

УДК 004.932

## СЖАТИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С АДАПТИВНЫМ ВЫРАВНИВАНИЕМ И ИНВЕРСИЕЙ КРАЕВ ГИСТОГРАММЫ

С.И. РУДИКОВ<sup>1</sup>, В.Ю. ЦВЕТКОВ<sup>2</sup>, А.П. ШКАДАРЕВИЧ<sup>1</sup><sup>1</sup> Унитарное предприятие «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО», Республика Беларусь<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28 февраля 2022

**Аннотация.** Предложена модификация алгоритма адаптивной эквализации, растяжения и сжатия гистограммы, основанная на инверсии ее обрезанных краев. При сжатии гистограммы инверсия краев позволяет сохранить корреляцию значений и контраст для большей части смежных пикселей изображения. Показано, что при уменьшении динамического диапазона ландшафтных ИК-изображений предложенный алгоритм повышает блочный контраст по сравнению с алгоритмом адаптивной эквализации гистограммы.

**Ключевые слова:** сжатие динамического диапазона изображений, инфракрасные изображения, выравнивание гистограммы, инверсия гистограммы.

### Введение

Для сжатия динамического диапазона и улучшения качества ландшафтных инфракрасных (ИК) изображений используются блочные алгоритмы, позволяющие адаптироваться к структуре изображения. Блочный алгоритм адаптивного выравнивания гистограммы (Adaptive Histogram Equalization, АНЕ) [1] на основе интегральной функции распределения яркости обеспечивает достаточно высокое качество изображений после преобразования, но не позволяет управлять формой глобальной гистограммы яркости. Это может приводить к недостаточному или чрезмерному локальному и глобальному контрасту преобразованного изображения. Данный недостаток свойственен многим модификациям алгоритма АНЕ [2–5]. Причина заключается в блочном выравнивании гистограммы, существенно ослабляющем результаты предкоррекции изображения. Поэтому эффективное управление формой глобальной гистограммы ИК-изображения при преобразовании динамического диапазона возможно только после блочного выравнивания гистограммы. Это реализовано в алгоритме адаптивной эквализации, растяжения и сжатия гистограммы (Histogram Equalization, Compression and Stretching, HECS) [6], который превосходит алгоритм АНЕ по контрасту за счет обрезки краев, растяжения центральной части, растяжения (сжатия) и наложения обрезанных краев глобальной гистограммы. Недостатком алгоритма HECS является ухудшение контраста по краям динамического диапазона, что приводит к заметным артефактам на преобразованном ИК-изображении и дополнительной неравномерности его глобальной гистограммы.

Целью работы является повышение качества воспроизведения ИК-изображений при сжатии их динамического диапазона.

### Постановка задачи

На рис. 1, а приведено ИК-изображение с широким динамическим диапазоном и его гистограмма. Эквализация (Histogram Equalization, HE) [7] выравнивает гистограмму ИК-изображения и позволяет получить ИК-изображение с узким динамическим диапазоном, но низким локальным контрастом (рис. 1, б). Для повышения локального контраста используется

алгоритм АНЕ [1], который делит исходное ИК-изображение на блоки пикселей, в пределах которых осуществляется выравнивание гистограмм. Блочный эффект уменьшается с помощью интерполяции. Разделение ИК-изображения на блоки в АНЕ позволяет адаптироваться к структуре изображения, но не обеспечивает равномерность глобальной гистограммы и возможность управления ее формой (рис. 1, *в*).

