



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-61-69>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932+004.258

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.В. РАБЦЕВИЧ., В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 11 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Приведены результаты оценки эффективности алгоритмов сегментации изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов, полученных с помощью атомного силового микроскопа (АСМ-изображения), а также синтезированных в программных пакетах Matlab и Gwyddion. Для сегментации использованы алгоритмы на основе волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений (без остановки и с остановкой на заданном уровне), маркерного водораздела (с автоматической расстановкой маркеров, под контролем оператора), водораздела на основе расстояний, выращивания областей (без выбора начальных точек, с выбором начальных точек на основе экстремумов), водораздела Винсента – Солли (классического, с предварительным вычислением градиента в восьмисвязной области, с выделением контуров областей и последующим их заполнением), двухфазного водораздела. Рассмотрены реализации алгоритмов сегментации в Matlab и в специализированном программном пакете Gwyddion. Оценка эффективности алгоритмов проведена с использованием числа сегментов, однородности яркости внутри сегментов, контраста на границе соседних сегментов и комплексного критерия, учитывающего однородность яркости в сегментах, их количество и размер.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Рабцевич В.В., Цветков В.Ю. Оценка эффективности алгоритмов сегментации АСМ-изображений. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 61-69.

EFFICIENCY EVALUATION OF SEGMENTATION ALGORITHMS FOR AFM IMAGES

VIYALETA V. RABTSEVICH, VIKTAR YU. TSVIATKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 11 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The results of evaluating the efficiency of algorithms for segmentation of images of surfaces of materials with an absent or weakly expressed substrate and a convex shape of objects obtained using an atomic force microscope (AFM images), as well as synthesized in the Matlab and Gwyddion software are presented. For segmentation, algorithms were used based on wave growth of local maximum regions with their selection in decreasing order of values (without stopping and with stopping at a given level), marker watershed (with automatic placement of markers, under the control of the operator), watershed based on distances, growing areas (without selecting starting points, with the choice of starting points based on extrema), the Vincent – Sulli watershed (classical, with a preliminary calculation of the gradient in an eight-connected area, with the selection of the contours of the areas and their subsequent filling), a two-phase watershed. Segmentation algorithms realization in Matlab and in the specialized software package Gwyddion are considered. Algorithms efficiency was assessed using segments number, uniformity brightness within a segment, contrast at the border of adjacent segments, and a complex criterion that takes into account the uniformity of segments brightness, their number and size.

Keywords: image segmentation, atomic force microscopy, wave growing regions, Vincent – Sulli watershed, local maximum, AFM images, marker watershed.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Rabtsevich V.V., Tsviatkou V.Yu. Efficiency Evaluation of Segmentation Algorithms for AFM Images. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 61-69.

Введение

В атомно-силовой микроскопии (АСМ) используются три режима измерения: контактный, бесконтактный и полуконтактный. Независимо от режима измерения и природы (электрическая, механическая, магнитная, тепловая и др.) физической величины, на основе которой проводится измерение, регистрируются две силы – притяжения, которая действует на большом расстоянии от поверхности, и отталкивания – на малом расстоянии [1]. В результате сканирования прямоугольного фрагмента поверхности материала формируется двумерная матрица чисел, эффективно представляемая полутоновым АСМ-изображением, в котором яркости пикселей коррелируют с экстремумами измеренной физической величины в соответствующих точках зондирования поверхности.

Для автоматизированной оценки качества материалов используется сегментация АСМ-изображений, позволяющая выделять области, соответствующие структурным составляющим поверхностей материалов. Алгоритмы сегментации основаны на учете различных локальных характеристик изображений (направление градиента, различие в значениях смежных пикселей, местоположение локальных экстремумов и т. д.) и дают поэтому различные результаты на одних и тех же изображениях. В этой связи имеет смысл рассматривать задачу выбора наиболее эффективного алгоритма для сегментации изображений определенного типа. В данной работе рассматриваются АСМ-изображения поверхностей материалов (металлы с плотной атомной решеткой, волокна с высокой плотностью элементов), в которых подложка отсутствует или слабо выражена, а объекты имеют выпуклую форму. АСМ-изображения такого типа могут быть представлены моделью в виде совокупности областей, яркость каждой из которых монотонно уменьшается от локального максимума, соответствующего вершине объекта, до локальных минимумов, соответствующих подложке или границе другой области.

