

ИНТЕРВАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА СЖАТИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ ТОНОВОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

С. И. РУДИКОВ¹

д-р техн. наук, проф. В. Ю. ЦВЕТКОВ²

акад. Нац. акад. наук Беларуси, д-р физ.-мат. наук, проф. А. П. ШКАДАРЕВИЧ¹

¹(Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО, Минск)

²(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Предложена модель сжатия динамического диапазона инфракрасных (ИК) изображений, основанная на матрице тонового отображения, элементы которой связывают уровни яркости исходного изображения с широким динамическим диапазоном и уровни яркости нелинейно преобразованного изображения с узким динамическим диапазоном, а также указывают в зависимости от варианта формирования этой матрицы: а) на потери различения соседних пикселей из-за сжатия динамического диапазона; б) уровень нелинейных искажений сжатия; в) неоднозначность тонового отображения. На основе данной модели предложены интервальные показатели качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений, позволяющие оценить потенциальную различающую способность, реальные потери различения соседних пикселей после преобразования, величину нелинейных искажений сжатия, равномерность использования динамического диапазона, неоднозначность тонового отображения для выбранного интервала динамического диапазона. Предложенные показатели позволяют повысить точность оценки качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений, расширяя систему известных показателей, оценивающих контраст, энтропию, статистическую естественность преобразованных изображений и структурную точность тонового отображения.

Ключевые слова: сжатие динамического диапазона, инфракрасные изображения, матрица тонового отображения, интервальные показатели качества изображений.

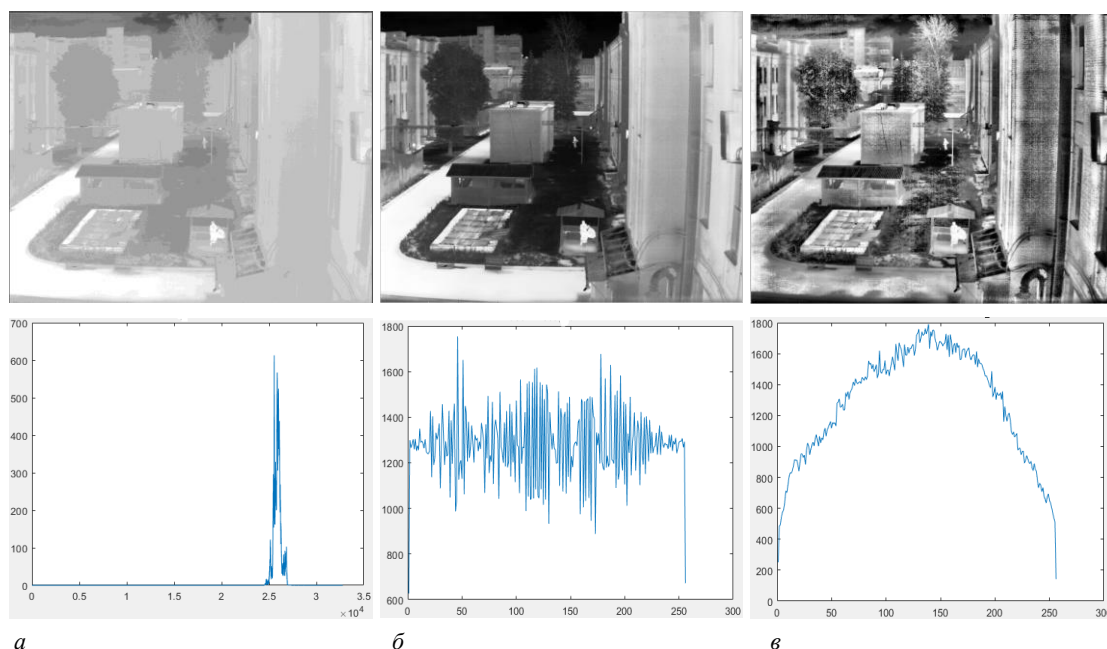
Введение. Для воспроизведения инфракрасных изображений, имеющих широкий динамический диапазон, на стандартных мониторах используется сжатие динамического диапазона. Известно множество алгоритмов тонового отображения, которые не только сжимают динамический диапазон, но и улучшают форму гистограммы яркости для лучшей передачи тонов. Многие основаны на эквализации гистограммы. Широко используется алгоритм глобальной эквализации гистограммы (Histogram Equalization, HE) [1], отличающийся низкой вычислительной сложностью. На его основе разработан блочный алгоритм адаптивной (локальной) эквализации гистограмм (Adaptive Histogram Equalization, AHE) [2], улучшающий тоновое отображение мелких деталей. На основе АНЭ разработано множество блочных алгоритмов, повышающих эффективность тонового отображения (представлены в [3–6]). В [7] предложен алгоритм адаптивного выравнивания, растяжения и сжатия гистограммы (Histogram Equalization, Compression and Stretching, HECS), улучшающий тоновое отображение на краях гистограммы яркости.

Качество алгоритмов тонового отображения определяется качеством преобразованных с их помощью изображений (безэталонные показатели качества) и схожестью этих изображений с исходными (эталонные показатели качества). Сравнение и рекомендации по использованию показателей качества можно найти в [8]. Благодаря относительной простоте вычисления широко используются безэталонные показатели, позволяющие оценить контраст, энтропию, статистическую естественность [9]. Для оценки качества тонового отображения на основе эталона в случае ИК-изображений с широким динамическим диапазоном часто используются показатели структурной точности [10] и качества тональной карты [11]. Несмотря на разнообразие показателей, они не учитывают ряд характеристик сжатия динамического диапазона, связанных, например, с линейностью и последовательностью передачи тонов, потерей различения соседних пикселей после преобразования и равномерностью использования динамического диапазона, ростом неоднозначности тонового отображения из-за различий передаточных характеристик блоков изображения при использовании для преобразования блочных алгоритмов. Кроме того, большинство известных показателей качества преобразования динамического диапазона вычисляются для всего динамического диапазона. Однако в ряде случаев необходимы интервальные показатели, позволяющие оценить качество тонового отображения в определенной части динамического диапазона преобразованного ИК-изображения. Данные недостатки известных показателей приводят к низкой точности и неоднозначности оценки качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений.

