spheres fragments, *c* – the combination of 18 spheres fragments

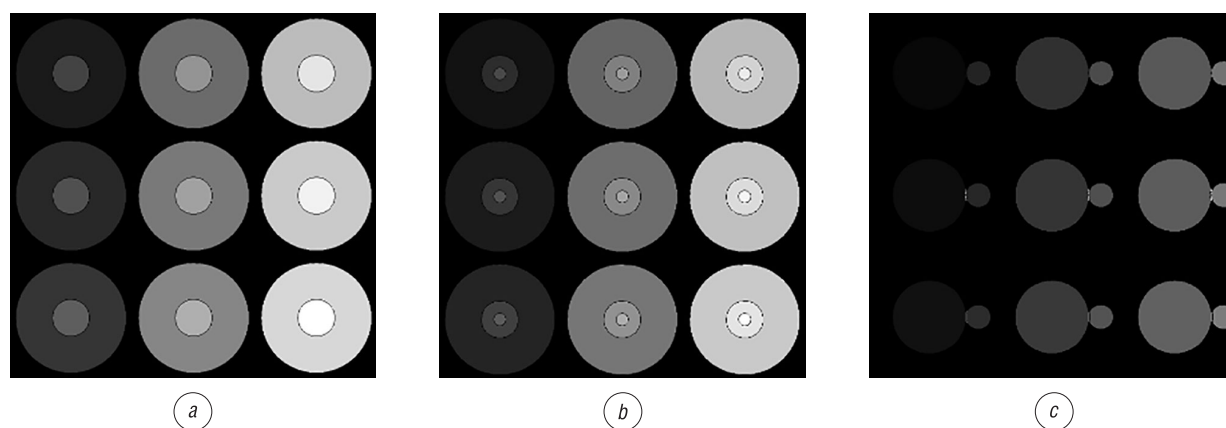


Рис. 10. Результаты неполной сегментации тестовых АСМ-изображений для алгоритма ВСГ водораздела Винсента–Солли с предварительным вычислением градиента (Matlab): *a* – 9 торов одинаковой высоты, *b* – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер, *c* – комбинация 18 фрагментов сфер  
 Fig. 10. Results of incomplete segmentation of test AFM images for the algorithm of Vincent–Sollie watershed with preliminary gradient calculation (Matlab): *a* – 9 tori of the same height, *b* – 9 tori and pyramids from spheres fragments, *c* – the combination of 18 spheres fragments

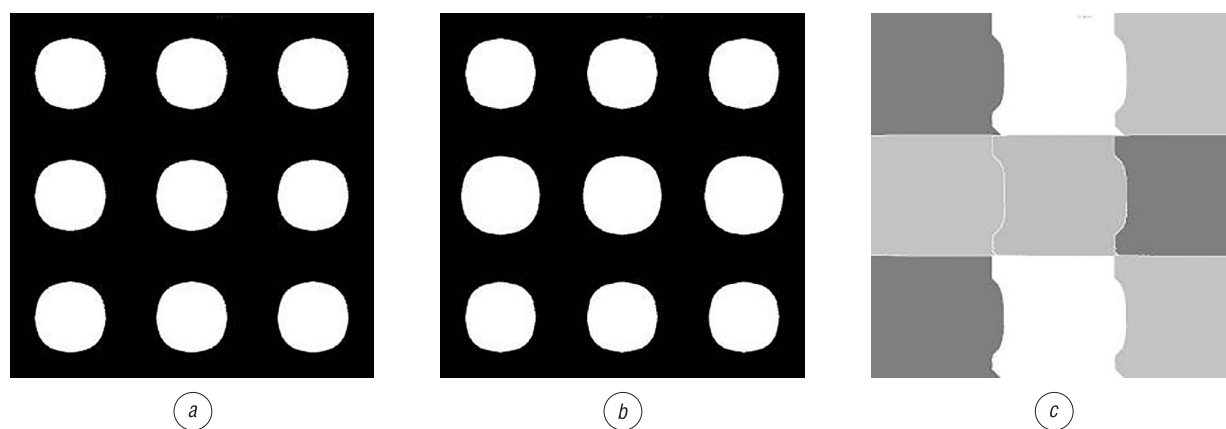


Рис. 11. Результаты сегментации тестовых АСМ-изображений для алгоритма ВСК водораздела Винсента–Солли с выделением контуров (C++): *a* – 9 торов одинаковой высоты, *b* – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер, *c* – комбинация 18 фрагментов сфер  
 Fig. 11. Results of segmentation of test AFM images for the algorithm of Vincent–Sollie watershed with selection of contours (C++): *a* – 9 tori of the same height, *b* – 9 tori and pyramids from spheres fragments, *c* – the combination of 18 spheres fragments

Т а б л и ц а 1. Значения нормированных ошибок сегментации тестовых АСМ-изображений

T a b l e 1. The values of the normalized segmentation errors of the test AFM-images

Изображение	Ошибка	Значение нормированных ошибок сегментации ( $\times 10^{-3}$ ) для алгоритмов							
		реализация в Matlab				реализация на C++			
		ВОЛМА	МВА	ВО	ВСГ	ВОЛМА	МВО	ВО	ВСК
АСМ-1	$E_O$	0	109,6	98,6	109,6	0	94,6	109,6	0,1
	$E_I$	0	44,3	52,0	46,1	0	0,5	81,7	0,6
	$E_S$	0	153,9	150,7	155,7	0	95,2	191,3	0,7
АСМ-2	$E_O$	0	0	0	43,7	0	10,2	0	0,5
	$E_I$	0	359,9	56,5	0	0	0	79,9	523,1
	$E_S$	0	359,9	56,5	43,7	0	10,2	79,9	523,6
АСМ-3	$E_O$	0	0	42,2	73,6	0	19,9	0	2034,9
	$E_I$	0	17,9	78,3	0	0	0	96,1	0
	$E_S$	0	17,9	78,3	73,6	0	19,9	96,1	2034,9