Показатели качества сегментации изображений также могут давать противоречивые результаты для одних и тех же изображений. Это связано с учетом различных характеристик изображений: дисперсии яркости внутри сегментов, контраста на границах сегментов, числа и размеров сегментов [2]. Поэтому для объективной оценки качества сегментации АСМ-изображений необходимо использовать несколько таких показателей.

Целью работы является определение наиболее эффективных алгоритмов выделения областей на основе различных показателей качества сегментации для синтезированных и реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов.

Оцениваемые алгоритмы сегментации и тестовые АСМ-изображения

Оценка эффективности алгоритмов сегментации осуществлена с использованием их реализаций в Matlab (M) и в программном пакете Gwyddion (Gwyddion [Electronic resource]. – Mode of access: <http://gwyddion.net>. – Date of access: 02.05.2021.) (G). Исследованы алгоритмы на основе: волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений AWS (AWS-M) [3]; волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений и остановкой на заданном уровне AWSS (AWSS-M) [3]; маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров (MWA-M) [4]; водораздела на основе расстояний (MWD-M) [4]; выращивания областей без выбора начальных точек (RG-M) [5]; выращивания областей с выбором начальных точек на основе экстремумов (SRG-M) [6]; водораздела по классическому алгоритму Винсента – Солли (VSC-G) [7]; двухфазного водораздела (TPW-G) [3].

Для оценки эффективности данных алгоритмов использованы тестовые АСМ-изображения поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов. Тестовые изображения разделены на три типа: 1) синтезированные в Matlab (54 базовых и производные от них изображения, содержащих от 9 до 200 объектов с различными яркостями и формами); 2) синтезированные в программном пакете Gwyddion (205 изображений, имитирующих различные материалы); 3) полученные с помощью атомно-силового микроскопа (98 изображений поверхностей различных материалов с предварительным выравниванием высоты подложки, без подавления шумов и артефактов). Изображения каждого типа дополнительно разделены на группы (рис. 1, 2).

