

*Горячкин Б. С., кандидат технических наук, доцент; Московский
государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Попова И. А., магистрант, Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана*

*Горячкин Д. Б., преподаватель, Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО ПОЛУЧЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Аннотация: Вопрос оптимизации графики представляет интерес для большого круга специалистов. Задача состоит в том, чтобы найти оптимальное решение между размером файла и качеством графики, так как содержание веб-страницы очень важно для пользователя. В результате скорость доступа к информационному ресурсу увеличивается за счет снижения веса изображений в процессе сжатия. В работе рассматривается сжатие с потерями фотореалистичных изображений с помощью библиотек, основанных на алгоритме JPEG. В статье приводится подробное описание и анализ объективных оценок качества изображений, используемых инструментов сжатия, также определяются классы изображений. Исследование затрагивает область web-разработки. По результатам исследования определяются подклассы фотореалистичных изображений в зависимости от их поведения при сжатии. Также даны рекомендации, касающиеся сжатия с сохранением приемлемого качества изображений, используемых в веб-проектах для каждого предложенного подкласса изображений. Причем под качеством подразумевается целостность и четкость изображения. Инструменты сжатия постоянно развиваются и алгоритмы, которые лежат в их основе

позволяют сохранять приемлемое качество изображений даже при высоких значениях степени сжатия (примерно около 20:1).

Ключевые слова: Растровая графика, алгоритм сжатия, метрика, качество изображения, артефакт, алгоритм JPEG.

Annotation: The issue of graphics optimization is of interest to a wide range of specialists. The challenge is to find the optimal solution between file size and graphics quality, since the content of a web page is very important to the user. As a result, the speed of access to the information resource is increased by reducing the weight of the images during the compression process. The paper deals with the lossy compression of photorealistic images using libraries based on the JPEG algorithm. The article provides a detailed description and analysis of objective estimates of the quality of images, used compression tools defines the classes of images. The research touches upon the area of web development. According to the research results, subclasses of photorealistic images are determined depending on their behavior under compression. In addition, recommendations are given regarding compression with maintaining acceptable image quality used in web projects for each proposed subclass of images. Moreover, quality means the integrity and clarity of the image. Compression tools are constantly evolving and the algorithms that underlie them allow you to maintain acceptable image quality even at high compression ratios (about 20: 1).

Key words: Bitmap graphics, compression algorithm, metric, image quality, artifact, JPEG algorithm.

Введение

Решению проблемы оптимизации графики разработчики уделяют достаточно много внимания. Разрабатываются новые алгоритмы сжатия, которые сочетают в себе как возможности стандартных методов сжатия, так и используются более эффективные приемы.

Именно для веб-проектов оптимизация изображений наиболее актуальна. В данной работе рассмотрим сжатие с потерями, так как оно позволяет значительно сократить размеры файла, добиваясь высокой степени сжатия за счет усреднения значений соседних пикселей и отбрасывания избыточной информации [2]. В результате скорость доступа к информационному ресурсу увеличивается за счет снижения веса изображений при сжатии, при этом картинка должна оставаться четкой, ее не должны портить мутность, пятна, пиксельная картинка, что важно для пользователей и поисковых систем. Таким образом, важно найти правильное соотношение между степенью сжатия, которую позволяет достичь соответствующий алгоритм, и качеством изображения.

Целью статьи является анализ и оценка влияния алгоритмов сжатия фотореалистичных растровых изображений на качество полученных изображений. Исследуются такие параметры, как размер файла, качество изображения, степень сжатия и скорость загрузки файла в браузере.

Введем классы изображений в зависимости от степени сжатия, экспериментально выведем допустимую степень сжатия для изображений, используемых в веб-проектах, также исследуем поведение цветных изображений при сжатии несколькими современными модификациями алгоритма JPEG.

В данной статье рассматривается алгоритм сжатия растровых изображений JPEG, который регламентируется международным стандартом ISO/IEC 10918-5 и его модификации для сжатия фотореалистичных изображений [5]. Формат JPEG получил большое распространение в веб-публикациях, когда требуется передать многоцветное качественное изображение [15].

Алгоритм JPEG позволяет сжимать изображения фотографической направленности, добиваясь достаточно большой степени сжатия (примерно 100:1). Это TrueColor формат с глубиной цвета 24 бит/пк, дает возможность использовать более 16 млн. цветов [1]. Формат JPEG разрабатывался для компактного хранения изображений, в его основе закодированы методы и алгоритмы сжатия и

оптимизации изображений. При обработке изображений в процессе сжатия алгоритм отбрасывает информацию, которую трудно уловить визуально, так как небольшие изменения цвета изображения плохо распознаются глазом наблюдателя. JPEG при сжатии изображений усредняет значения соседних пикселей, то есть пытается подобрать интерполяцию для разнородных значений пикселей. При превышении допустимой степени сжатия изображение может распадаться на отдельные квадраты 8x8, что приводит к потере мелких деталей, размытости и пикселизации [19]. Восстановить исходные данные уже невозможно. Уровень сжатия в формате JPEG влияет на качество закодированного изображения [13]. Оптимальное значение качества выходного файла зависит от содержимого изображения и подбирается методом экспертных оценок.

Анализ алгоритмов сжатия графических изображений и метрик оценки их качества

В процессе анализа авторами был использован ряд библиотек, реализующих сжатие изображений по алгоритму JPEG таких, как: JPEG; MozJPEG; Libjpeg-turbo и Imagemin.

Приведем краткое описание используемых инструментов сжатия [8; 9; 10; 11] (табл. 1).

