

### Анализ структурного сходства в оценке качества изображений

А.Н. Земцов, М.А. Кузнецов, Гайс Мохаммед Салех Аль-Мерри

Волгоградский государственный технический университет,  
400005, г. Волгоград, пр. имени В.И. Ленина, 28, Россия

**Резюме. Цель.** Цель работы состоит в исследовании недостатков распространенных в настоящее время объективных математических критериев, основанных на принципе измерения вносимой ошибки, а также демонстрации преимуществ критериев, учитывающих особенности зрительной системы человека. **Метод.** Исследование основано на моделировании внесения искажений импульсным шумом. Полученное качество изображения оценивается с применением вышеуказанных метрик. Метрики оценки качества должны хорошо согласовываться с результатами субъективных оценок для широкого класса изображений, не требуя при этом чересчур сложных вычислений; имели простую аналитическую форму и их можно было бы применять в качестве критериев оптимальности при оптимизации или выборе параметров систем обработки изображений, в том числе, систем машинного обучения. **Результат.** Результаты экспериментов показывают слабую сторону традиционных подходов к оценке качества изображения, основанных на использовании математических мер, оценивающих вносимую алгоритмом обработки ошибку. **Вывод.** Метрики представляют собой распространенные в настоящее время объективные критерии, с помощью которых можно измерить отклонения, но они плохо коррелируют с субъективными показателями качества. Метрики, учитывающие особенности зрительной системы человека, позволяют оценивать качество изображения как измерение структурных искажений, а не вносимых ошибок. Проведенные нами эксперименты позволили показать, что улучшенная метрика имеет не линейную, а показательную зависимость от вероятности искажения значения пикселя, значительно лучше коррелирует с субъективным визуальным восприятием качества изображения, подвергнутого обработке, чем среднеквадратическое отклонение.

**Ключевые слова:** среднеквадратическое отклонение, индекс структурного сходства, оценка качества изображений, зрительная система, кодирование изображений

**Для цитирования:** А.Н. Земцов, М.А. Кузнецов, Гайс Мохаммед Салех Аль-Мерри. Анализ структурного сходства в оценке качества изображений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):83-90. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-83-90.

**Analysis of Structural Similarity for Image Quality Assessment**  
A.N. Zemtsov, M.A. Kuznetsov, Ghaith Mohammed Saleh Al-Merri  
Volgograd State Technical University,  
28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the work is to study the shortcomings of currently widespread objective mathematical criteria based on the principle of measuring the introduced error, as well as to demonstrate the advantages of criteria that take into account the features of the human visual system. **Method.** The study is based on modeling the introduction of distortions by impulse noise. The resulting image quality is assessed using the above metrics. Quality assessment metrics should be consistent with subjective assessment results for a wide range of images without requiring complex computations; they should have a simple analytical form and be applicable as optimality criteria for optimizing or selecting parameters for image processing systems, including machine learning systems. **Result.** The experimental results show the weakness of traditional approaches to image quality assessment based on the use of mathematical measures that assess the

error introduced by the processing algorithm. **Conclusion.** These metrics are currently widespread objective criteria that can be used to measure deviations, but they correlate poorly with subjective quality indicators. Metrics that take into account the peculiarities of the human visual system allow us to evaluate image quality as a measurement of structural distortions, rather than introduced errors. Our experiments have shown that the improved metric has a non-linear but exponential dependence on the probability of pixel value distortion, and correlates much better with the subjective visual perception of the quality of the image that has been processed than the standard deviation.

**Keywords:** mean squared error, structural similarity, image quality assessment, human visual system, image coding

**For citation:** A.N. Zemtsov, M.A. Kuznetsov, Ghaith Mohammed Saleh Al-Merri. Analysis of Structural Similarity in Image Quality Assessment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):83-90. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-83-90.

