

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЕГМЕНТАЦИИ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОНОТОННОСТИ УБЫВАНИЯ ЯРКОСТИ СЕГМЕНТОВ

**В. В. РАБЦЕВИЧ, д-р техн. наук, проф. В. Ю. ЦВЕТКОВ**  
*(Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники, Беларусь)*

**Аннотация.** Рассматривается задача количественной оценки качества сегментации изображений атомной силовой микроскопии (АСМ). Для ее решения предложены интегральные показатели на основе монотонности убывания яркости внутри сегмента от локального максимума. Показатели отличаются от известных безэталонных показателей качества сегментации, ориентацией на модель объектов, подходящую для большинства АСМ-изображений. Для определения интегральных показателей используется весовая классификация локальных максимумов и сегментов.

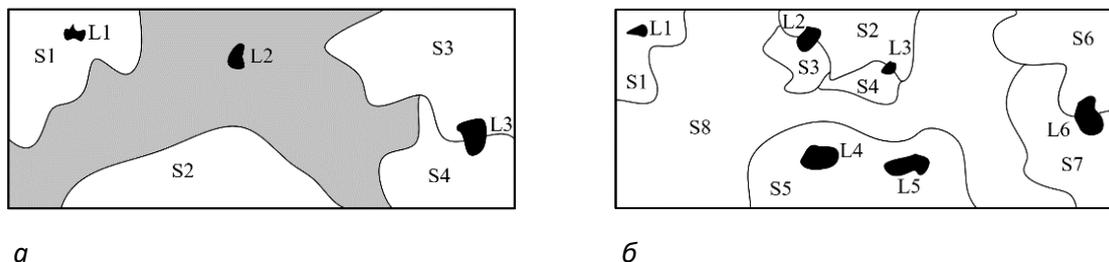
**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, сегментация изображений, показатели качества сегментации, монотонность.

**Введение.** Сегментам на изображениях атомно-силовой микроскопии (АСМ) соответствуют выпуклые трехмерные объекты, расположенные на гладкой поверхности. Для таких сегментов существует один локальный максимум, при удалении от которого яркость монотонно убывает до границы, соответствующей на поверхности материала точке начала подложки или другого объекта. Для детектирования объектов могут применяться алгоритмы сегментации, начиная от простейших, таких как выращивание областей RG (region growing) [1], заканчивая более специализированными, такими как ВОЛМА [2] или алгоритмы водораздела, реализованные в специализированных программных комплексах, например, Gwyddion [3].

Целью работы является повышение качества оценки алгоритмов сегментации, при выделении объектов на АСМ-изображениях, по сравнению с уже существующими, такими как мера контраста на границе сегментов, однородность высоты внутри сегмента, комплексный критерий [4].

**Показатели монотонности убывания яркости сегментов.** Для определения качества сегментации без использования эталонного изображения, предлагаются интегральные показатели монотонности. Показатели вычисляются на основе значений яркости пикселей, изменяющейся от локального максимума к границам сегмента, которая эквивалентна высоте над подложкой, и штрафных коэффициентов, если в пределах найденного сегмента нарушается принцип монотонного

убывания яркости или локальный максимум оказывается разделенным между несколькими сегментами. В результате определяются суммарный  $\sum K_{mon}$  и средний  $\langle K_{mon} \rangle$  показатели монотонности. Весовые коэффициенты локального максимума и сегмента определяют вклад каждого в общую картину. Их значения вычисляются с учетом расположения сегментов и локальных максимумов (рис. 1).



**а** – варианты локализации сегментов (серая область соответствует подложке);  
**б** – варианты расположения локальных максимумов

**Рисунок 1. – Расположение сегментов и локальных максимумов  
(L – локальные максимумы, S – сегменты)**

Весовой коэффициент сегмента определяется с помощью выражения  $W_{S_i} = \frac{A_i}{N_s (\sum_{k=1}^{N_s} A_k) - A_i}$ , где  $A_i$  – площадь рассматриваемого сегмента,  $A_k$  – суммарная  $k$ -го сегмента,  $N_s$  – количество сегментов.

Весовой коэффициент локального максимума вычисляется с помощью выражения  $W_{L_j} = \frac{Q_j}{N_L (\sum_{p=1}^{N_L} Q_p) - A_j}$ , где  $Q_j$  – площадь рассматриваемого локального максимума;  $Q_p$  – площадь  $p$ -го локального максимума;  $N_L$  – количество локальных максимумов.

Для определения показателей монотонности дополнительно вводятся коэффициенты локального максимума  $K_{LM}$  и сегмента  $K_S$ .

Коэффициент локального максимума определяется в зависимости от условий:

- один локальный максимум принадлежит одному сегменту (S1 и L1)  $K_{LM} = 0$ ;
- локальный максимум не принадлежит сегменту (L2, расположенный на подложке),  $K_{LM} = W_L$  – коэффициент локального максимума равен его весовому коэффициенту;
- локальный максимум принадлежит нескольким сегментам (S3, S4, L3),

$$K_{LM} = \frac{W_L}{\sum_{k=1}^p W_S},$$

$W_L$  – весовой коэффициент рассматриваемого локального максимума,

$\sum_{k=1}^P W_S$  – суммарный весовой коэффициент всех сегментов, которым принадлежит рассматриваемый локальный максимум.