Т а б л и ц а 2. Время неполной сегментации тестовых АСМ-изображений

T a b l e 2. The time of incomplete segmentation of the test AFM-images

Изображение	Значение времени неполной сегментации (мс) для алгоритмов							
	реализация в Matlab				реализация на C++			
	ВОЛМА	МВА	ВО	ВСГ	ВОЛМА	МВО	ВО	ВСК
АСМ-1	23 117,1	442,9	287 707,8	0,523 (+287 707,8)	5957,0	293,6 (+4500)	8196,0	9848
АСМ-2	30 288,3	454,5	295 065,2	0,536 (+295 065,2)	7824,0	296,7 (+13 500)	9907,0	11 251
АСМ-3	26 438,9	492,0	250 362,5	0,503 (+250 362,5)	3907,0	301,5 (+9000)	6988,0	8368
Среднее по АСМ-1 – АСМ-3	26 614,9	463,1	277 711,8	277 712,3	5896,0	9297,3	8363,7	9822,3

Из табл. 1 следует, что некоторые тестовые АСМ-изображения с относительно небольшой ошибкой сегментирует алгоритм МСО маркерного водораздела под контролем оператора. Ошибки сегментации с помощью МСО сильно зависят от точности расстановки маркеров оператором. Однако данная операция требует значительных временных затрат, особенно при большом числе сегментов. В алгоритме МВА маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров маркеры фона и объектов определяются на основе градиента, что приводит к резкому увеличению ошибки сегментации (в 3–30 раз в зависимости от типа изображения).

Из табл. 2 следует, что при реализации в Matlab предложенный алгоритм обеспечивает в среднем в 57 раз меньшую скорость работы по сравнению с маркерным водоразделом, и в 10 раз большую скорость работы по сравнению с алгоритмами выращивания областей и водораздела Винсента–Солли. При реализации на C++ предложенный алгоритм обеспечивает в среднем в 1,6 раза меньшую скорость работы по сравнению с маркерным водоразделом, в 1,4 и 1,7 раз большую скорость работы по сравнению с выращиванием областей и водоразделом по алгоритму Винсента–Солли соответственно (с учетом временных затрат на расстановку маркеров оператором и использованием дополнительных алгоритмов сегментации для определения номеров сегментов).

Полученные результаты сегментации тестовых АСМ-изображений сопоставлены с результатами работы программы Gwiddion [26] (рис. 12), в которой используется алгоритм Винсента–Солли. С помощью данной программы может быть реализована неполная сегментация АСМ-изображений без ошибок, однако это требует использования дополнительно размыва, вычисления и оценки градиента, предварительной инверсии значений яркости, заполнения оконтуренных фрагментов. Данные операции производятся под контролем оператора. Кроме того, полученные результаты представляют собой бинарную матрицу, в которой пикселям объектов соответствуют единичные элементы, что требует дополнительно сегментации по яркости для определения

номера каждому сегменту. Дополнительные операции и участие оператора приводят к значительным временным затратам.

Для оценки работы представленных алгоритмов сравним результаты их работы на оригинальных АСМ-изображениях, к которым применены алгоритмы выравнивания яркости и фильтрации (рис. 13–16).

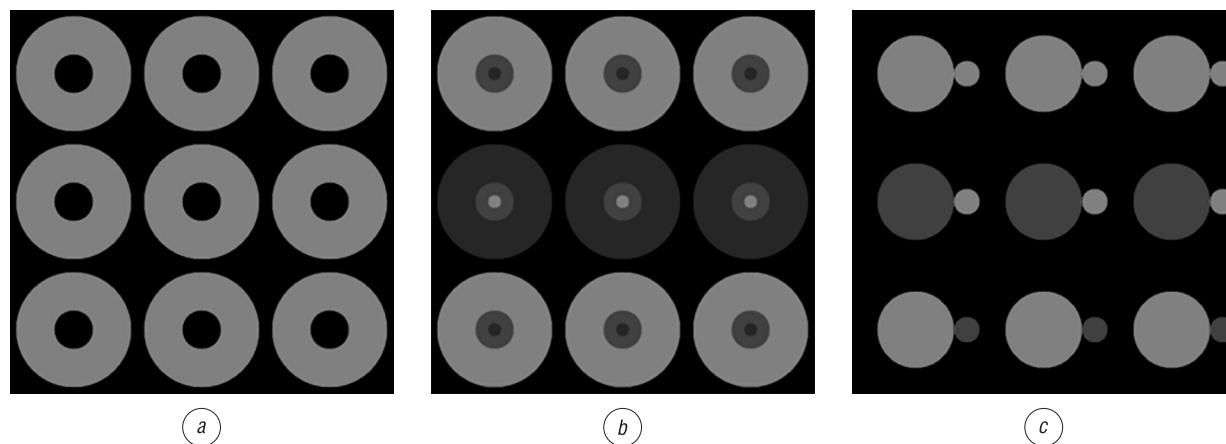


Рис. 12. Результаты сегментации с помощью программы Gwiddion и последующей обработки: *a* – 9 торов одинаковой высоты, *b* – 9 торов и пирамид из фрагментов сфер, *c* – комбинация 18 фрагментов сфер