Целью работы является повышение точности оценки качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений за счет использования дополнительных интервальных показателей, характеризующих различающую способность преобразованных изображений, линейность и однозначность тонового отображения в выбранной части динамического диапазона преобразованного изображения.

Постановка задачи. Для оценки качества алгоритмов преобразования динамического диапазона широко используются показатели статистической естественности (Statistical Naturalness, N_s) [9], структурной точности (Structural Fidelity, F_s) [10] и основанный на них показатель качества тональной карты (Tone Mapped image Quality Index, I_{TMQ}) [11]. Кроме того, для оценки качества изображения используются контраст (стандартное отклонение) D_{ST} , средний градиент G_A , энтропия E_1 . Для оценки детализации изображения после преобразования в [7] предложено использовать количество N_{LE} локальных экстремумов.

На рисунках 1 и 2 приведены ИК-изображения и их гистограммы: исходное изображение с широким динамическим диапазоном (для отображения использовано линейное сжатие гистограммы), полученные на его основе изображения с узким динамическим диапазоном с помощью алгоритма HE [1] и блочных алгоритмов АНЕ [2], HECS [7] и его модификации HECSm на основе инверсии обрезанных краев глобальной гистограммы со смещением гистограммы яркости вправо (HECSm+) и влево (HECSm-) при размере блока 64×64 пикселя. Для этих изображений в таблице 1 приведены значения рассмотренных показателей. Жирным шрифтом отмечены лучшие значения, курсивом – худшие.

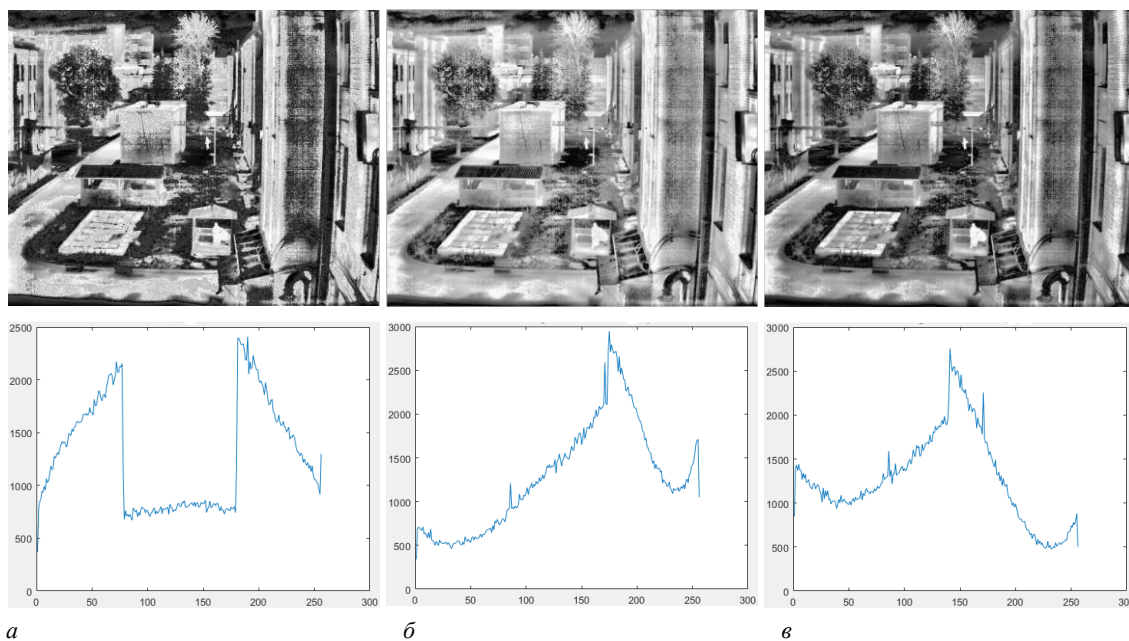


а – исходное изображение; **б** – преобразованное с помощью HE; **в** – преобразованное с помощью АНЕ

Рисунок 1. – ИК-изображения и их гистограммы

Таблица 1. – Значения показателей качества для изображений на рисунке 1

Показатели качества изображений	Алгоритм сжатия динамического диапазона								
	HE	Блоки 64×64 пикселя				Блоки 32×32 пикселя			
		АНЕ	HECS	HECSm+	HECSm-	АНЕ	HECS	HECSm+	HECSm-
N_s	0,0600	0,2996	0,4987	0,2670	0,3144	0,5004	0,5312	0,4693	0,5358
F_s	0,8239	0,8779	0,7849	0,8576	0,8591	0,7934	0,7677	0,7809	0,7851
I_{TMQ}	0,7824	0,8546	0,8656	0,8425	0,8525	0,8684	0,8662	0,8594	0,8720
D_{ST}	35,712	58,837	73,320	57,380	58,818	60,501	61,162	61,065	61,874
G_A	5,239	12,988	19,330	13,101	13,546	19,088	21,009	19,635	19,858
E_1	6,2973	7,6580	7,7240	7,5921	7,6372	7,7856	7,8111	7,7377	7,756
N_{LE}	34202	41467	51188	43317	43847	43324	48958	45524	45875



а – преобразованное с помощью HECS; **б** – преобразованное с помощью HECSm+;
в – преобразованное с помощью HECSm-