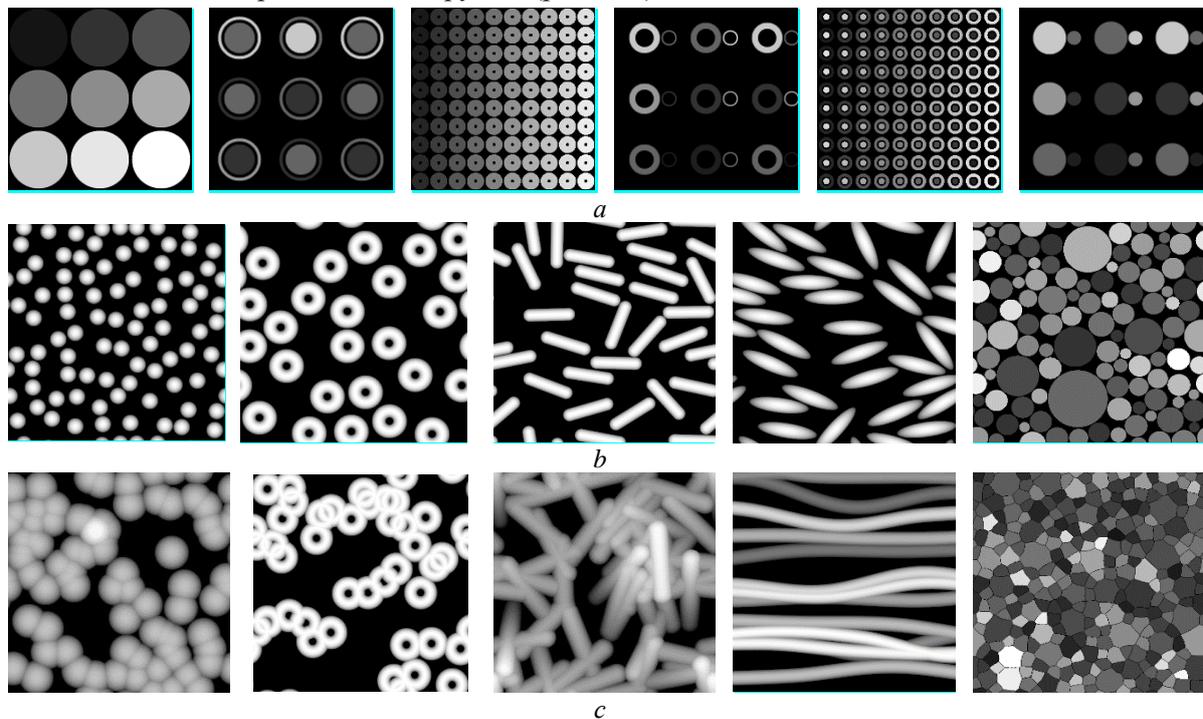


Рис. 1. Примеры тестовых АСМ-изображений типов 1 и 2: *a* – тип 1, группа 1; *b* – тип 2, группа 1; *c* – тип 2, группа 2
Fig. 1. Examples of test AFM images types 1 and 2: *a* – type 1, group 1; *b* – type 2, group 1; *c* – type 2, group 2

Изображения первого типа разделены на три группы: контрольная (группа 1), состоящая из синтезированных изображений, содержащих объекты с известными параметрами (рис. 1, *a*), и группы 2 и 3, изображения которых содержат те же объекты, что и первая группа, но после гаусс-фильтра с размерами 3 и 5 и стандартным отклонением 10 и 15 соответственно (для имитации реальных АСМ-изображений).

Изображения второго и третьего типов разделены на две группы в зависимости от взаимного расположения объектов на поверхности материала: группа 1 – изображения отдельно расположенных объектов (рис. 1, *b* – тип 2, рис. 2, *a* – тип 3); группа 2 – изображения соприкасающихся и перекрывающихся объектов (рис. 1, *c* – тип 2, рис. 2, *b* – тип 3).

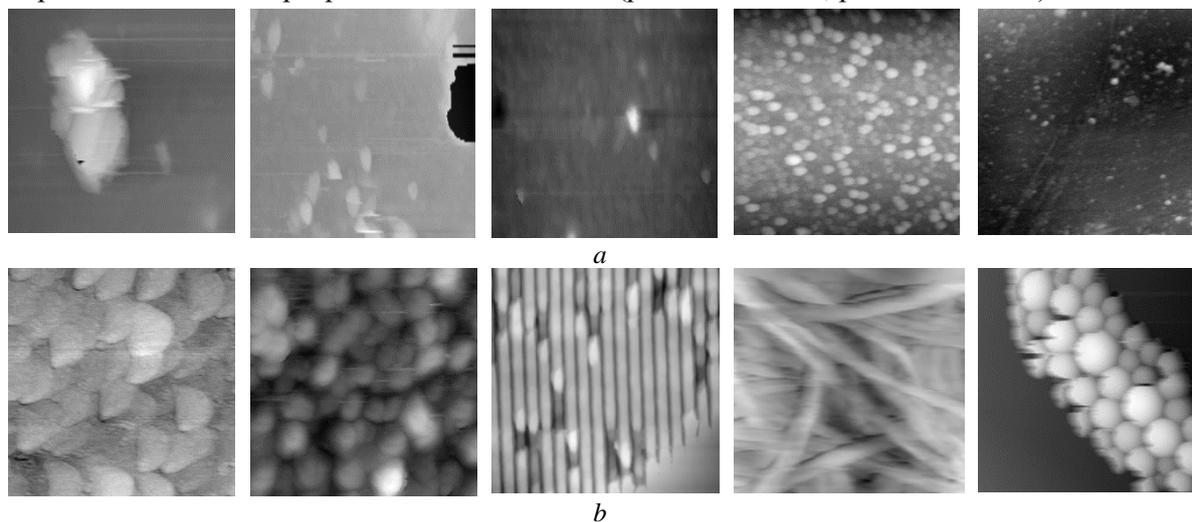


Рис. 2. Пример тестовых АСМ-изображений типа 3: *a* – группа 1; *b* – группа 2
Fig. 2. Example of test AFM images type 3: *a* – group 1; *b* – group 2