Коэффициент сегмента определяется в зависимости от условий:

- в сегменте находится один локальный максимум с  $K_{LM} = 0$  (S1 и L1)  $K_S = 0$ ;
- в сегменте находится один локальный максимум, с коэффициентом сегмента  $K_{LM} > 0$  (случаи S6 и L6), коэффициент сегмента определяется с помощью выражения  $K_S = W_S + K_{LM}$ , где  $W_S$  – весовой коэффициент рассматриваемого сегмента,  $K_{LM}$  – коэффициент локального максимума;

- в сегменте находится несколько локальных максимумов (случаи S5, L4, L5),  $K_S = W_S N_{Li}$ , где  $N_{Li}$  – количество локальных максимумов;

- сегмент содержит несколько локальных максимумов, часть которых или все принадлежат другим сегментам,  $K_{LM} > 0$  (случаи S2, S3, S4, L2 и L3),

$K_S = \frac{W_S}{\sum_{k=1}^P W_{Sk}} + \sum_{k=1}^P K_{LMp}$ , где  $\sum_{k=1}^P W_{Sk}$  – суммарный весовой коэффициент всех сегментов, которые имеют те же локальные максимумы, что и рассматриваемый сегмент,

$\sum_{k=1}^P K_{LMp}$  – сумма всех коэффициентов локальных максимумов.

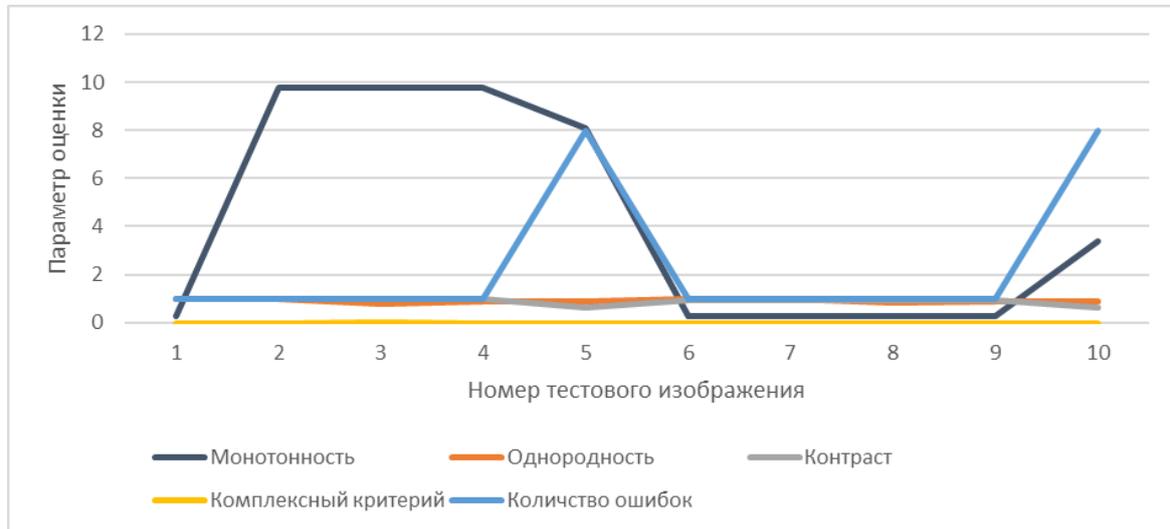
- сегмент не содержит ни одного локального максимума (случай S8), тогда  $K_S = W_S$ .

Итоговые показатели монотонности рассчитываются как средний по всем сегментам  $K_{MON} = \sum_{k=1}^{Ns} K_S + \sum_{k=1}^{Ns} K_{LM}$  или как суммарный для каждого сегмента

$$K_{MON} = \frac{\sum_{k=1}^{Ns} K_S}{N_S} + \frac{\sum_{k=1}^{Nl} K_{LM}}{N_L}.$$

