

## ТОНОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОГОВОЙ ОБРАБОТКИ ГИСТОГРАММЫ

А.Д. РОБАЧЕВСКИЙ<sup>1</sup>, Д.А. СИКОРСКИЙ<sup>2</sup>, С.А. МОСКАЛЁВ<sup>3</sup>,  
В.В. ЧЕПИКОВА<sup>1</sup>, В.Ю. ЦВЕТКОВ<sup>1</sup>

*1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*2 – ОАО «ПЕЛЕНГ», Республика Беларусь*

*3 – ОАО «Конструкторское бюро «Дисплей», Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 20 марта 2024*

**Аннотация.** Рассматривается задача сжатия динамического диапазона инфракрасных изображений для их отображения на стандартном мониторе. Разработан алгоритм управляемого тонового отображения на основе пороговой обрезки, уплотнения и линейного сжатия гистограммы с низкой вычислительной сложностью. Алгоритм позволяет перераспределять яркость изображения за счет изменения формы гистограммы с помощью изменения параметров пороговой сигмоиды, задаваемых оператором. Показано, что предложенный алгоритм обеспечивает за счет выбора параметров пороговой сигмоиды лучшие интервальные показатели качества тонового преобразования в значимой части динамического диапазона по сравнению с алгоритмом эквализации гистограммы.

**Ключевые слова:** уменьшение динамического диапазона изображений, инфракрасные изображения, управление формой гистограммы.

### Введение

Сжатие динамического диапазона инфракрасных (ИК) изображений с минимальными потерями информации о деталях широко используется в системах видеонаблюдения. Благодаря высокому качеству и простоте распространение получил алгоритм тонового отображения на основе выравнивания гистограммы (Histogram Equalization, HE) [1]. Недостатком данного алгоритма является невозможность управления параметрами преобразования, кроме как через форму интегральной функции распределения. Такая функция строится по гистограмме яркости пикселей исходного ИК-изображения, но может быть видоизменена для коррекции формы гистограммы преобразованного ИК-изображения. Установление связи между необходимым преобразованием для конкретного ИК-изображения с широким динамическим диапазоном и формой интегральной функции распределения является сложной задачей. На практике часто используется заранее известная интегральная функция распределения эталонного изображения. Такой подход не всегда обеспечивает приемлемое качество тонового отображения.

Целью работы является повышение качества управляемого сжатия динамического диапазона ИК-изображений при низкой вычислительной сложности преобразования.

### Алгоритм управляемого тонового отображения ИК-изображений

Для обеспечения возможности изменения степени сжатия динамического диапазона ИК-изображений предлагается алгоритм TCLHC (Thresholding, Compaction and Linear Histogram Compression) управляемого тонового отображения на основе пороговой обрезки, уплотнения и линейного сжатия гистограммы. Алгоритм TCLHC состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Формирование гистограммы яркости исходного ИК-изображения с широким динамическим диапазоном.

Шаг 2. Построение линии пороговых значений повторяемости по гистограммы яркости исходного ИК-изображения в форме сигмоиды (в ручном режиме на основе визуального контроля) с учетом того, что значения редко встречающихся пикселей будут заменены ближайшими часто встречающимися значениями (см. пример на рис. 1).