Fig. 12. Results of segmentation using Gwiddion and post-processing: *a* – 9 tori of the same height, *b* – 9 tori and pyramids from spheres fragments, *c* – the combination of 18 spheres fragments

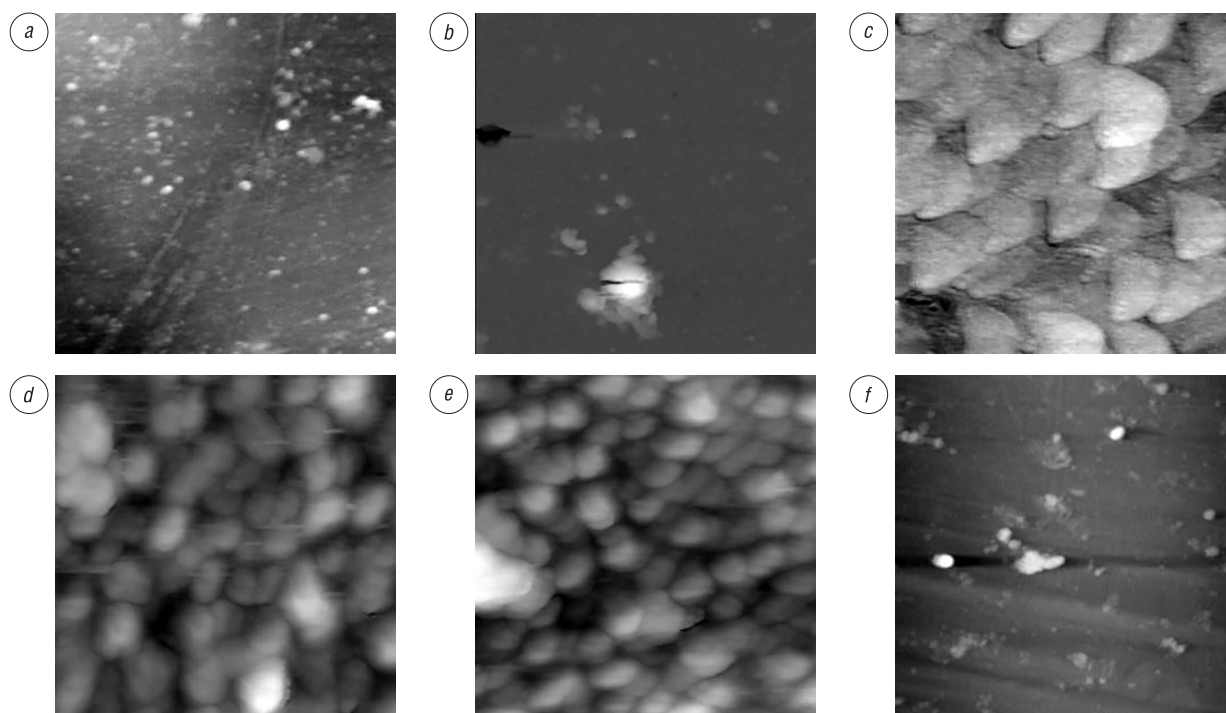


Рис. 13. Исходные АСМ-изображения в режиме топографии: *a* – поверхность полимера, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм; *b* – поверхность стекла с дефектами, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм; *c* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная затупленным зондом, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *d* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная новым зондом, первое сканирование, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *e* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная измененным зондом, четвертое сканирование, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *f* – поверхность полимера с волновым рельефом, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм

Fig. 13. Original AFM images in topography mode: *a* – polymer surface, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$ ; *b* – glass surface with defects, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$ ; *c* – the AlSiN nanocrystalline coating surface, was made with a blunted probe, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *d* – AlSiN nanocrystalline coating surface, was made by a new probe, first scan, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *e* – the AlSiN nanocrystalline coating surface, was made by a modified probe, the fourth scan, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *f* – polymer surface with wave relief, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$