Таблица 1. Краткое описание используемых инструментов сжатия

| № п/п | Название библиотек | Используемая версия | Краткое описание |
|-------|--------------------|---------------------|--|
| 1 | JPEG | 6b | Это стабильная и надежная библиотека для приложений, которые поддерживают формат JPEG. JPEG - это стандартизированный метод сжатия полноцветных и полутоновых изображений [8]. Создатели - Independent JPEG Group. |
| 2 | MozJPEG | 3.3.1 | MozJPEG - это библиотека сжатия изображений, созданная разработчиками из Mozilla. MozJPEG повышает эффективность сжатия JPEG, одновременно обеспечивая более высокое визуальное качество и меньшие размеры |

| | | | |
|---|---------------|-------|--|
| | | | файлов [9]. |
| 3 | Libjpeg-turbo | 2.0.6 | Оптимизированная версия алгоритма JPEG, которая работает быстрее стандартной реализации [10]. |
| 4 | Imagemin | 7.0.1 | Imagemin - отличный выбор для сжатия изображений, поскольку он поддерживает широкий спектр форматов изображений и легко интегрируется со сценариями сборки и инструментами сборки. Сжимает изображения при помощи плагина, в основу работы которого положен алгоритм MozJPEG [11]. |

Из сводной таблицы можно заметить, что все инструменты сжатия основываются на алгоритме сжатия JPEG и являются усовершенствованными модификациями исходного алгоритма, при этом имеют некоторые преимущества. Так, например, если при компрессии изображений нужно добиться больших степеней сжатия, при этом сохранив высокое визуальное качество, тогда стоит выбирать алгоритм MozJPEG. Он позволяет достичь значительно больших степеней сжатия, чем стандартный алгоритм JPEG, однако кодирует изображения медленнее.

Алгоритм сжатия Imagemin работает в режиме командной строки, а также возможна интеграция этой библиотеки в исходный код приложения, поэтому библиотека является достаточно гибкой. В основе данного инструмента лежит алгоритм MozJPEG, поэтому результаты сжатия будут совпадать.

Алгоритм, лежащий в основе инструмента Libjpeg-turbo является оптимизированной версией алгоритма JPEG, поэтому данный алгоритм позволит сжимать изображения быстрее стандартной реализации. Его применение будет полезно при обработке большого числа изображений. Выбор конкретного алгоритма сжатия графики зависит от решаемой задачи.

Оценить качество сжатых изображений позволяют метрики качества. Критерии оценки качества изображений могут быть субъективными и объективными, эталонные и не эталонные. Рассмотрим эталонные объективные

оценки качества, так как у нас имеется оригинальное изображение (не сжатое или без искажений), с которым будем сравнивать сжатое изображение.

Введем понятие качества изображения и приемлемого (допустимого) качества изображения.

Под качеством в данном случае понимается количество полезных данных, которые может сохранить алгоритм JPEG. При сжатии с потерями алгоритм заменяет похожие участки изображения некоторым эталоном, а, следовательно, происходит искажение изображения и потеря информации [12].

Приемлемое качество изображения – такое качество, где изменения привнесены алгоритмом, однако визуально не заметны артефакты сжатия, характерные для данного алгоритма сжатия.

Критерий потери качества – «дрожащие контуры», которые наиболее заметны в местах контрастных переходов, появление пятен в областях с плавными переходами, появление шумов и пиксельных блоков.

При сжатии изображений с помощью алгоритмов архивации обязательно будут внесены различные искажения и на практике зачастую нужно дать объективную оценку качества искаженного изображения. Оценить качество сжатых изображений позволят метрики качества.

Чтобы оценить схожесть сжатых изображений и исходных будем использовать ряд объективных метрик: среднеквадратическую ошибку (MSE), пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ, PSNR), универсальный индекс качества (UQI) и коэффициент структурного подобия (SSIM). Кратко опишем выбранные оценки качества.

❖ *Среднеквадратическая ошибка (MSE)*

Описывается выражением:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N [X(i, j) - Y(i, j)]^2, \quad (1)$$

где X и Y – эталонное и тестируемое изображение соответственно. Чем ниже значение оценки MSE, тем меньше ошибка [3].

❖ **Пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ, PSNR)**

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{(2^B - 1)^2}{\sqrt{MSE}}, \quad (2)$$

где B – количество бит на пиксель.

Метрика PSNR вычисляет пиковое отношение сигнал / шум в децибелах (дБ) между двумя изображениями. Чем больше значение PSNR, тем лучше качество сжатого или восстановленного изображения [3].

❖ **Универсальный индекс качества (UQI)**

Метрика позволяет определить подобность сжатого изображения исходному в зависимости от вида и степени искажения эталонного изображения. Оценка считается универсальной, так как отражает схожесть сжатого изображения относительно исходного, однако принимает во внимание разные виды искажений. Также на значение UQI не влияет специфика изображения и искажения на нем. Данная оценка может принимать значения в диапазоне $[-1, 1]$, где значение $UQI=1$ означает максимально возможное качество сигнала.

В основе алгоритма расчёта метрики UQI заложен расчёт статистических характеристик, таких как дисперсия, математическое ожидание, корреляционная функция. Расчёт значения оценки UQI производится по следующим формулам:

$$UQI = \frac{4\sigma_{xy}\bar{x}\bar{y}}{[\sigma_x^2 + \sigma_y^2][(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]}, \quad (3)$$

где

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i,$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2,$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2,$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

В таком случае UQI содержит информацию о нескольких искажающих факторах, а именно: изменение величины математического ожидания, среднеквадратичных отклонений сигнала от оригинала и степень коррелированности отчетов двух сигналов. Представим выражение (3) как произведение трех сомножителей:

$$UQI = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} * \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} * \frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (4)$$

В качестве первого множителя выступает коэффициент взаимной корреляции сигналов x и y . Он определяет степень их линейной подобности и может принимать значения в диапазоне $[-1,1]$. В качестве второго множителя представлено соотношение между математическими ожиданиями входного и восстановленного сигнала, которое может принимать значения в диапазоне $[0;1]$. Когда входной сигнал – изображение, данный коэффициент определяет изменения яркости. Последний множитель определяет искажение контрастности восстановленного сигнала относительно оригинала и принимает значения в диапазоне $[0;1]$.