Оценка качества сегментации АСМ-изображений на основе числа сегментов

Произведена оценка качества сегментации синтезированных и реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов по числу сегментов. В табл. 1–3 приведены средние (AD), максимальные (MaxDV) и минимальные (MinDV) значения разниц, стандартные отклонения (SD) для истинного числа сегментов и числа сегментов, обнаруженных на тестовых изображениях различных типов.

Таблица 1. Значения показателей качества сегментации на основе числа сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 1

Table 1. Segmentation quality indicators based on segments number for the first type of test AFM images

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	RG-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (54 изображения)	AD	0,00	27,33	61,61	591,50	0,00	67,78	1,61
	MaxDV	0,00	101,00	219,00	2700,00	0,00	221,00	10
	MinDV	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
	SD	0,00	39,79	78,34	757,625	0,00	77,76	2,06
Группа 2 (54 изображения)	AD	0,61	23147,72	60,83	585,83	0,61	57,56	1,11
	MaxDV	9,00	51701,00	219,00	3100,00	9,00	241,00	2,00
	MinDV	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
	SD	2,12	166882,05	78,91	802,8876	2,06	86,39	0,32
Группа 3 (54 изображения)	AD	10,94	48294,06	55,22	561,06	6,94	67,61	8,89
	MaxDV	93,00	109201,00	199,00	2320,00	57,00	260,00	99,00
	MinDV	0,00	283,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
	SD	29,08	34723,59	68,12	700,40	17,82	90,83	23,86
Среднее значение по группам		3,85	23823,04	59,22	579,46	2,52	64,15	3,87

Таблица 2. Значения показателей качества сегментации на основе числа сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 2

Table 2. Segmentation quality indicators based on segments number for the second type of test AFM images

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	RG-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (105 изображений)	AD	583,87	49731,28	620,91	826,09	590,38	630,35	645,00
	MaxDV	11666,00	85533,00	11666,00	12129,00	11667,00	11737,00	11819,00
	MinDV	0,00	365,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00
	SD	1499,91	21854,79	1487,98	1607,34	1498,39	1523,18	1541,51
Группа 2 (100 изображений)	AD	30,03	64182,58	226,75	82,69	26,98	24,94	72,18
	MaxDV	299,00	131771	861,00	394,00	189,00	135,00	312,00
	MinDV	1,00	13057	12,00	1,00	0,00	0,00	2,00
	SD	47,75	25863,86	205,1664	84,86	39,46	33,05	68,78
Среднее значение по группам		306,95	56956,93	423,83	454,39	308,68	327,65	358,59

Таблица 3. Значения показателей качества сегментации на основе числа сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 3

Table 3. Segmentation quality indicators based on segments number for the third type of test AFM images

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации				
		AWS-M	RG-M	MWA-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (57 изображений)	AD	3542,05	32601,07	5233,77	4553,41	2323,68
	MaxDV	14279,00	143860,00	15839,00	13889,00	10362,00
	MinDV	12,00	822,00	10,00	9,00	5,00
	SD	4221,98	32308,13	4236,24	3838,83	2476,50
Группа 2 (41 изображение)	AD	2026,37	37513,46	3078,98	2778,22	1627,90
	MaxDV	19774,00	133552,00	19774,00	16057,00	7540,00
	MinDV	12,00	2789,00	0,00	158,00	0,00
	SD	3680,23	27356,69	3470,50	3222,20	1733,51
Среднее значение по группам		2784,21	35057,27	4156,38	3665,82	1975,79

Из табл. 1 следует, что минимальное отклонение показывают алгоритмы AWS, SRG-M и VSC-G. Алгоритм AWS показывает результат, аналогичный VSC-G, но в 1,53 раза хуже по сравнению с SRG-M. Однако алгоритм VSC-G выполняется под контролем оператора, с возможностью выбора оптимальных параметров сегментации, а SRG-M требует предварительного определения начальных точек роста. Алгоритм RG-M обнаруживает в 6188 раз больше сегментов по сравнению с алгоритмом AWS (пересегментация). Алгоритмы MWA-M, MWD-M и TPW-G показывают соответственно в 15,38, 150,51 и 16,67 раза больше ошибок при нахождении количества сегментов по сравнению с алгоритмом AWS.