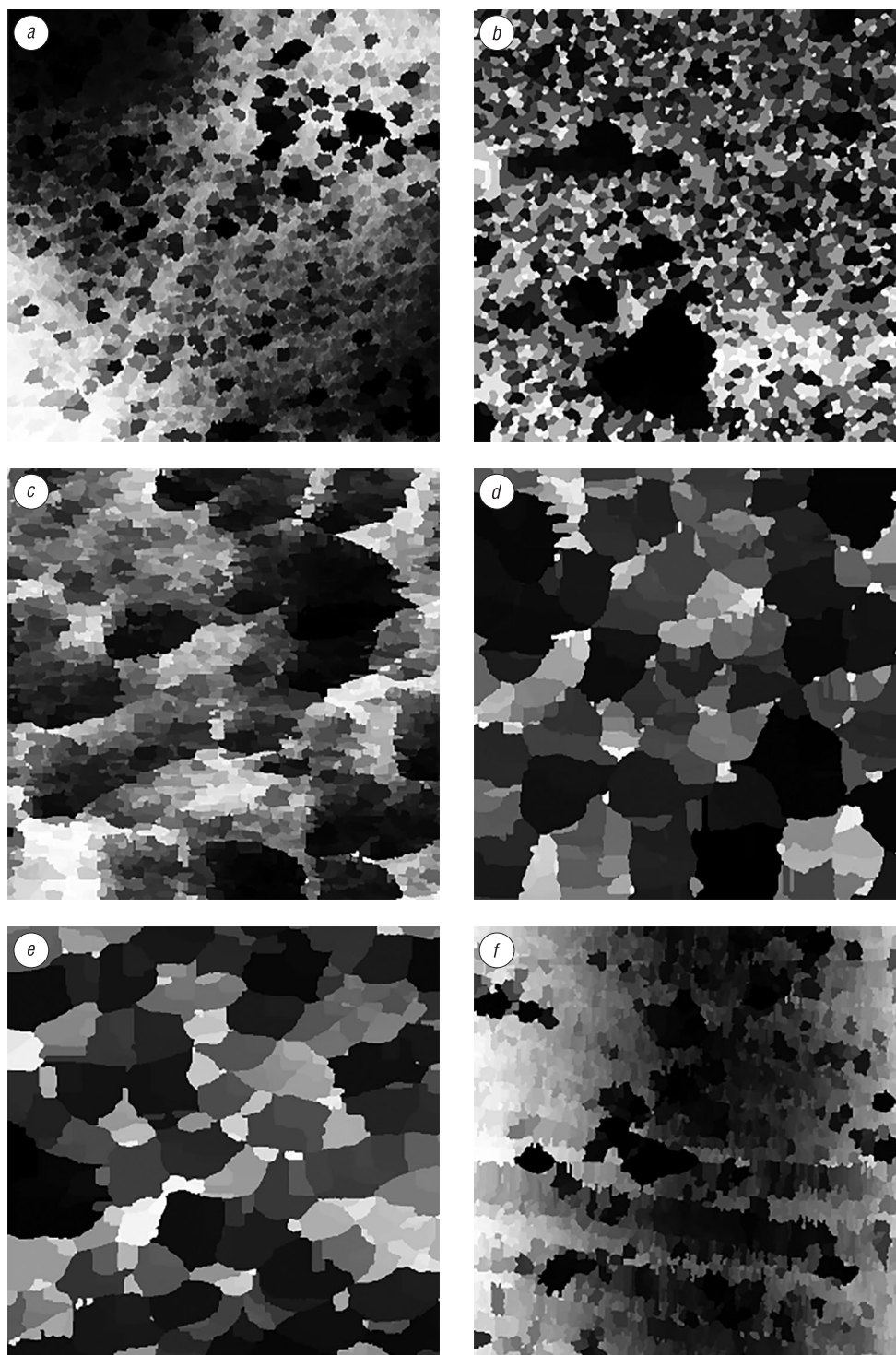


Рис. 14. Результат сегментации алгоритмом ВОЛМА: *a* – поверхность полимера, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм; *b* – поверхность стекла с дефектами, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм; *c* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная затупленным зондом, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *d* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная новым зондом, первое сканирование, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *e* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная измененным зондом, четвертое сканирование, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *f* – поверхность полимера с волновым рельефом, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм

Fig. 14. The results of the segmentation by algorithm VOLMA: *a* – polymer surface, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$ ; *b* – glass surface with defects, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$ ; *c* – the AlSiN nanocrystalline coating surface, was made with a blunted probe, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *d* – AlSiN nanocrystalline coating surface, was made by a new probe, first scan, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *e* – the AlSiN nanocrystalline coating surface, was made by a modified probe, the fourth scan, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *f* – polymer surface with wave relief, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$