Рисунок 2. – Преобразованные ИК-изображения и их гистограммы

Из таблицы 1 следует, что при размере блока 64×64 пикселя по всем показателям, кроме F_s , алгоритм HECS превосходит другие алгоритмы. При размере блока 32×32 пикселя алгоритм HECS уступает алгоритмам АНБ и HECSm- по показателям F_s и I_{TMQ} и алгоритму HECSm- по показателям N_s и D_{ST} . При этом, как следует из рисунка 1, алгоритм HECS по сравнению с другими алгоритмами вносит в преобразованное изображение значительные нелинейные искажения, нарушая последовательность изменения оттенков (хорошо заметно на участках в области темного и светлого), что связано с ошибками переквантования. Единственный показатель, отражающий данный факт – это структурная точность F_s , которая в алгоритме HECS хуже по сравнению с другими алгоритмами. Однако показатель F_s имеет примерно одинаковые значения для результатов алгоритмов HECSm+ и HECSm-, представляемых существенно разными гистограммами и использующими различную нелинейность передаточных характеристик блоков в области темного и светлого. Таким образом, для повышения точности оценки качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений актуальными задачами являются разработка модели сжатия динамического диапазона, учитывающей нелинейность передаточных характеристик блоков, а также показателей качества сжатия на основе данной модели и оценка их эффективности.

Модель сжатия динамического диапазона ИК-изображений. Предлагается модель сжатия динамического диапазона ИК-изображений на основе матрицы $Q(V) = \|q(V, m, n)\|_{(m=0, L_{LDR}-1, n=0, L_{HDR}-1)}$ тонового отображения, нулевые значения элементов которой указывают на отсутствие отображения n -го уровня квантования исходного изображения I_{HDR} в m -й уровень квантования преобразованного изображения I_{LDR} , а отличные от нуля значения – на наличие такого отображения и, в зависимости от варианта V формирования матрицы:

- на потери различия соседних пикселей при отображении значения n пикселя исходного изображения I_{HDR} в значение m соответствующего пикселя преобразованного изображения I_{LDR} ($V = A$);
- уровень нелинейных искажений при отображении значения n пикселя исходного изображения I_{HDR} в значение m соответствующего пикселя преобразованного изображения I_{LDR} ($V = B$);
- количество всех пикселей со значением n исходного изображения I_{HDR} , отображенных в пиксели со значением m преобразованного изображения I_{LDR} ($V = C$).

Значения элементов матрицы $Q(A)$ определяются с учетом порога различия D (минимального значимого количества градаций яркости соседних пикселей в окрестности радиусом R пикселей, при котором

обеспечивается различимость этих пикселей на исходном I_{HDR} и преобразованном I_{LDR} изображениях), с помощью выражения (сначала все элементы нулевые)

$$\begin{aligned} & (i_{\text{HDR}}(y, x) = n) \wedge (i_{\text{LDR}}(y, x) = m) \Rightarrow (q(A, m, n) \leftarrow 1), \\ & (\forall k (k = \overline{-R, R}) \forall p (p = \overline{-R, R}) ((k \neq 0) \vee (p \neq 0)) (|i_{\text{HDR}}(y, x) - i_{\text{HDR}}(y + k, x + p)| > D) \wedge \\ & \wedge (|i_{\text{LDR}}(y, x) - i_{\text{LDR}}(y + k, x + p)| < D) \Rightarrow q(A, m, n) \leftarrow q(A, m, n) + \\ & + |i_{\text{HDR}}(y, x) - i_{\text{HDR}}(y + k, x + p)| L_{\text{LDR}} / L_{\text{HDR}} - |i_{\text{LDR}}(y, x) - i_{\text{LDR}}(y + k, x + p)|) \end{aligned} \quad (1)$$

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

Значения элементов матрицы $Q(B)$ определяются на основе суммы квадратов разностей значений пикселей m преобразованного изображения I_{LDR} и значений, полученных из значений n соответствующих пикселей исходного изображения I_{HDR} , с помощью выражения (сначала все элементы нулевые)

$$(i_{\text{HDR}}(y, x) = n) \wedge (i_{\text{LDR}}(y, x) = m) \Rightarrow q(B, m, n) \leftarrow q(B, m, n) + (i_{\text{HDR}}(y, x) L_{\text{LDR}} / L_{\text{HDR}} - i_{\text{LDR}}(y, x))^2 \quad (2)$$

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

Значения элементов матрицы $Q(C)$ определяются с помощью выражения (сначала все элементы нулевые)

$$(i_{\text{HDR}}(y, x) = n) \wedge (i_{\text{LDR}}(y, x) = m) \Rightarrow q(C, m, n) \leftarrow q(C, m, n) + 1 \text{ при } y = \overline{0, Y - 1}, x = \overline{0, X - 1}. \quad (3)$$

На основе матрицы $Q(V)$ в зависимости от варианта ее формирования могут быть получены:

- компрессионная характеристика $F_{\text{DP}} = \|f_{\text{DP}}(m)\|_{(m=\overline{0, L_{\text{LDR}}-1})}$, описывающая распределение по динамическому диапазону $[0, L_{\text{LDR}} - 1]$ преобразованного изображения I_{LDR} количества уровней квантования исходного изображения I_{HDR} ($V = A$);

- характеристика $F_{\text{DE}} = \|f_{\text{DE}}(m)\|_{(m=\overline{0, L_{\text{LDR}}-1})}$ потерь различения соседних пикселей преобразованного изображения, описывающая распределение по динамическому диапазону $[0, L_{\text{LDR}} - 1]$ разностей в различениях соседних пикселей на исходном I_{HDR} и преобразованном I_{LDR} изображениях ($V = A$);

- дистрибутивная характеристика $F_{\text{D}} = \|f_{\text{D}}(n)\|_{(n=\overline{0, L_{\text{HDR}}-1})}$, описывающая распределение по прореженному динамическому диапазону $[0, L_{\text{HDR}} - 1]$ исходного изображения I_{HDR} количества соответствующих уровней квантования преобразованного изображения I_{LDR} , где L_{HDR} – количество уровней квантования, для которых существуют пиксели исходного изображения I_{HDR} с соответствующей яркостью ($V = A$);

- характеристика $F_{\text{MS}} = \|f_{\text{MS}}(m)\|_{(m=\overline{0, L_{\text{LDR}}-1})}$ нелинейности тонового отображения, описывающая распределение по динамическому диапазону $[0, L_{\text{LDR}} - 1]$ преобразованного изображения I_{LDR} нелинейных искажений, возникающих при тоновом отображении по сравнению с линейным преобразованием ($V = B$);

- характеристика $F_{\text{H}} = \|f_{\text{H}}(m)\|_{(m=\overline{0, L_{\text{LDR}}-1})}$ использования динамического диапазона преобразованного изображения (гистограмма яркости), описывающая распределения значений пикселей преобразованного изображения I_{LDR} по динамическому диапазону $[0, L_{\text{LDR}} - 1]$ ($V = C$).