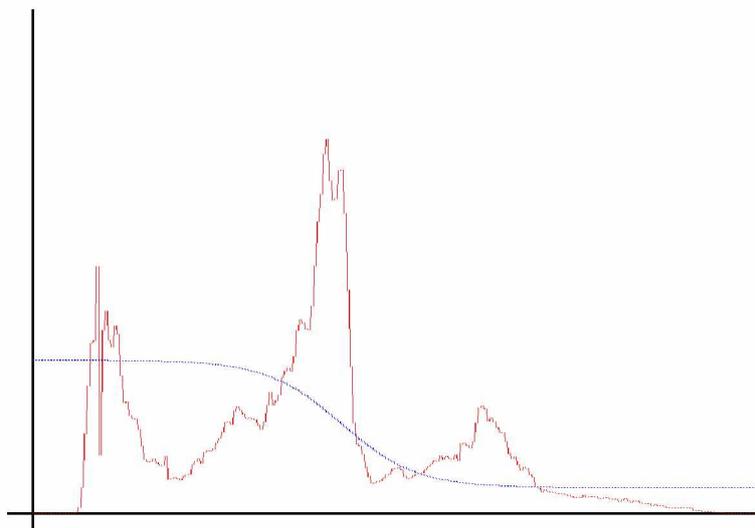


Рис. 1. Кривая пороговых значений

Для построения гистограммы используется выражение

$$y(x) = \frac{2r \max}{1 + e^{d(x-c_x-w-\min)}} + (c_y - r) \max,$$

где  $r$  – половина расстояния между двумя горизонтальными асимптотами,  $c_y$  – показывает ординату точки центра сигмоиды,  $c_x$  – показывает абсциссу точки центра,  $d$  – показывает степень экспоненты (при отрицательных значениях  $d$  сигмоида отзеркаливается),  $\max$  – максимальное значение гистограммы повторяемости,  $w$  – ширина полосы гистограммы,  $\min$  – минимальное значение яркости изображения.

Шаг 3. Пороговая обрезка гистограммы. Значения пикселей исходного ИК-изображения, соответствующие значениям гистограммы, меньшим значения порога повторяемости, заменяются ближайшими значениями пикселей исходного ИК-изображения, соответствующими значениям гистограммы, равным или большим порога повторяемости. В результате формируется закругленное ИК-изображение, на гистограмме которого увеличивается количество нулевых элементов (см. пример на рис. 2).

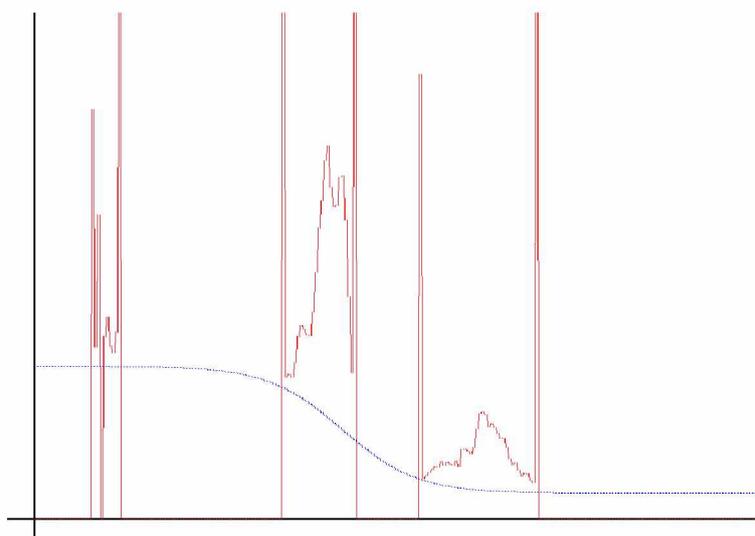


Рис. 2. Пороговая обрезка гистограммы

Шаг 4. Поиск нулей и уплотнение гистограммы загрубленного ИК-изображения. Слева направо осуществляется поиск нулевых значений гистограммы загрубленного ИК-изображения. Если нулевое значение гистограммы найдено, то все значения гистограммы справа от нулевого сдвигаются на одно значение влево. В результате гистограмма уплотняется за счет исключения нулевых элементов и формируется уплотненное ИК-изображение с более узким динамическим диапазоном по сравнению с исходным ИК-изображением, рис. 3.

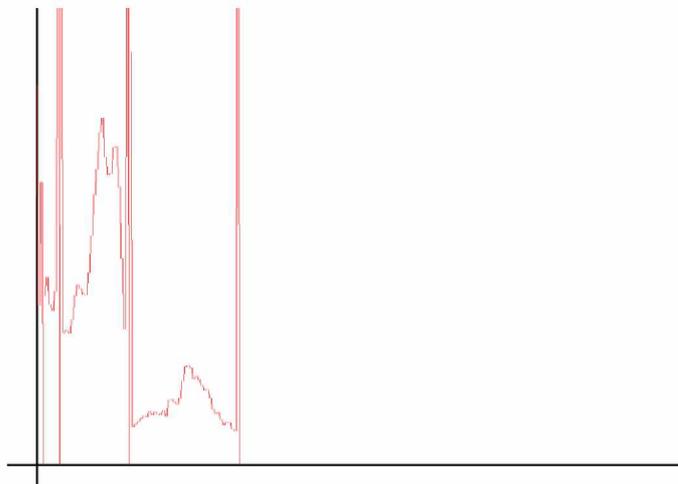


Рис. 3. Уплотнение гистограммы

Шаг 5. Линейное преобразование уплотненного ИК-изображения к требуемому динамическому диапазону. Это может быть сжатие или растяжение гистограммы яркостей в зависимости от соотношения требуемой ширины динамического диапазона результирующего ИК-изображения и максимального значения яркости, уплотненного ИК-изображения.