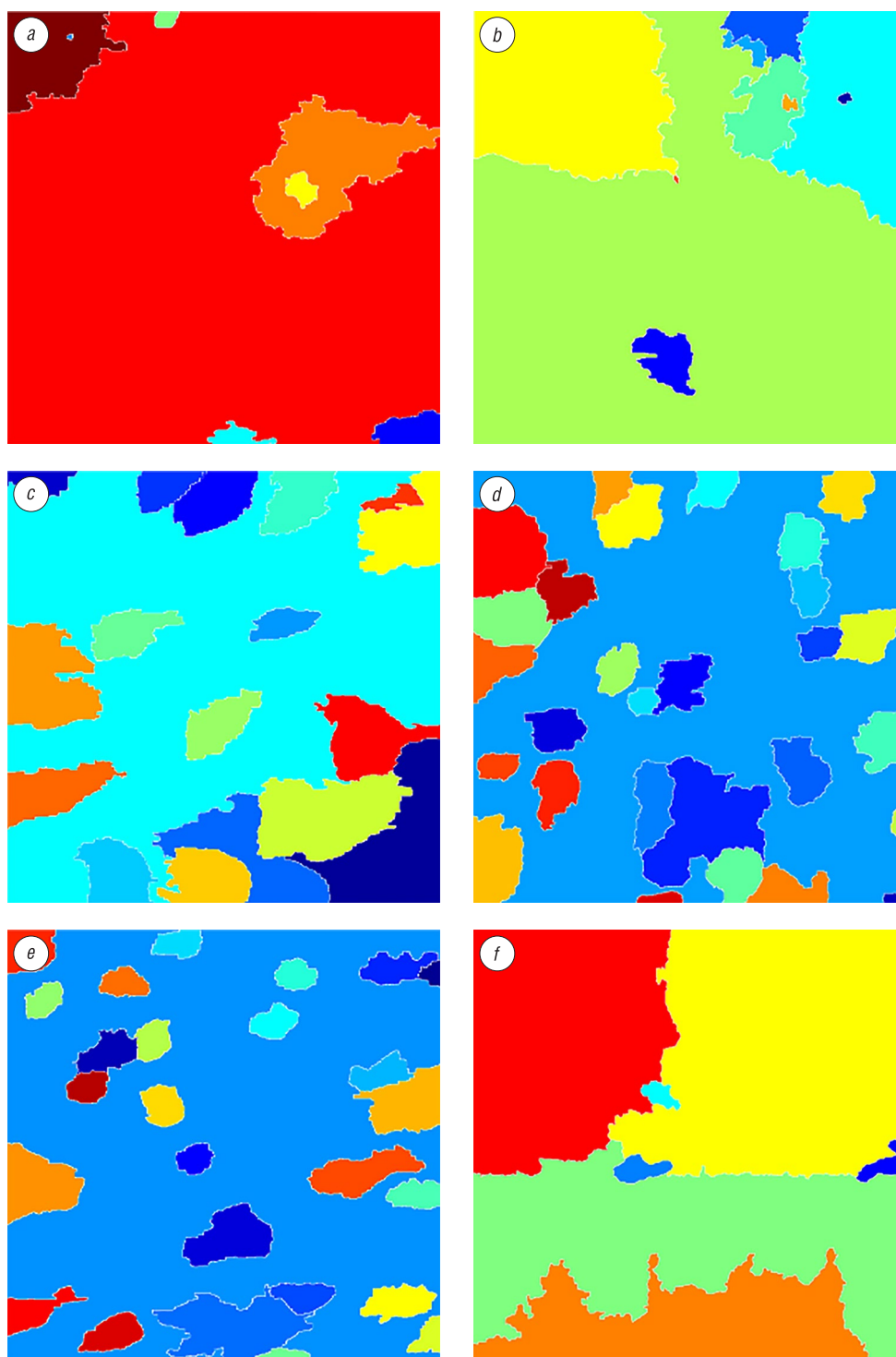


Рис. 15. Результат сегментации алгоритмом МВА: *a* – поверхность полимера, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм; *b* – поверхность стекла с дефектами, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм; *c* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная затупленным зондом, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *d* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная новым зондом, первое сканирование, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *e* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная измененным зондом, четвертое сканирование, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *f* – поверхность полимера с волновым рельефом, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм

Fig. 15. The results of the segmentation by algorithm MVA: *a* – polymer surface, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$ ; *b* – glass surface with defects, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$ ; *c* – the AlSiN nanocrystalline coating surface, was made with a blunted probe, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *d* – AlSiN nanocrystalline coating surface, was made by a new probe, first scan, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *e* – the AlSiN nanocrystalline coating surface, was made by a modified probe, the fourth scan, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *f* – polymer surface with wave relief, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$