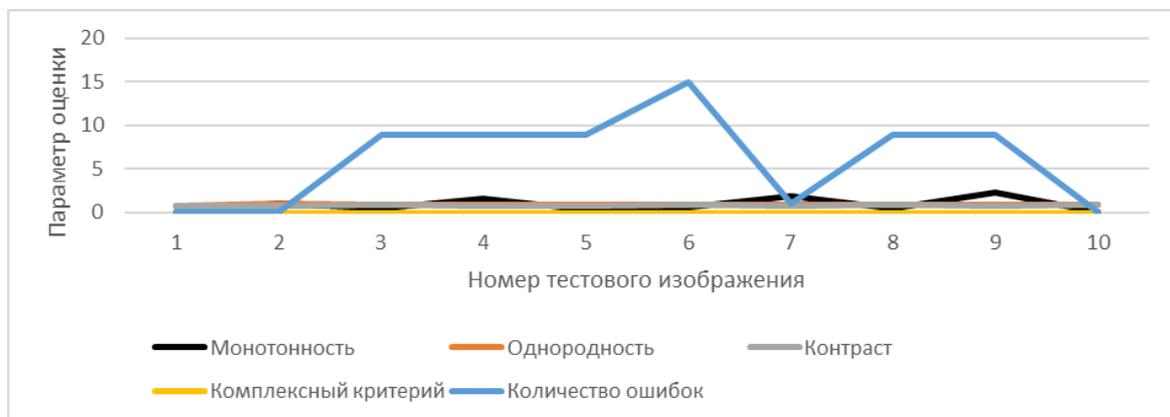
Оценка эффективности алгоритмов сегментации Для сравнения разработанных показателей качества сегментации с известными использовались тестовые изображения, сформированные в Matlab, с установленным количеством объектов. Часть изображений были размыты с применением фильтра Гаусса, таким образом, что на полученных тестовых изображениях общее количество объектов осталось постоянным, но их границы и свойства стали менее выраженными. Для определения границ объектов интереса использованы алгоритмы сегментации, такие как водораздел на основе расстояний (MWD); водораздел по классическому алгоритму Винсента-Солли (VSC-G) [3]; двухфазный водораздел (TPW-G) [3]. Сравнение предложенных показателей качества производилось с такими показателями

как: однородность яркости внутри сегмента, мера контраста на границе соседних сегментов, комплексный показатель [5]. На рис. 2–4 представлены зависимости показателей качества сегментации от количества ошибок сегментации (разность между истинным количеством объектов и количеством найденных сегментов) для 10 тестовых изображений, сформированных в Matlab.

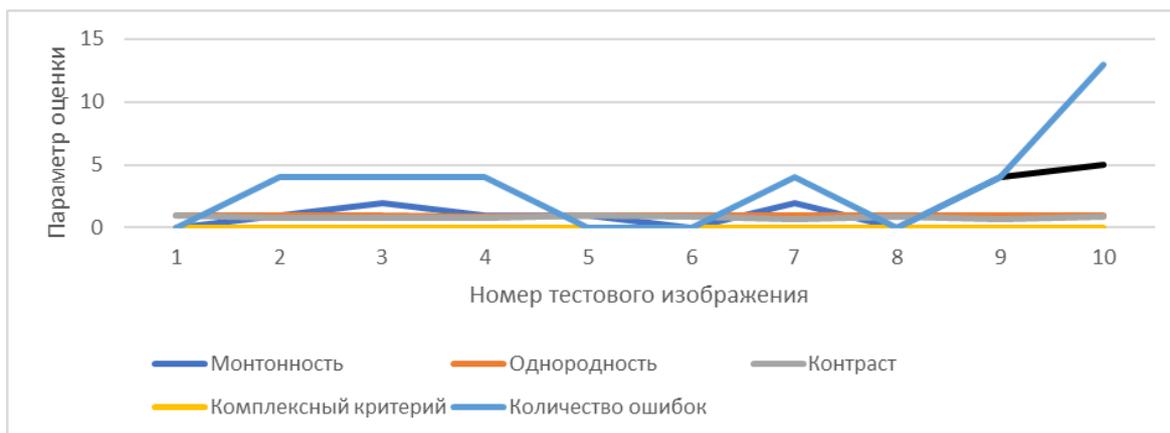


**Рисунок 2. – Зависимости показателей качества от ошибок сегментации для алгоритма MWD**

Из рис. 2–4 следует, что показатели монотонности изменения яркости внутри сегмента имеют лучшую чувствительность к ошибкам сегментации и нарушению модели сегментов. Интегральные показатели в среднем показывают ухудшение качества сегментации для изображений всех типов на 1 порядок. Однако в некоторых случаях, данные показатели показывает рост параметра, при потере некоторых сегментов.



**Рисунок 3. – Зависимости показателей качества от ошибок сегментации для алгоритма VSC-G**



**Рисунок 4. – Зависимости показателей качества от ошибок сегментации для алгоритма TPW-G**

**Заключение.** Предложены интегральные показатели качества сегментации АСМ-изображений на основе оценки монотонности изменения яркости внутри сегментов с учетом площадей локальных максимумов и сегментов. Значения предложенных показателей при ухудшении качества сегментации пропорционально уменьшаются в отличие от известных показателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pratt, W. K. Digital Image Processing / W. K. Pratt. – 3th ed. – Los Altos, California: Jonh Willey & Sons, Inc., 2001. – 738 p.
2. Сегментация АСМ-изображений на основе волнового выращивания областей локальных максимумов с выбором пикселей в порядке убывания значений / В. В. Рабцевич [и др] // Вес. Нац. акад.наук Беларусі. Сер. фіз.-тех.наук. – 2019. – № 2. – С. 215–231.
3. Gwiddion [Electronic resource]. – Mode of access: <http://gwyddion.net>. – Date of access: 02.05.2021.
4. Кольцов, П. П. О количественной оценке эффективности алгоритмов анализа // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 542–556.
5. Захаров, А. В. Критерии оценки качества сегментации изображений // Труды НИИСИ РАН. – 2012. – Т.2, № 2. – С.87–99.