Значения функций F_{DP} , F_{DE} , F_{MS} , F_{H} , F_{D} определяются с помощью выражений:

$$f_{\text{DP}}(m) = \sum_{n=0}^{L_{\text{HDR}}-1} (q(A, m, n) > 0), \quad (4)$$

$$f_{\text{DE}}(m) = \sum_{n=0}^{L_{\text{HDR}}-1} (q(A, m, n) - 1), \quad (5)$$

$$f_{MS}(m) = \sum_{n=0}^{L_{HDR}-1} q(B, m, n), \quad (6)$$

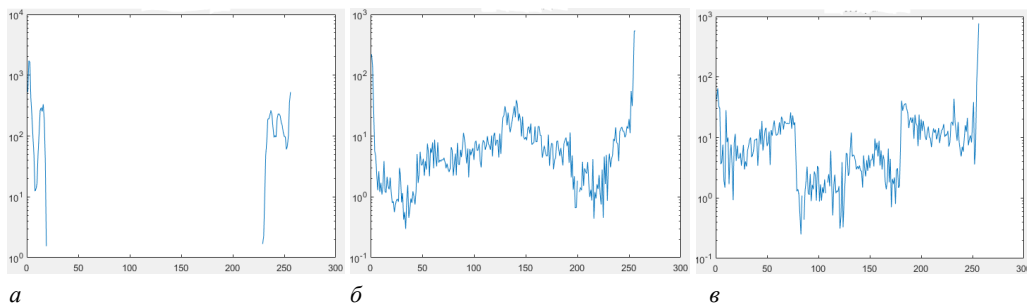
$$f_H(m) = \sum_{n=0}^{L_{HDR}-1} q(C, m, n) \quad (7)$$

при $m = \overline{0, L_{LDR} - 1}$;

$$\left(\sum_{m=0}^{L_{LDR}-1} (q(A, m, n) > 0) > 0 \right) \Rightarrow \left(\left(f_D(k) = \sum_{m=0}^{L_{LDR}-1} (q(A, m, n) > 0) \right), (k \leftarrow k+1) \right) \quad (8)$$

при $k \leftarrow 0, n = \overline{0, L_{HDR} - 1}, k \in [0, L_{HDR} - 1]$.

Характеристика F_{DE} ИК-изображений, полученных с помощью алгоритмов HE, AHE, HECS (см. рисунки 1, 2), показана на рисунке 3.



a – для алгоритма HE; *b* – для алгоритма AHE; *v* – для алгоритма HECS

Рисунок 3. – Функция F_{DE}

Показатели качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений. Для оценки качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений предлагаются интервальные и интервально-блочные показатели, основанные на функциях F_{DP} , F_{DE} , F_{MS} , F_H , F_D и характеризующие:

- потенциальную различающую способность P_D на выбранном интервале $[m_L, m_R]$ динамического диапазона преобразованного изображения I_{LDR} ;
- потери E_D различения соседних пикселей на выбранном интервале $[m_L, m_R]$ динамического диапазона преобразованного изображения I_{LDR} , обусловленные тоновым отображением;
- величину E_{MS} нелинейных искажений сжатия динамического диапазона на выбранном интервале $[m_L, m_R]$ динамического диапазона преобразованного изображения I_{LDR} относительно линейно преобразованного изображения $I_{HDR} L_{LDR} / L_{HDR}$;
- равномерность U_H использования динамического диапазона на выбранном интервале $[m_{L1}, m_{R1}]$ динамического диапазона преобразованного изображения I_{LDR} относительно базового интервала $[m_{L2}, m_{R2}]$;
- неоднозначность L_{DH} тонового отображения, обусловленную различиями передаточных характеристик блоков в интервале $[m_L, m_R]$ динамического диапазона преобразованного изображения I_{LDR} , соответствующего интервалу $[K_{HL} m_L, K_{HL} m_R]$ прореженного динамического диапазона исходного изображения I_{HDR} , где K_{HL} – коэффициент, зависящий от количества уровней квантования L_{LDR} и L_{HDR} , $K_{HL} = L_{HDR} / L_{LDR}$;
- величину L_{DL} нелинейных искажений, связанных с неоднозначностью тонового отображения, в интервале $[m_L, m_R]$ динамического диапазона преобразованного изображения I_{LDR} , соответствующего интервалу $[K_{HL} m_L, K_{HL} m_R]$ прореженного динамического диапазона исходного изображения I_{HDR} .

