

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.80>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ СЖАТИЯ И КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ЗАРАНЕЕ ЗАДАНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Научная статья

**Бастрычкин А.С.<sup>1,\*</sup>, Костров Б.В.<sup>2</sup>, Бабаев С.И.<sup>3</sup>, Гусев С.И.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0003-3723-0950;

<sup>2</sup> ORCID : 0009-0005-6557-5192;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-5829-8223;

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (a\_s\_bas[at]mail.ru)

### Аннотация

В статье рассматриваются подходы к сжатию изображений с использованием квазидвумерного спектрального представления, основанного на функциях Уолша.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью эффективной передачи изображений по каналам связи с ограниченными ресурсами, где допустимы определённые отклонения в качестве. Предложенные критерии сжатия направлены на достижение заранее заданной степени сжатия и качества восстановленных изображений.

Экспериментальная проверка подтверждает эффективность предложенных методов на наборе ландшафтных изображений, демонстрируя высокую предсказуемость результатов сжатия и качества восстановления. Полученные результаты могут быть применены в задачах обработки изображений в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

**Ключевые слова:** сжатие изображений, преобразование Уолша, квазидвумерный спектр, секвентный анализ.

## DETERMINING THE COMPRESSION RATE AND QUALITY OF RESTORED IMAGES BASED ON PREDEFINED PARAMETERS

Research article

**Bastrychkin A.S.<sup>1,\*</sup>, Kostrov B.V.<sup>2</sup>, Babaev S.I.<sup>3</sup>, Gusev S.I.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0003-3723-0950;

<sup>2</sup> ORCID : 0009-0005-6557-5192;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-5829-8223;

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russian Federation

\* Corresponding author (a\_s\_bas[at]mail.ru)

### Abstract

The article discusses approaches to image compression using a quasi-dimensional spectral representation based on Walsh functions.

The relevance of the research is due to the necessity of efficient transmission of images over communication channels with limited resources, where certain deviations in quality are acceptable. The proposed compression criteria are aimed at achieving a predetermined degree of compression and quality of reconstructed images.

Experimental validation confirms the effectiveness of the proposed methods on a set of landscape images, demonstrating high predictability of compression results and restoration quality. The obtained results can be applied to image processing tasks in conditions of limited computational resources.

**Keywords:** image compression, Walsh transform, quasi-dimensional spectrum, sequential analysis.

### Введение

В настоящее время задача передачи изображений по каналам связи является актуальной. При этом существуют классы задач, в которых точное сохранение визуальной составляющей не обязательно, допустимы некоторые отклонения от исходного качества, не влияющие на общее восприятие изображения. Однако в подобных задачах более весомы такие критерии как затраты времени работы и памяти вычислительных устройств на передачу изображения, нагрузка на канал связи, объём передаваемой информации.

Разработано множество методов сокращения информационной избыточности неподвижных изображений [1, С. 598-741], а также видеопотоков, большинство исследований в настоящее время сосредоточено на увеличении степени сжатия изображения или сохранении его качества [2], [3], однако при реализации этих методов могут использоваться такие подходы как:

- ортогональные преобразования, основанные на системах непрерывных функций (синусоидальных или вейвлет-функций), дающие характерные эффекты при обработке дискретных сигналов;
- вычисления с плавающей точкой, накладывающие дополнительные ограничения на архитектуру и аппаратные требования к вычислительным системам передачи изображений;
- методы энтропийного кодирования, эффективно реализующие сокращение избыточности данных, заранее подготовленных на предыдущих этапах, однако требующие создания, а также хранения или передачи дополнительной информации в виде словарей, без которых невозможно кодирование и декодирование данных.

Эти и другие подходы к разработке алгоритмов сжатия существенно усложняют процесс передачи изображений в системах с аппаратными и энергетическими ограничениями на передающее оборудование [4].