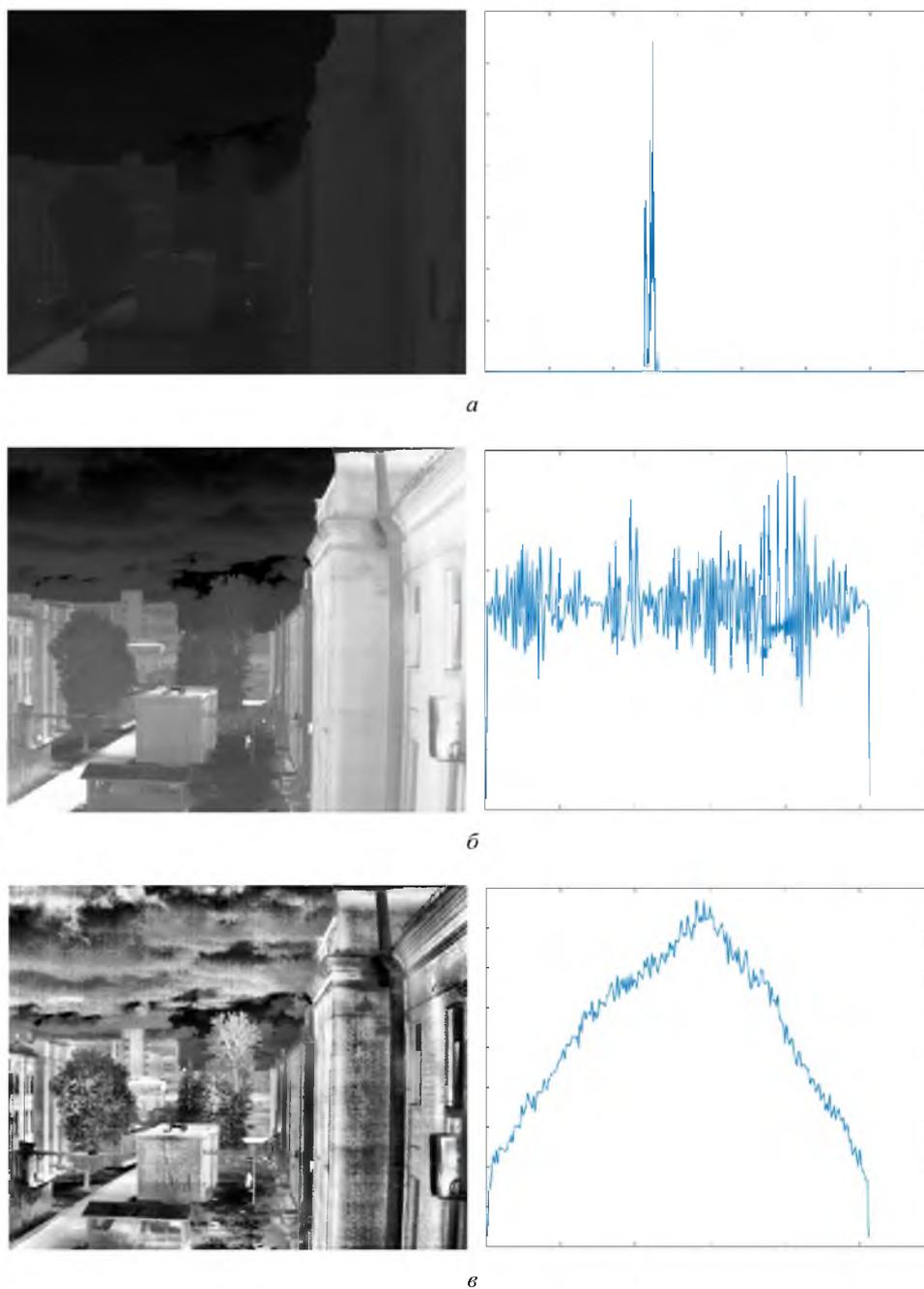


Рис. 1. ИК-изображения и их гистограммы: *а* – исходное; *б* – преобразованное с помощью HE; *в* – преобразованное с помощью АНЕ

Для повышения качества и расширения интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений при сжатии их динамического диапазона алгоритм HECS адаптивной эквализации, растяжения и сжатия гистограммы реализует двойное уменьшение динамического диапазона ИК-изображения с промежуточным управлением формой его гистограммы за счет ее частичного растяжения и сжатия [6]. Алгоритм реализуется в три этапа:

1. Предварительное уменьшение динамического диапазона  $[0, L_{HDR} - 1]$  исходного ИК-изображения  $I_{HDR} = \parallel i_{HDR}(y, x) \parallel_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$  до  $[0, L_{LDR1} - 1]$ ,  $L_{HDR} < L_{LDR1}$  (этап 1) на основе адаптивной эквализации гистограммы – формируется ИК-изображение  $I_{LDR1}(L_{LDR1}) = \parallel i_{LDR1}(y, x) \parallel_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$  с динамическим диапазоном  $[0, L_{LDR1} - 1]$ .