Значения показателей P_D , E_D , E_{MS} , U_H , L_{DH} , L_{DL} определяются с помощью выражений:

$$P_D = \left(\sum_{m=m_L}^{m_R-1} f_{DP}(m) - \sum_{m=0}^{L_{LDR}-1} f_{DP}(m) / L_{LDR} \right) / (m_R - m_L), \quad (9)$$

$$E_D = \left(\sum_{m=m_L}^{m_R-1} f_{DE}(m) - \sum_{m=0}^{L_{LDR}-1} f_{DE}(m) / L_{LDR} \right) / (m_R - m_L), \tag{10}$$

$$E_{MS} = \frac{1}{10^3} \sum_{m=m_L}^{m_R-1} f_{MS}(m) / \sum_{m=m_L}^{m_R-1} f_H(m), \tag{11}$$

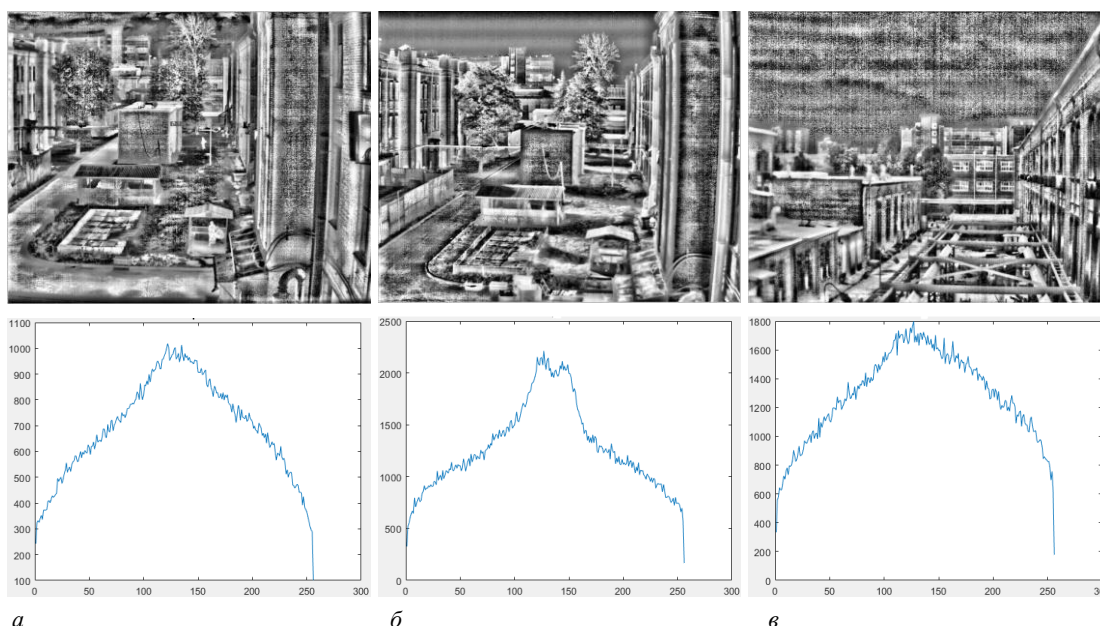
$$U_H = \sum_{m=m_{L1}}^{m_{R1}-1} f_H(m) / \sum_{m=m_{L2}}^{m_{R2}-1} f_H(m), \tag{12}$$

$$L_{DH} = \sum_{n=K_{HL}m_L}^{K_{HL}m_R-1} f_D(n) / (K_{HL}(m_R - m_L)), \tag{13}$$

$$L_{DL} = \sum_{n=K_{HL}m_L}^{K_{HL}m_R-1} f_D(n) / \sum_{m=m_L}^{m_R-1} f_H(m). \tag{14}$$

Из выражений (1)–(14) следует, что показатели P_D , E_D , E_{MS} , L_{DH} , L_{DL} позволяют произвести эталонную оценку качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений (для вычисления этих показателей используются исходное I_{HDR} и преобразованное I_{LDR} изображения). Показатель U_H предназначен для безэталонной оценки качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений.

Оценка эффективности показателей качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений. На рисунке 4 приведены ИК-изображения с узким динамическим диапазоном $L_{LDR} = 256$, преобразованные с помощью алгоритма АНЕ из трех изображений $I_{HDR}(1) - I_{HDR}(3)$ с широким динамическим диапазоном $L_{HDR} = 32768$ при размере блока 32×32 пикселя. Для изображений, приведенных на рисунке 4, а также аналогичных изображений, полученных из изображений $I_{HDR}(1) - I_{HDR}(3)$ с широким динамическим диапазоном с помощью алгоритма НЕ и различных блочных алгоритмов при размерах блока 64×64 и 32×32 пикселя, в таблицах 2, 3 приведены значения показателей качества сжатия динамического диапазона N_S , F_S , I_{TMQ} , D_{ST} , G_A , E_I , N_{LE} , а также предложенные показатели P_D , E_D , E_{MS} , U_H , L_{DH} , L_{DL} при $D = 8$ и $R = 1$ (таблица 2 дополняет таблицу 1).



a – для $I_{HDR}(1)$; *b* – для $I_{HDR}(2)$; *c* – для $I_{HDR}(3)$

Рисунок 4. – ИК-изображения, полученные с помощью алгоритма АНЕ с размером блока 32×32 пикселя, и их гистограммы

В таблицах 2, 3 жирным шрифтом отмечены лучшие значения, курсивом – худшие. Поскольку гистограммы яркости выбранных изображений отличаются формой и положениями максимумов, для нормировки интервалы вычисления показателей P_D , E_D , E_{MS} , U_H , L_{DH} , L_{DL} приведены к центральным значениям h_{MAX} максимумов гистограмм и составляют: $[m_L, m_R] = [m_{L1}, m_{R1}] = [0, 3h_{MAX}/4]$, $[m_{L2}, m_{R2}] = [h_{MAX}/2, 3h_{MAX}/2]$ (левая часть динамического диапазона – интервал L); $[m_L, m_R] = [m_{L1}, m_{R1}] = [h_{MAX}/2, 3h_{MAX}/2]$, $[m_{L2}, m_{R2}] = [0, 3h_{MAX}/4] \cup [5h_{MAX}/4, L_{LDR} - 1]$ (центральная часть динамического диапазона – интервал С); $[m_L, m_R] = [m_{L1}, m_{R1}] = [5h_{MAX}/4, L_{LDR} - 1]$, $[m_{L2}, m_{R2}] = [h_{MAX}/2, 3h_{MAX}/2]$ (правая часть динамического диапазона – интервал R). Показатели E_{MS} , L_{DH} , L_{DL} вычисляются также для всего динамического диапазона $[0, L_{LDR} - 1]$ (интервал Т).