Если входной сигнал - изображение, в таком случае алгоритм расчёта выглядит так: маска в виде прямоугольного окна размером $A \times B$ проходит попиксельно от верхнего левого угла все изображение, представленное в виде матрицы. На каждой итерации происходит расчёт значений статистических характеристик и определяется значение UQI_i для текущего положения маски.

В итоге производится расчёт среднего арифметического значения UQI_i для целого изображения и это значение будет характеризовать качество изображения в целом:

$$UQI = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M UQI_i \quad (5)$$

где M – число блоков, внутри которых вычислялись UQI_i [3].

❖ *Метрика структурного сходства (SSIM)*

Измерение степени структурного подобия обеспечивает хорошее приближение к зрительно воспринимаемому качеству, так как считается, что зрительная система человека хорошо приспособлена к выделению структурной информации [18]. Структурными искажениями считаются изменения в структуре объектов, содержащихся на изображении, а остальные считаются неструктурными искажениями.

Значение SSIM-индекса принимает значения из диапазона $[-1, 1]$, где значение $+1$ означает полную аутентичность изображений.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (6)$$

где:

μ_x – среднее x ;

μ_y – среднее y ;

σ_x^2 – дисперсия x ;

σ_y^2 – дисперсия y ;

σ_{xy} – ковариация x и y ;

$c_1 = (k_1, L)^2$, $c_2 = (k_2, L)^2$ – две переменные, где:

L – динамический диапазон пикселей (обычно $2^{\text{bits per pixel}} - 1$)

$k_1 = 0.01$ и $k_2 = 0.03$ – константы [3].

Метрики качества MSE и PSNR не требуют входных параметров, а, значит, просты в расчете. Пиксельная структура, используемая в MSE и PSNR, неточно отображает систему человеческого визуального восприятия. Психофизические и психофизиологические исследования показали, что функции зрительной системы человека не учитываются в MSE и PSNR.

Метрики UQI и SSIM обладают хорошей согласованностью со значениями субъективных экспертных оценок. В отличие от оценок MSE и PSNR, они имеют абсолютное значение, равное единице, то есть при показаниях UQI и SSIM,

близких к единице, можно говорить о высоком качестве восстановленного сигнала. Эталонные метрики UQI и SSIM являются предпочтительными при оценке качества сжатого изображения относительно оригинала.

Описанные выше метрики были использованы для алгоритмической оценки качества сжатого изображения, при этом в качестве входных данных выступало оригинальное изображение и сжатое.

Определение степени сжатия изображений для использования в веб-ресурсах

Под понятием степень сжатия понимаем отношение длины в битах сжатого представления файла к длине исходного представления. Максимально допустимая степень сжатия – та степень сжатия, при которой искажения еще не видны, но с увеличением его на одно значение становятся заметными.

Степень сжатия оценим по стандартной формуле [1]:

$$K_c = \frac{V_0}{V_c},$$

где V_c – объем сжатого файла, V_0 – объем исходного файла.

Данная формула позволяет количественно оценить степень сжатия файла.

Чтобы корректно оценить степень сжатия, следует ввести классификацию графических изображений. В каждый класс относится некоторое подмножество изображений и для этого подмножества алгоритм сжатия будет давать качественно одинаковые результаты.

Введем следующие классы изображений:

- Фотореалистичные изображения (фото, отсканированные фото);
- Изображения с преобладанием больших однотонных областей и небольшим количеством цветов (до 16) (графики, гистограммы);
- Изображения, которые построены с помощью различного ПО на компьютере и содержат плавные переходы (чертежи, схемы и др.);
- Монохромные изображения (фото в сепии);

➤ Изображения в градациях серого.

В данном исследовании рассматривается один класс – фотореалистичные изображения, как наиболее используемый.

В свою очередь, цветные фотореалистичные изображения в формате JPEG можно разделить на 3 подкласса:

1. Малодетализированные изображения в темных тонах;
2. Малодетализированные изображения в светлых тонах;
3. Изображения со множеством разнородных деталей.

Для изображений в каждом подклассе ниже будет определено значение качества, при котором достигается допустимая степень сжатия с помощью рассмотренных библиотек, основанных на алгоритме JPEG. При создании web-ориентированных систем можно придерживаться данной рекомендации при сжатии цветных фотореалистичных изображений алгоритмом JPEG.

Таким образом, при сжатии изображения варьируем значение качества, которое является входным параметром для рассмотренных алгоритмов. Чем меньше значение качества, тем меньше вес файла, следовательно, больше степень сжатия. Это критичная характеристика, так как нужно найти приемлемое значение качества, при котором не появлялись бы на изображении визуально заметные артефакты: «дрожащие контуры», которые наиболее заметны в местах контрастных переходов, появление пятен в областях с плавными переходами, появление шумов и пиксельных блоков.

В ходе исследования авторами были подобраны изображения следующим образом: некоторые изображения были взяты с ресурса [4] как рекомендованные для использования при проведении исследований по сжатию файлов. Другие изображения были выбраны случайным образом и на них была также опробована работа алгоритма JPEG и его модификаций: MozJPEG, Libjpeg-turbo, Imagemin.