Авторам и были предложены алгоритмы сжатия и протоколы передачи данных, основанные на применении теории дискретных сигналов, определённых на конечных интервалах [5], [6], [7], которые лишены указанных недостатков и могут найти своё приложение в задачах передачи изображений с применением встраиваемых систем в условиях жестких ограничений на вычислительные возможности передающего оборудования.

Для известных и стандартизированных алгоритмов существуют критерии, изменение которых позволяет получить предсказуемый результат в смысле некоторых характеристик, например, качества или степени сжатия. Так, качество восстановленного изображения в алгоритме JPEG задаётся выбором соответствующих таблиц квантования [8, С. 372-377]. Поиск похожих по смыслу критериев обеспечения предсказуемости результатов для предложенных алгоритмов является актуальной задачей.

### Прореживание квазидвумерного спектра в задаче сжатия изображений

В работе предполагается, что изображение представлено матрицей яркостей пикселей  $\mathbf{I}$ , размер матрицы  $N \times N$ ,  $N = 2^n$ ,  $n$  – натуральное число. Значение яркости пикселя находится в диапазоне от 0 до 255, где 0 соответствует чёрному цвету, 255 – белому.

В исследуемых алгоритмах основной является идея перехода к квазидвумерному спектральному пространству, которое может быть представлено как (1):

$$\mathbf{B} = \mathbf{W} * \mathbf{I} \quad (1)$$

где  $\mathbf{B}$  – матрица квазидвумерного спектра изображения,  $\mathbf{W}$  – матрица функций Уолша, упорядоченная по Уолшу. При работе с функциями Уолша применяются термины обобщённой частоты или частоты (секвенты) в качестве указания отличия их от частот, получаемых в результате преобразования Фурье и других преобразований, основанных на синусоидальных функциях [9, С. 81-83].

В описанных ранее алгоритмах исключение «высокоочастотных» составляющих квазидвумерных спектров изображения задавалось пороговым значением  $k$ .

Задание значения исключения составляющих одним числом имело ряд неудобств. Во-первых, число  $k$  приходилось подбирать многократно отдельно для каждого изображения для получения данных с фиксацией результатов по другим критериям, таким как степень сжатия или качество изображения. Во-вторых, значение  $k$  – это значение уровня составляющих, все элементы спектра, по модулю меньшие  $k$ , исключаются, то есть становятся равными 0 (2).

$$\mathbf{B}^*(i, j) = \begin{cases} 0, & |\mathbf{B}(i, j)| \leq k, \\ \mathbf{B}(i, j), & |\mathbf{B}(i, j)| > k \end{cases} \quad (2)$$

Подобное число имеет смысл в исследуемой области, однако для пользователей алгоритма более понятными могут являться иные критерии, например, процент исключённых составляющих.

### Критерий прореживания, обеспечивающий заданную степень сжатия

Новый подход к исключению составляющих учитывает указанные замечания и заключается в реализации следующих шагов:

1. Задаётся пороговое значение  $k$ , имеющее заранее довольно высокое значение (при исключении составляющих по данному порогу будет устранено около 90% спектра).

2. Задаётся процент исключённых составляющих  $p$ , который будет означать предельную долю возможных исключённых элементов спектра.

3. Исключение составляющих по заданному порогу начинается с области высоких частот и продолжается до тех пор, пока не будет достигнут заданный процент  $p$  или (если процент недостижим в принципе) не будут исключены все составляющие ниже порога.

Пусть количество спектральных составляющих, которые надо исключить для достижения процента  $p$  равно  $c = \left\lfloor \frac{N \cdot N}{100} * p \right\rfloor$ , а текущее количество исключённых составляющих равно  $q$ . Тогда исключение составляющих спектра, обеспечивающее заданную степень сжатия, может быть выражено как (3):

$$\mathbf{B}^*(i, j) = \begin{cases} 0, & |\mathbf{B}(i, j)| \leq k \text{ и } q < c, \\ \mathbf{B}(i, j), & |\mathbf{B}(i, j)| > k \text{ или } q \geq c. \end{cases} \quad (3)$$

При этом  $i = \overline{N, 1}, j = \overline{N, 1}$ . Такой порядок обхода матрицы позволит начать исключение компонентов спектра с области концентрации компонентов высокой частоты при упорядочении матрицы преобразования по Уолшу, что позволит обеспечить более высокую степень сжатия по сравнению с обходом с области низких частот.