**Введение.** В современных телекоммуникационных и вычислительных системах на различных этапах их функционирования, в изображения вносятся множество искажений различного рода. Требования к характеристикам изображений постоянно растут, в результате чего необходимость хранения и передачи огромных объемов данных требует использования различных алгоритмов кодирования изображений во многих областях, от медицины [1] до аэрокосмической промышленности [2]. С увеличением частоты и многообразия кибератак возникла острая необходимость в обеспечении защиты графической информации, как криптографической, так и стеганографической [3, 4], а также скремблирования [5, 6].

В последние годы было разработано много эффективных методов кодирования [7, 8] и защиты изображений со значительно отличающимися характеристиками, в том числе, для операций с потерями качества. Оценка методов без внесения искажений обычно является простой и понятной задачей, где используется ряд стандартных критериев, таких как коэффициент сжатия, время обработки и т.д.

Метрики оценки искажений должны хорошо согласовываться с результатами субъективных оценок для широкого спектра изображений, не обладая при этом большой вычислительной сложностью. Кроме того, желательно, чтобы используемые метрики оценки искажений имели простую аналитическую форму и их можно было бы применять в качестве критериев оптимальности при оптимизации или выборе параметров систем обработки изображений, в том числе, для машинного обучения [9].

Основной проблемой при оценке методов кодирования и защиты изображений, вносящих изменения в изображение, является чрезвычайная сложность описания типа и степени деградации в реконструируемых изображениях, которые описываются с использованием эталонного изображения, в качестве которого, обычно, выбирается исходное.

В силу особенностей человеческой зрительной системы понятие качества изображения и его показатели носят субъективный характер, что обуславливает интерес к разработке количественных метрик, которые можно было бы использовать для оценки вносимых алгоритмом обработки искажений [10]. Существует достаточно большой набор таких метрик: максимальное отклонение, среднее отклонение, взаимнокорреляционная функция, коэффициент битовых ошибок, среднеквадратическое отклонение, пиковое отношение сигнала к шуму, и другие. Эти метрики представляют собой распространенные объективные критерии, с помощью которых можно измерить отклонения от идеальных или совершенных моделей, но они плохо коррелируют с субъективными показателями качества. Как следствие, в последние годы основное внимание уделяется более глубокому анализу зрительной системы человека. Зрительная система человека слишком сложна для полного понимания, но учет даже упрощенной модели в объективных показателях приводит к лучшей корреляции с оценками экспертов.

**Постановка задачи.** Метод оценки качества изображения используется для измерения степени деградации реконструируемого изображения по отношению к его исходной версии. Субъективная оценка характеризуется трудоемкостью, большими временными, и, соответственно, финансовыми затратами при реализации. Под цифровым изображением будем понимать некоторое дискретное поле  $f_{ij}$ , или матрицу значений размером  $m \times n$ .

$$f_{ij} = f(x_i, y_j)$$

Таким образом, исходное изображение – матрица фиксированных значений  $f(x, y)$  взятых в фиксированных точках  $(x_i, y_j)$ , т.е.  $f(x_i, y_j)$  – значение пикселей исходного изображения, взятого в качестве эталона, а  $\hat{f}(x_i, y_j)$  – изображения, полученного в результате обработки исходного.

Объективные метрики оценки качества изображения, такие как среднеквадратическое отклонение и пиковое отношение сигнала к шуму, просты в использовании, понятны в физическом смысле, и удобны для математической реализации на этапах, связанных с оптимизацией. Для оценки изменений можно использовать среднеквадратическое отклонение [12]:

$$\text{СКО} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |f(x_i, y_j) - \hat{f}(x_i, y_j)|^2$$

Среднеквадратическое отклонение является наиболее популярной метрикой для решения многих задач, в том числе, задач машинного обучения. Большее значение среднеквадратического отклонения соответствует большей степени деградации изображения в результате обработки.

В ряде случаев, подобные математические метрики не очень хорошо коррелируют с субъективным визуальным восприятием качества изображения, подвергнувшегося обработке. В связи с этим необходимо провести исследование чувствительности метрик среднеквадратического отклонения и индекса структурного сходства к вносимым искажениям и корреляции метрик с субъективным визуальным восприятием качества изображения.