2. Управление формой гистограммы (этап 2):

2.1. Сжатие гистограммы на основе двух гамма-функций с коэффициентами  $G_L$  и  $G_H$ , применяемых к двум частям динамического диапазона  $[0, T_G - 1]$  и  $[T_G + 1, L_{LDR1} - 1]$ , разделяемым на уровне  $T_G = K_G(L_{LDR1} - 1)$  по коэффициенту  $K_G$ .

2.2. Линейное растяжение центральной части гистограммы, ограниченной динамическим диапазоном  $[T, L_{LDR1} - 1 - T]$  по порогу  $T$ , с коэффициентом  $(L_{LDR1} - 1) / (L_{LDR1} - 1 - 2T)$  и линейное растяжение (сжатие) боковых частей гистограммы, ограниченных диапазонами  $[0, T - 1]$  и  $[L_{LDR1} - T, L_{LDR1} - 1]$  по порогу  $T$  с коэффициентами  $T_L/T$  и  $T_R/T$ , где  $T_L, T_R$  – пороги.

3. Окончательное уменьшение динамического диапазона до  $[0, L_{LDR2} - 1]$  на основе линейного сжатия гистограммы с коэффициентом  $L_{LDR2} / L_{LDR1}$  (этап 3).

Преобразованное с помощью алгоритма HECS ИК-изображение с узким динамическим диапазоном и его гистограмма представлены на рис. 2, а.

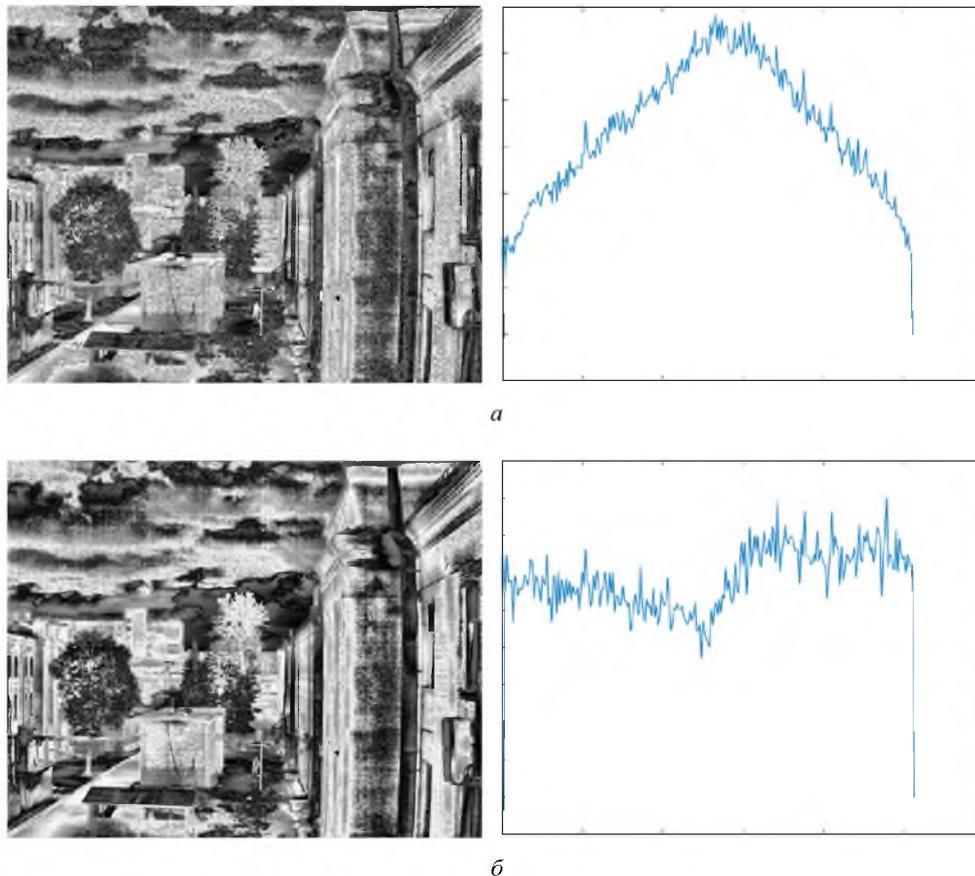


Рис. 2. Преобразованные ИК-изображения и их гистограммы: а – с помощью HECS; б – с помощью HECSm