Из табл. 2 следует, что минимальное отклонение показывает алгоритм AWS, количество ошибок для которого уменьшается в 1,01, 185,56, 1,38, 1,48, 1,07 и 1,17 раза по сравнению с алгоритмами SRG-M, RG-M, MWA-M, MWD-M, TPW-G и VSC-G соответственно.

Из табл. 3 следует, что алгоритм AWS проигрывает по точности только алгоритму VSC-G в 1,41 раза, который выполняется под контролем оператора, и показывает результаты лучше в 12,59, 1,49 и 1,32 раза по сравнению с алгоритмами RG-M, MWA-M и TPW-G. Из сравнения исключен алгоритм SRG-M, так как основан на предварительном поиске локальных экстремумов и разница между количеством найденных объектов и экстремумов равна нулю. Алгоритм MWD-M не распознал объекты на тестовых АСМ-изображениях из-за содержащегося в них шума.

Оценка качества сегментации АСМ-изображений на основе однородности, контраста и комплексного критерия

Произведена оценка качества сегментации синтезированных и реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов по однородности яркости (яркость эквивалентна высоте в канале топологии АСМ-изображения) внутри сегмента [8], глобальному контрасту на границах сегментов [9] и комплексному критерию [10].

Однородность U_{Mz} вычисляется на основе дисперсии яркости внутри сегментов с помощью выражения ($1 -$ лучшее значение)

$$U_{Mz} = 1 - \sum_{S_i \in Mz} \frac{\omega_i \sigma_i^2}{N}, \quad (1)$$

где $\omega_i = \frac{A_i \sigma_i^2}{A_{Mz} \sigma_{\max}^2}$ – вес, определяющий вклад сегмента в результирующую матрицу; A_i – площадь

i -го сегмента; A_{Mz} – площадь всей матрицы; σ_i^2 – дисперсия яркости в i -м сегменте, $\sigma_i^2 = \sum_{i \in S} \frac{(f_i - \bar{f}_i)^2}{A_i}$;

$\sigma_{\max}^2 = \frac{1}{2}(f_{\max} - f_{\min})^2$ – максимальное значение дисперсии признака; N – нормирующий множитель; f_{\max} , f_{\min} – максимальные и минимальные значения яркости на всей исследуемой матрице сегментации; \bar{f}_i – среднее значение яркости в i -м сегменте.

Контраст C_{Mz} на границе соседних сегментов определяется как (1 – лучшее значение)

$$C_{Mz} = \frac{\sum_{S_i \in Mz} \omega_i c_i}{\sum_{S_i \in Mz} \omega_i}, \quad (2)$$

где $c_i = \sum_{S_j} p_{ij} c_{ij}$ – контраст рассматриваемого сегмента; p_{ij} – коэффициент смежности

рассматриваемого сегмента; $c_{ij} = \frac{|\bar{f}_i - \bar{f}_j|}{\bar{f}_i + \bar{f}_j}$ – контраст двух соседних сегментов.

Комплексный критерий Q учитывает однородность яркости внутри сегментов, их количество и размер и определяется с помощью выражения (0 – лучшее значение)

$$Q = \frac{1}{10000N} \sqrt{R} \sum_{i=1}^R \left[\frac{e_i^2}{1 + \log A_i} + \left(\frac{R(A_i)}{A_i} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где N – количество пикселей на изображении; R – количество сегментов; e_i – величина, характеризующая степень однородности i -го сегмента (изменяется в пределах 0–1, 0 – лучшее значение); $R(A_i)$ – количество сегментов, имеющих площадь, близкую к A_i .