**Методы исследования.** Основная идея индекса структурного сходства основывается на восприятии – предположении, что человеческая зрительная система в значительной степени соответствует принципу структурной похожести [13]. В соответствии с этим принципом деградация изображения, получаемого в результате обработки, рассматривается как изменение восприятия структуры изображения, а также его яркости и контрастности. Структурная информация определяется исходя из принципа пространственной локальности, т.е. располагающиеся поблизости и сильно связанные друг с другом. Индекс структурного сходства также относится к полным эталонным метрикам.

Итоговое значение метрики индекса структурного сходства представляет собой функцию яркости, контрастности и структурной похожести:

$$\text{ИСС}(x, y) = f(\varphi_{\text{я}}(x, y), \varphi_{\text{к}}(x, y), \varphi_{\text{с}}(x, y))$$

где  $\varphi_{\text{я}}(x, y)$  – показатель сравнения яркости (интенсивности) двух изображений,  $\varphi_{\text{к}}(x, y)$  – показатель сравнения контрастности, т.е. самой яркой и самой темной областями двух изображений,  $\varphi_{\text{с}}(x, y)$  – показатель структурного сходства локальных шаблонов яркости двух изображений для нахождения сходства и различия между ними.

Показатель яркости изображения получается произведением освещенности и отражательной способности, но показатели структурного сходства объектов на изображении не зависят от освещенности. Контрастность и структурная информация с точки зрения зрительной системы человека могут быть более важными, чем яркость.

Функции сравнения яркости контрастности структурного сходства могут быть записаны так:

$$\varphi_{\text{я}}(x, y) = \frac{2 \cdot \mu_f \cdot \mu_{\hat{f}} + C_1}{\mu_f^2 + \mu_{\hat{f}}^2 + C_1}$$

$$\varphi_k(x, y) = \frac{2 \cdot \sigma_f \cdot \sigma_{\hat{f}} + C_2}{\sigma_f^2 + \sigma_{\hat{f}}^2 + C_2}$$

$$\varphi_c(x, y) = \frac{\sigma_f \hat{f} + C_3}{\sigma_f \cdot \sigma_{\hat{f}} + C_3}$$

Здесь  $\mu_f$  и  $\mu_{\hat{f}}$  – значения средней яркости,  $\sigma_f$  и  $\sigma_{\hat{f}}$  – значения контрастности изображений  $f(x_i, y_j)$  и  $\hat{f}(x_i, y_j)$ .

Тогда итоговое значение метрики индекса структурного сходства запишется в виде:

$$\text{ИСС}(x, y) = \frac{(2 \cdot \mu_f \cdot \mu_{\hat{f}} + C_1) \cdot (2 \cdot \sigma_f \hat{f} + C_2)}{(\mu_f^2 + \mu_{\hat{f}}^2 + C_1) \cdot (\sigma_f^2 + \sigma_{\hat{f}}^2 + C_2)}$$

**Обсуждение результатов.** Изображения обычно искажаются на этапах их получения и передачи. Во многих задачах требуется обеспечить управляемый уровень искажений [14]. Существующие метрики качества изображения можно разделить на две категории: субъективные и объективные. Среднеквадратическое отклонение является наиболее популярной объективной метрикой для решения широкого спектра задач, таких как сжатие изображений [15], стеганография [16], машинное обучение [17, 18], и др. Во многих подобных задачах используемый алгоритм изменяет изображение. Так, например, целью сжатия изображений с потерями является эффективное хранение данных изображения путем снижения избыточности содержимого изображения, которая достигается отбрасыванием маловажной информации при сохранении требуемого уровня качества изображения [19].

Таким образом, требуется найти компромисс, который в примере с сжатием изображений с потерями заключается в соответствии количества бит, необходимых для представления изображения качеству полученного в результате сжатия изображения [20, 21].