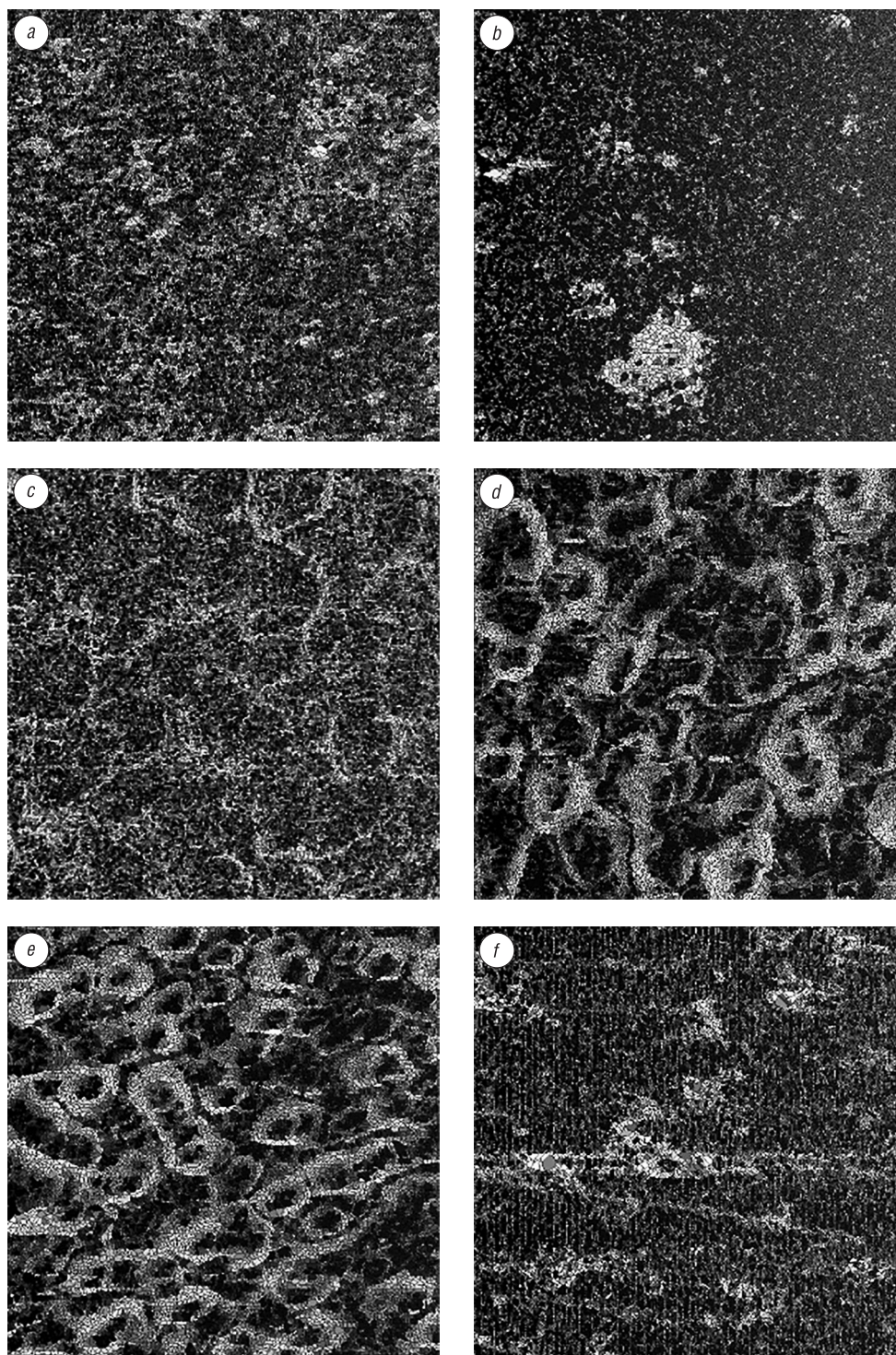


Рис. 16. Результат сегментации алгоритмом ВСК: *a* – поверхность полимера, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм; *b* – поверхность стекла с дефектами, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм; *c* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная затупленным зондом, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *d* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная новым зондом, первое сканирование, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *e* – поверхность нанокристаллического покрытия AlSiN, выполненная измененным зондом, четвертое сканирование, размер поля сканирования  $2 \times 2$  мкм; *f* – поверхность полимера с волновым рельефом, размер поля сканирования  $20 \times 20$  мкм

Fig. 16. The results of the segmentation by algorithm VSK: *a* – polymer surface, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$ ; *b* – glass surface with defects, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$ ; *c* – the AlSiN nanocrystalline coating surface, was made with a blunted probe, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *d* – AlSiN nanocrystalline coating surface, was made by a new probe, first scan, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *e* – the AlSiN nanocrystalline coating surface, was made by a modified probe, the fourth scan, the scanning field size is  $2 \times 2$   $\mu\text{m}$ ; *f* – polymer surface with wave relief, the scanning field size is  $20 \times 20$   $\mu\text{m}$

Как видно из рис. 13–16, алгоритм водораздела Винсента–Солли приводит к возникновению лишних сегментов. Особенно это проявляется на изображениях с нечеткими границами. Алгоритм морфологического маркерного водораздела без участия оператора приводит в свою очередь к недостаточной сегментации изображений, множество сегментов теряются. Разработанный алгоритм ВОЛМА дает возможность разбить исходное изображение на сегменты, однако он чувствителен к артефактам на изображении, которые могут привести к ложным сегментам на изображении.

**Заключение.** Разработан алгоритм сегментации АСМ-изображений на основе волнового выращивания областей локальных максимумов с выбором пикселей в порядке убывания значений. Сущность алгоритма состоит в использовании порога яркости, изменяющегося от максимума к минимуму, для выбора пикселей АСМ-изображения, которые образуют точки роста областей (локальные максимумы) или присоединяются к существующим областям (смежные с пикселями, включенными в области и имеющими такую же или большую яркость). Это позволяет устранить ошибки сегментации АСМ-изображений, характерные для алгоритмов маркерного водораздела (с автоматической и ручной расстановкой маркеров), выращивания областей, водораздела Винсента–Солли. В сравнении с алгоритмами выращивания областей и водораздела Винсента–Солли разработанный алгоритм обеспечивает повышение скорости сегментации в 1,4 и 1,7 раза соответственно при реализации на языке программирования C++. Из этого можно сделать вывод, что разработанный алгоритм увеличивает точность нахождения границ объектов находящихся на поверхности неорганических материалов, при этом существенно проигрывает в скорости работы.