В табл. 4 – 6 приведены значения U_{Mz} , C_{Mz} , Q , усредненные по изображениям. Из анализа исключен алгоритм RG-M из-за пересегментации.

Таблица 4. Значения показателей качества сегментации на основе однородности яркости, контраста, количества и размеров сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 1

Table 4. Values of segmentation quality indicators based on uniformity of brightness, contrast, number and size of segments for test AFM images of type 1

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	AWSS-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (54 изображения)	U_{Mz}	0,66	1,00	0,81	0,88	0,99	0,81	1,00
	C_{Mz}	0,17	1,00	0,44	0,82	0,99	0,72	0,94
	Q	6,39E-05	2,77E-06	1,67E-04	4,70E-02	2,93E-06	2,80E-04	3,39E-06
Группа 2 (54 изображения)	U_{Mz}	0,69	0,92	0,83	0,87	0,93	0,83	0,93
	C_{Mz}	0,19	0,98	0,42	0,80	0,79	0,67	0,99
	Q	4,93E-05	2,31E-06	9,59E-05	6,56E-02	8,20E-06	4,08E-02	2,31E-06
Группа 3 (54 изображения)	U_{Mz}	0,72	0,87	0,85	0,85	0,89	0,85	0,89
	C_{Mz}	0,19	0,91	0,43	0,77	0,68	0,65	0,99
	Q	4,20E-05	2,03E-06	9,61E-05	3,42E-02	5,15E-05	2,37E-04	1,56E-06
U_{Mz} среднее по группам		0,69	0,93	0,83	0,87	0,94	0,83	0,94
C_{Mz} среднее по группам		0,18	0,96	0,43	0,79	0,89	0,68	0,97
Q среднее по группам		5,17 E-05	2,37 E-06	1,19 E-04	4,89 E-02	2,09E-05	1,38E-02	2,42 E-06

Таблица 5. Значения показателей качества сегментации на основе однородности яркости, контраста, количества и размеров сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 2

Table 5. Values of segmentation quality indicators based on uniformity of brightness, contrast, number and size of segments for test AFM images of type 2

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	AWSS-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (105 изображений)	U_{Mz}	0,75	0,93	0,22	0,94	0,79	0,93	0,93
	C_{Mz}	0,14	0,93	0,19	0,96	0,68	0,85	0,99
	Q	1,05E-04	1,96E-02	4,86E-01	3,85E-02	1,32	1,26E-02	8,37E-03
Группа 2 (100 изображений)	U_{Mz}	0,81	0,94	0,87	0,90	0,84	0,86	0,93
	C_{Mz}	0,16	0,54	0,47	0,65	0,58	0,52	0,85
	Q	2,47E-05	5,70E-02	2,58E-05	2,14E-04	1,07E-03	9,21E-05	1,68E-06
U_{Mz} среднее по группам		0,78	0,93	0,55	0,92	0,82	0,90	0,93
C_{Mz} среднее по группам		0,15	0,74	0,33	0,74	0,63	0,69	0,92
Q среднее по группам		6,49E-05	3,83E-02	2,40E-01	1,93E-02	6,60E-01	6,30E-03	4,19E-03

Таблица 6. Значения показателей качества сегментации на основе однородности яркости, контраста, количества и размеров сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 3

Table 6. Values of segmentation quality indicators based on uniformity of brightness, contrast, number and size of segments for test AFM images of type 3

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	AWSS-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (57 изображений)	U_{Mz}	0,94	0,96	0,81	–	0,97	0,97	0,95
	C_{Mz}	0,13	0,13	0,14	–	0,19	0,15	0,25
	Q	3,85E+01	1,86E+01	1,58E-01	–	3,27E+03	5,04E-01	8,33E+01
Группа 2 (41 изображение)	U_{Mz}	0,96	0,98	0,76	–	0,97	0,96	0,97
	C_{Mz}	0,09	0,15	0,14	–	0,22	0,13	0,28
	Q	8,16E-01	5,10E+00	2,20E-01	–	8,86E+02	3,79E-01	7,23E+01
U_{Mz} среднее по группам		0,95	0,97	0,79	–	–	0,97	0,96
C_{Mz} среднее по группам		0,11	0,14	0,14	–	–	0,14	0,27
Q среднее по группам		1,97 E+01	1,19E+01	1,89E-01	–	–	4,42E-01	7,78 E+01