К сожалению, близость между сжатым и исходным изображениями не является только объективной мерой, поскольку человеческое восприятие также играет важную роль в определении качества сжатого изображения. В связи с этим необходимо провести исследование с целью выявить недостатки математических мер оценки качества искаженных изображений.

Одним из наиболее частых результатов воздействия внешней среды на получаемое или передаваемое по каналам связи изображение, оказывающих существенное негативное влияние на качество изображения, является импульсный шум.

Импульсный шум для изображения с динамическим диапазоном  $[n_{min}, n_{max}]$  определим следующим выражением:

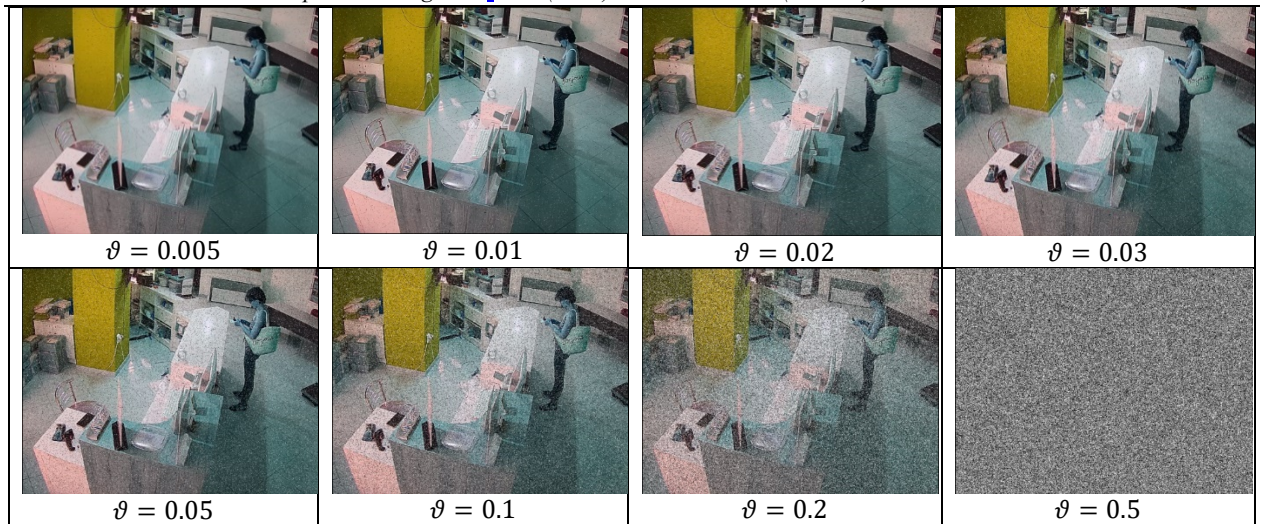
$$\hat{f}(x_i, y_j) = \begin{cases} f(x_i, y_j), & 1 - \vartheta, \\ \eta(x_i, y_j), & \vartheta, \end{cases}$$

где  $\vartheta$  – вероятность искажения значения пикселя  $(x_i, y_j)$ ,  $\eta(x_i, y_j)$  – искаженное значение пикселя  $(x_i, y_j)$ ,  $\eta(x_i, y_j) \in \{n_{min}, n_{max}\}$ . По умолчанию будем считать, что  $n_{min} = 0, n_{max} = 255$ .

Моделирование внесения искажений проводилось в общей сложности для 134 эталонных изображений в формате JPEG, включая 27 изображений в формате JPEG2000 [22].

Для проведения анализа на основе исходного изображения размером  $512 \times 512$  были сгенерированы изображения с импульсным шумом, некоторые из которых показаны на рис. 1.

Будем сравнивать эффективность оценки улучшенной метрики с математической метрикой, основанной на традиционном подходе к оценке качества изображения. Основная причина повышения эффективности при использовании улучшенной метрики заключается в том, что она обеспечивает в интегральном критерии оценку контраста и структурной информации в большей степени, чем яркости, что позволяет учесть важные особенности искаженного изображения и зрительной системы человека.