В табл. 1 и 2 приведены выигрыши алгоритма HECS в сравнении с алгоритмом АНЕ в процентах по контрастности (стандартному отклонению)  $D_{ST}$ , среднему градиенту  $G_A$ , энтропии  $E_I$  и количеству локальных экстремумов  $N_{IE}$ , усредненные по 94 ИК-изображениям, разделенным на 6 типов в зависимости от формы гистограммы после адаптивной эквализации

(рис. 3): 11 ИК-изображений типа 1; 17 – типа 2; 31 – типа 3; 27 – типа 4; 5 – типа 5; 3 – типа 6. Характеристики  $D_{ST}$ ,  $G_A$ ,  $E_I$  являются средними по блокам  $64 \times 64$  пикселей. Из табл. 1 и 2 следует, что алгоритм HECS превосходит алгоритм АНЕ по характеристикам  $D_{ST}$ ,  $G_A$ ,  $E_I$  и  $N_{LE}$ . Однако, как видно на рис. 1, *в* и рис. 2, *а* глобальная гистограмма ИК-изображения после преобразования с помощью алгоритма HECS выравнивается незначительно в сравнении с алгоритмом АНЕ. Таким образом, актуальной является задача модификации алгоритма HECS для повышения равномерности глобальной гистограммы.

Табл. 1. Выигрыши алгоритма HECS в сравнении с алгоритмом АНЕ при размере блока  $32 \times 32$

Характеристика	Выигрыши алгоритма HECS в сравнении с АНЕ по типам ИК-изображений					
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	Тип 6
$D_{ST}$	6,06	9,95	10,04	9,72	7,59	6,95
$G_A$	13,78	18,23	18,92	20,58	9,42	11,28
$E_I$	13,38	36,25	34,84	24,41	39,16	20,10
$N_{LE}$	13,38	9,97	9,17	17,22	4,26	12,97

Табл. 2. Выигрыши алгоритма HECS в сравнении с алгоритмом АНЕ при размере блока  $64 \times 64$

Характеристика	Выигрыши алгоритма HECS в сравнении с АНЕ по типам ИК-изображений					
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	Тип 6
$D_{ST}$	12,25	11,33	8,89	7,03	0,11	2,33
$G_A$	35,39	47,91	49,97	50,54	13,39	48,73
$E_I$	31,41	50,54	51,54	38,39	55,92	41,77
$N_{LE}$	14,68	14,89	14,11	25,94	6,88	18,11