#### Список использованных источников

1. Взаимосвязь микроструктурного состояния поверхности и механических свойств углеродных и металл-углеродных покрытий, формируемых плазмо-усиленным химическим вакуумным осаждением / В. В. Углов [и др.] // Перспективные материалы. – 2003. – №6. – С. 5–11.
2. Ion-beam coatings based on Ni and Cr with ultradispersed diamond – structure and properties / M. Andreyev [et al.] // Vacuum. – 2005. – Vol. 78, №2–4. – P. 451–454. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.01.067>
3. Особенности пойкилоцитоза, вызванного действием активных форм азота / М. Н. Стародубцева [и др.] // Проблемы здоровья и экологии. – 2006. – №2 (8). – С. 117–121.
4. Investigation of the structure of nanocrystalline refractory oxides by X-ray diffraction, electron microscopy and atomic force microscopy / T. M. Ulyanova [et al.] // Crystallography Reports. – 2006. – Vol. 51, Suppl. 1. – P. 144–149.
5. О свойствах стали, модифицированной углеродными наноматериалами / С. А. Жданок [и др.] // Инж.-физ. журн. – 2010. – Т. 83, №1. – С. 3–7.
6. Слепнева, Л. М. Дисперсность и морфология гидрозоля диоксида титана / Л. М. Слепнева, Т. А. Кузнецова // Наука и техника. – 2012. – №5. – С. 67–71.
7. Наноразмерная субструктура термообработанного высокопрочного чугуна / С. А. Чижик [и др.] // Инж.-физ. журн. – 2013. – Т. 86, №5. – С. 949–959.
8. Кузнецова, Т. А. Деформационное структурирование пленок алюминия при микроиндентировании / Т. А. Кузнецова, С. А. Чижик, А. Л. Худoley // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. – №12. – С. 46–56.
9. Получение порошка диоксида титана методом сольволиза и оценка его дисперсности / Л. М. Слепнева [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – №1. – С. 10–15.
10. Surface microstructure of Mo(C)N coatings investigated by AFM / T. Kuznetsova [et al.] // J. Mater. Eng. Perform. – 2016. – Vol. 25, №12. – P. 5450–5459. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2390-z>
11. Geisse, N. A. AFM and Combined Optical Techniques / N. A. Geisse // Materials Today. – 2009. – Vol. 12, №7–8. – P. 40–45. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(09\)70201-9](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(09)70201-9)
12. Eaton, P. Atomic Force Microscopy / P. Eaton, P. West. – Oxford Univ. Press, 2010. – 257 p. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199570454.001.0001>
13. Pratt, W. K. Digital Image Processing / W. K. Pratt. – 3<sup>th</sup> ed. – Los Altos, California: Jonh Willey & Sons, Inc., 2001. – 738 p. <https://doi.org/10.1002/0471221325>
14. Gonzalez, R. C. Digital Image Processing / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. – Pearson Education, 2008. – 954 p.
15. Beucher, S. Use of watersheds in contour detection [Electronic resource] / S. Beucher, C. Lantuéjoul // Proc. International Workshop on Image Processing, Real-Time Edge and Motion Detection/Estimation, Rennes. – 1979. – Mode of access: <http://www.cmm.mines-paristech.fr/~beucher/publi/watershed.pdf> – Date of access: 02.04.2018.
16. Vincent, L. Watershed in Digital Spaces: an efficient algorithm based on immersion simulation / L. Vincent, P. Sollie // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1991. – Vol. 13. – P. 583–598. <https://doi.org/10.1109/34.87344>



17. Jackway, P.T. Gradient watersheds in morphological scale space / P.T. Jackway // IEEE Transactions on Image Processing. – 1999. – Vol. 5, iss. 6 – P. 913–921. <https://doi.org/10.1109/83.503908>
18. Weickert, J. Efficient Image Segmentation using partial differential equations and morphology / J. Weickert // Pattern Recognition. – 2001. – Vol. 34, №9. – P. 1813–1824. [https://doi.org/10.1016/s0031-3203\(00\)00109-6](https://doi.org/10.1016/s0031-3203(00)00109-6)
19. Jung, C.R. Robust Watershed Segmentation using wavelets / C.R. Jung, J. Scharcanski // Image and Vision Computing. – 2005. – Vol. 23, №7. – P. 661–669. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2005.03.001>
20. Marker-Controlled Watershed Segmentation [Electronic resource] // MathWork. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/images/examples/marker-controlled-watershed-segmentation.html> – Date of access: 02.04.2018
21. Альмияхи, О.М. Сегментация изображений на основе волнового выращивания областей / О.М. Альмияхи, В.Ю. Цветков, В.К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2016. – №3 (97). – С. 24–30.
22. Watershed segmentation algorithm in OpenCV [Electronic resource] // Github. – Mode of access: <https://github.com/AlmogDavid/fellowQuad/blob/1d26f32ba44cba0426af6e6c40bcd73e0db6f9ba/opencv/Source.cpp> – Date of access: 02.04.2018.
23. Region Growing Algorithm [Electronic resource] // Github. – Mode of access: <https://github.com/emreozanalkan/RegionGrowingAlgorithm> – Date of access : 02.04.2018.
24. Watershed [Electronic resource] // MathWork. – Mode of access: [https://www.mathworks.com/help/images/ref/watershed.html?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/help/images/ref/watershed.html?s_tid=srchtitle) – Date of access: 02.04.2018.
25. Watershed [Electronic resource] // Github. – Mode of access: <https://github.com/keke2014/Watershed> – Date of access: 02.04.2018.
26. Gwiddion [Electronic resource]. – Mode of access: <http://gwyddion.net> – Date of access: 02.04.2018.