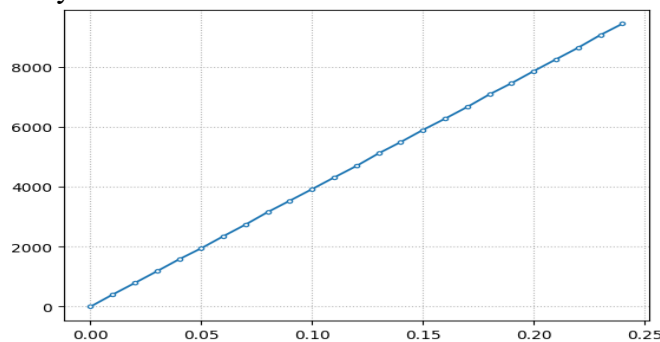


**Рис. 1 – Зашумленные изображения, используемые в эксперименте**

**Fig. 1 – Noisy images used in the experiment**

На первом этапе оценим эффективность метрики, основанной на традиционном подходе к оценке качества изображения.

Для этого будем последовательно увеличивать значения  $\vartheta$  и фиксировать вычисленные значения математической метрики. Вычисленные значения среднеквадратического отклонения для линейно увеличиваемых значений  $\vartheta$  с шагом 0.01 показаны на рис. 2.



**Рис. 2 – Зависимость среднеквадратического отклонения от  $\vartheta$**

**Fig. 2 – Dependence of mean squared error on  $\vartheta$**

На графике (рис. 2) видно, что при отсутствии искажений в результирующем изображении среднеквадратическое отклонение равно нулю. С линейным увеличением значений  $\vartheta$  линейно возрастает и среднеквадратическое отклонение.

Таким образом, среднеквадратическое отклонение не коррелирует с субъективным визуальным восприятием качества изображения. Это можно объяснить тем, что среднеквадратическое отклонение вычисляется путем сложения квадратичной разницы отдельных пикселей без учета связи между соседними пикселями.

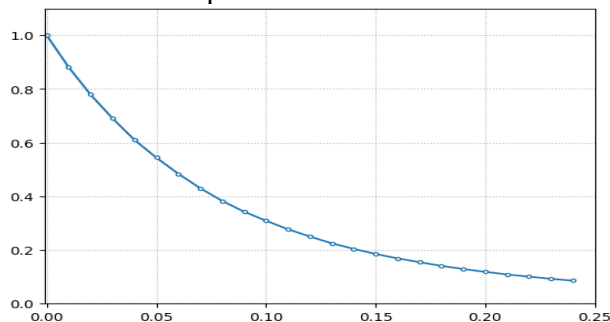
Большинство оценок визуального качества используют шкалы оценок для измерения воспринимаемого качества изображения. В таких случаях необходима экспертная помощь в установлении шкал качества и сравнении сжатых изображений и набора обучающих изображений. С помощью такого подхода сложно получить объективные и количественные показатели, т.к. полученные результаты субъективны и имеют качественный характер.

Зрительная система человека является конечным получателем информации от систем обработки изображений, поэтому наиболее правильным методом количественной оценки качества изображения может представляться субъективная оценка. Однако на практике субъективная оценка требует организации пула наблюдателей для маркировки искаженных изображений, что является трудоёмким, сложно организуемым и дорогостоящим процессом.

На втором этапе оценим эффективность улучшенной метрики, основанной на подходе к оценке структурной схожести. Для вычисления улучшенной метрики изображение

разбивается на неперекрывающиеся блоки  $8 \times 8$ , для которых вычисляются значения средней яркости и контрастности.

Вычисленные значения индекса структурного сходства для линейно увеличиваемых значений  $\vartheta$  с шагом 0.01 показаны на рис. 3.