### Оценка качества тонового отображения

Для оценки качества тонового отображения использованы три тестовых ИК-изображения (ИК-1 – ИК-3) с динамическим диапазоном 65536 уровней яркости. На рис. 4 приведены ИК-изображения после их линейного отображения в диапазон 0,255 уровней яркости и формы гистограмм их интенсивностей до преобразования.

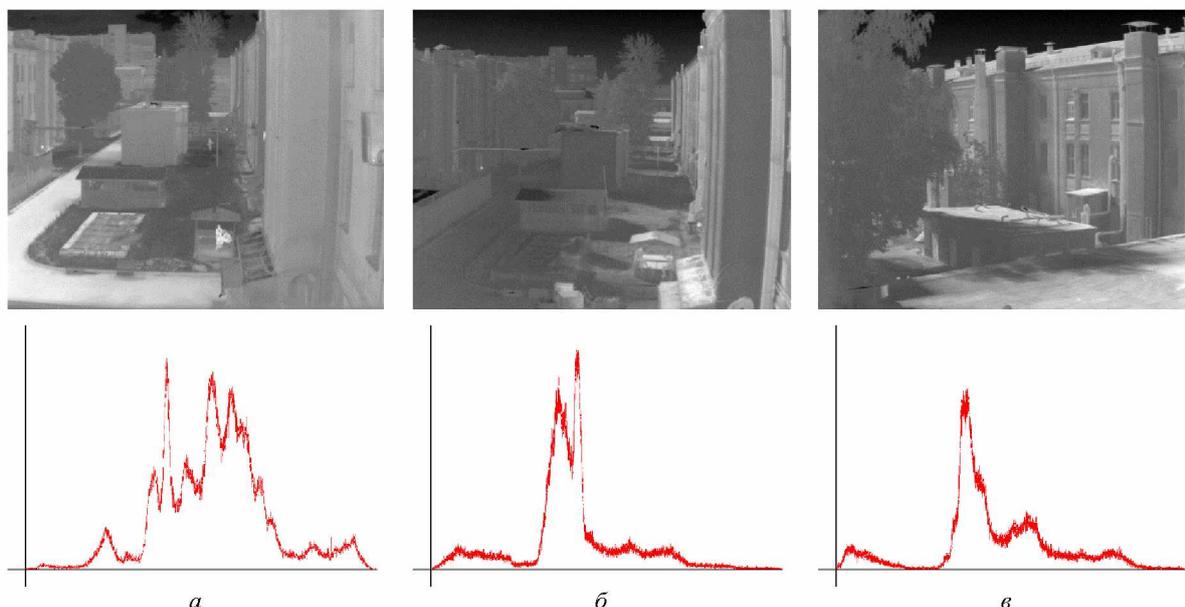


Рис. 4. Тестовые ИК-изображения и их гистограммы: *а* – ИК-1; *б* – ИК-2; *в* – ИК-3

На рис. 5 приведены результаты тонового отображения этих трех тестовых ИК-изображений в динамический диапазон 256 уровней яркости с помощью алгоритма HE.