Таблица 2. – Значения показателей качества для изображения I_{HDR} (1)

Интервалы	Показатели	Значения показателей для алгоритмов сжатия динамического диапазона								
		HE	Блоки 64×64 пикселя				Блоки 32×32 пикселя			
			AHE	HECS	HECSm+	HECSm-	AHE	HECS	HECSm+	HECSm-
L	P_D	3,167	-54,351	-38,422	-147,916	-18,759	-101,685	-98,716	-175,918	-26,308
	E_D	23,888	-5,590	-5,661	-8,361	-3,911	-11,409	-10,502	-16,060	-9,817
	E_{MS}	19,913	21,004	20,334	15,839	21,547	20,518	21,415	17,288	22,971
	U_H	0,987	0,728	1,011	0,483	0,726	0,681	0,668	0,480	0,729
	L_{DH}	1,000	38,268	67,420	57,900	38,896	30,961	31,597	59,558	35,872
	L_{DL}	0,007	0,299	0,525	0,638	0,300	0,265	0,268	0,663	0,273
C	P_D	-5,847	133,171	-21,362	159,146	134,799	155,731	141,580	164,163	150,889
	E_D	-41,331	3,611	-5,453	0,738	0,217	7,639	8,924	10,404	9,910
	E_{MS}	4,312	6,071	2,251	2,873	5,161	6,022	6,520	3,297	6,125
	U_H	1,005	1,364	0,894	1,519	1,620	1,496	1,456	1,570	1,619
	L_{DH}	1,000	111,790	114,230	109,622	111,635	120,155	122,946	120,175	119,822
	L_{DL}	0,007	0,663	0,900	0,592	0,634	0,685	0,704	0,657	0,680
R	P_D	0,996	-54,311	72,273	72,865	-154,433	-54,856	-37,391	50,478	-164,268
	E_D	3,026	6,286	19,724	8,538	0,019	-2,773	-3,523	0,503	-8,256
	E_{MS}	0,565	0,570	0,756	0,717	0,585	0,545	0,650	0,728	0,722
	U_H	1,002	0,739	1,227	0,833	0,508	0,656	0,706	0,793	0,507
	L_{DH}	1,000	39,808	33,829	32,439	40,098	57,158	57,926	35,267	51,073
	L_{DL}	0,007	0,338	0,223	0,217	0,455	0,482	0,475	0,251	0,587
T	E_{MS}	10,576	9,400	10,951	6,269	10,449	9,254	9,168	6,619	10,887
	L_{DH}	1,000	67,544	70,179	66,140	67,666	73,752	75,384	72,712	73,650
	L_{DL}	0,007	0,496	0,516	0,486	0,497	0,542	0,554	0,534	0,541

Из таблиц 1–3 следует, что предложенные показатели P_D , E_D , E_{MS} , U_H , L_{DH} , L_{DL} качества сжатия динамического диапазона вводят новые критерии для определения эффективности алгоритмов тонного ото-бражения дополнительно к существующим критериям, определяемым известными показателями N_S , F_S , I_{TMQ} , D_{ST} , G_A , E_I , N_{LE} . Являясь интервальными, предложенные показатели позволяют оценить качество сжатия динамического диапазона в интересующем поддиапазоне, что важно для поиска объектов на ИК-изображениях в различных технологических системах (например, для определения притока холодного воздуха – яркость таких объектов находится в нижней части динамического диапазона, для обнаружения работающей и греющейся техники – яркость таких объектов находится в верхней части динамического диапазона).

Таблица 3. – Значения показателей качества для изображений $I_{HDR}(2)$ и $I_{HDR}(3)$

Интервалы	Показатели	Значения показателей для алгоритмов сжатия динамического диапазона									
		для изображения $I_{HDR}(2)$, интервалы L, T					для изображения $I_{HDR}(3)$, интервалы R, T				
		HE	Блоки 64 × 64 пикселя				HE	Блоки 32 × 32 пикселя			
AHE	HECS		HECSm+	HECSm-	AHE	HECS		HECSm+	HECSm-		
L(R)	P_D	-0,268	-119,857	-98,826	-227,549	-82,349	0,868	18,103	39,799	60,460	-51,054
	E_D	8,516	-5,670	-4,571	-28,039	-17,270	13,716	-1,603	0,168	-7,765	-14,381
	E_{MS}	24,950	18,484	18,096	14,816	20,460	1,127	0,740	0,886	0,727	0,806
	U_H	0,987	0,753	0,789	0,475	0,708	1,000	0,812	0,931	0,778	0,530
	L_{DH}	1,000	52,552	63,416	55,456	47,427	1,000	18,852	16,944	11,021	17,824
	L_{DL}	0,014	0,780	0,929	1,197	0,699	0,005	0,105	0,085	0,058	0,141
T	E_{MS}	9,447	8,576	8,771	5,649	9,558	10,314	9,192	9,847	6,520	10,611
	L_{DH}	1,000	37,943	42,065	37,454	37,654	1,000	63,921	67,486	62,369	63,409
	L_{DL}	0,014	0,529	0,587	0,522	0,525	0,005	0,342	0,361	0,334	0,340
	N_S	0,064	0,336	0,536	0,291	0,333	0,083	0,673	0,763	0,576	0,659
	F_S	0,837	0,843	0,682	0,817	0,824	0,829	0,797	0,762	0,792	0,791
	I_{TMQ}	0,787	0,852	0,841	0,836	0,846	0,791	0,898	0,902	0,881	0,894
	D_{ST}	35,407	60,728	65,264	58,072	58,633	28,087	62,849	69,173	58,466	60,135
	G_A	5,723	13,634	21,931	13,295	13,612	5,960	22,965	27,280	21,453	22,224
	E_I	6,351	7,692	7,845	7,598	7,637	6,104	7,817	7,883	7,677	7,727
	N_{LE}	28360	35522	48095	37724	37728	43929	48982	55705	50739	51089

Показатель P_D позволяет выявить алгоритм тонового отображения, обеспечивающий лучшее потенциальное различие соседних пикселей после тонового отображения в интересующем интервале динамического диапазона. Наименьшие (лучшие) значения данного показателя в нижней и верхней частях динамического диапазона для большинства ИК-изображений обеспечивают алгоритмы HECSm+ и HECSm-. Минимальным значениям показателя P_D в нижней и верхней частях динамического диапазона соответствуют, как правило, минимальные или близкие к минимальным значения потерь E_D различия соседних пикселей преобразованного изображения и E_{MS} нелинейных искажений сжатия динамического диапазона (характерно для алгоритмов HECSm+ и HECSm-).

Показатель U_H позволяет определить алгоритмы, обеспечивающие наибольшую равномерность использования динамического диапазона. Наиболее равномерное использование динамического диапазона обеспечивает алгоритм HE, а в группе блочных алгоритмов – HECS.

Показатель неоднозначности L_{DH} и связанный с ним показатель L_{DL} нелинейных искажений имеют лучшие значения для алгоритма HE, а в группе блочных алгоритмов – в зависимости от типа изображения и интервала. Следствием низкой неоднозначности алгоритма HE являются характерные для него высокие значения показателя F_S структурной точности. Соответствие между значениями показателей L_{DH} неоднозначности тонового отображения, L_{DL} нелинейных искажений и F_S структурной точности прослеживается для всех алгоритмов сжатия динамического диапазона.

Из таблиц 1–3 также следует, что существует взаимосвязь между известными показателями N_S натуральной естественности и D_{ST} контраста, G_A градиента, E_I энтропии, N_{LE} количества локальных экстремумов. Лучшие значения для большинства случаев обеспечивает алгоритм HECS. Однако при этом он имеет, как правило, худшие значения глобальных показателей L_{DH} неоднозначности тонового отображения, L_{DL} нелинейных искажений и F_S структурной точности.

Заключение. Разработана модель сжатия динамического диапазона ИК-изображений, основанная на матрице тонового отображения, элементы которой указывают на связь между значениями пикселей исходного и преобразованного изображений с учетом разницы в различениях соседних пикселей этих изображений, линейности и возможной неоднозначности преобразования из-за блочного характера обработки

исходного изображения. На основе данной модели предложены интервальные показатели потенциальной различающей способности, потерь различения при сжатии динамического диапазона, величины нелинейных искажений сжатия, равномерности использования динамического диапазона, неоднозначности тонового отображения и величины нелинейных искажений из-за неоднозначности отображения. Проведены исследования зависимости этих показателей от типа ИК-изображения, алгоритма тонового отображения, интервалов динамического диапазона, порога различения соседних пикселей и радиуса окрестности оценки различения на исходном и преобразованном изображениях, а также связи предложенных показателей между собой и с известными показателями качества. Установлено, что при улучшении потенциальной различающей способности преобразованных изображений, как правило, уменьшаются реальные потери различения соседних пикселей и среднеквадратическое отклонение значений пикселей преобразованного изображения от значений соответствующих пикселей линейно преобразованного изображения. Процесс улучшения различения соседних пикселей преобразованного изображения в отдельном интервале динамического диапазона сопровождается обычно уменьшением равномерности гистограммы, ростом неоднозначности тонового отображения и связанных с ней нелинейных искажений в этом интервале, а также снижением структурной точности. Структурная точность и статистическая естественность для многих ИК-изображений находятся в противопоставлении, поэтому снижение структурной точности, как правило, приводит к улучшению статистической естественности ИК-изображений и связанных с ней контраста и энтропии. Таким образом, предложенные показатели, основанные на матрице тонового отображения, повышают точность оценки качества сжатия динамического диапазона за счет расширения системы известных показателей и ввода дополнительных критериев качества, ориентированных на оценку различающей способности, линейности и однозначности тонового отображения в различных интервалах динамического диапазона преобразованного изображения. Это позволяет выбирать алгоритмы тонового отображения, обеспечивающие лучшие характеристики в значимых интервалах с учетом глобальных показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nithyananda, C. R. Review on Histogram Equalization based Image Enhancement Techniques / C. R. Nithyananda, A. C. Ramachandra, Preethi // *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai. – 2016. – P. 2512–2517. – DOI: [10.1109/ICEEOT.2016.7755145](https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755145).
2. Kim, T. K. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering / T. K. Kim, J. K. Paik, B. S. Kang // *IEEE Trans. Consum. Electron.* – 1998. – Vol. 44, iss. 1. – P. 82–87. – DOI: [10.1109/30.663733](https://doi.org/10.1109/30.663733).
3. Kim, J.-Y. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization / J.-Y. Kim, L.-S. Kim, S.-H. Hwang // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology.* – 2001. – Vol. 11, iss. 4. – P. 475–484. – DOI: [10.1109/76.915354](https://doi.org/10.1109/76.915354).
4. Reza, A. M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement / A. M. Reza // *J. of VLSI Signal Process.-Syst. Signal Image Video Technol.* – 2004. – Vol. 38, iss. 1. – P. 35–44. – DOI: [10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82](https://doi.org/10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82).
5. Huang, S.-C. Image contrast enhancement for preserving mean brightness without losing image features / S.-C. Huang, C.-H. Yeh // *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* – 2013. – Vol. 26, № 5. – P. 1487–1492. – DOI: [10.1016/j.engappai.2012.11.011](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.11.011).
6. Al-Sammarai, M. F. Contrast enhancement of roads images with foggy scenes based on histogram equalization / M. F. Al-Sammarai // *10th Intern. Conf. on Computer Science and Education (ICCSE)*, Cambridge, 22–24 July 2015. – Cambridge, 2015. – P. 95–101. – DOI: [10.1109/ICCSE.2015.7250224](https://doi.org/10.1109/ICCSE.2015.7250224).
7. Рудиков, С. И. Уменьшение динамического диапазона инфракрасных изображений на основе адаптивного выравнивания, растяжения и сжатия гистограммы / С. И. Рудиков, В. Ю. Цветков, А. П. Шкадаревич // *Вестні Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фізика-тэхнічных навук.* – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 470–482. – DOI: [10.29235/1561-8358-2021-66-4-470-482](https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-470-482).
8. Голуб, Ю. И. Влияние уменьшения размеров изображения на вычисление оценки его качества / Ю. И. Голуб, Ф. В. Старовойтов, В. В. Старовойтов // *Системный анализ и прикладная информатика.* – 2020. – № 2. – С. 35–45.
9. Independence of luminance and contrast in natural scenes and in the early visual system / V. Mante [et al] // *Nat Neurosci.* – 2005. – Vol. 8. – P. 1690–1697. – DOI: [10.1038/nn1556](https://doi.org/10.1038/nn1556).
10. Wang, Z. Multiscale structural similarity for image quality assessment / 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. – DOI: [10.1109/ACSSC.2003.1292216](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2003.1292216).
11. Yeganeh, H. Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images / H. Yeganeh, Z. Wang // *IEEE Transactions on Image Processing.* – 2013. – Vol. 22, iss. 2. – P. 657–667. – DOI: [10.1109/TIP.2012.2221725](https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2221725).

REFERENCES

1. Nithyananda, C. R., Ramachandra, A. C., & Preethi. (2016). Review on Histogram Equalization based Image Enhancement Techniques. In *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai (2512–2517). DOI: [10.1109/ICEEOT.2016.7755145](https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755145).

2. Kim, T. K., Paik, J. K., & Kang, B. S. (1998). Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering. *IEEE Trans. Consum. Electron*, 44(1), 82–87. DOI: [10.1109/30.663733](https://doi.org/10.1109/30.663733).
3. Kim, J.-Y., Kim, L.-S., & Hwang, S.-H. (2001). An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 11(4), 475–484. DOI: [10.1109/76.915354](https://doi.org/10.1109/76.915354).
4. Reza, A. M. (2004). Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement. *Journal of VLSI Signal Process.-Syst. Signal Image Video Technol.*, 38(1), 35–44. DOI: [10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82](https://doi.org/10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82).
5. Huang, S.-C., & Yeh, C.-H. (2013). Image contrast enhancement for preserving mean brightness without losing image features. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(5), 1487–1492. DOI: [10.1016/j.engappai.2012.11.011](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.11.011).
6. Al-Sammarai, M. F. (2015). Contrast enhancement of roads images with foggy scenes based on histogram equalization. In *10th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE)* (95–101). Cambridge. DOI: [10.1109/ICCSE.2015.7250224](https://doi.org/10.1109/ICCSE.2015.7250224).
7. Rudikov, S. I., Tsvetkov, V. Yu., & Shkadarevich, A. P. (2021). Umen'shenie dinamicheskogo diapazona infrakrasnykh izobrazhenii na osnove adaptivnogo vyravnivaniya, rastyazheniya i szhatiya gistogrammy [Dynamic range reduction of infrared images based on adaptive equalization, stretch and compression of histogram]. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh navuk. [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical serie]*, 66(4), 470–482. DOI: [10.29235/1561-8358-2021-66-4-470-482](https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-470-482). (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Golub, Yu. I., Starovoitov, F. V., & Starovoitov, V. V. (2020). Vliyanie umen'sheniya razmerov izobrazheniya na vychislenie otsenki ego kachestva [Impact of image size reducing for image quality assesment]. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika [System analysis and applied information science]*, (2), 35–45. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Mante, V., Frazor, R. A., Bonin, V., Geisler, W. S., & Carandini, M. (2005). Independence of luminance and contrast in natural scenes and in the early visual system. *Nat Neurosci*, (8), 1690–1697. DOI: [10.1038/nn1556](https://doi.org/10.1038/nn1556).
10. Wang, Z., Simoncelli, E. P., & Bovik, A. C. (2003). Multiscale structural similarity for image quality assessment. *37th Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA*, 2, 1398–1402. DOI: [10.1109/ACSSC.2003.1292216](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2003.1292216).
11. Yeganeh, H., & Wang, Z. (2013). Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(2), 657–667. DOI: [10.1109/TIP.2012.2221725](https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2221725).

Поступила 07.09.2022

INTERVAL QUALITY INDICATORS OF THE DYNAMIC RANGE COMPRESSION OF INFRARED IMAGES ON THE BASIS OF A TONE MAPPING MATRIX

S. RUDIKOV¹, V. TSVIATKOU², A. SHKADAREVICH¹

¹(UE “STC “LEMT” BelOMO”)

²(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

The article proposes a dynamic range compression model for infrared (IR) images based on a tone mapping matrix, the elements of which relate the brightness levels of the original image with a wide dynamic range and the brightness levels of a non-linearly transformed image with a narrow dynamic range, and also indicate, depending on the variant of formation of this matrices on: a) loss of discrimination between adjacent pixels due to compression of the dynamic range; b) the level of non-linear compression distortions; c) ambiguity of tone mapping. Based on this model, interval indicators of the quality of compression of the dynamic range of infrared images are proposed, which allow estimating the potential distinguishing power, the real loss of discrimination between adjacent pixels after transformation, the magnitude of nonlinear compression distortions, the uniformity of the use of the dynamic range, and the ambiguity of tone mapping for the selected interval of the dynamic range. The proposed indicators improve the accuracy of assessing the quality of compression of the dynamic range of IR images by expanding the system of known indicators that evaluate the contrast, entropy, statistical naturalness of the converted images, and the structural accuracy of tone mapping.

Keywords: dynamic range compression, infrared images, tone mapping matrix, quality intervals indicators of images.