**Рис. 3 – Зависимость индекса структурного сходства от  $\vartheta$**   
**Fig. 3 – Dependence of the structural similarity index on  $\vartheta$**

Видно, что отсутствию искажений в результирующем изображении значение индекса структурного сходства равно единице. С линейным увеличением значений  $\vartheta$  индекс структурного сходства убывает по показательному закону, и с разрушением изображения интенсивность изменений менее выражена.

Индекс структурного сходства значительно лучше коррелирует с субъективным визуальным восприятием качества изображения, подвергнутого обработке, чем среднеквадратическое отклонение. Это можно объяснить тем, что данная метрика основывается на предположении, что зрительная система человека в значительной степени адаптирована для извлечения структурной информации из поля зрения.

Общий вид зависимости корреляции от степени искажений исходного изображения одинаков: чем выше доля искажений  $\vartheta$  исходного изображения, тем меньше корреляция, и в большей степени эти искажения фиксируются каждой метрикой, но характер влияния идентичных искажений на метрики существенно отличается.

**Вывод.** Оценка вносимых алгоритмом обработки искажений играет очень важную роль в приложениях цифровой обработки изображений. В работе анализируются среднеквадратическое отклонение и индекс структурного сходства. Были проведены эксперименты по моделированию искажений импульсным шумом. Полученное качество изображения оценивается с применением вышеуказанных метрик.

Результаты показывают слабую сторону традиционных подходов к оценке качества изображения, основанных на использовании математических мер, оценивающих вносимую алгоритмом обработки ошибки. Эти метрики представляют собой распространенные в настоящее время объективные критерии, с помощью которых можно измерить отклонения, но они плохо коррелируют с субъективными показателями качества.

Как следствие, в последние годы основное внимание уделяется более глубокому анализу зрительной системы человека. Метрики, учитывающие особенности зрительной системы человека, позволяют оценивать качество изображения как измерение структурных искажений, а не вносимых ошибок.

Человеческий глаз очень чувствителен к изменению яркости или границам на изображении, а контраст и структура могут быть более важной информацией, чем яркость для зашумленного изображения.

Проведенные нами эксперименты позволили показать, что улучшенная метрика имеет не линейную, а показательную зависимость от вероятности искажения значения пикселя, значительно лучше коррелирует с субъективным визуальным восприятием качества изображения, подвергнутого обработке, чем среднеквадратическое отклонение.

#### Библиографический список:

1. Marias K. The Constantly Evolving Role of Medical Image Processing in Oncology: From Traditional Medical Image Processing to Imaging Biomarkers and Radiomics // Journal of Imaging, 2021. 7(8). 124.