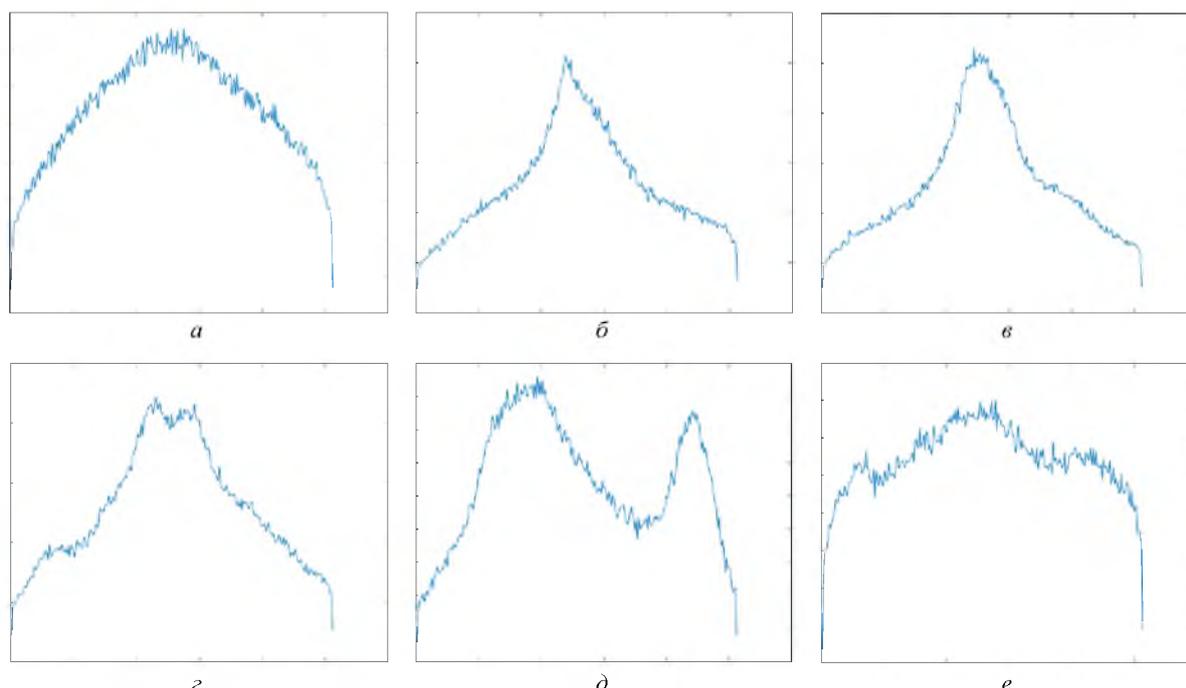


Рис. 3. Гистограммы ИК-изображений после адаптивного выравнивания: *а* – тип 1; *б* – тип 2; *в* – тип 3; *г* – тип 4; *д* – тип 5; *е* – тип 6

### Адаптивная эквализация, растяжение и сжатие гистограммы с инверсией и наложением обрезанных краев

Для повышения глобального контраста ИК-изображений при уменьшении их динамического диапазона предлагается модификация алгоритма HECS адаптивной эквализации, растяжения и сжатия гистограммы, основанная на инверсии обрезанных краев глобальной

гистограммы. Сущность модификации состоит в преобразовании (линейном растяжении (сжатии) с коэффициентами  $T_L/T$ ,  $T_R/T$  и инверсии) значений пикселей из диапазонов  $[0, T-1]$  и  $[L_{LDR1}-T, L_{LDR1}-1]$  с помощью выражения

$$\tilde{i}_{LDR1}(y, x) = \begin{cases} \left\lfloor \frac{T_L}{T} i_{LDR1}(y, x) - T_L \right\rfloor & \text{при } i_{LDR1}(y, x) < T, \\ (L_{LDR1}-1) - \left( T_R + \frac{T_R}{T} (i_{LDR1}(y, x) - (L_{LDR1}-1)) \right) & \text{при } i_{LDR1}(y, x) > L_{LDR1}-1-T \end{cases} \quad (1)$$

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

На рис. 4 показан процесс преобразования гистограммы ИК-изображения в соответствии с предложенной модификацией алгоритма HECS. Сначала, с помощью порога  $T$  глобальная гистограмма ИК-изображения разделяется на три части: центральную и две крайних. Затем, центральная часть растягивается на весь динамический диапазон, а крайние – в соответствии с коэффициентами растяжения (сжатия)  $T_L/T$  и  $T_R/T$ . Кроме того, крайние фрагменты гистограммы инвертируются. Растянутая центральная часть, сжатые (растянутые) и инвертированные крайние фрагменты гистограммы складываются. Результирующая гистограмма выравнивается за счет увеличения вероятностей темных и светлых пикселей. Ее формой можно управлять с помощью порогов  $T, T_L, T_R$ .

Инверсия краев гистограммы позволяет сохранить корреляцию значений и контраст для большей части смежных пикселей изображения. На рис. 5 приведен фрагмент исходной гистограммы, разделенный на 4 диапазона, из которой формируются два фрагмента в результате обрезки краев, растяжения центральной части гистограммы и наложения обрезанных краев без инверсии и с инверсией. Из рис. 5 следует, что при наложении краев гистограммы без инверсии контрастные диапазоны 1–3 и 2–4 исходной гистограммы становятся неконтрастными после преобразования. При наложении краев гистограммы с инверсией контрастные диапазоны 1–3 и 2–4 исходной гистограммы сохраняют относительный контраст. Потеря контраста диапазонов 2–3 и 1–4 менее значима, поскольку диапазоны 2–3 соседние, а диапазон 1 является крайним в исходной гистограмме и включает относительно небольшое количество пикселей. Данное свойство предложенного преобразования подтверждает рис. 2, б, на котором приведены преобразованное с помощью предложенного модифицированного алгоритма ИК-изображение и его гистограмма.

