



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-78-86>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.932

## ЛОКАЛЬНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МЕТРИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОМБИНИРОВАНИЯ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

М. Ю. ЛОВЕЦКИЙ<sup>1,2</sup>, В. Ю. ЦВЕТКОВ<sup>1</sup>, А. А. БОРИСКЕВИЧ<sup>1</sup>,  
В. А. ЛАПИЦКАЯ<sup>2</sup>, С. А. ЧИЖИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 14.10.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Рассмотрена задача оценки качества комбинирования компонентных изображений, формируемых в двух синхронных каналах атомного силового микроскопа (АСМ-изображений). Предложена вычислительно простая метрика качества комбинирования компонентных АСМ-изображений на основе коэффициентов локальной корреляции, учитывающая вклад каждого из компонентных АСМ-изображений в результирующее комбинированное АСМ-изображение и корреляцию между компонентными АСМ-изображениями. Показано, что локальная корреляция обеспечивает более высокую точность оценки качества комбинирования АСМ-изображений по сравнению с глобальной корреляцией.

**Ключевые слова:** атомная силовая микроскопия, оценка качества комбинирования изображений, глобальная корреляция изображений, локальная корреляция изображений.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках задания 3.03.3 подпрограммы «Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии» (ГПНИ «Конвергенция-2025»).

**Для цитирования.** Локальная корреляционная метрика для оценки качества комбинирования АСМ-изображений / М. Ю. Ловецкий [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 78–86. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-78-86>.

## LOCAL CORRELATION METRIC FOR ASSESSING THE QUALITY OF COMBINED AFM IMAGES

MIKHAIL YU. LAVETSKI<sup>1,2</sup>, VIKTAR YU. TSVIATKOU<sup>1</sup>, ANATOLY A. BORISKEVICH<sup>1</sup>,  
VASILINA A. LAPITSKAYA<sup>2</sup>, SERGEI A. CHIZHIK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>A. V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus  
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 14.10.2022

**Abstract.** The problem of assessing the quality of combining component images formed in two synchronous channels of an atomic force microscope (AFM images), is considered. A computationally simple quality metric for combining component AFM images, based on local correlation coefficients is proposed, taking into account the contribution of each of the component AFM images to the resulting combined AFM image and the correlation

between component AFM images. It is shown that local correlation provides a higher accuracy of AFM images combination quality estimation in comparison to the global correlation.

**Keywords:** atomic force microscopy, image combination quality assessment, global image correlation, local image correlation.

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

**Gratitude.** The work was performed within the framework of task 3.03.3 of the subprogram “Interdisciplinary research and new emerging technologies” (SPNI “Convergence-2025”).

**For citation.** Lavetski M. Yu., Tsviatkou V. Yu., Boriskevich A. A., Lapitskaya V. A., Chizhik S. A. (2023) Local Correlation Metric for Assessing the Quality of Combined AFM Images. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 78–86. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-78-86> (in Russian).

## Введение

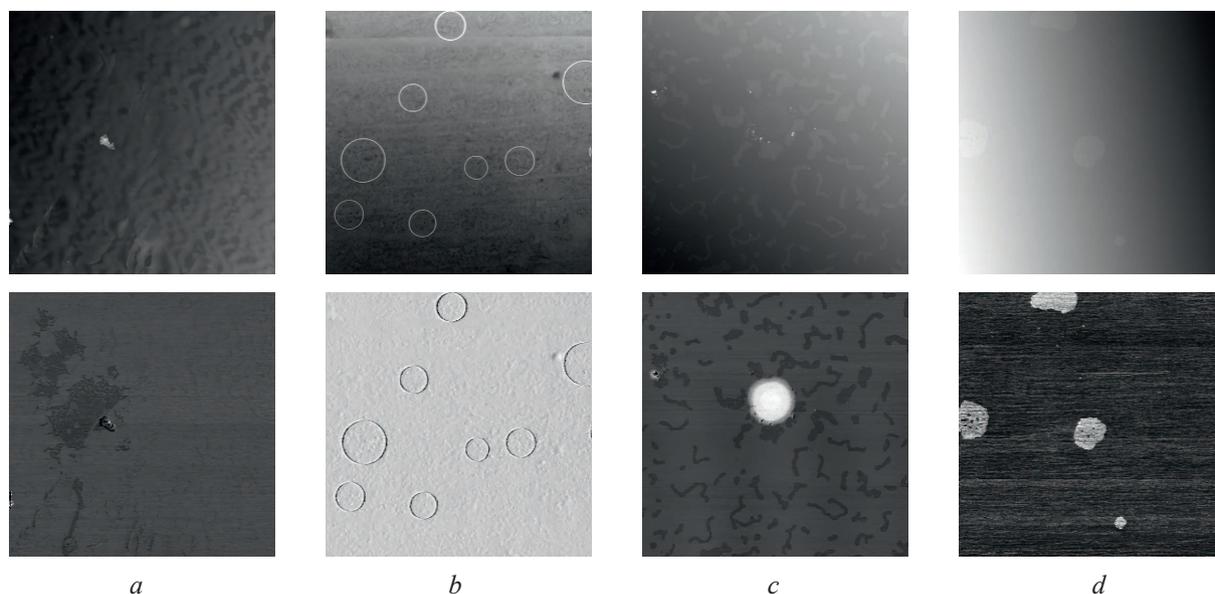
В атомно-силовой микроскопии (АСМ) при сканировании фрагмента поверхности материала могут использоваться несколько параллельных синхронизированных измерительных каналов для различных физических величин. Формируемые в этих измерительных каналах значения комбинируются в несколько двумерных матриц чисел, эффективно представляемых многоканальными АСМ-изображениями, в которых яркости пикселей каждого канала отражают значения измеряемой физической величины в соответствующих точках поверхности. Наиболее часто используются каналы, описывающие высоту, вязкость и жесткость поверхности, а также деформацию зонда и рассеивание энергии во время сканирования.