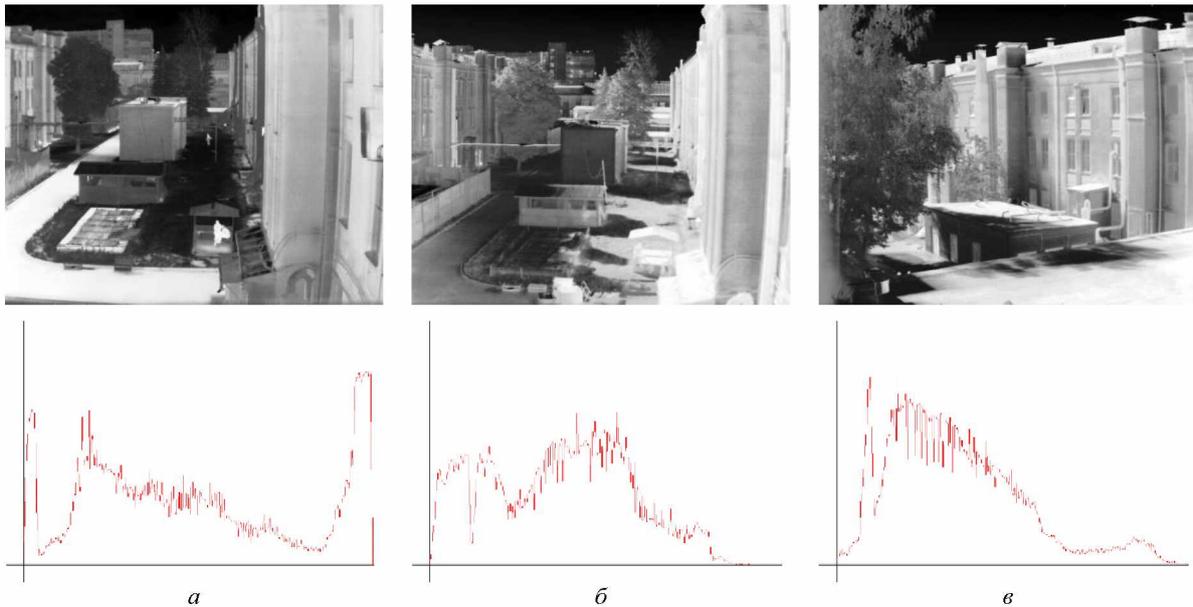


Рис. 5. ИК-изображения и их гистограммы после преобразования с помощью алгоритма HE:  
*a* – ИК-1; *б* – ИК-2; *в* – ИК-3

На рис. 6 и 7 приведены результаты тонового отображения тестовых изображений ИК-1 – ИК-3 в динамический диапазон 256 уровней яркости с помощью предложенного алгоритма TCLHC при нескольких значениях порога повторяемости.

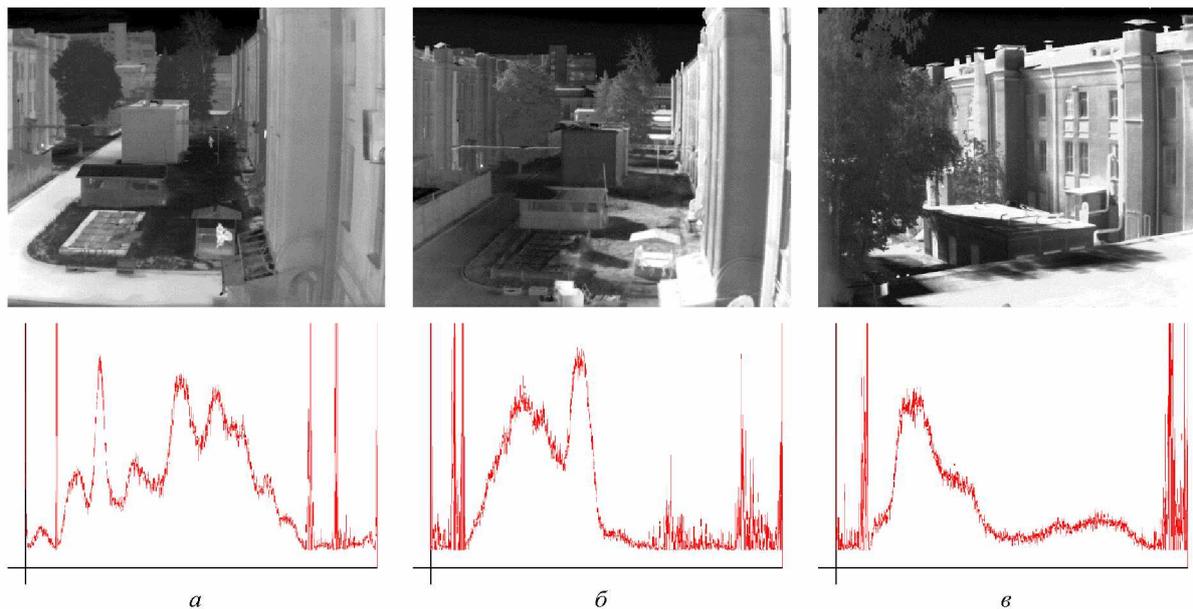


Рис. 6. ИК-изображения и их гистограммы после преобразования с помощью алгоритма TCLHC с линейным порогом 50: *a* – ИК-1; *б* – ИК-2; *в* – ИК-3