## References

1. Uglov V. V., Anishchik V. M., Kuleshov A. K., Polo I., Tieri F., Peletie Z., Kuznetsova T. A., Samtsov M. P., Dub S. N., Novitskaja M. V. Interrelation of surface microstructural state and mechanical characteristics of carbon and metal-carbon coatings formed by plasma-enhanced chemical vacuum deposition. *Perspektivnye Materialy*, 2003, no. 6, pp. 5–11 (in Russian).
2. Andreyev M., Anishchik V., Markova L., Kuznetsova T. Ion-beam coatings based on Ni and Cr with ultradispersed diamond – structure and properties. *Vacuum*, 2005, vol. 78, no. 2–4, pp. 451–454. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.01.067>
3. Starodubtseva M. N., Kuznetsova T. G., Kuznetsova T. A., Ellori Dzh. K., Cherenkevich S. N., Abetkovskaya S. O. Peculiarities of poikilocytosis induced by reactive nitrogen species action. *Problemy zdorov'ya i ekologii = Problems of Health and Ecology*, 2006, no. 2 (8), pp. 117–121 (in Russian).
4. Ulyanova T. M., Titova L. V., Medichenko S. V., Zonov Yu. G., Konstantinova T. E., Glazunova V. A., Doroshkevich A. S., Kuznetsova T. A. Investigation of the structure of nanocrystalline refractory oxides by X-ray diffraction, electron microscopy and atomic force microscopy. *Crystallography Reports*, 2006, vol. 51, suppl. 1, pp. 144–149. <https://doi.org/10.1134/s1063774506070212>
5. Zhdanok S. A., Sviridenok A. I., Ignatovskiy M. I., Krauklis A. V., Kuznetsova T. A., Chizhik S. A., Borisevich K. O. On the properties of a steel modified with carbon nanomaterials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, iss. 1, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0312-8>
6. Slepneva L. M., Kuznetsova T. A. Dispersibility and Morphology of Titanium Dioxide Hydrosols. *Nauka i tekhnika = Science and Technology*, 2012, no. 5, pp. 3–7 (in Russian).
7. Chizhik S. A., Kuznetsova T. A., Khudoley A. L., Komarov A. I., Komarova V. I., Vasilenko M. S. Nanosized substructure of heat-treated high-strength cast iron. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, iss. 5, pp. 1008–1019. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0922-z>
8. Kuznetsova T. A., Chizhik S. A., Khudoley A. L. Deformation structuring of aluminum films during microindentation. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 1275–1285. <https://doi.org/10.1134/s1027451014050115>
9. Slepneva L. M., Kuznetsova T. A., Gorbunova V. A., Slepnev G. E., Chizhik S. A. Production of titanium dioxide powder by solvolysis method and estimation of its dispersion. *Vestsi Natsyonal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 1, pp. 10–15 (in Russian).
10. Kuznetsova T., Zubar T., Chizhik S., Gilewicz A., Lupicka O., Warcholinski B. Surface microstructure of Mo(C)N coatings investigated by AFM. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25, no. 12, pp. 5450–5459. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2390-z>
11. Geisse N. A. AFM and Combined Optical Techniques. *Materials Today*, 2009, vol. 12, no. 7–8, pp. 40–45. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(09\)70201-9](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(09)70201-9)
12. Eaton P., West P. *Atomic Force Microscopy*. Oxford University Press, 2010. 257 p. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199570454.001.0001>
13. Pratt W. K. *Digital Image Processing*. 3<sup>th</sup> ed. Los Altos, California, Jonh Willey & Sons, Inc., 2001. 738 p.
14. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. Pearson Education, 2008. 954 p.
15. Beucher S., Lantuéjoul C. Use of watersheds in contour detection. *Proc. International Workshop on Image Processing, Real-Time Edge and Motion Detection/Estimation, Rennes. 1979*. Available at: <http://www.cmm.mines-paristech.fr/~beucher/publi/watershed.pdf> (accessed 2 April 2018).
16. Vincent L., Soille P. Watershed in Digital Spaces: an efficient algorithm based on immersion simulation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, vol. 13, pp. 583–598. <https://doi.org/10.1109/34.87344>
17. Jackway P. T. Gradient watersheds in morphological scale space. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, vol. 5, iss. 6, pp. 913–921. <https://doi.org/10.1109/83.503908>

- 18 Weickert J. Efficient Image Segmentation using partial differential equations and morphology. *Pattern Recognition*, 2001, vol. 34, no. 9, pp. 1813–1824. [https://doi.org/10.1016/s0031-3203\(00\)00109-6](https://doi.org/10.1016/s0031-3203(00)00109-6)
- 19 Jung C. R., Scharcanski J. Robust Watershed Segmentation using wavelets. *Image and Vision Computing*, 2005, vol. 23, no. 7, pp. 661–669. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2005.03.001>
20. Marker-Controlled Watershed Segmentation. *MathWork*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/images/examples/marker-controlled-watershed-segmentation.html> (accessed 2 April 2018).
21. Almiyahi O. M., Tsviatkou V. Yu., Kanapelka V. K. Image segmentation based on the wave region growing. *Doklady BGUIR*, 2016, vol. 3 (97), pp. 24–30 (in Russian).
22. Watershed segmentation algorithm in OpenCV. *Github*. Available at: <https://github.com/AlmogDavid/fellowQuad/blob/Id26f32ba44cba0426af6e6c40bcd73e0db6f9ba/opencv/Source.cpp> (accessed 2 April 2018).
23. Region Growing Algorithm. *Github*. Available at: <https://github.com/emreozanalkan/RegionGrowingAlgorithm> (accessed 2 April 2018).
24. Watershed. *MathWork*. Available at: [https://www.mathworks.com/help/images/ref/watershed.html?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/help/images/ref/watershed.html?s_tid=srchtitle) (accessed 2 April 2018).
25. Watershed. *Github*. Available at: <https://github.com/keke2014/Watershed> (accessed 2 April 2018).
26. *Gwiddion*. Available at: <http://gwyddion.net> (accessed 2 April 2018).

### Інфармацыя аб аўтарах

*Рабцевіч Вioлетта Віктарoвнa* – асiстэнт кафедры інфокоммуникационных технологий, Беларуский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rabceviv@gmail.com

*Цветков Виктор Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий, Беларуский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vtsvet@bsuir.by

*Кузнецова Татьяна Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего лаборатории нанопроцессов и технологий, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kuzn06@mail.ru

*Чижик Сергей Антонович* – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, первый заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chizhik\_sa@tut.by

### Information about the authors

*Violetta V. Rabtsevich* – Assistant of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rabceviv@gmail.com

*Viktar Yu. Tsviatkou* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vtsvet@bsuir.by

*Tatiana A. Kuznetsova* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Deputy of Head of the Laboratory of Nanoprocesses and Technologies, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kuzn06@mail.ru

*Sergey A. Chizhik* – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, First Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chizhik\_sa@tut.by