Предложенный подход позволит применять более наглядный критерий исключения составляющих, при этом процент исключённых составляющих будет отражать примерную степень сжатия.

### Критерий прореживания, обеспечивающий заданное качество восстановления

Одним из критериев оценки качества восстановленного после сжатия изображения является среднеквадратическое отклонение (СКО, англ. Root-mean-square error, RMSE) восстановленного изображения от исходного (4):

$$RMSE_I = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\mathbf{I}(i, j) - \mathbf{I}^*(i, j))^2}. \quad (4)$$

где  $\mathbf{I}^*$  – матрица восстановленного после сжатия изображения.

Для попытки оценить качество восстановленного изображения после исключения составляющих квазидвумерного спектра рассмотрим, как связано СКО изображений и их квазидвумерных спектров.

СКО квазидвумерных спектров можно представить как (5)

$$RMSE_B = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\mathbf{B}(u, j) - \mathbf{B}^*(u, j))^2}. \quad (5)$$

Так как разницу между спектрами составляют только исключённые значения, то выражение (4) можно переписать как (5)

$$RMSE_B = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\overline{\mathbf{B}^*}(u, j))^2}, \quad (6)$$

где  $\overline{\mathbf{B}^*}$  – матрица исключённых составляющих. Тогда выражение (4) можно представить в виде (7):

$$RMSE_I = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\overline{\mathbf{I}^*}(i, j))^2}, \quad (7)$$

где  $\overline{\mathbf{I}^*}$  – матрица разностей яркостей пикселей исходного и восстановленного изображений.

Исходя из равенства Парсеваля для квазидвумерных спектров [11, С. 144] (8):

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\overline{\mathbf{I}^*}(i, j))^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\overline{\mathbf{B}^*}(u, j))^2 \quad (8)$$

можно получить следующее выражение (9):

$$RMSE_B = \sqrt{N} * RMSE_I. \quad (9)$$

Учитывая (6), получим (10):

$$\sum_{u=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\overline{\mathbf{B}^*}(u, j))^2 = N^3 * RMSE_I^2. \quad (10)$$

Таким образом, чтобы добиться заданного качества восстановленного изображения, предлагается задать достаточно высокий порог  $k$  (по тому же принципу, что и в предыдущем критерии) и  $RMSE_I$ , и исключать из спектра его компоненты до тех пор, пока сумма квадратов значений этих компонентов не достигнет заданной суммы, рассчитанной с помощью (10).

Пусть  $\sum_{u=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\overline{\mathbf{B}^*}(u, j)) = S$ , а текущая сумма квадратов исключённых элементов равно  $D$ . Тогда исключение составляющих спектра, обеспечивающее заданное СКО, может быть выражено как (11):

$$\mathbf{B}^*(i, j) = \begin{cases} 0, & |\mathbf{B}(i, j)| \leq k \text{ и } D < S, \\ \mathbf{B}(i, j), & |\mathbf{B}(i, j)| > k \text{ или } D \geq S. \end{cases} \quad (11)$$

При этом  $i = \overline{N-1}, j = \overline{N-1}$ .