При визуальном анализе многоканальных АСМ-изображений возникает необходимость объединения их каналов для совместного отображения на стандартных мониторах, имеющих относительно узкий динамический диапазон, с минимальными искажениями и потерями деталей. Комбинированное изображение, формируемое в результате объединения изображений измерительных каналов, может быть цветным (т. е. трехканальным) или полутоновым. В статье рассматривается формирование комбинированных полутоновых АСМ-изображений на основе двух измерительных каналов.

Для объединения изображений широко используются подходы, основанные на взвешенном сложении, методе главных компонент [1], дискретном вейвлет-преобразовании [2] и др. Среди них нет подходов, специально ориентированных на объединение изображений, формируемых в измерительных каналах атомного силового микроскопа. Отсутствуют также рекомендации по выбору алгоритма для эффективного формирования комбинированных АСМ-изображений. Разработка этих рекомендаций требует оценки качества таких изображений. Для оценки качества комбинированных полутоновых изображений широко используются показатели, основанные на анализе краев [3, 4], взаимной информации [5], оценке количества информации в изображении [6], оценке точности визуальной информации в различных масштабах представления изображения [7] и др. Ни один из этих показателей специально не ориентирован на оценку качества комбинированных АСМ-изображений. Относительной простотой вычислений отличается коэффициент корреляции. Он основан на вычислении средних значений изображений и не учитывает локальные особенности распределения яркости. АСМ-изображения отличаются существенными локальными неоднородностями распределения яркости, что снижает точность оценки их качества с помощью коэффициента корреляции. Целью исследований авторов являлось повышение точности оценки качества комбинирования АСМ-изображений на основе коэффициента корреляции.

## Выбор метода формирования комбинированных АСМ-изображений

На рис. 1 приведены примеры АСМ-изображений, полученных в нескольких синхронных измерительных каналах атомно-силового микроскопа Dimension FastScan компании Bruker. Изображения каждого канала имеют размер 256×256 пикселей и разрядность 8 бит. Для оценки точности показателей качества комбинированных АСМ-изображений необходимо выбрать метод их формирования. Исходя из предположения о независимости эффективности методов объединения изображений и точности показателей качества комбинированных изображений для формирования комбинированных АСМ-изображений выбран простейший метод взвешенного сложения.



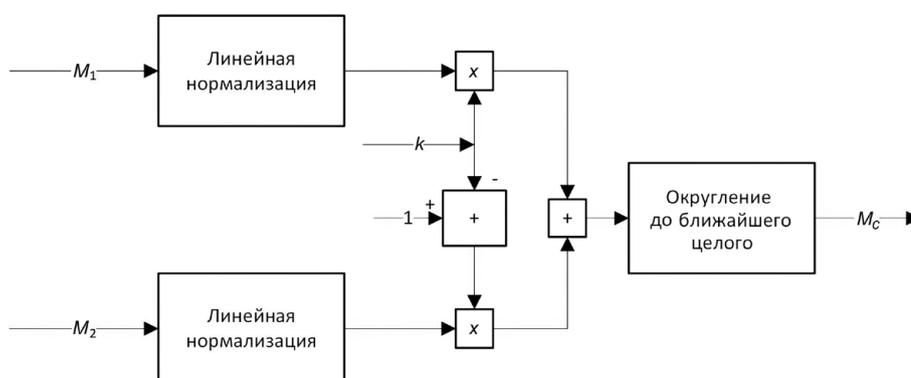
**Рис. 1.** АСМ-изображения в двух измерительных каналах атомного силового микроскопа:  
*a* – металлизированная наноструктурированная никелевая поверхность;  
*b–d* – металлизированные наноструктурированные никелевые поверхности с полимерными пленками  
**Fig. 1.** AFM images in two measuring channels of an atomic force microscope:  
*a* – metallized nanostructured nickel surface; *b–d* – metallized nanostructured nickel surfaces with polymer films

Согласно данному методу, значения пикселей  $m_c(y, x)$  комбинированного АСМ-изображения  $M_c = \|m_c(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  вычисляются на основе значений пикселей АСМ-изображений  $M_1 = \|m_1(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  первого и  $M_2 = \|m_2(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  второго измерительных каналов атомного силового микроскопа с помощью выражения

$$m_c(y, x) = [k m_1(y, x) + (1 - k) m_2(y, x)], \text{ при } y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}, \quad (1)$$

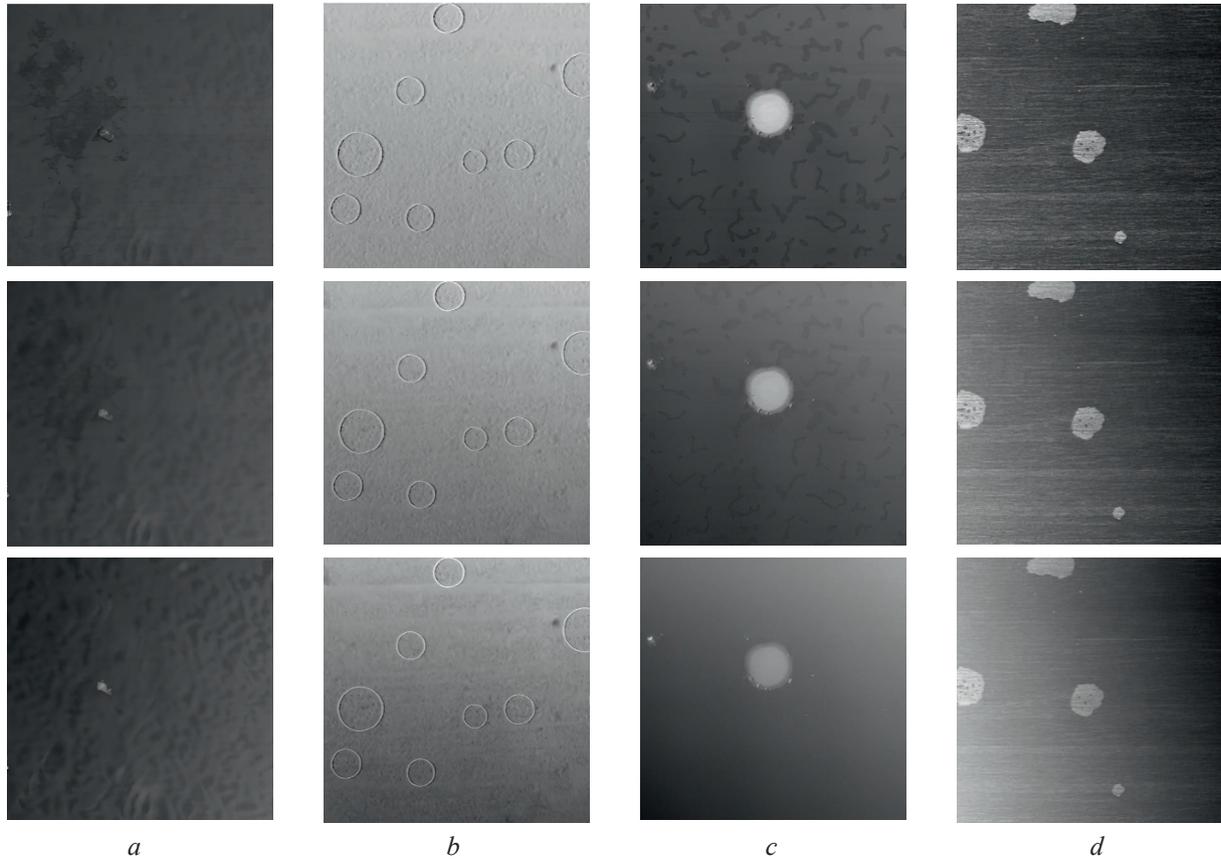
где  $k$  – коэффициент, определяющий вклад значений пикселей каждого компонентного АСМ-изображения  $M_1$  и  $M_2$  в значения пикселей комбинированного АСМ-изображения  $M_c$ ,  $0 < k < 1$ ;  $Y, X$  – размеры (в пикселях) компонентных и комбинированного АСМ-изображений по вертикали и горизонтали;  $[ ]$  – операция округления значений пикселей до ближайшего целого.

На рис. 2 приведена схема формирования комбинированного АСМ-изображения на основе выражения (1). Для согласования динамических диапазонов компонентных АСМ-изображений в схеме предусмотрено линейное контрастирование на основе минимаксного растяжения гистограммы без насыщения.



**Рис. 2.** Схема формирования комбинированного АСМ-изображения на основе взвешенного сложения  
**Fig. 2.** Scheme for forming a combined AFM image based on weighted summation

На рис. 3 показаны результаты формирования комбинированных АСМ-изображений для приведенных на рис. 1 примеров компонентных АСМ-изображений при трех значениях коэффициента  $k$ : 0,3, 0,5 и 0,7. Меньшие значения коэффициента  $k$  соответствуют меньшей относительной доле значений компонентного АСМ-изображения  $M_1$  в комбинированном АСМ-изображении  $M_C$  по сравнению с  $M_2$ .



**Рис. 3.** Комбинированные АСМ-изображения при значениях  $k = 0,7$  (верхний ряд),  $k = 0,5$  (средний),  $k = 0,3$  (нижний):  $a$  – металлизированная наноструктурированная никелевая поверхность;  $b-d$  – металлизированные наноструктурированные никелевые поверхности с полимерными пленками  
**Fig. 3.** Combined AFM images at  $k = 0.7$  (top row),  $k = 0.5$  (middle),  $k = 0.3$  (bottom):  $a$  – metallized nanostructured nickel surface;  $b-d$  – metallized nanostructured nickel surfaces with polymer films

### Оценка качества комбинирования АСМ-изображений на основе коэффициента глобальной корреляции

Комбинированное АСМ-изображение формируется для обеспечения возможности наблюдения значимых деталей компонентных АСМ-изображений, формируемых в синхронных каналах атомного силового микроскопа одновременно в одном пространстве пикселей. Поэтому качество комбинирования АСМ-изображения может быть оценено его корреляцией с компонентными АСМ-изображениями. Коэффициент  $r(A, B)$  корреляции двух компонентных АСМ-изображений  $A = \|a(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  и  $B = \|b(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  вычисляется по формуле

$$r(A, B) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |a(y, x) - \bar{a}| |b(y, x) - \bar{b}|}{\sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (a(y, x) - \bar{a})^2 \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (b(y, x) - \bar{b})^2}}, \quad (2)$$

где  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  – среднее значение яркости пикселей изображений  $A$  и  $B$ .

Коэффициент корреляции, вычисляемый по (2), является глобальным. Для оценки вклада каждого компонентного АСМ-изображения в комбинированное АСМ-изображение использована схема, приведенная на рис. 4. С ее помощью оценивается глобальная корреляция между исходными компонентными АСМ-изображениями  $M_1$  и  $M_2$ , комбинированным АСМ-изображением  $M_C$  и компонентным  $M_1$ , комбинированным АСМ-изображением  $M_C$  и компонентным  $M_2$ .

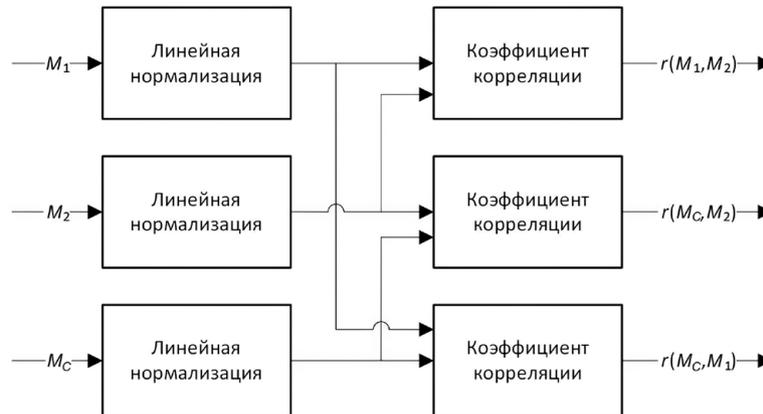


Рис. 4. Схема оценки корреляции комбинированного и компонентных АСМ-изображений  
Fig. 4. Scheme for assessing the correlation of combined and component AFM images

В табл. 1 приведены значения коэффициентов глобальной корреляции, вычисленные с помощью схемы рис. 4 для АСМ-изображений, приведенных на рис. 1, 3, и нескольких других АСМ-изображений поверхностей различных материалов.

Таблица 1. Значения коэффициентов глобальной корреляции  
Table 1. Values of global correlation coefficients

Показатель / Index	$k$	Коэффициент корреляции АСМ-изображений / Correlation coefficient of AFM images									
		АСМ1	АСМ2	АСМ3	АСМ4	АСМ5	АСМ6	АСМ7	АСМ8	АСМ9	АСМ10
$r(M_1, M_2)$	0,5	0,5650	0,425	0,3291	0,6020	0,2360	0,5379	0,5010	0,6555	0,6005	0,4500
$r(M_C, M_1)$	0,7	0,9932	0,993	1,0000	0,9992	0,9748	0,9868	0,9843	0,9872	0,9955	0,9998
	0,5	0,9678	0,970	0,9999	0,9956	0,8868	0,9289	0,9273	0,9403	0,9775	0,9990
	0,3	0,8775	0,870	0,9990	0,9785	0,6590	0,7791	0,7645	0,8217	0,9035	0,9944
$r(M_C, M_2)$	0,7	0,6075	0,446	0,3232	0,6131	0,4251	0,5554	0,6050	0,6756	0,6158	0,4583
	0,5	0,6696	0,525	0,3317	0,6297	0,6215	0,6173	0,7117	0,7218	0,6434	0,4728
	0,3	0,7875	0,703	0,3514	0,6706	0,8446	0,7903	0,8443	0,8156	0,7184	0,5064
$D(k)$	0,7	7,35	6,19	5,94	6,94	10,79	6,65	8,36	8,14	7,07	5,98
	0,5	9,72	7,90	6,06	7,38	24,09	9,23	15,17	11,60	8,08	6,22
	0,3	<b>32,74</b>	<b>22,16</b>	<b>6,34</b>	<b>8,90</b>	<b>34,33</b>	<b>260,50</b>	<b>40,24</b>	<b>409,47</b>	<b>14,59</b>	<b>6,83</b>
$\Delta r(k_L, k_H)$		-0,0643	-0,134	-0,0272	-0,0368	-0,1037	-0,0272	-0,0195	0,0255	-0,0106	-0,0427

Из табл. 1 следует, что компонентные АСМ-изображения  $M_1$  и  $M_2$  слабо коррелированы. Причем вклад компонентного АСМ-изображения  $M_1$  в комбинированное изображение  $M_C$  всегда более значителен, чем компонентного  $M_2$ . При этом значения коэффициентов глобальной корреляции  $r(M_C, M_1)$  и  $r(M_C, M_2)$  находятся в некотором противоречии: при коэффициенте глобальной корреляции  $r(M_C, M_1)$ , равном или очень близком к единице (что говорит о практически полном соответствии между компонентным АСМ-изображением  $M_1$  и комбинированным  $M_C$ , т. е. фактически  $M_1 = M_C$ ), разница в значениях коэффициентов глобальной корреляции  $r(M_C, M_2)$  и  $r(M_1, M_2)$  является более существенной для всех видов изображений. В табл. 1 приведены значения разностей  $\Delta r(k_L, k_H)$  динамических диапазонов коэффициентов  $r(M_C, M_1, k)$  и  $r(M_C, M_2, k)$ , вычисленных по формуле:

$$\Delta r(k_L, k_H) = |r(M_C, M_1, k_H) - r(M_C, M_1, k_L)| - |r(M_C, M_2, k_H) - r(M_C, M_2, k_L)| \text{ для } k_L = 0,3, k_H = 0,7. \quad (3)$$

Приведенные в табл. 1 значения  $\Delta r(k_L, k_H)$  свидетельствуют о несогласованности изменений коэффициентов глобальной корреляции  $r(M_C, M_1, k)$  и  $r(M_C, M_2, k)$  при изменении  $k$ , определяющего вклад компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение: динамический диапазон коэффициента  $r(M_C, M_1, k)$  меньше, чем  $r(M_C, M_2, k)$ . В этой связи актуальной является задача повышения точности корреляционной оценки качества комбинирования АСМ-изображений.

### Оценка качества комбинирования АСМ-изображений на основе коэффициента локальной корреляции

Повышение точности корреляционной оценки качества комбинирования АСМ-изображений возможно за счет учета локальных особенностей распределений значений пикселей в компонентных и комбинированном АСМ-изображениях. Для этого может использоваться коэффициент  $r_L(A, B)$  локальной корреляции двух АСМ-изображений  $A = \|a(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  и  $B = \|b(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ , вычисляемый с помощью выражения:

$$r_L(A, B, p) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |a(y, x) - a_L(y, x, p)| |b(y, x) - b_L(y, x, p)|}{\sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (a(y, x) - a_L(y, x, p))^2 \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (b(y, x) - b_L(y, x, p))^2}}, \quad (4)$$

где  $a_L(y, x, p), b_L(y, x, p)$  – среднее значение яркости пикселей изображений  $A$  и  $B$  в окрестности пикселя с координатами  $(y, x)$  размером  $p \times p$  пикселей,  $a_L(y, x, p) = \frac{1}{p^2} \sum_{j=0}^p \sum_{i=0}^p a(y+j, x+i)$ ,  $b_L(y, x, p) = \frac{1}{p^2} \sum_{j=0}^p \sum_{i=0}^p b(y+j, x+i)$ .

В табл. 2, 3 для нескольких значений размера  $p$  окрестности приведены значения коэффициентов локальной корреляции, вычисленные с помощью схемы рис. 4 для АСМ-изображений, приведенных на рис. 1, 3, и нескольких других АСМ-изображений поверхностей различных материалов. Также в табл. 2, 3 представлены значения разностей  $\Delta r_L(k_L, k_H)$  динамических диапазонов коэффициентов локальной корреляции  $r_L(M_C, M_1, p, k)$  и  $r_L(M_C, M_2, p, k)$ , вычисляемых с помощью (4) для  $k_L = 0,3, k_H = 0,7$ , и значения отношений  $|\Delta r(k_L, k_H) / \Delta r_L(k_L, k_H)|$ .

**Таблица 2.** Значения коэффициентов локальной корреляции при  $p = 3$   
**Table 2.** Values of local correlation coefficients at  $p = 3$

Показатель / Index	$k$	Коэффициент корреляции АСМ-изображений / Correlation coefficient of AFM images									
		АСМ1	АСМ2	АСМ3	АСМ4	АСМ5	АСМ6	АСМ7	АСМ8	АСМ9	АСМ10
$r_L(M_1, M_2, p)$	0,5	0,5906	0,598	0,2743	0,4935	0,5971	0,6254	0,6294	0,6318	0,5496	0,3217
$r_L(M_C, M_1, p)$	0,7	0,7341	0,861	0,9426	0,9374	0,8012	0,6290	0,6406	0,6426	0,7371	0,9611
	0,5	0,6030	0,736	0,7847	0,8114	0,6716	0,6257	0,6328	0,6352	0,6108	0,8375
	0,3	0,5855	0,651	0,5339	0,6590	0,6152	0,6253	0,6306	0,6330	0,5649	0,6024
$r_L(M_C, M_2, p)$	0,7	0,8240	0,866	0,5379	0,7021	0,7942	0,9931	0,9917	0,9935	0,8537	0,5392
	0,5	0,9483	0,955	0,7557	0,8484	0,9338	0,9987	0,9984	0,9987	0,9603	0,7413
	0,3	0,9893	0,989	0,9230	0,9519	0,9849	0,9998	0,9997	0,9998	0,9916	0,9111
$D_L(k)$	0,7	<b>29,35</b>	<b>577,59</b>	13,34	14,12	<b>381,70</b>	<b>7,12</b>	<b>7,39</b>	<b>7,38</b>	<b>24,82</b>	11,05
	0,5	7,61	12,91	<b>193,65</b>	<b>90,90</b>	10,25	6,96	7,09	7,11	8,18	<b>51,02</b>
	0,3	6,60	8,11	13,65	11,14	7,25	6,94	7,02	7,05	6,64	15,24
$\Delta r_L(k_L, k_H)$		-0,0167	0,087	0,0236	0,0286	-0,0047	-0,003	0,002	0,0033	0,0343	-0,0132
$ \Delta r(k_L, k_H) / \Delta r_L(k_L, k_H) $		3,85	1,54	1,15	1,29	22,06	9,07	9,75	7,73	0,31	3,23

**Таблица 3.** Значения коэффициентов локальной корреляции при  $p = 9$   
**Table 3.** Values of local correlation coefficients at  $p = 9$

Показатель / Index	$k$	Коэффициент корреляции АСМ-изображений / Correlation coefficient of AFM images									
		АСМ1	АСМ2	АСМ3	АСМ4	АСМ5	АСМ6	АСМ7	АСМ8	АСМ9	АСМ10
$r_L(M_1, M_2, p)$	0,5	0,6080	0,532	0,2744	0,6208	0,6450	0,6556	0,6703	0,6487	0,5902	0,4635
$r_L(M_C, M_1, p)$	0,7	0,9056	0,872	0,9774	0,9605	0,7752	0,6509	0,6842	0,6491	0,9408	0,9973
	0,5	0,7340	0,715	0,8906	0,8862	0,6818	0,6528	0,6754	0,6479	0,8096	0,9848
	0,3	0,6192	0,603	0,6717	0,7824	0,6467	0,6542	0,6723	0,6482	0,6687	0,9300
$r_L(M_C, M_2, p)$	0,7	0,6500	0,764	0,4364	0,7902	0,6760	0,9932	0,9926	0,9930	0,6512	0,5100
	0,5	0,8123	0,908	0,6286	0,8933	0,9056	0,9987	0,9985	0,9987	0,7784	0,5844
	0,3	0,9456	0,977	0,8516	0,9647	0,9813	0,9998	0,9997	0,9998	0,9241	0,7162
$D_L(k)$	0,7	10,01	<b>28,47</b>	9,52	16,56	<b>22,68</b>	<b>7,33</b>	<b>8,11</b>	<b>7,36</b>	9,31	6,67
	0,5	<b>32,48</b>	15,81	21,13	<b>403,73</b>	11,00	7,28	7,73	7,24	<b>86,24</b>	8,46
	0,3	7,89	7,94	<b>30,86</b>	15,44	7,54	7,30	7,62	7,23	10,57	<b>16,61</b>
$\Delta r_L(k_L, k_H)$		-0,0092	0,056	-0,1095	0,0036	-0,1768	-0,0033	0,0048	-0,0059	-0,0008	-0,1389
$ \Delta r(k_L, k_H)/\Delta r_L(k_L, k_H) $		6,99	2,39	0,25	10,22	0,59	8,24	4,06	4,32	13,25	0,31

Из табл. 2, 3 следует, что разница  $\Delta r_L(k_L, k_H)$  в динамических диапазонах коэффициентов локальной корреляции в 4–6 раз меньше по сравнению с разницей  $\Delta r(k_L, k_H)$  в динамических диапазонах коэффициентов глобальной корреляции для  $p = \{3, 5, 7, 9\}$  с усреднением по десяти АСМ-изображениям. Это говорит о существенно лучшей согласованности изменений коэффициентов  $r_L(M_C, M_1, p, k)$  и  $r_L(M_C, M_2, p, k)$  по сравнению с коэффициентами глобальной корреляции  $r(M_C, M_1, k)$  и  $r(M_C, M_2, k)$  при изменении  $k$ . Из сопоставления выражений (2) и (4) следует, что временная сложность вычислений коэффициента локальной корреляции  $r_L(A, B, p)$  примерно в  $2p^2$  раза больше по сравнению с временной сложностью вычислений коэффициента глобальной корреляции  $r(A, B)$ .

Для оценки качества комбинирования АСМ-изображений с учетом корреляции между комбинированным АСМ-изображением и каждым из двух компонентных АСМ-изображений, а также между компонентными АСМ-изображениями предлагается локальная корреляционная метрика  $D_L(k)$ , вычисляемая с помощью выражения (чем больше ее значение, тем лучше):

$$D_L(k) = \frac{r_L(M_C, M_1, k) + r_L(M_C, M_2, k)}{|r_L(M_C, M_1, k) - r_L(M_C, M_2, k)| r_L(M_1, M_2, 0,5)}. \quad (5)$$

Локальная корреляционная метрика  $D_L(k)$  (табл. 2, 3) позволяет определить значение  $k$ , обеспечивающее лучшее соотношение вкладов компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение. Аналогичная метрика  $D(k)$  на основе коэффициентов глобальной корреляции (табл. 1) не позволяет это сделать, что связано с ее низкой точностью. Данная метрика указывает на  $k = 0,3$  для любых АСМ-изображений, хотя, как следует из рис. 1, это неверно. Из табл. 2, 3 также следует, что значения локальной корреляционной метрики  $D_L(k)$  для одних и тех же изображений не всегда совпадают при различных значениях размера  $p$  окна корреляционного анализа. Такая зависимость позволяет осуществлять оценку качества комбинирования АСМ-изображений с учетом размера значимых объектов. Это подтверждает сопоставление рис. 1 и табл. 2, из которого следует, что при  $p = 3$  выбираются  $k = 0,7$  и  $k = 0,5$ , соответствующие комбинированным АСМ-изображениям с хорошо различимыми мелкими деталями.