Для каждого инструмента сжатия фиксировались такие параметры, как исходный размер файла, размер файла после сжатия, значение качества, степень

сжатия, скорость загрузки и значения метрик качества. Ниже приведены графики зависимости исследуемых параметров (рис. 1-7).

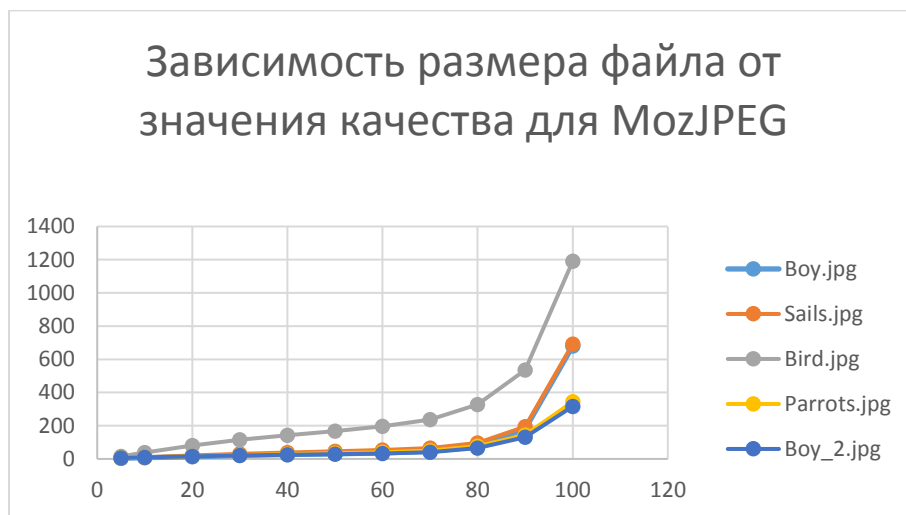


Рис. 1. Зависимость размера файла от значения качества для библиотеки MozJPEG

По графику на рис. 1 видно, что чем выше значение качества, тем больше размер файла, так как сохраняется большее число информации при высоких значениях качества. При снижении качества со 100% до 90% происходит резкое уменьшение размера файла, далее при понижении качества уменьшение размера файла происходит более плавно.

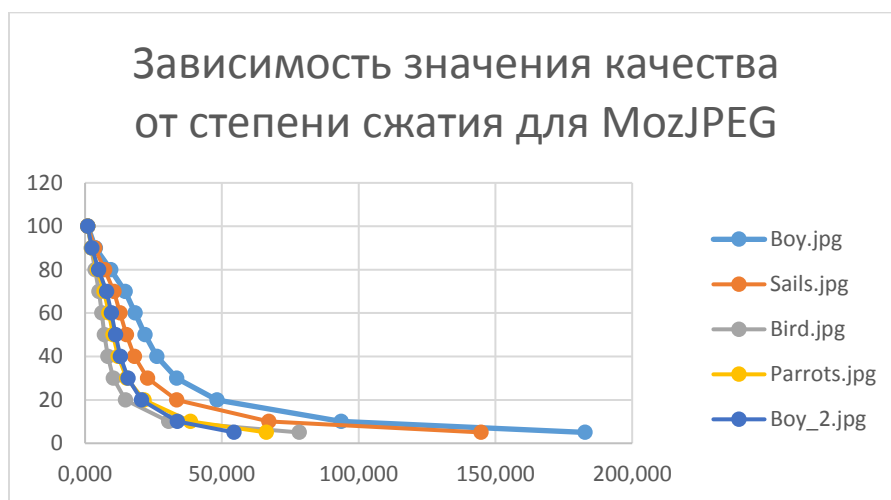


Рис. 2. Зависимость значения качества от значения степени сжатия для библиотеки MozJPEG

Из рис. 2 видно, что с увеличением степени сжатия уменьшается качество изображения, то есть происходит потеря информации.

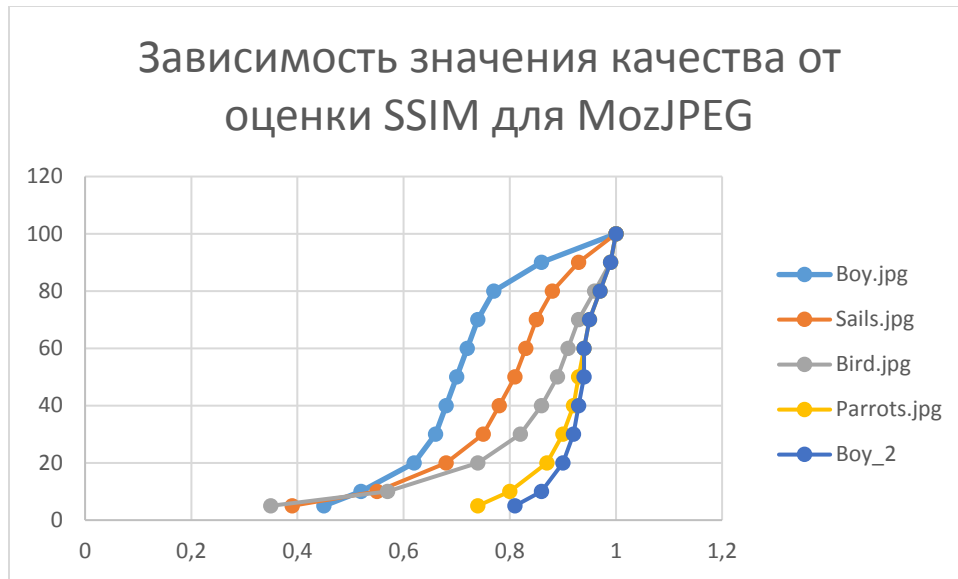


Рис. 3. Зависимость значения качества от значения оценки SSIM для библиотеки MozJPEG

По графику на рисунке 3 видно, что при уменьшении значения качества уменьшается значение коэффициента структурного сходства, то есть по структуре сжатое изображение отличается от оригинала. Так как инструмент MozJPEG позволяет достичь больших степеней сжатия, чем JPEG, значит теряется больше полезной информации и метрики качества показывают более низкие оценки. Оценка SSIM принимает меньшие значения при сравнении оригинального изображения и сжатого, следовательно, при сжатии происходят более сильные изменения в структуре изображения.

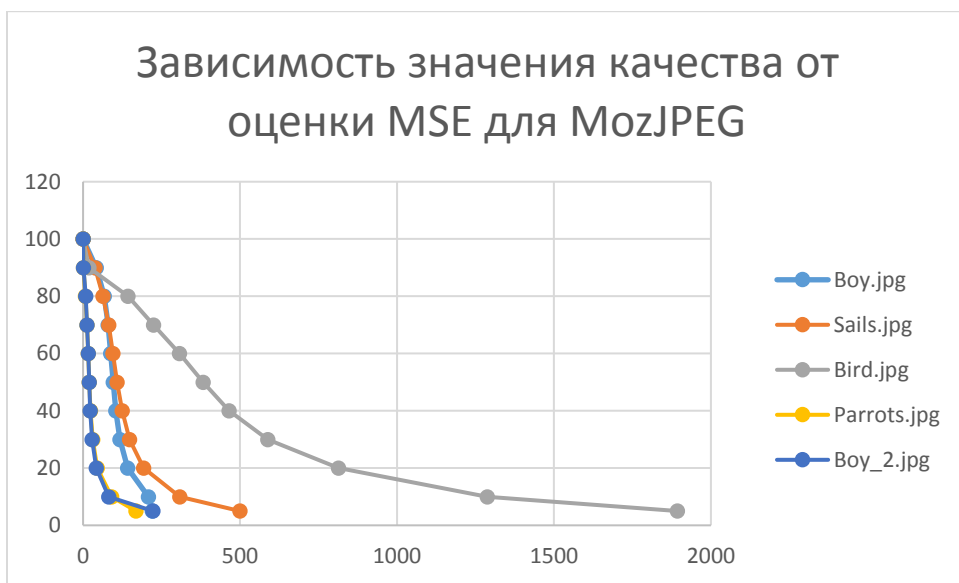


Рис. 4. Зависимость значения качества от значения оценки MSE для библиотеки MozJPEG

Рис. 4 демонстрирует, что при уменьшении значения качества значение метрики MSE начинает уменьшаться значительными темпами.

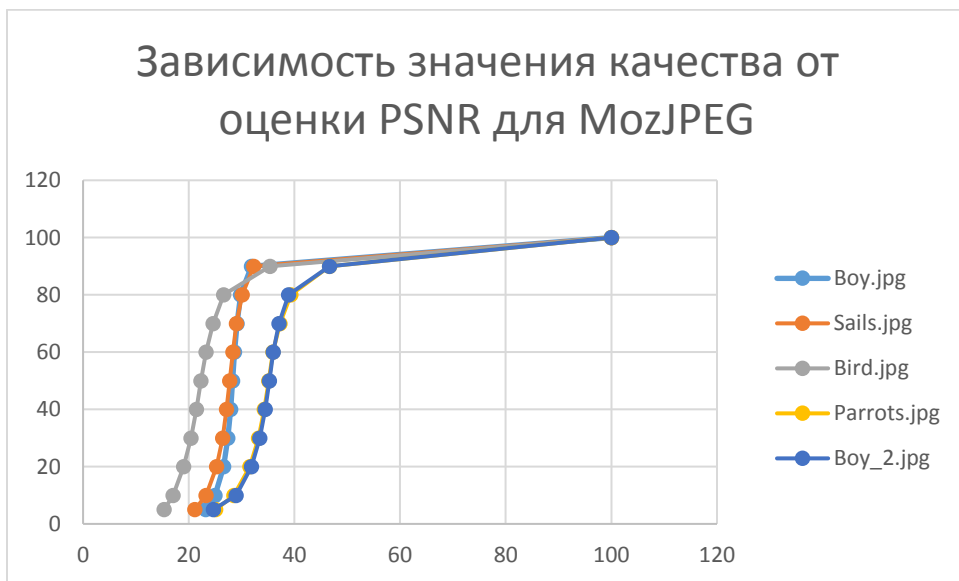


Рис. 5. Зависимость значения качества от значения оценки PSNR для библиотеки MozJPEG

Рис. 5 показывает, что при небольшом уменьшении качества значение оценки PSNR резко ухудшается. При дальнейшем уменьшении значения качества значение метрики плавно уменьшается.