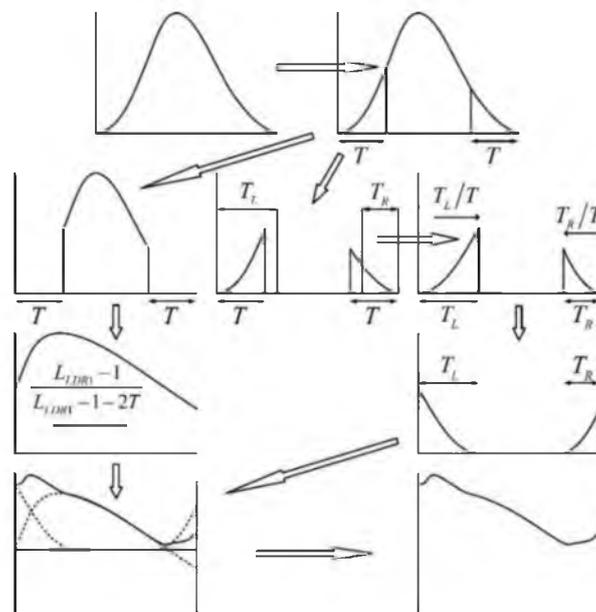


Рис. 4. Процесс растяжения и сжатия гистограммы с зеркальным отображением обрезанных краев глобальной гистограммы

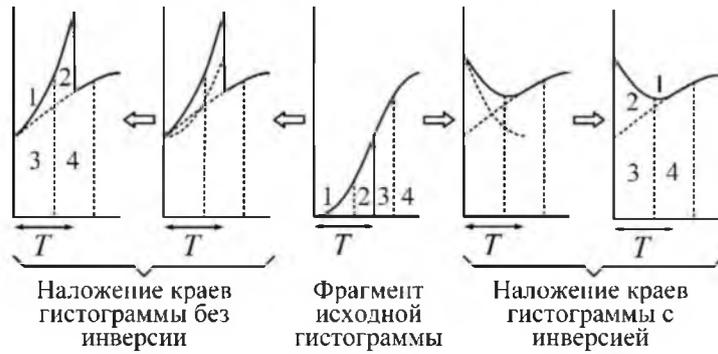


Рис. 5. Обрезка краев, растяжение центральной части гистограммы и наложение обрезанных краев без инверсии и с инверсией

### Оценка эффективности алгоритмов сжатия гистограммы

В табл. 3 и 4 приведены выигрыши модифицированного алгоритма HECSm в сравнении с алгоритмом АНЕ в процентах по контрастности  $D_{ST}$ , среднему градиенту  $G_A$ , энтропии  $E_I$  и количеству локальных экстремумов  $N_{LE}$ , усредненные блокам  $64 \times 64$  пикселей и 94 ИК-изображениям, разделенным на 6 типов в зависимости от формы гистограммы после адаптивной эквализации (см. рис. 3).

Табл. 3. Выигрыши алгоритма HECSm в сравнении с алгоритмом АНЕ при размере блока  $32 \times 32$

Характеристика	Выигрыши алгоритма HECS в сравнении с АНЕ по типам ИК-изображений					
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	Тип 6
$D_{ST}$	13,45	16,95	13,32	15,48	13,88	8,33
$G_A$	19,01	36,61	23,22	22,69	13,76	11,53
$E_I$	31,12	59,73	46,67	27,96	44,16	21,15
$N_{LE}$	7,65	10,60	7,98	12,99	3,05	10,04

Табл. 4. Выигрыши алгоритма HECSm в сравнении с алгоритмом АНЕ при размере блока  $64 \times 64$