В табл. 1 и 2 приведены показатели качества преобразованных тестовых изображений с помощью алгоритмов HE и TCLHC со статическим (Т) и изменяемым сигмоидным (S) порогами. Для оценки качества тонового отображения использованы глобальные показатели, позволяющие оценить контраст (стандартное отклонение  $D_{ST}$  и средний градиент  $G_A$ ), энтропия  $E_1$ , количество локальных экстремумов  $N_{LE}$ , статистическая естественность  $N_S$  [2], структурная точность  $F_S$  [3], качество тональной карты  $I_{TMQ}$  [4], а также предложенные в [5] интервальные

и интервально-блочные показатели, позволяющие оценить: потенциальную различающую способность  $P_D$  на выбранном интервале динамического диапазона преобразованного изображения; потери  $E_D$  различения соседних пикселей на выбранном интервале динамического диапазона преобразованного изображения, обусловленные тоновым отображением; величину  $E_{MS}$  нелинейных искажений сжатия динамического диапазона на выбранном интервале динамического диапазона преобразованного изображения относительно линейно преобразованного изображения; равномерность  $U_H$  использования динамического диапазона на выбранном интервале динамического диапазона преобразованного изображения относительно базового интервала; неоднозначность  $L_{DH}$  тонового отображения, обусловленную различиями передаточных характеристик блоков в интервале динамического диапазона преобразованного изображения, соответствующего интервалу прореженного динамического диапазона исходного изображения; величину  $L_{DL}$  нелинейных искажений, связанных с неоднозначностью тонового отображения, в интервале динамического диапазона преобразованного изображения, соответствующего интервалу прореженного динамического диапазона исходного изображения.

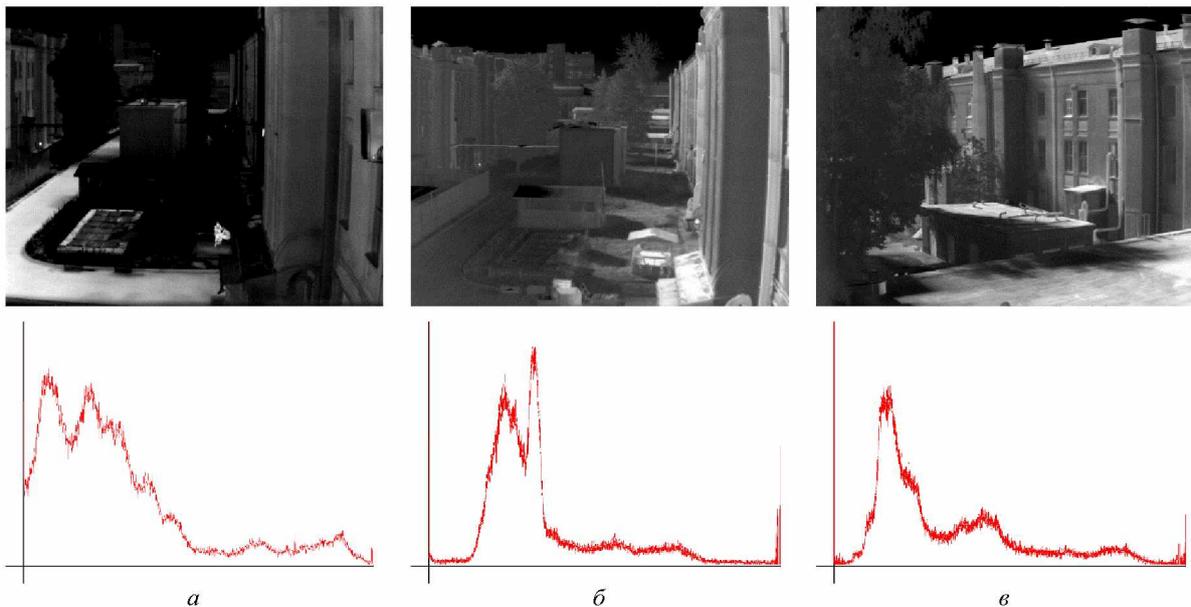


Рис. 7. ИК-изображения и их гистограмма после преобразования с помощью алгоритма TCLHC с пороговой сигмоидой при  $r = 0,5$ ;  $y = 0,5$ ;  $x = 0,3$ ;  $d = 200$ ;  $a$  – ИК-1;  $b$  – ИК-2;  $c$  – ИК-3

Меньшие значения  $P_D$  и  $E_D$  свидетельствуют о более высокой различающей способности и меньших потерях различения соседних пикселей преобразованного изображения. Меньшие значения  $E_{MS}$  говорят о приближении передаточных характеристик блоков (или всего изображения) к линейным. Близкие к единице значение  $U_H$  свидетельствуют о более равномерном распределении яркостей на выбранном интервале относительного базового интервала и близости тонового отображения к линейному при равновероятных значениях пикселей. Близость к единице значений  $L_{DH}$  говорит о меньшей неоднозначности тонового отображения. Меньшие значения  $L_{DL}$  свидетельствуют об уменьшении нелинейных искажений из-за неоднозначности тонового отображения. Значения интервальных показателей вычисляются для перекрывающихся левого (L), центрального (C), правого (R) интервалов гистограммы и всего динамического диапазона изображения (интервал T). В табл. 1, 2 выделены лучшие значения параметров качества тонового преобразования.

Из табл. 1 следует, что по глобальным показателям качества тонового отображения алгоритм HE превосходит алгоритм TCLHC с любой пороговой функцией. Однако, значения

интервальных показателей качества тонового отображения указывают на неоднозначность превосходства алгоритма HE. Согласно этим показателям алгоритм TCLHC лучше передает детали в правой части гистограммы яркости (для более теплых объектов) за счет ее нелинейного растяжения, обеспечивая более высокий локальный контраст.

Табл. 1. Значения глобальных показателей качества ИК-изображений

Показатели	Значения глобальных показателей для алгоритмов								
	HE			TCLHC (T)			TCLHC (S)		
	ИК-1	ИК-2	ИК-3	ИК-1	ИК-2	ИК-3	ИК-1	ИК-2	ИК-3
$N_S$	<b>0,0596</b>	<b>0,0635</b>	0,0865	0,0336	0,0533	<b>0,0985</b>	0,0211	0,0245	0,0450
$F_S$	<b>0,8239</b>	<b>0,8374</b>	<b>0,8842</b>	0,7778	0,7766	0,8306	0,6026	0,6413	0,7668
$I_{TMQ}$	<b>0,7822</b>	<b>0,7872</b>	<b>0,8068</b>	0,7601	0,7667	0,7956	0,6995	0,7141	0,7610
$D_{ST}$	<b>47,11</b>	<b>46,23</b>	<b>47,29</b>	35,16	37,81	56,91	22,77	23,24	38,08
$G_A$	5,06	<b>6,19</b>	<b>6,53</b>	3,81	5,22	<b>7,18</b>	2,22	3,23	4,75
$E_I$	<b>6,85</b>	<b>6,85</b>	<b>7,24</b>	6,48	6,55	7,07	3,41	5,88	6,53
$N_{LE}$	<b>34202</b>	<b>28360</b>	<b>25323</b>	33687	26454	24141	23334	21944	21769