2. Zhang J., Chen Z., Liu S. Remote Sensing Image Coding for Machines on Semantic Segmentation via Contrastive Learning // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024. vol. 62. pp. 1-13. 5645013.
3. Коржик В.И., Красов А.В. Цифровая стеганография: учебник. М.: ООО «КноРус». 2023. 324 с.
4. Земцов А.Н. Методы цифровой стеганографии для защиты авторских прав: монография. Saarbrücken: LAP Lambert, 2012. 148 с.
5. Бахрушина Г. И. Скремблирование цифровых изображений / Г.И. Бахрушина, Д.С. Синьков, А.П. Бахрушин // *Ученые заметки ТОГУ*, 2018. Т. 9, № 1. С. 636-645.
6. Земцов А.Н., Цыбанов В.Ю. Скремблирование цифровых изображений // *Инженерный вестник Дона*, 2020. № 6 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6503](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6503).
7. Иванов А.В. Методы, алгоритмы и устройства кодирования и декодирования изображений. Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 260 с.
8. Земцов А.Н. Представление изображений с помощью преобразования Ле Галла // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*, 2018. № 43. С. 42-48.
9. Park K., Chae M., Cho J.H. Image Pre-Processing Method of Machine Learning for Edge Detection with Image Signal Processor Enhancement // *Micromachines*, 2021. 12(1), 73.
10. Сычев А.С. Безэталонный интегрально-мультипликативный показатель качества цифровых полутоновых изображений/А.С. Сычев, И.С. Холопов // *Цифровая обработка сигналов*, 2018. № 3. С. 49-55.
11. Сай С.В. Метрика искажений мелких структур компрессированных изображений // *Компьютерная оптика*, 2018. Т. 42. № 5. С. 829-837.
12. Непараметрический алгоритм автоматической классификации многомерных статистических данных большого объема и его применение / И.В. Зеньков, А.В. Лапко, В.А. Лапко [и др.] // *Компьютерная оптика*, 2021. Т. 45. № 2. С. 253-260.
13. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity // *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004. 13(4). pp. 600-612.
14. Антоненко А.С. Оценка параметров QoS для бесперебойной работы IPTV // *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 2020. Т. 14. № 10. С. 33-38.
15. Земцов А.Н. Сравнительный анализ эффективности методов сжатия изображений на основе дискретного косинусного преобразования и фрактального кодирования//*Прикладная информатика*, 2011. № 4(34). С. 90-104.
16. Земцов А.Н. Защита от неправомерного использования графической информации в социальных сетях // *Современные наукоемкие технологии*, 2020. № 7. С. 51-56.
17. Jierula A., Wang S. Study on Accuracy Metrics for Evaluating the Predictions of Damage Locations in Deep Piles Using Artificial Neural Networks with Acoustic Emission Data // *Applied Sciences*, 2021. 11(5). 2314.
18. Schmid L., Roidl M., Kirchheim A. Comparing Statistical and Machine Learning Methods for Time Series Forecasting in Data-Driven Logistics – A Simulation Study // *Entropy*, 2025. 27(1). 25.
19. Гаврилов Д.А. Аппаратная реализация сжатия динамического диапазона цифровых изображений на ПЛИС Xilinx / Д.А. Гаврилов, А.В. Павлов, Д.Н. Щелкунов//*Журнал радиоэлектроники*, 2018. № 10. С. 16.
20. Старобинец Д.Ю. Автоматический выбор параметров сжатия изображений с потерями на основе инвариантных моментов при дистанционном зондировании Земли//*Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017. Т. 14. № 5. С. 26-36.
21. Земцов А.Н. Сравнительный анализ эффективности методов сжатия изображений на основе дискретного косинусного преобразования и фрактального кодирования//*Прикладная информатика*, 2011. № 5(35). С. 77-84.
22. ISO/IEC 15444-1 ITU-T Rec. T. 800, Information Technology – JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System, 2019. 196 p.

#### References:

1. Marias K. The Constantly Evolving Role of Medical Image Processing in Oncology: From Traditional Medical Image Processing to Imaging Biomarkers and Radiomics. *Journal of Imaging*, 2021;7(8):124. (In Russ)
2. Zhang J., Chen Z., Liu S. Remote Sensing Image Coding for Machines on Semantic Segmentation via Contrastive Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024;62:1-13. 5645013.
3. Korzhik V.I., Krasov A.V. Digital Steganography: A Textbook. Moscow: OOO KnoRus. 2023:324 p.
4. Zemtsov A.N. Digital Steganography Methods for Copyright Protection: A Monograph. Saarbrücken: LAP Lambert, 2012:148 p.
5. Bakhrushina G. I. Scrambling Digital Images /G.I. Bakhrushina, D.S. Sinkov, A.P. Bakhrushin. *Scientific Notes of TNU*, 2018;9(1):636-645. (In Russ)
6. Zemtsov A.N., Tsybanov V. Yu. Scrambling Digital Images. *Engineering Bulletin of the Don*, 2020;6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6503](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6503). (In Russ)
7. Ivanov A.V. Methods, Algorithms, and Devices for Coding and Decoding Images. St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019: 260 p. (In Russ)