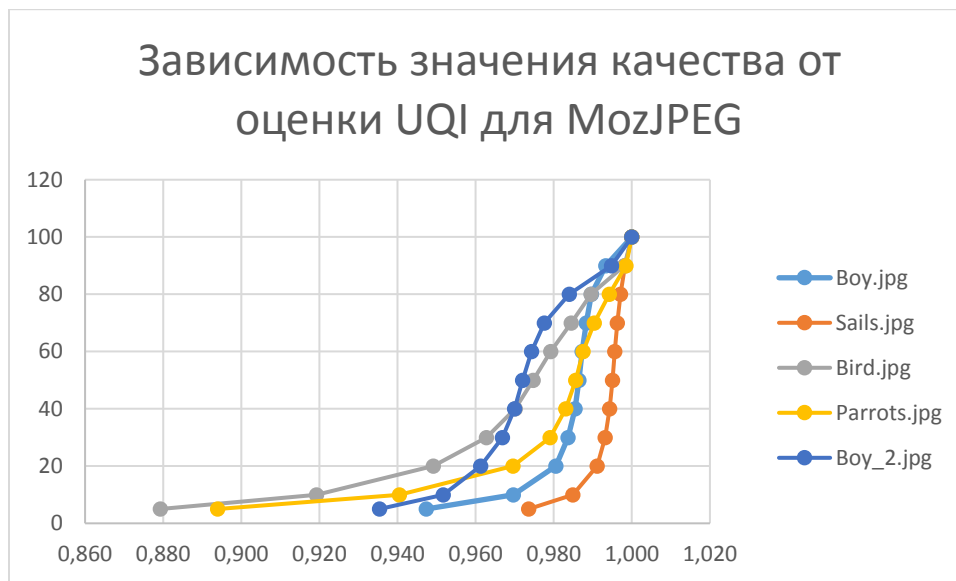


Рис. 6. Зависимость значения качества от значения оценки UQI для библиотеки MozJPEG

Рис. 6 позволяет сказать, что значение оценки UQI падает при уменьшении значения качества, однако значение оценки изменяется незначительно при небольшой потере качества. Примерно при достижении значения качества 30% и ниже значения метрики начинают изменяться сильнее. То есть статистические характеристики сжатого изображения отличаются от исходного.

Таким образом, авторы наглядно показали зависимость исследуемых параметров на примере библиотеки MozJPEG, у остальных рассматриваемых библиотек получились схожие результаты.

На рис. 7 представлена гистограмма, отображающая значение качества, при котором достигается допустимая степень сжатия с помощью рассмотренных библиотек, основанных на алгоритме JPEG. Для всех исследуемых алгоритмов сжатия справедливы представленные значения качества.

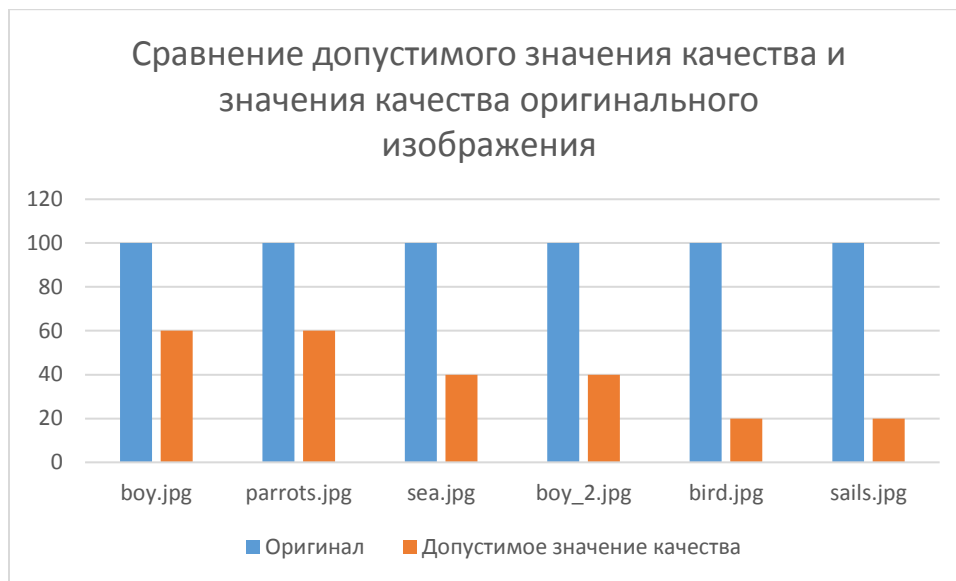


Рис. 7. Сравнение допустимого значения качества и значения качества исходного файла для каждого класса цветных фотореалистичных изображений

Из представленных наглядных пособий видно, что для каждого изображения необходимо и можно найти правильное соотношение между степенью сжатия и качеством.

На рис. 8-10 представлены фотореалистичные изображения, представляющие каждый подкласс. На сжатом изображении выделим цветными линиями артефакты, внесенные алгоритмом сжатия. Оранжевой линией выделим участки из пикселей, синей – размытые, «дрожащие» контуры и зеленой - размытые, сглаженные участки изображения.