Из табл. 4 следует, что по однородности яркости внутри сегментов в трех группах лучший результат показывают алгоритмы AWSS-M, SRG-M и VSC-G. Алгоритмы AWS-M и MWD-M проигрывают им в 1,35 и 1,07 раза, а алгоритмы MWA-M и TPW-G – в 1,12 раза. По контрасту алгоритмы AWSS-M и VSC-G превосходят алгоритм AWS-M в 5,33 раза, MWA-M – в 2,23 раза, MWD-M – в 1,22 раза, SRG-M – в 1,05 раза, TPW-G – в 1,37 раза. По комплексному критерию алгоритмы AWSS-M и VSC-G превосходят алгоритмы AWS-M и SRG-M на порядок, MWA-M – на два порядка, MWD-M и TPW-G – на четыре порядка.

Из табл. 5 следует, что по однородности яркости внутри сегментов в двух группах лучший результат показывают алгоритмы AWSS-M и VSC-G. Алгоритмы AWS-M, MWA-M, MWD-M, SRG-M и TPW-G проигрывают им в 1,19, 1,69, 1,01, 1,13 и 1,04 раза. По контрасту алгоритм VSC-G превосходит алгоритм AWSS-M в 1,24 раза. Алгоритмы AWSS-M и MWD-M превосходят алгоритм AWS-M в 4,93 раза, MWA-M – в 2,24 раза, SRG-M – в 1,17 раза, TPW-G – в 1,08 раза. По комплексному критерию алгоритм AWS-M показывает лучший результат, превосходя алгоритмы VSC-G и TPW-G на два порядка, алгоритмы AWSS-M и MWD-M – на три порядка, алгоритмы MWA-M и SRG-M – на четыре порядка.

Из табл. 6 следует, что по однородности яркости внутри сегментов алгоритмы AWS, AWSS, SRG-M, TPW-G и VSC-G показывают практически одинаковый результат, который в среднем в 1,22 раза лучше по сравнению с MWA-M. Алгоритм VSC-G показывает лучший результат по контрасту по сравнению с MWA-M, AWSS и TPW-G в 1,93 раза, по сравнению с SRG-M – в 1,29 раза, по сравнению с AWS – в 2,45 раза.

По комплексному критерию алгоритмы TPW-G и MWA-M показывают лучшие результаты на два порядка по сравнению с AWS, AWSS и VSC-G, на четыре порядка – по сравнению с SRG-M. В табл. 6 отсутствуют данные для алгоритма MWD-M из-за недостаточной сегментации. Для алгоритма AWSS уровень остановки определяется по крайнему левому резкому изменению гистограммы изображения.

Заключение

Анализ результатов сегментации реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов, полученных с использованием различных алгоритмов сегментации, показал, что все они обеспечивают высокую однородность распределения яркости сегментов, за исключением алгоритмов водораздела на основе автоматической расстановки маркеров и расстояний. По контрасту результатов сегментации лучшие результаты показывают алгоритмы водораздела Винсента – Солли (примерно в 2 раза) и выращивания областей с выбором начальных точек на основе экстремумов (примерно в 1,5 раза). Однако эти алгоритмы значительно проигрывают другим алгоритмам по комплексному критерию, учитывающему однородность яркости внутри сегментов, их количество и размер. Кроме того, алгоритм водораздела Винсента – Солли выполняется под контролем оператора, а алгоритм выращивания областей с выбором начальных точек на основе экстремумов требует предварительного их выделения, что ведет к существенному росту вычислительной сложности. Лучшие по комплексному критерию алгоритмы двухфазного водораздела, выполняемого под контролем оператора, и маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров показывают существенно большие значения ошибок по числу сегментов по сравнению с другими алгоритмами. Наименьшие ошибки по числу сегментов показывают алгоритмы водораздела Винсента – Солли и волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений. Алгоритмы волнового выращивания областей локальных максимумов не требуют участия оператора в процессе сегментации, чем превосходят алгоритмы Винсента – Солли и двухфазного водораздела, а также обеспечивают большую скорость сегментации по сравнению с этими и другими алгоритмами. Среди алгоритмов автоматической сегментации с учетом минимальных ошибок сегментации, высоких значений однородности и контраста, а также средних значений комплексного критерия алгоритмы волнового выращивания областей локальных максимумов являются наиболее эффективными для сегментации реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов. На АСМ-изображениях, синтезированных в Matlab и Gwyddion, эти алгоритмы также показывают лучшие результаты.

