

Е.А. Дубровская, К.С. Баланев, К.Э. Привалов, М.В. Раскатова

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ методов оценки контраста изображений, включая глобальные методы (RMS-контраст, энтропийный контраст, контраст по диапазону) и локальные методы с использованием сверточных операторов (Собеля, Прюитта, Лапласа, Робертса), а также контраст Вебера и локальное стандартное отклонение. Исследованы особенности каждого метода, их чувствительность к шуму и точность оценки локальных и глобальных изменений яркости. На основе анализа экспериментов выявлено, что локальные методы, такие как сверточные операторы и контраст Вебера, более точно оценивают локальные контрасты, но чувствительны к шумовым артефактам. Глобальные методы на основе гистограмм, включая RMS-контраст и энтропийный контраст, предоставляют общую оценку контраста без учета локальных особенностей изображения.

**Ключевые слова:** контрастность изображения, методы оценки контрастности, гистограмма яркости, локальные и глобальные изменения яркости.

E.A. Dubrovskaya, K.S. Balanev, K.E. Privalov, M.V. Raskatova

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING IMAGE CONTRAST

**Abstract.** The article provides a comparative analysis of image contrast estimation methods, including global methods (RMS-contrast, entropy contrast, range contrast) and local methods using convolutional operators (Sobel, Pruitt, Laplace, Roberts), as well as Weber contrast and local standard deviation. The features of each method, their sensitivity to noise, and the accuracy of estimating local and global brightness variations are investigated. Based on the analysis of experiments, it is found that local methods, such as convolutional operators and Weber contrast, are more accurate in estimating local contrasts but sensitive to noise artifacts. Global histogram-based methods, including RMS contrast and entropy contrast, provide an overall contrast estimate without considering local image features.

**Keywords:** image contrast, contrast estimation methods, luminance histogram, local and global luminance variations.

### *Введение*

Существует множество исследований, посвященных количественному и качественному способу определения контраста [1–4]. Качественный способ определения яркости и контраста заключается в экспертной оценке некоторой группы выбранных людей для исследуемого изображения. Данный способ не всегда применим для оценки контраста изображения, так как не является формализованным, а также его не получится применить при большом наборе исследуемых изображений. Основной недостаток данного способа заключается в том, что оценка разных экспертов может отличаться в зависимости от индивидуального восприятия цвета. Количественный способ является наиболее распространенным. Существуют различные методы для реализации этого подхода, которые будут рассмотрены в данной работе.

Методы определения контраста могут производиться с помощью ядра свертки, а также на основе гистограммы распределения цветов изображения. Методы определения

**Дубровская Елена Андреевна**

магистрант, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва. Сфера научных интересов: разработка программного обеспечения, информационные системы.

Электронный адрес: lena24042002@gmail.com

**Баланев Кирилл Сергеевич**

аспирант, ассистент кафедры безопасности и информационных технологий, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва. Сфера научных интересов: разработка программного обеспечения, информационные системы.

Электронный адрес: balanev.kirill@yandex.ru

**Привалов Кирилл Эдуардович**

магистрант, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва. Сфера научных интересов: разработка программного обеспечения, информационные системы.

Электронный адрес: PrivalovKE@mpei.ru

**Раскатова Марина Викторовна**

кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных машин, систем и сетей, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва. Сфера научных интересов: разработка программного обеспечения, информационные системы. Автор более 70 опубликованных научных работ. SPIN-код: 8053-5041, AuthorID: 609945.

Электронный адрес: raskatovaMv@mpei.ru

контраста с помощью ядра свертки требуют большего объема вычислительных ресурсов и времени в сравнении с алгоритмом работающего исключительно с гистограммой изображения. Однако за счет ядра свертки оценка изображения будет производиться локально, что позволит более точно передать степень контраста.

*Алгоритм оценки глобального контраста на основе гистограммы*

Алгоритм оценки контраста на основе гистограммы требует значительно меньше вычислительных ресурсов и времени в силу меньшего количества производимых операций над изображением. Однако данный метод позволяет оценить контраст глобально, не учитывая локальные особенности изображения.

О контрасте изображения можно судить по гистограмме распределения яркости изображения [5]. Анализируя гистограммы, можно сделать вывод, что у более контрастного изображения количество темных и светлых пикселей должно быть приблизительно равным, а основное место сосредоточения пикселей – возле границ диапазона. Гистограмма нормализованного изображения занимает широкий диапазон яркостей.

В работе представлены три метода оценки глобального контраста: RMS-контраст, энтропийный контраст и контраст по диапазону.

**RMS-контраст.** При оценке контрастности целого изображения методом RMS можно рассчитать среднеквадратичное отклонение по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{255} (i - l_{avg})^2 h_i}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – среднееквадратичное отклонение;  $NM$  – размер оцениваемого изображения в пикселях;  $i$  – значение интенсивности пикселя в диапазоне  $[0, 255]$ ;  $l_{avg}$  – среднее значение интенсивности всех пикселей изображения;  $h_i$  – значение, отражающее количество пикселей изображения интенсивности  $i$ .

Полученное значение может находиться в промежутке от нуля в случае полностью однородного изображения и достигать предела 255 в случае распределения яркостей пикселя по максимальному диапазону [5]. Чем контрастнее будет изображение, тем выше будет значение  $\sigma$  при расчете.

**Энтропийный контраст.** Энтропийный контраст – это мера разнообразия яркости изображения. Он оценивает, насколько широко распределены интенсивности яркости по изображению. В его основе лежит концепция энтропии в теории информации, которая определяет степень неопределенности или хаотичности в данных [6].

Данный метод рассчитывается по формуле

$$C = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log(p_i), \quad (2)$$

где  $C$  – энтропийный контраст;  $p_i = \frac{n_i}{NM}$  – вероятность появления уровня яркости  $i$ ;  $h_i$  – значение, отражающее количество пикселей изображения интенсивности  $i$ .

Если все пиксели изображения имеют одинаковую яркость, то есть изображение однородное, то энтропия будет равна нулю, потому что в изображении нет разнообразия – оно полностью предсказуемо. Если же яркость на изображении разная, то это делает изображение менее предсказуемым, и, следовательно, энтропия увеличивается.

Энтропийный контраст учитывает вероятности появления каждого уровня яркости и вычисляется по гистограмме, которая показывает, сколько пикселей имеют конкретные значения яркости.

Низкий энтропийный контраст будет занимать значения от 0 до 2 и будет получаться в случае, если изображение однородное и содержит мало деталей (например, изображение, состоящее из нескольких близких по яркости оттенков). Высокий энтропийный контраст будет иметь значения от 5 до 8, если изображение имеет множество деталей и резкие изменения яркости, что указывает на высокое разнообразие.

**Контраст по диапазону.** Данный метод определения контраста оценивает разницу между максимальной и минимальной яркостью с учетом их частот в гистограмме. Контраст по диапазону – это мера, основанная на разнице между самой яркой и самой темной областями изображения [7]. Он показывает, насколько сильно отличаются максимальные и минимальные уровни яркости на изображении.

Контраст по диапазону также учитывает, сколько пикселей имеет минимальные и максимальные значения яркости, что делает его чувствительным к экстремальным значениям яркости. Если в изображении много очень темных и очень светлых пикселей, оно будет иметь высокий контраст по диапазону:

$$C = (I_{\max} - I_{\min})(n_{\max} + n_{\min}), \quad (3)$$

где  $C$  – контраст по диапазону;  $I_{\max}$  – максимальная интенсивность яркости;  $I_{\min}$  – минимальная интенсивность яркости;  $n_{\max}$  – количество пикселей с максимальной интенсивностью;  $n_{\min}$  – количество пикселей с минимальной интенсивностью.

Сравнительный анализ методов оценки контраста изображений

Контраст по диапазону фокусируется на крайних значениях яркости и показывает, насколько сильно изображение варьируется между светлыми и темными областями. Высокий контраст по диапазону говорит о наличии резко выраженных ярких и темных объектов. Полученное значение будет находиться в промежутке от 0 до 255 в случае работы с 8-битным изображением. Значение, близкое к нулю, будет означать слабый контраст изображения, в то время как значение, близкое к 255, – высокий контраст.

Оценка контраста для трех изображений на Рисунке 1 представлена в Таблице 1 по каждому из трех методов.

Изображение на Рисунке 1 а содержит текстуры и переходы между светлыми и темными областями и практически не содержит резких изменений яркости. Изображение на Рисунке 1 б содержит множество мелких деталей, текстур и резких переходов между уровнями яркости, что делает изображение контрастным. Изображение на Рисунке 1 в имеет мало деталей и переходов между уровнями яркости, кроме яркого шара на фоне неба.



**Рисунок 1.** Оригинальные изображения: а – поле; б – комната; в – шар

Источник: а) <https://goo.su/RfOiE5>, б) <https://goo.su/tePCeDO>, в) <https://clck.ru/3DaNGa>

Ниже представлена сравнительная Таблица 1, отражающая оценку яркости и контраста изображений по трем методам глобальной оценки контраста (формулы 1, 2, 3).

Таблица 1

**Сравнительная характеристика оценки контраста для оригинальных изображений**

Метод оценки	Рисунок 1 а	Рисунок 1 б	Рисунок 1 в
RMS-контраст	34,20	77,54	11,39
Энтропийный контраст	7,76	7,96	4,8
Контраст по диапазону	216	255	223

Источник: здесь и далее таблицы выполнены авторами.

Чтобы оценить влияние шума на методы определения контраста, к исходным изображениям были добавлены шумовые искажения, используя онлайн-сервис Anytools<sup>1</sup>. Результаты представлены на Рисунке 2, где показаны зашумленные версии изображений.

<sup>1</sup> Пакетная обработка фото // Anytools.pro. URL: <https://anytools.pro/ru/img/editor/noise> (дата обращения: 14.09.2024).



**Рисунок 2.** Зашумленные изображения: *a* – поле; *б* – комната; *в* – шар

Источник: Anytools.pro. URL: <https://anytools.pro/ru/img/editor/noise> (дата обращения: 14.09.2024).

Добавление шума привело к появлению случайных вариаций яркости и цветовых артефактов, что существенно изменило визуальное восприятие изображений. Шумовые пиксели создают резкие переходы между соседними областями, увеличивая количество локальных изменений яркости.

В Таблице 2 представлены результаты оценки контраста для зашумленных изображений по каждому из трех методов глобальной оценки контраста.

Таблица 2

**Сравнительная характеристика для зашумленных изображений**

Метод оценки	Рисунок 2 а	Рисунок 2 б	Рисунок 2 в
RMS-контраст	76,43	82,83	73,85
Энтропийный контраст	7,83	7,96	7,98
Контраст по диапазону	255	255	255

Оценка по RMS-контрасту значительно увеличилась для всех изображений после добавления шума, что указывает на резкое увеличение вариаций в яркости. Энтропийный контраст также увеличился, особенно для простых изображений, так как шум добавляет хаотичность и разнообразие. Контраст по диапазону достиг максимального значения для всех изображений, поскольку шум создает большие скачки яркости – от минимальных до максимальных значений.

Полученные значения говорят о том, что глобальная оценка контраста данными методами не устойчива к шумовым артефактам и может давать ложные результаты в ряде ситуаций появления артефактов на изображениях.

**Методы оценки контраста с использованием свертки.** Методы оценки контраста с использованием свертки основаны на применении фильтров для анализа локальных изменений яркости в изображении. Данные методы позволяют выявить детали и границы объектов, что важно для точной оценки контраста в локальных областях. В данной работе рассмотрены методы вычисления контрастности изображения, включая контраст Вебера [8], локальное стандартное отклонение [9], а также контрасты, основанные на операторах Собеля [10], Прюитта [11], Лапласа [12] и Робертса [13].

В Таблице 3 представлен обзор операторов свертки.

**Обзор операторов свертки**

Название	Особенность	Ядра свертки
Контраст Вебера	Оценивает разницу между объектом и его фоном, нормализованную по яркости фона	$C = \frac{I - I_{bg}}{I_{bg}},$ <p>где <math>I</math> – интенсивность пикселя;  <math>I_{bg}</math> – средняя интенсивность фона</p>
Локальное отклонение	Мера вариаций яркости в локальной области изображения	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (I - I_{avg})^2},$ <p>где <math>I</math> – интенсивность яркости каждого пикселя;  <math>I_{avg}</math> – средняя яркость в локальной области;  <math>N</math> – количество пикселей</p>
Методы, основанные на операторах: Собеля	Методы используются для обнаружения основных контуров и форм.  Метод Собеля более чувствителен к шуму, но лучше определяет направление градиента. Данный метод подходит для выявления четких контуров и границ в изображениях с выраженными деталями.	$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Прюитта	Метод Прюитта проще в вычислении, менее чувствителен к мелким деталям, так как использует более простые маски	$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $G_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
Лапласа	Методы используются для выделения тонких деталей и точных границ. Метод Лапласа выявляет места резкого изменения яркости без учета направления, что может приводить к появлению ложных границ в изображениях с шумом, так как метод чувствителен к нему, как и метод Робертса.	$G = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$ <p>Для оценки изменения яркости используется одно сверточное ядро</p>
Робертса	Метод предназначен для вычисления градиента яркости по диагональным направлениям. Использует маленькие 2x2 ядра и чувствителен к шуму	$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ $G_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$

Для дальнейших вычислений в методах, связанных с ядром Собеля, Робертсона, Привьюта или Лапласа, используются два ядра [14]:  $G_x$  – ядро для выделения горизонтальных изменений,  $G_y$  – ядро для выделения вертикальных изменений. В зависимости от фильтра используются свои ядра, после чего считается модуль градиента  $G$  по формуле

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (4)$$

В Таблице 4 представлены оценочные значения контраста для оригинальных изображений.

Таблица 4

**Сравнительная характеристика оценки контраста для оригинальных изображений с использованием свёрточных операторов**

Контрастность	Рисунок 1 а	Рисунок 1 б	Рисунок 1 в
Контраст Вебера	0,65	0,96	1,10
Локальное стандартное отклонение	34,20	77,54	11,39
Собель	30,74	110,13	11,61
Привьют	12,59	40,88	4,60
Лаплас	12,89	35,29	3,96
Робертс	4,91	15,85	1,76

В Таблице 5 представлены оценочные значения контраста для изображений с добавлением шума.

Таблица 5

**Сравнительная характеристика оценки контраста для зашумленных изображений с использованием свёрточных операторов**

Контрастность	Рисунок 2 а	Рисунок 2 б	Рисунок 2 в
Контраст Вебера	0,88	0,97	1,11
Локальное стандартное отклонение	76,43	82,83	73,85
Собель	307,19	237,35	320,94
Привьют	113,70	90,40	117,10
Лаплас	267,04	176,02	275,35
Робертс	63,66	45,17	66,35

Каждый шумовой пиксель создает резкое изменение яркости между соседними пикселями. Методы, основанные на операторах Собеля, Прюитта, Лапласа, Робертса, а также на локальном стандартном отклонении, чувствительны к таким изменениям. Шум увеличивает общую оценку контраста, поскольку эти методы реагируют на любые изменения яркости, включая шумовые артефакты [15]. Добавление шума значительно увеличило локальные контрастные меры, такие как Собель, Привьют, Робертсон и Лаплас, особенно для изображений, которые изначально имели меньшие градиенты и резкие переходы. Шум усилил локальные вариации яркости и создал множество искусственных контрастных областей, что увеличило все показатели контраста.

В свою очередь, контраст Вебера показывает умеренный контраст в оригинальных изображениях. Шум увеличил значения, но незначительно. Контраст Вебера после шума указывает на то, что относительная разница между объектом и фоном возросла, но не кардинально.

Проведенный анализ методов оценки контраста показал, что разные подходы могут давать разные результаты в зависимости от характера изображения. Методы глобальной оценки контраста, такие как RMS-контраст, энтропийный контраст и контраст по диапазону, хорошо справляются с оценкой контраста для изображений с четкими переходами и высокими градиентами яркости. Однако они менее устойчивы к шуму, что проявляется в значительном увеличении значений контраста после добавления шума, что может привести к некорректным результатам.

Локальные методы, такие как контраст Вебера, контраст Собеля, Привьюта, Робертсона и Лапласа, более чувствительны к изменениям яркости на уровне локальных деталей и хорошо подходят для анализа изображений с множеством границ и текстур. Однако добавление шума также может увеличивать локальные контрастные меры, что создает дополнительные артефакты и может привести к завышенным оценкам.

Для изображений с шумом лучше использовать методы, менее подверженные влиянию шумовых артефактов, такие как контраст Вебера, который показал себя наиболее устойчивым. Локальные методы подходят для выявления мелких деталей и границ, но требуют дополнительной обработки для борьбы с шумом.

#### Литература

1. Голуб Ю.И., Старовойтов Ф.В. Исследование локальных оценок контраста цифровых изображений при отсутствии эталона // Системный анализ и прикладная информатика. 2019. № 2. С. 4–11. EDN NDHOWC.
2. Беззубик В.В., Белащенко Н.Р., Никифоров В.О. Метод количественной оценки контраста цифрового изображения // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 6 (70). С. 86–88. EDN MWPLIB.
3. Небаба С.Г. Методы оценки и подготовки изображений в видеопотоке к распознаванию объектов // GraphiCon 2018 : Труды 28-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению. Томск, 24–27 сентября 2018 г. / Нац. исслед. Том. политех. ун-т. Томск, 2018. С. 450–453. URL: <https://www.graphicon.ru/html/2018/papers/450-453.pdf?ysclid=m1iamv6puw240563682> (дата обращения: 14.09.2024).
4. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. Сравнение объективных методов оценки качества цифровых изображений // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 6. С. 17. EDN TYZENT. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/15/text.html> (дата обращения: 14.09.2024).
5. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Пер. с англ. В.В. Чепыжова. М. : Техносфера, 2006. 616 с. ISBN 5-94836-092-X.
6. Dash L., Chatterji B.N. Adaptive contrast enhancement and de-enhancement // Pattern Recognition. 1992. Vol. 24. No. 4. P. 289–302. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(91\)90072-D](https://doi.org/10.1016/0031-3203(91)90072-D)
7. Wang Z., Bovik A.C. A Universal Image Quality Index // IEEE Signal Processing Letters. 2002. Vol. 9. No. 3. P. 81–84. DOI: 10.1109/97.995823 2002
8. Peli E. Contrast in complex images // Journal of the Optical Society of America A. 1990. Vol. 7. No. 10. P. 2032–2040. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.7.002032>



9. Cheng H.D., Shi X.J. A simple and effective histogram equalization approach to image enhancement // *Digital Signal Processing*. 2004. Vol. 14. No. 2. P. 158–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2003.07.002>
10. Kanopoulos N., Vasanthavada N., Baker R.L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1988. Vol. 23. No. 2. P. 358–367. DOI: 10.1109/4.996
11. Maini R., Aggarwal H. Study and comparison of various image edge detection techniques // *International Journal of Image Processing (IJIP)*. 2009. Vol. 3. No. 1. P. 1–11. URL: [https://www.academia.edu/3345358/Study\\_and\\_comparison\\_of\\_various\\_image\\_edge\\_detection\\_techniques](https://www.academia.edu/3345358/Study_and_comparison_of_various_image_edge_detection_techniques) (дата обращения: 14.09.2024).
12. Marr D., Hildreth E. Theory of edge detection // *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*. 1980. Vol. 207. No. 1167. P. 187–217. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.1980.0020>
13. Canny J. A computational approach to edge detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. PAMI-8. No. 6. P. 679–693. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851
14. Сизиков В.С., Довгань А.Н., Лавров А.В., Манойлов В.В. Устойчивые методы математико-компьютерной обработки изображений и спектров. СПб. : Национальный исследовательский университет «ИТМО», 2022. 72 с. EDN YGCSLH.
15. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2000. 168 с. EDN FTGCGYB.

### References

1. Golub Yu.I., Starovoitov F.V. (2019) Study of local assessments of contrast for digital images. *System Analysis and Applied Information Science*. No. 2. Pp. 4–11. (In Russian).
2. Bezzubik V.V., Belashenkov N.R., Nikiforov V.O. (2010) Method for quantitative assessment of digital image contrast. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. No. 6 (70). Pp. 86–88. (In Russian).
3. Nebaba S.G. (2018) Methods of evaluation and preparation of images in the video stream for object recognition. In: *GraphiCon 2018 : Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Conference on Computer Graphics and Vision*. Tomsk, September 24–27, 2018. Tomsk : National Research Tomsk Polytechnic University. Pp. 450–453. URL: <https://www.graphicon.ru/html/2018/papers/450-453.pdf?ysclid=m1iamv6puw240563682> (accessed 14.09.2024). (In Russian).
4. Kokoshkin A.V., Korotkov V.A., Korotkov K.V., Novichikhin E.P. (2015) Comparison of objective methods for assessing the quality of digital images. *Journal of Radio Electronics*. No. 6. Pp. 17. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/15/text.html> (accessed 14.09.2024). (In Russian).
5. Gonzalez R., Woods R., Eddins S.L. (2004) *Digital Image Processing in MATLAB*. Pearson Prentice Hall. 609 p. ISBN 0130085197. (Russian edition: transl. by V.V. Chepyzhov. Moscow : Tekhnosfera Publ. 2006. 616 p.).
6. Dash L., Chatterji B.N. (1992) Adaptive contrast enhancement and de-enhancement // *Pattern Recognition*. Vol. 24. No. 4. Pp. 289–302. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(91\)90072-D](https://doi.org/10.1016/0031-3203(91)90072-D)
7. Wang Z., Bovik A.C. (2002) A Universal Image Quality Index. In: *IEEE Signal Processing Letters*. Vol. 9. No. 3. Pp. 81–84. DOI: 10.1109/97.995823 2002
8. Peli E. (1990) Contrast in complex images. *Journal of the Optical Society of America A*. Vol. 7. No. 10. Pp. 2032–2040. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.7.002032>

9. Cheng H.D., Shi X.J. (2004) A simple and effective histogram equalization approach to image enhancement. *Digital Signal Processing*. Vol. 14. No. 2. Pp. 158–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2003.07.002>
10. Kanopoulos N., Vasanthavada N., Baker R.L. (1988) Design of an image edge detection filter using the Sobel operator. In: *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 23. No. 2. Pp. 358–367. DOI: 10.1109/4.996
11. Maini R., Aggarwal H. (2009) Study and comparison of various image edge detection techniques. *International Journal of Image Processing (IJIP)*. Vol. 3. No. 1. Pp. 1–11. URL: [https://www.academia.edu/3345358/Study\\_and\\_comparison\\_of\\_various\\_image\\_edge\\_detection\\_techniques](https://www.academia.edu/3345358/Study_and_comparison_of_various_image_edge_detection_techniques) (accessed 14.09.2024).
12. Marr D., Hildreth E. (1980) Theory of edge detection. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*. Vol. 207. No. 1167. Pp. 187–217. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.1980.0020>
13. Canny J. (1986) A computational approach to edge detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. PAMI-8. No. 6. Pp. 679–693. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851
14. Sizikov V.S., Dovgan' A.N., Lavrov A.V., Manoilov V.V. (2022) *Ustoichivye metody matematiko-komp'yuternoї obrabotki izobrazhenii i spektrov* [Stable methods of mathematical computer processing of images and spectra]. St. Petersburg : National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (University ITMO) Publ. 72 p. (In Russian).
15. Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I., Spektor A.A. (2000) *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v informatsionnykh sistemakh* [Digital image processing in information systems]. Novosibirsk : Novosibirsk State Technical University Publ. 168 p.