Исходя из (10), можно предположить, что значения  $D$  и  $S$  могут занимать более 8 десятичных разрядов, и квадрат каждого исключаемого компонента, близкого по модулю к  $k$  будет вносить большой вклад в результирующее СКО. Исходя из этого предлагается ввести некоторую окрестность  $\varepsilon = [0, 1 * S]$ , в пределах которой будет производиться расчёт суммы квадратов (12).

$$\mathbf{B}^*(i, j) = \begin{cases} 0, & |\mathbf{B}(i, j)| \leq k \text{ и } |S - D| < \varepsilon, \\ \mathbf{B}(i, j), & |\mathbf{B}(i, j)| > k \text{ или } |S - D| \geq \varepsilon. \end{cases} \quad (12)$$

Представленный подход позволит более точно получить требуемое качество изображения по сравнению с исключением составляющих только по порогу  $k$  (2).

### Экспериментальная проверка предложенных критериев

Экспериментальная проверка предложенных критериев проводилась на наборе ландшафтных изображений, имеющих различную тематику: лесная местность, сельская местность, городская застройка.

На рисунке 1 изображены графики степени сжатия изображений при использовании предложенных критериев прореживания.



Рисунок 1 - Степень сжатия изображения при использовании предложенных критериев прореживания  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.80.1>

Красным цветом изображён график способа прореживания, при котором получены результаты, отличающиеся наименьшей дисперсией степени сжатия  $D_{bpp}$  (13) (таблица 1), а значит, предсказуемостью результатов в смысле степени сжатия.

$$D_{bpp} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (X(i) - \bar{X})^2, \quad (13)$$

где  $K$  – количество проведённых экспериментов,  $X$  – вектор полученных степеней сжатия,  $\bar{X}$  – среднее значение степени сжатия в  $K$  экспериментах.

Таблица 1 - Статистические характеристики данных эксперимента по оценке степеней сжатия изображений

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.80.2>

Критерий	Среднее, бит/пикс	Минимум, бит/пикс	Максимум, бит/пикс	Дисперсия $D_{bpp}$ , (бит/пикс) <sup>2</sup>
Сохранение степени сжатия, $k=2000$ , $p=80\%$	1,8416	1,8270	2,1043	0,0019
Прореживание по порогу, $k=600$	2.3397	0,3507	6,5262	2,3750
Сохранение качества, $k=1500$ , $RMSE_I = 8$	4,7965	0,4756	7,9791	3,9569

На рисунке 2 изображены графики качества восстановленных изображений при использовании предложенных критериев прореживания.

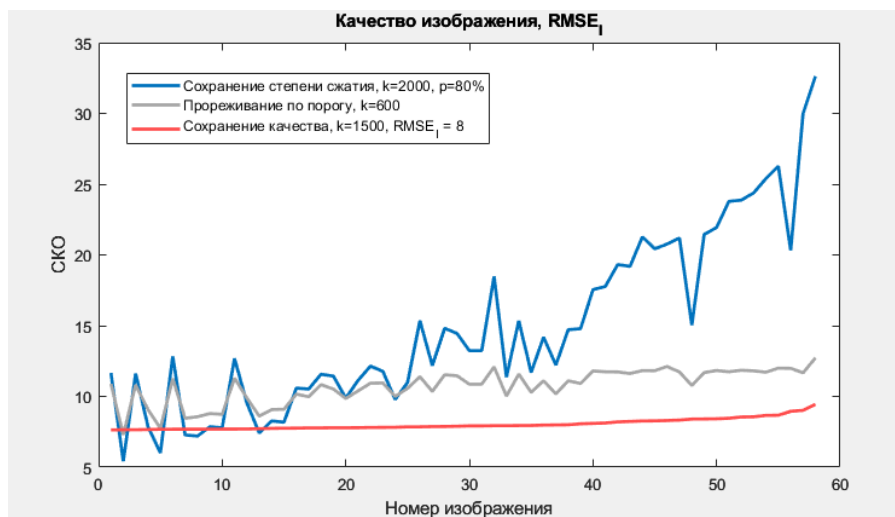


Рисунок 2 - SKO изображений при использовании предложенных критериев прореживания  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.80.3>

Красным цветом изображён график способа прореживания, при котором получены результаты, отличающиеся наименьшей дисперсией  $D_{RMSE}$  (таблица 2), а значит, предсказуемостью результатов в смысле качества восстановления.  $D_{RMSE}$  была рассчитана аналогично  $D_{bpp}$  (13).

Таблица 2 - Статистические характеристики данных эксперимента по оценке качества изображений

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.80.4>

Критерий	Среднее, ед. SKO	Минимум, ед. SKO	Максимум, ед. SKO	Дисперсия $D_{RMSE}$ , (ед. SKO) <sup>2</sup>
Сохранение степени сжатия, $k=2000$ , $p=80\%$	14,8270	5,4184	32,6297	38,7264
Прореживание по порогу, $k=600$	10,7163	7,2805	12,7239	1,4803
Сохранение качества, $k=1500$ , $RMSE_i = 8$	8,0274	7,6295	9,4321	0,1512

Пример сжатия изображения из исходного набора данных изображён на рисунке 3.

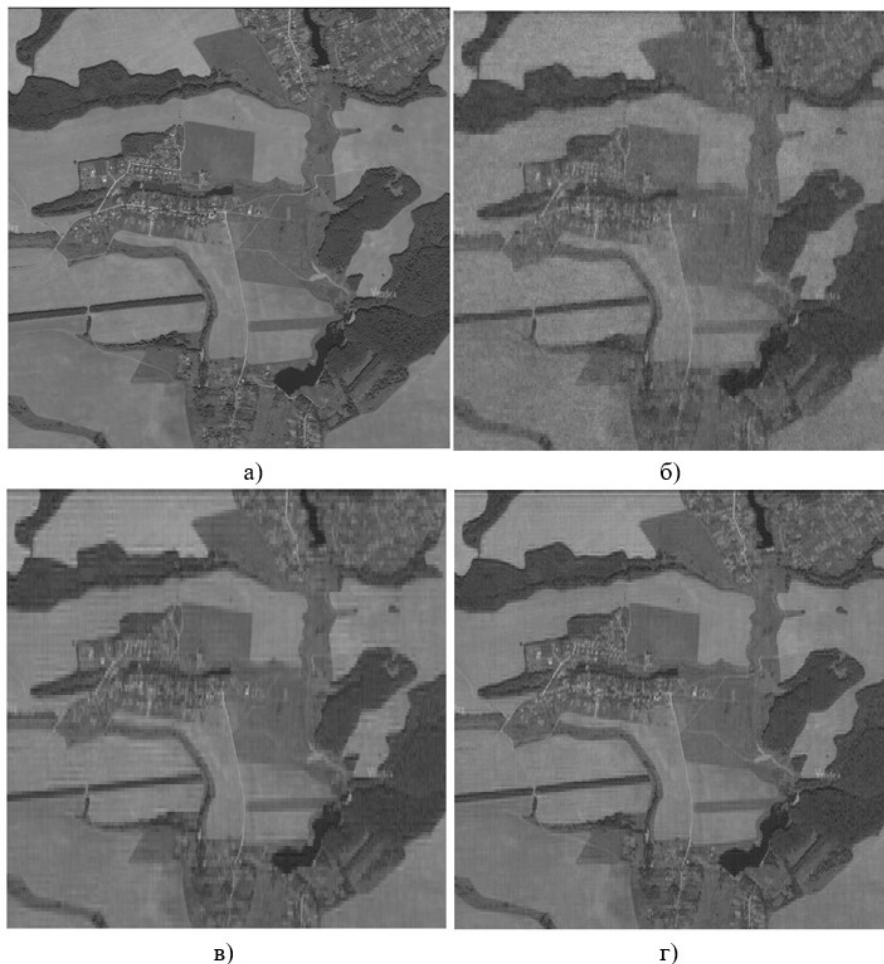


Рисунок 3 - Пример сжатия изображения:

*a* - исходное изображение; *б* - прореживание по порогу,  $k=600$ ; 1,1249 бит/пиксель; СКО = 10,0018; *в* - сохранение степени сжатия,  $k=2000$ ;  $p=80\%$ ; 1,8277 бит/пиксель; СКО = 9,7841; *г* - сохранение качества,  $k=1500$ ;  $p=8$ ; 3,2 бит/пиксель; СКО = 7,8164

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.80.5>

Результат рисунка 3 в) показывает, что при  $p=80\%$  произошло сжатие с 8 до 1,8277 бит/пиксель, на 77%. На рисунке 1 г) заданное СКО было равно 8, полученное после сжатия СКО равно 7,8164.

Таким образом, предложенные критерии способны обеспечивать заранее заданные степень сжатия и качество восстановленных изображений.

#### Заключение

Для задачи сжатия изображений с использованием квазидвумерного спектрального представления в базисе функций Уолша выведены критерии прореживания, обеспечивающие заранее заданную степень сжатия и СКО.

В экспериментальной части демонстрируется работоспособность предложенных критериев при сжатии ландшафтных изображений.

Разработанные критерии исключения составляющих спектров могут быть обобщены для других видов ортогональных преобразований; критерий восстановления, обеспечивающий качество изображений, в дальнейшем может быть получен для других рассчитываемых метрик оценки качества изображений.

Областью применения разработанных критериев являются задачи сжатия и изображений в условиях ограничений на аппаратные характеристики оборудования обработки и передачи данных.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

#### Список литературы / References

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. — Москва : Техносфера, 2005.

2. A. Jabbar Altaay A. Developed a Method for Satellite Image Compression Using Enhanced Fixed Prediction Scheme / A. A. Jabbar Altaay // Journal of Al-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics. — 2024. — № 16(2). — P. 161–171. — DOI: 10.29304/jqcs.2024.16.21567.
3. Лубков И.И. Разработка метода субполосного сжатия изображений / И.И. Лубков, Е.Г. Жилияков, Д.И. Трубицына [и др.] // Экономика. Информатика. — 2022. — Т. 49. — № 1. — С. 195–204. — DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-1-195-204.
4. Zaineldin H. Image compression algorithms in wireless multimedia sensor networks: A survey / H. Zaineldin, M.A. Elhosseini, H.A. Ali // Ain Shams Engineering Journal. — 2015. — Vol. 6. — Iss. 2. — P. 481–490. — DOI: 10.1016/j.asej.2014.11.001
5. Kostrov B.V. Image compression and restoration in embedded computing systems / B.V. Kostrov, A.G. Svirina, S.I. Babaev [et al.] // 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 - Including ECYPS 2017, Proceedings. — Bar, 2017. — P. 7977192. — DOI: 10.1109/MECO.2017.7977192.
6. Костров Б. В. Сжатие изображений на основе ортогональных преобразований / Б. В. Костров, А. С. Бастрьчкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2016. — № 9. — С. 113–119.
7. Gromov A.Y. Image compression in quasi-two-dimensional spectrum with quantizing of high-frequency component / A.Y. Gromov, D.S. Stepanov, E.P. Koroleva [et al.] // 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2018 - Including ECYPS 2018, Proceedings : 7, Budva. — Budva, 2018. — P. 1–4. — DOI: 10.1109/MECO.2018.8406074.
8. Дворкович В.П. Цифровые видеoinформационные системы (теория и практика) / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. — Москва : Техносфера, 2012. — 1008 с.
9. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Н. Ахмед, К.Р. Рао. — Москва : Связь, 1980.
10. Бастрьчкин А. С. Прореживание изображений при передаче по каналу связи / А. С. Бастрьчкин, Б. В. Костров // 7-я международная научно-техническая конференция "К.Э.Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика" : Тезисы докладов, Рязань, 04–06 октября 2017 года. — Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2017. — С. 382–387.
11. Костров Б.В. Спектральный анализ изображений в конечных базисах : Монография / Б.В. Костров, А.Г. Свирина, В.К. Злобин. — Москва : КУРС, 2016. — 172 с.