## Выводы

1. Для оценки качества комбинирования АСМ-изображений предложена локальная корреляционная метрика. При ее вычислении используются коэффициенты локальной корреляции, определяемые в квадратной окрестности каждого пикселя сравниваемых АСМ-изображений. Метрика учитывает вклад каждого из компонентных АСМ-изображений в результирующее комбинированное АСМ-изображение, а также корреляцию между компонентными АСМ-изображениями.

2. Установлено, что для взвешенного сложения исходных АСМ-изображений при изменении вклада одного из компонентных АСМ-изображений в результирующее комбинированное АСМ-изображение от 0,7 до 0,3 разница в динамических диапазонах коэффициентов локальной корреляции компонентных АСМ-изображений в 4–6 раз меньше разницы в динамических диапазонах коэффициентов глобальной корреляции при размере окрестности локальной оценки от 3×3 до 9×9 пикселей. Это свидетельствует о существенно лучшей согласованности изменений коэффициентов локальной корреляции по сравнению с коэффициентами глобальной корреляции при изменении вкладов компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение и повышении точности корреляционной оценки качества комбинирования АСМ-изображений.

## Список литературы / References

1. Sun Jifeng, Jiang Yuanjiao, Zeng Shaoyong (2005) A Study of PCA Image Fusion Techniques on Remote Sensing. *Proceedings of the SPIE International Conference on Space Information Technology*. 5985, 739–744.
2. Zhang A. K., Dare. Y. P. (2007) Wavelet Based Image Fusion Techniques-an Introduction, Review and Comparison. *ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. 62 (4), 249–263.
3. Petrovic V., Xydeas C. (2005) Objective Image Fusion Performance Characterisation. *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05)*. 2 (1), 1866–1871. DOI: 10.1109/ICCV.2005.175.
4. Piella G., Heijmans H. (2003) A New Quality Metric for Image Fusion. *Proceedings 2003 International Conference on Image Processing (Cat. No 03CH37429)*. III–173. DOI: 10.1109/ICIP.2003.1247209.
5. Qu G., Zhang D., Yan P. (2001) Medical Image Fusion by Wavelet Transform Modulus Maxima. *Opt. Express*. 9, 184–190.
6. Aslantas V., Bendes E. (2015) A New Image Quality Metric for Image Fusion: the Sum of the Correlations of Differences. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*. 69. 1890–1896. DOI: 10.1016/j.aeue.2015.09.004.
7. Han Y., Cai Y., Cao Y., Xu X. (2013) A New Image Fusion Performance Metric Based on Visual Information Fidelity. *Inf. Fusion*. 14 (2), 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2011.08.002>.

## Вклад авторов

Ловецкий М. Ю. предложил показатель качества комбинирования АСМ-изображений, разработал алгоритмы и программные модели комбинирования и оценки качества АСМ-изображений, провел эксперименты.

Цветков В. Ю. осуществил постановку задачи исследования и научное редактирование статьи.

Борискевич А. А. определил направление и цель исследования, выполнил интерпретацию полученных результатов.

Лапицкая В. А. получила изображения на АСМ.

Чижик С. А. выбрал АСМ-изображения для анализа и дальнейшей обработки.

## Authors' contribution

Lovetski M. Yu. proposed a quality indicator for combining AFM images, developed algorithms and software models for combining and assessing the quality of AFM images, and conducted experiments.

Tsviatkou V. Yu. carried out the formulation of the research problem and scientific editing of the article.

Boriskevich A. A. determined the direction and purpose of the study, performed the interpretation of the results.

Lapitskaya V. A. received images on AFM.

Chizhik S. A. selected AFM images for analysis and further processing.

### Сведения об авторах

**Ловецкий М. Ю.**, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, мл. н. с. лаборатории нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

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

**Борискевич А. А.**, д. т. н., профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Лапицкая В. А.**, к. т. н., научный сотрудник лаборатории нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

**Чижик С. А.**, академик, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-84-08  
E-mail: vtsvet@bsuir.by  
Цветков Виктор Юрьевич

### Information about the authors

**Lavetski M. Yu.**, Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Junior Researcher at the Laboratory of Nanoprocesses and Technologies of the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

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

**Boriskevich A. A.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Lapitskaya V. A.**, Cand. of Sci., Researcher at the Laboratory of Nanoprocesses and Technologies of the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

**Chizhik S. A.**, Academician, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher at the Laboratory of Nanoprocesses and Technologies of the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-84-08  
E-mail: vtsvet@bsuir.by  
Tsviatkou Viktor Yur'evich