Характеристика	Выигрыши алгоритма HECS в сравнении с АНЕ по типам ИК-изображений					
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	Тип 6
$D_{ST}$	23,12	24,02	19,86	16,62	13,21	12,57
$G_A$	41,71	46,22	46,01	42,52	19,03	35,80
$E_I$	41,35	57,97	59,24	41,06	59,23	40,91
$N_{LE}$	11,31	9,35	9,64	17,79	4,85	20,00

Из табл. 1–4 следует, что для ИК-изображений всех типов при любых размерах блоков алгоритм HECSm превосходит алгоритм АНЕ по характеристикам  $D_{ST}$  (на 13,6 % при размере блока  $32 \times 32$  пикселей, на 18,2 % при размере блока  $64 \times 64$  пикселей),  $G_A$  (на 21,1 % при размере блока  $32 \times 32$  пикселей, на 38,6 % при размере блока  $64 \times 64$  пикселей),  $E_I$  (на 38,5 % при размере блока  $32 \times 32$  пикселей, на 50,0 % при размере блока  $64 \times 64$  пикселей) и  $N_{LE}$  (на 8,7 % при размере блока  $32 \times 32$  пикселей, на 12,2 % при размере блока  $64 \times 64$  пикселей). При этом алгоритм HECSm превосходит алгоритм-прототип HECS по контрасту для ИК-изображений всех типов при всех размерах блоков (в 1,6 раза при размерах блоков  $32 \times 32$  пикселей, в 2,6 раза при размерах блоков  $64 \times 64$  пикселей); по характеристикам  $G_A$  (в 1,4 раза) и  $E_I$  (в 1,4 раза) при размерах блоков  $32 \times 32$  пикселей; по характеристике  $G_A$  при размерах блоков  $64 \times 64$  пикселей для изображений типов 1 и 5; по характеристике  $E_I$  при размерах блоков  $64 \times 64$  пикселей для изображений типов 1–5.

## Заклучение

Предложен модифицированный алгоритм адаптивной эквализации, растяжения и сжатия гистограммы, основанный на инверсии ее обрезанных краев. При сжатии гистограммы инверсия ее краев позволяет сохранить корреляцию значений и контраст для большей части смежных пикселей изображения. При уменьшении динамического диапазона предложенный алгоритм повышает блочный контраст ландшафтных ИК-изображений на 13,6 % – 18,2 % при размерах блоков от 32×32 до 64×64 пикселей по сравнению с алгоритмом адаптивной эквализации гистограммы.

## DYNAMIC RANGE COMPRESSION OF INFRARED IMAGES WITH ADAPTIVE EQUALIZATION AND HISTOGRAM EDGE INVERSION

S.I. RUDIKOV, V.Yu. TSVIATKOU, A.P. SHKADAREVICH

**Abstract.** A modification of the algorithm of adaptive equalization, stretching and compression of the histogram, based on the inversion of its clipped edges, is proposed. In histogram compression, edge inversion preserves value correlation and contrast for most adjacent pixels in an image. It is shown that with a decrease in the dynamic range of landscape IR images, the proposed algorithm increases the block contrast in comparison with the adaptive histogram equalization algorithm.

*Keywords:* image dynamic range compression, infrared images, histogram equalization, histogram inversion.

## Список литературы

1. Kim T.K., Paik J.K., Kang B.S. // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 1998. Vol. 44. No. 1. P. 82–87.
2. Reza A.M. // The Journal of VLSI Signal Processing-Systems for Signal, Image, and Video Technology. 2004. Vol. 38. No. 1. P. 35–44.
3. Kim J.-Y., Kim L.-S., Hwang S.-H. // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2001. Vol. 11. No. 4. P. 475–484.
4. Huang S.-C., Yeh C.-H. // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2013. Vol. 26. No. 5. P. 1487–1492.
5. Al-Sammarai M.F. // 10th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE). Cambridge. 2015. P. 95–101.
6. Рудиков С.И., Цветков В.Ю., Шкадаревич А.П. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук. 2021. Т. 66. № 4. С. 470–482.
7. Nithyananda C.R., Ramachandra A.C., Preethi. // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). Chennai. 2016. P. 2512–2517.