Табл. 2. Значения интервальных показателей качества ИК-изображений

Показатели	Значения интервальных показателей для алгоритмов								
	HE			TCLHC			TCLHC		
	ИК-1	ИК-2	ИК-3	ИК-1	ИК-2	ИК-3	ИК-1	ИК-2	ИК-3
$P_D$	3,1667	<b>-0,2682</b>	<b>0,3867</b>	<b>2,9792</b>	1,2630	2,4284	7,5833	4,3880	7,3242
$E_D$	<b>23,8875</b>	<b>8,5156</b>	<b>89,8104</b>	72,0797	58,5825	156,4934	1164,0022	618,6910	358,1024
$E_{MS}$	19,9126	24,9502	25,9418	22,8952	<b>21,5291</b>	<b>19,8044</b>	31,5900	28,0754	23,0543
$U_H$	<b>0,9872</b>	<b>0,9867</b>	<b>0,9809</b>	0,7231	1,1685	1,7148	5,1066	0,8279	2,5416
$L_{DH}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$L_{DL}$	0,0073	0,0137	0,0152	0,0075	<b>0,0096</b>	0,0107	<b>0,0032</b>	<b>0,0101</b>	<b>0,0083</b>
$P_D$	-5,8470	<b>-14,9207</b>	-12,9086	<b>-4,1672</b>	-11,2020	<b>-13,2289</b>	<b>-4,8782</b>	-6,3270	-7,0805
$E_D$	-41,3314	-111,2161	-146,2064	-72,4310	-415,0800	-593,5226	<b>-705,4703</b>	<b>-162,6808</b>	<b>-221,0519</b>
$E_{MS}$	<b>4,3120</b>	8,9541	10,1452	7,0095	10,6635	<b>8,4627</b>	11,9975	15,8161	<b>8,7426</b>
$U_H$	<b>1,0054</b>	<b>1,0070</b>	<b>1,0112</b>	1,6478	1,2771	0,7332	0,3627	1,9511	0,6815
$L_{DH}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$L_{DL}$	<b>0,0073</b>	0,0138	0,0153	<b>0,0055</b>	<b>0,0115</b>	0,0187	0,0166	<b>0,0089</b>	0,0214
$P_D$	0,9958	9,8583	8,4096	-0,2647	6,5771	6,1805	<b>-4,4209</b>	<b>-0,2667</b>	<b>-2,7258</b>
$E_D$	3,0261	63,9042	6,2242	-24,9154	212,0977	229,9864	<b>-704,6261</b>	<b>-154,7741</b>	<b>-214,6045</b>
$E_{MS}$	<b>0,5651</b>	1,1087	1,3821	0,9846	<b>1,0702</b>	0,8795	<b>0,6278</b>	2,6761	<b>0,5959</b>
$U_H$	<b>1,0021</b>	<b>0,9994</b>	<b>0,9970</b>	0,4906	0,3975	1,0130	0,4071	0,1972	0,3933
$L_{DH}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$L_{DL}$	<b>0,0074</b>	<b>0,0140</b>	<b>0,0155</b>	0,0116	0,0289	0,0183	0,0404	0,0455	0,0543
$E_{MS}$	<b>10,5758</b>	<b>9,4466</b>	<b>9,3519</b>	10,6900	12,9264	11,8600	27,9447	16,9603	17,6051
$L_{DH}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$L_{DL}$	<b>0,0073</b>	<b>0,0139</b>	<b>0,0155</b>	<b>0,0073</b>	<b>0,0139</b>	<b>0,0155</b>	<b>0,0074</b>	<b>0,0139</b>	<b>0,0155</b>

## Заключение

Предложен алгоритм управляемого тонового отображения на основе пороговой обрезки, уплотнения и линейного сжатия гистограммы с низкой вычислительной сложностью. Алгоритм отличается возможностью выбора порога под контролем оператора для нелинейного растяжения одной части динамического диапазона яркостей инфракрасного изображения за счет другого. С помощью интервальных показателей качества тонового отображения показано, что предложенный алгоритм обеспечивает лучший локальный контраст в выбранной оператором части динамического диапазона.

## TONE TRANSFORMATION OF INFRARED IMAGES BASED ON HISTOGRAM THRESHOLDING

A.D. ROBACHEVSKY, D.A. SIKORSKY, S.A. MOSKALEV,  
V.V. CHEPIKOVA, V.Yu. TSVIATKOU

**Abstract.** The problem of compressing the dynamic range of infrared images for their display on a standard monitor is considered. A controlled tone mapping algorithm has been developed based on threshold trimming, compaction and linear histogram compression with low computational complexity. The algorithm allows you to redistribute the brightness of the image by changing the shape of the histogram by changing the threshold sigmoid parameters specified by the operator. It is shown that the proposed algorithm, due to the choice of threshold sigmoid parameters, provides better interval quality indicators of tone transformation in a significant part of the dynamic range compared to the histogram equalization algorithm.

*Keywords:* image dynamic range reduction, infrared images, histogram shape control.

## 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. Mante V., Frazor R. A., Bonin V., Geisler W. S., Carandini M. // Nat Neurosci. 2005. Vol. 8. P. 1690–1697.
3. Wang Z., Simoncelli E. P., Bovik A. C. / Z. Wang, E. P. Simoncelli, A. C. Bovik // 37th Asilomar Conf. on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA. 2003. Vol. 2. P. 1398–1402.
4. Yeganeh H., Wang Z. // IEEE Transactions Image Processing. 2013. Vol. 22, Iss. 2. P. 657–667.
5. Рудиков С. И., Цветков В. Ю., Шкадаревич А. П. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2022. Т. 39, № 11. С. 30–39.