8. Zemtsov A.N. Image representation using the Le Gall transform. *Bulletin of Tomsk State University. Management, Computing and Information Science*, 2018; 43: 42-48. (In Russ)
9. Park K., Chae M., Cho J.H. Image Pre-Processing Method of Machine Learning for Edge Detection with Image Signal Processor Enhancement. *Micromachines*, 2021;12(1):73.
10. Sychev A.S. Reference-free integral-multiplicative quality indicator of digital halftone images/A.S. Sychev, I.S. Kholopov. *Digital signal processing*, 2018;3:49-55 (In Russ)
11. Sai S.V. Metric of distortions of fine structures in compressed images. *Computer Optics*, 2018; 42(5):829-837.
12. Nonparametric algorithm for automatic classification of large-volume multivariate statistical data and its application /I.V. Zenkov, A.V. Lapko, V.A. Lapko [et al.] *Computer Optics*, 2021;45(2): 253-260. (In Russ)
13. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004;3(4):600-612.
14. Antonenko A.S. Assessing QoS Parameters for Uninterrupted IPTV Operation. *T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2020;14(10.):33-38. (In Russ)
15. Zemtsov A.N. Comparative Analysis of the Efficiency of Image Compression Methods Based on the Discrete Cosine Transform and Fractal Coding. *Applied Informatics*, 2011; 4(34): 90-104. (In Russ)
16. Zemtsov A.N. Protection against Unauthorized Use of Graphic Information in Social Networks. *Modern Science-Intensive Technologies*, 2020;7:51-56. (In Russ)
17. Jierula A., Wang S. Study on Accuracy Metrics for Evaluating the Predictions of Damage Locations in Deep Piles Using Artificial Neural Networks with Acoustic Emission Data. *Applied Sciences*, 2021;11(5). 2314.
18. Schmid L., Roidl M., Kirchheim A. Comparing Statistical and Machine Learning Methods for Time Series Forecasting in Data-Driven Logistics – A Simulation Study. *Entropy*, 2025;27(1). 25.
19. Gavrilov D.A. Hardware Implementation of Dynamic Range Compression of Digital Images on Xilinx FPGAs/D.A. Gavrilov, A.V. Pavlov, D.N. Shchelkunov. *Journal of Radio Electronics*, 2018;1016. (In Russ)
20. Starobinets D.Yu. Automatic selection of lossy image compression parameters based on invariant moments in Earth remote sensing. *Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space*, 2017;14(5): 26-36.
21. Zemtsov A.N. Comparative analysis of the efficiency of image compression methods based on discrete cosine transform and fractal coding. *Applied Informatics*, 2011;5(35):77-84. (In Russ)
22. ISO/IEC 15444-1 ITU-T Rec. T. 800, Information Technology – JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System, 2019:196 p. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Земцов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы»; [azemtsow@mail.ru](mailto:azemtsow@mail.ru); ORCID 0000-0001-6430-3615

Михаил Андреевич Кузнецов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы»; [35km@mail.ru](mailto:35km@mail.ru); ORCID 0000-0001-5044-1427

Гайс Мохаммед Салех Аль-Мерри, кандидат технических наук, доцент, кафедра "Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования"; [gaismr2009@mail.ru](mailto:gaismr2009@mail.ru); ORCID 0000-0002-9171-6535

#### Information about the authors:

Andrey N. Zemtsov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Electronic Computers and Systems, [azemtsow@mail.ru](mailto:azemtsow@mail.ru); ORCID 0000-0001-6430-3615

Mikhail A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Electronic Computers and Systems, [35km@mail.ru](mailto:35km@mail.ru); ORCID 0000-0001-5044-1427

Gais Mohammed Saleh Al-Merri, Lecturer, Department of Computer-Aided Design and Search Engineering Systems, [gaismr2009@mail.ru](mailto:gaismr2009@mail.ru); ORCID 0000-0002-9171-6535

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 24.08.2025.

Одобрена после рецензирования /Revised 17.09.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 20.10.2025.