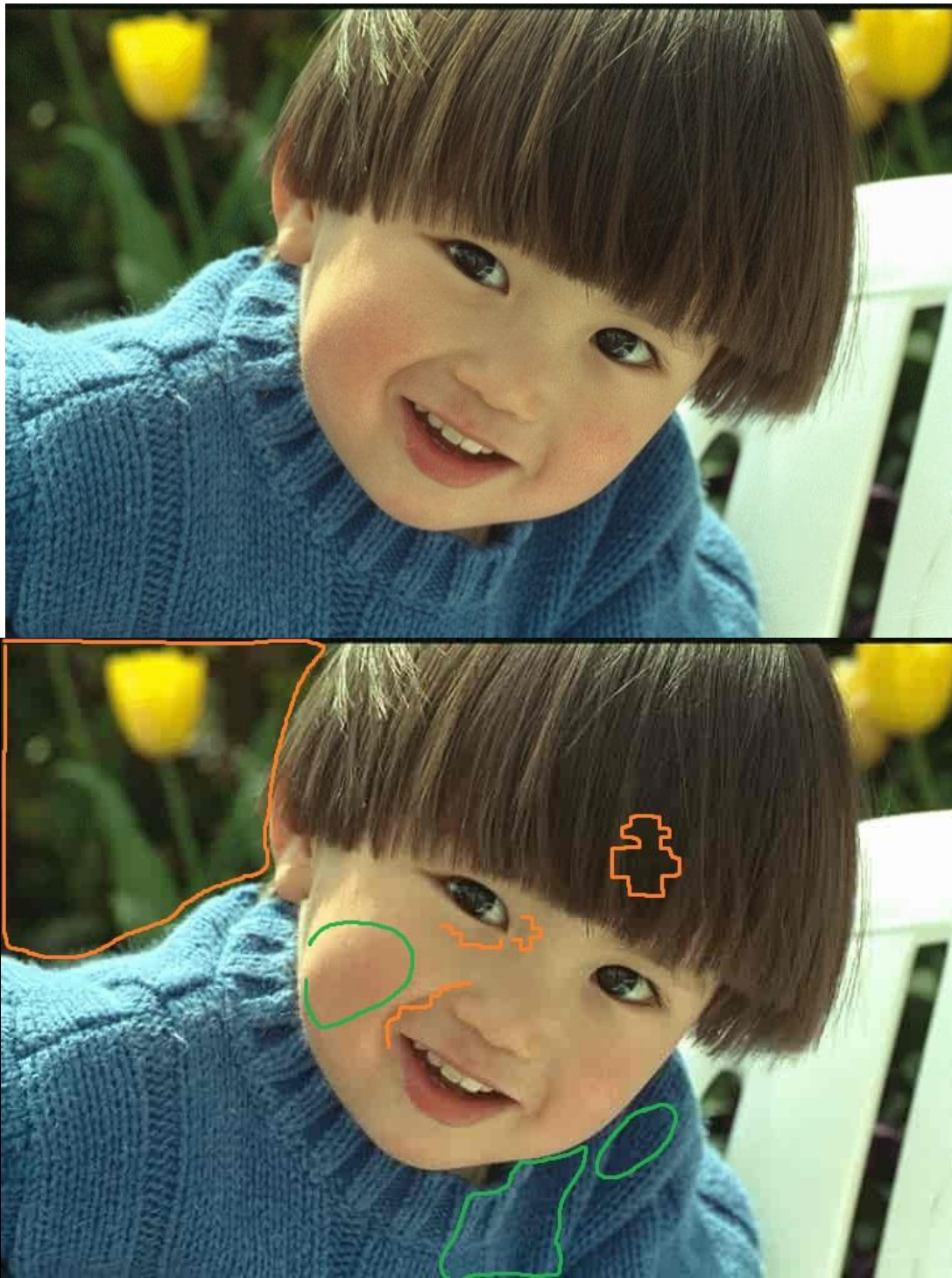


Рис. 8. Малодетализированное изображение в темных тонах (boy.jpg): (сверху оригинал, снизу – сжатое изображение с допустимым качеством для web – 60%.)

На сжатом изображении на рис. 8 становятся заметны артефакты сжатия: появляется пиксельная мозаика на темных областях изображения (заднем фоне,

волосах); сглаживаются мелкие детали на свитере и волосах; картинка становится блеклой, цвета приглушенными.



Рис. 9. Малодетализированное изображение в светлых тонах (boy_2.jpg): (сверху оригинал, снизу – сжатое изображение с допустимым качеством для web – 40%.)

На сжатом изображении на рис. 9 становятся заметны артефакты сжатия: на заднем малодетализированном светлом фоне появляются пиксельные лестницы. В местах контрастных переходов (на границе желтого фона с зелеными листьями) границы становятся размытыми, нечеткими. Яркие, насыщенные цвета на оптимизированном изображении становятся тусклыми и блеклыми, то есть теряется реалистичность изображения.





Рис. 10. Изображение со множеством деталей (sails.jpg): сверху оригинал, (снизу – сжатое изображение с допустимым качеством для web – 20%.)

На сжатом изображении на рис. 10 становятся заметны артефакты сжатия: появляется пиксельная мозаика на темных областях изображения (на водной глади и темных частях парусников). В местах контрастных переходов цветов контуры объектов становятся «дрожащие», размытые. Также на оптимизированном изображении изменились цвета на более блеклые; мелкие детали становятся размытыми.

Изображения со множеством деталей в формате JPEG изначально больше весят, чем малодетализированные изображения. Эти изображения содержат много мелких деталей и резкие цветовые переходы, а эта информация занимает больше места, так как алгоритму нужно хранить все детали снимка и сложно подобрать интерполяцию для этих разнородных пикселей [15]. Малодетализированные изображения меньше весят, так как алгоритм JPEG экономит память на повторяющихся участках. Соответственно, наиболее уязвимая зона картинки –

большие малодетализированные участки и их границы, где при сжатии начинают появляться артефакты.

Если на фото много разнородных пикселей, тогда алгоритму сложно усреднить их значения, в таком случае требуется больше памяти для хранения деталей снимка, а само изображение долго не теряет качество (так как потери фактически незаметны). Было замечено, что чем больше на изображении деталей, тем больше значение степени сжатия и при меньших значениях качества на изображении не появляются заметных артефактов [13].

На изображениях с большими малодетализированными областями при сжатии начинают появляться заметные пиксели, а впоследствии пятна – алгоритм усредняет значения соседних пикселей. Светлые малодетализированные изображения имеют степень сжатия больше, чем темные малодетализированные изображения, так как на светлом фоне артефакты трудно заметить. Для изображений с множеством деталей сжатие происходит практически с незаметными потерями и можно достичь достаточно высокой степени сжатия, что подтверждается настоящими исследованиями.

Все изображения покрывались большим числом артефактов при сжатии со значением качества, равным 5-10% для изображений с множеством деталей и 20% для изображений с обширным малодетализированным фоном.

Согласно нашей классификации, для темных изображений с обширным малодетализированным фоном приемлемая степень сжатия достигается при значении качества 60%, для светлых изображений с обширным малодетализированным фоном – 40%, а для изображений со множеством деталей – 20%. На гистограмме (рис.7) это наглядно видно.

Лучше не превышать степени сжатия более 9:1 для малодетализированных изображений в темных тонах и 13:1 для малодетализированных изображений в светлых тонах для библиотек MozJPEG и Imagemin. Для библиотек JPEG и Libjpeg-turbo 5:1 для малодетализированных изображений в темных тонах и 8:1

для малодетализированных изображений в светлых тонах. Степень сжатия изображения с фотографическим качеством с множеством деталей может составить 20:1 без заметной потери качества. При создании web-ориентированных систем можно придерживаться данной рекомендации при сжатии цветных фотореалистичных изображений алгоритмом JPEG.

На практике с использованием выбранных изображений удалось достичь максимальной степени сжатия 40,8:1 для библиотек JPEG, Libjpeg-turbo и 182,796:1 для библиотек MozJPEG и Imagemin.

Таким образом, был исследован ряд инструментов для сжатия изображений на основе алгоритма JPEG. Исследуя поведение изображений в процессе сжатия данными библиотеками, было выявлено, что качество начинает ухудшаться при достаточно низких значениях, а, именно, примерно при 10-20% качества изображения покрываются пиксельной мозаикой. Это свидетельствует о том, что инструменты, реализующие стандартный алгоритм сжатия JPEG усовершенствовались разработчиками. Исследователи стараются модифицировать алгоритмы сжатия так, чтобы вес файла был меньше, а качество при этом сохранялось приемлемым и артефакты сжатия долго не были заметны.

Заключение

В настоящей статье проведен анализ алгоритмов сжатия фотореалистичных изображений и дана оценка влияния этих алгоритмов на качество полученных изображений, которое оценивалось с использованием эталонных метрик MSE, PSNR, UQI, SSIM. Выведена классификация цветных фотореалистичных изображений, где для каждого подкласса изображений определено значение качества, при котором достигается допустимая степень сжатия с помощью рассмотренных библиотек, основанных на алгоритме JPEG. Проблема оптимизации изображений всегда будет актуальной, что обуславливает появление новых алгоритмов сжатия, которые в большинстве случаев являются усовершенствованной версией стандартных методов.

Библиографический список:

1. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. - 384 с.
2. Ватолин Д.С. Использование графики в WWW // ComputerWorld-Россия. – 1996. – Апрель 15. – с. 4-15.
3. Оценка качества цифровых изображений и видеоданных: учебно-методическое пособие / Д. В. Матвеев, А. Г. Седов, В. В. Хрящев, А. Л. Приоров; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. — Ярославль: ЯрГУ, 2018. — 76 с.
4. Интернет-ресурс: <https://homepages.cae.wisc.edu/~ece533/images/> - Общедоступные тестовые изображения для домашних работ и проектов - (дата обращения 03.12.20).
5. Интернет-ресурс: <https://www.iso.org/standard/54989.html> - ISO/IEC 10918-5:2013 Information technology — Digital compression and coding of continuous-tone still images: JPEG File Interchange Format (JFIF) - (дата обращения 03.12.20).
6. Д.В. Гринев, С.Ю. Гайдаров. Анализ форматов графических файлов. - 2002.
7. Климов А.С. Форматы графических файлов. – С.-Пб : ДиаСофт, 1995. – 456 с.
8. Интернет-ресурс: <http://gnuwin32.sourceforge.net/packages/jpeg.htm> - Jpeg for Windows - (дата обращения 03.12.20).
9. Интернет-ресурс: <https://github.com/mozilla/mozjpeg> - MozJPEG - (дата обращения 03.12.20).
10. Интернет-ресурс: <https://libjpeg-turbo.org/> - Libjpeg-turbo - (дата обращения 03.12.20).

11. Интернет-ресурс: <https://github.com/imagemin/imagemin> - Imagemin - (дата обращения 03.12.20).
12. А.Ю. Тропченко, А.А. Тропченко Методы сжатия изображений, аудиосигналов и видео – 2009.
13. Ватолин Д.С. Тенденции развития алгоритмов архивации графики. //Открытые системы сегодня. – 1995. – Декабрь 4. – с. 5-14.
14. Ватолин Д.С. Сжатие статических изображений. //Открытые системы сегодня. – 1995. – Апрель 8. – с.7-12.
15. G.K.Wallace. “The JPEG still picture compression standard.” Communication of ACM. Volume 34. Number 4 April 1991.
16. Прорис Д. Файлы растровой графики: взгляд внутрь. //PC Magazine. – 1996.- December 3. – с.3-21.
17. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. -Кн. 2-480 с.
18. Бабкин П.С., Павлов Ю.Н. Анализ и сравнение объективных методов оценки качества изображений // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 9. С. 203–215.
19. Белоногов И.Б., Коротаев А.И., Ревунков Г.И. Технология мультимедиа: Учеб. пособие для вузов. - Изд - во МГТУ им. Н. Э. Баумана.
20. Божко А. Н., Жук Д. М., Маничев В. Б. Компьютерная графика: Учеб. пособие для вузов. - Изд - во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.- 392 с.: ил.- (Информатика в техническом университете).