#### **Список литературы на английском языке / References in English**

1. Gonzalez R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij [Digital image processing] / R. Gonzalez, R. Woods. — Moscow : Technosphere, 2005. [in Russian]
2. A. Jabbar Altaay A. Developed a Method for Satellite Image Compression Using Enhanced Fixed Prediction Scheme / A. A. Jabbar Altaay // Journal of Al-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics. — 2024. — № 16(2). — P. 161–171. — DOI: 10.29304/jqcs.2024.16.21567.
3. Lubkov I.I. Razrabotka metoda subpolosnogo szhatija izobrazhenij [Development of the method of subband image compression] / I.I. Lubkov, E.G. Zhilyakov, D.I. Trubitsyna [et al.] // Jekonomika. Informatika [Economics. Computer Science]. — 2022. — Vol. 49. — № 1. — P. 195–204. — DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-1-195-204. [in Russian]
4. Zaineldin H. Image compression algorithms in wireless multimedia sensor networks: A survey / H. Zaineldin, M.A. Elhosseini, H.A. Ali // Ain Shams Engineering Journal. — 2015. — Vol. 6. — Iss. 2. — P. 481–490. — DOI: 10.1016/j.asej.2014.11.001
5. Kostrov B.V. Image compression and restoration in embedded computing systems / B.V. Kostrov, A.G. Svirina, S.I. Babaev [et al.] // 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 - Including ECYPS 2017, Proceedings. — Bar, 2017. — P. 7977192. — DOI: 10.1109/MECO.2017.7977192.
6. Kostrov B. V. Szhatie izobrazhenij na osnove ortogonal'nyh preobrazovanij [Image compression based on orthogonal transformations] / B. V. Kostrov, A. S. Bastrykin // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki [Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences]. — 2016. — № 9. — P. 113–119. [in Russian]
7. Gromov A.Y. Image compression in quasi-two-dimensional spectrum with quantizing of high-frequency component / A.Y. Gromov, D.S. Stepanov, E.P. Koroleva [et al.] // 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2018 - Including ECYPS 2018, Proceedings : 7, Budva. — Budva, 2018. — P. 1–4. — DOI: 10.1109/MECO.2018.8406074.
8. Dvorkovich V.P. Cifrovye videoinformacionnye sistemy (teorija i praktika) [Digital Apostille video information system urgencies (theory and practice)] / C.P. Dvorkovich, A.V. Dvorkovich. - Moscow: Technosphere, 2012. — 1008 p. [in Russian]
9. Ahmed N. Ortogonal'nye preobrazovanija pri obrabotke cifrovyh signalov [Orthogonal involute conversions when processing digital aposematic signal] / N. Ahmed, K.R. Rao. — Moscow: SVYAZ, 1980. [in Russian]
10. Bastrychkin A. S. Prorezhivanie izobrazhenij pri peredache po kanalu svjazi [Cutting images at peredache on the channel] / A.S. Bastrychkin, B. V. Kostrov // 7-ja mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "K.E.Ciolkovskij - 160 let so dnja rozhdenija. Kosmonavtika. Radiojelektроника. Geoинформатика" [7th International Scientific and technical conference "K.E.Tsiolkovsky – 160th birthday. Spaceflight. Radio undeclectronics. "Geoinformatics"] : Thesisdevelopmental report, Ryazan, 04-06 October 2017. — Ryazan: Ryazan State University of Radio Engineering, 2017. — P. 382–387. [in Russian]
11. Kostrov B.V. Spektral'nyj analiz izobrazhenij v konechnyh bazisah [Spectral Urgench analysis images in connectn Urgench bases] : monograph / B.V. Kostrov, A.G. Svirina, V.K. Evil. — Moscow: KURS, 2016. — 172 p. [in Russian]