Список литературы

1. Головин Ю.И. *Основы нанотехнологий*. М.: Машиностроение; 2012.
2. Zakharov A.V., Koltsov P.P., Osipov A.S., Kutsaev A.S., Kravchenko. [On the quantitative performance evaluation of image analysis algorithms]. *Trudy NIISI RAN*. 2012;2(2):87-99. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-542-556.
3. Рабцевич В.В., Цветков В.Ю. Сегментация АСМ-изображений на основе волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений. *Доклады БГУИР*. 2022; 20(3): 26-35.
4. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing. Third Edition*. 2008: 798-800.
5. Pratt W.K. *Digital Image Processing. Third Edition*. 2001:562-566.
6. Fan M., Lee T. Variants of seeded region growing. *Image Processing IET*. 2015;9(6):478-485. DOI: 10.1049/iet-ipr.2014.0490.
7. Vincent L., Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991;13:583-598. DOI: 10.1109/34.87344.
8. Levine M.D., Nazif A. Dynamic measurement of computer generated image segmentations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1985;7(2):155-164. DOI: 10.1109/TPAMI.1985.4767640.
9. Remes V., Haindl M. Region of interest contrast measures. *Kybernetika*. 2018;54(5):978-990. DOI: 10.14736/kyb-2018-5-0978.

10. Borsotti M., Campadelli P., Schettini R. Quantitative evaluation of color image segmentation results. *Pattern Recognition Letters*. 1998;19(8):741-747. DOI: 10.1016/S0167-8655(98)00052-X.

References

1. Golovin Yu.I. [*Fundamentals of nanotechnology*]. Moscow: Mashinostroenie; 2012. (in Russ.)
2. Zakharov A.V., Koltsov P.P., Osipov A.S., Kutsaev A.S., Kravchenko. [On the quantitative performance evaluation of image analysis algorithms]. *Trudy NIISI RAN*. 2012;2(2):87-99. DOI:10.18287/0134-2452-2015-39-4-542-556.
3. Rabtsevich V.V., Tsviatkou V.Yu. AFM Image Segmentation Based on Wave Growth of Local Maximum Regions with their Selection in Order of Decreasing Values. *Doklady BGUIR*. 2022; 20(3): 26-35.
4. Gonzalez, R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing, Third Edition*. 2008: 798-800.
5. Pratt, W. K. *Digital Image Processing, Third Edition*. 2001:562-566.
6. Fan M., Lee T. Variants of seeded region growing. *Image Processing IET*. 2015;9(6):478-485. DOI:10.1049/iet-ipr.2014.0490
7. Vincent L., Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991;13:583-598. DOI:10.1109/34.87344.
8. Levine M.D., Nazif A. Dynamic measurement of computer generated image segmentations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1985;7(2):155-164. DOI:10.1109/TPAMI.1985.4767640
9. Remes V., Haindl M. Region of interest contrast measures. *Kybernetika*. 2018;54 (5): 978-990. DOI:10.14736/kyb-2018-5-0978
10. Borsotti M., Campadelli P., Schettini R. Quantitative evaluation of color image segmentation results. *Pattern Recognition Letters*. 1998;19(8):741-747. DOI: 10.1016/S0167-8655(98)00052-X.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Рабцевич В.В., ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Цветков В.Ю., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Rabtsevich V.V., Assistant at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tsviatkou V.Yu., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. + 375 017 293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375 017 293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich