

УДК 004.932.2

Панюшкин А. М.

студент 5-го курса

Самарский национальный исследовательский университет имени

академика С. П. Королёва

Россия, г. Самара

Слесарев Р. А.

руководитель отдела мобильной разработки, старший инженер-

программист

ООО «СУПЕРНОВА-ТЕХ»

Россия, г. Санкт-Петербург

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА ФОРМАТА СЖАТИЯ
ВИЗУАЛЬНОГО КОНТЕНТА В МОБИЛЬНЫХ КЛИЕНТСКИХ
ПРИЛОЖЕНИЯХ**

***Аннотация:** предложен воспроизводимый способ многокритериального выбора формата изображений при едином ограничении $SSIM-Y \geq 0,95$. Сопоставлены JPEG, WebP, AVIF, HEIC, JPEG 2000 и JPEG XL. На 24 изображениях Kodak получено 1 056 наблюдений «качество–размер» и 720 временных измерений. AVIF обеспечил минимальный медианный объём 0,751 бит/пикс., тогда как минимальное значение интегрального индекса размера, кодирования и декодирования получено для WebP ($I=0,178$). Показано, что выбор по размеру файла и выбор по совокупным затратам приводят к различным решениям.*

***Ключевые слова:** JPEG; WebP; AVIF; HEIC; JPEG 2000; JPEG XL; SSIM; сжатие изображений; многокритериальный выбор.*

Andrei Mikhailovich Paniushkin
software engineer; fifth-year student
SUPERNOVA-TECH LLC; Samara National Research University
Russia, Samara

Roman Alexandrovich Slesarev
head of mobile development, senior software engineer; independent
researcher
SUPERNOVA-TECH LLC
Russia, Saint Petersburg

EXPERIMENTAL-QUALIMETRIC JUSTIFICATION OF MULTI- CRITERIA SELECTION OF A VISUAL CONTENT COMPRESSION FORMAT IN MOBILE CLIENT APPLICATIONS

Abstract: *A reproducible method for multi-criteria image-format selection under a common $SSIM-Y \geq 0.95$ constraint is proposed. JPEG, WebP, AVIF, HEIC, JPEG 2000 and JPEG XL are compared. The experiment produced 1,056 rate–distortion observations and 720 timing measurements on 24 Kodak images. AVIF achieved the lowest median rate of 0.751 bpp, whereas WebP achieved the lowest integrated size, encoding and decoding cost index ($I=0.178$). It is shown that selection based on file size and selection based on aggregate costs lead to different decisions.*

Keywords: *JPEG; WebP; AVIF; HEIC; JPEG 2000; JPEG XL; SSIM; image compression; multi-criteria selection.*

ВВЕДЕНИЕ

В мобильном клиентском приложении изображение одновременно формирует сетевую нагрузку, время серверной подготовки и задержку клиентского декодирования. Поэтому оценка только размера файла недостаточна, так как выигрыш в трафике может сопровождаться ростом вычислительной стоимости. Для лент и соответствующих

персонализированных сервисов это противоречие особенно заметно, поскольку контент нередко преобразуется непосредственно перед выдачей пользователю.

Сравниваемые технологии относятся к разным поколениям стандартов. JPEG регламентирован ITU-T T.81 [1], WebP основан на VP8 [2], AVIF — на AV1 и ISOBMFF [3]. Под HEIC в работе понимается HEVC-изображение в контейнере HEIF [4]. JPEG 2000 использует вейвлет-преобразование [5], а JPEG XL стандартизован как ISO/IEC 18181 [6]. Номинальные шкалы параметров качества у этих кодеков не эквивалентны, поэтому непосредственное сравнение одинаковых числовых настроек методологически некорректно.

Цель исследования — определить формат с наилучшим балансом удельного объёма и времени обработки при общем пороге структурного качества. Гипотеза состоит в том, что современные форматы уменьшают объём относительно JPEG, однако учёт вычислительных затрат меняет ранжирование. Актуальность всей темы и самого вот этого метода заключается в сочетании порогового отбора, логарифмической нормировки и анализа чувствительности весов для шести форматов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Корпус включал 24 несжатых PNG-изображения Kodak размерами 768×512 или 512×768 пикселей [8]. Стенд имел характеристики Apple M3, 8 ГБ ОЗУ, macOS 26.5; FFmpeg 8.0.1, libaom, libwebp, libopenjpeg, libjxl и libheif. Для JPEG проверено девять настроек, для остальных форматов — по семь: 44 варианта на изображение и $24 \times 44 = 1\,056$ строк “качество—размер”.

Эталон и декодированный результат приводились к 8-битному цветовому представлению YUV 4:4:4. Основной метрикой служил SSIM по яркостному каналу [7], дополнительной — PSNR. Для каждой пары “изображение–формат” выбирался файл минимального размера, удовлетворяющий единому порогу качества:

$$bpp = \frac{8S}{W \cdot H}, \quad (1)$$

$$q^i(f, i) = \arg \min \{bpp(f, q, i) \vee SSIM_Y(f, q, i) \geq 0,95\} \quad (2)$$

После отбора осталось $24 \times 6 = 144$ конфигурации. Кодирование и декодирование каждой из них измерялись пять раз после прогрева; порядок перемешивался с фиксированным seed. Wall-clock-время включало запуск процесса. В итоге сформировано $144 \times 5 = 720$ временных наблюдений.

Экспериментальной единицей считалось изображение. Показатели представлены медианами, неопределённость удельного объёма — 95 %-ными бутстреп-интервалами по 10 000 повторных выборок. Это сохраняет парную структуру сравнения и ограничивает влияние отдельных высокодетализированных сценариев.

Поскольку значения времени различались более чем на порядок, показатели x_k нормировались после логарифмирования:

$$z_k(f) = \frac{\ln\left(\frac{x_k(f)}{x_{k,min}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{k,max}}{x_{k,min}}\right)} \quad (3)$$

Индекс совокупных затрат определялся выражением:

$$I(f) = 0,45 * z_{bpp}(f) + 0,25 * z_{enc}(f) + 0,30 * z_{dec}(f) \rightarrow \min \quad (4)$$

Вес 0,45 отражает приоритет сетевого объёма, а суммарный вес времени 0,55 — интерактивность обработки. Устойчивость результата проверялась по 231 тройке неотрицательных весов с шагом 0,05 и единичной суммой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

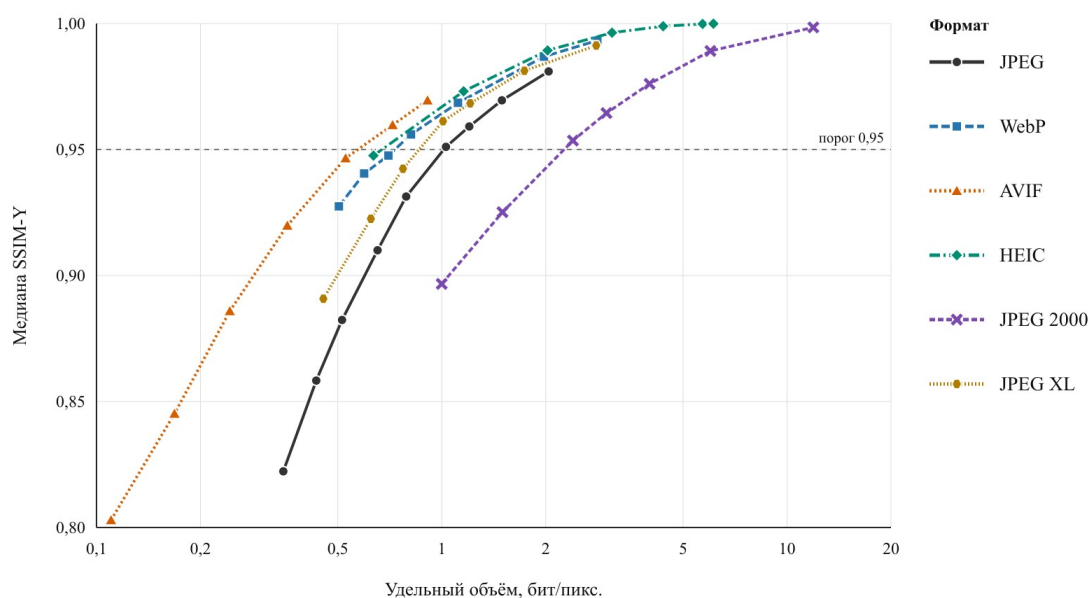


Рис. 1. Медианные зависимости SSIM-Y от удельного объёма для шести форматов

Кривые на рис. 1 показывают, что преимущество формата зависит от диапазона качества. При $SSIM-Y \geq 0,95$ минимальный медианный объём получил AVIF — 0,751 бит/пикс. Далее следуют WebP — 0,934, HEIC — 0,964, JPEG XL — 1,107, JPEG — 1,316 и JPEG 2000 — 2,400 бит/пикс. Парная медиана сокращения относительно JPEG составила 39,8 % для AVIF, 27,8 % для WebP и 20,1 % для HEIC.

Таблица 1. Медианные показатели отобранных конфигураций

Формат	bpp [95 % ДИ]	Кодирование, мс	Декодирование, мс	I
JPEG	1,316 [0,957–1,424]	85,7	69,3	0,217
WebP	0,934 [0,743–1,228]	119,8	79,0	0,178
AVIF	0,751 [0,597–0,894]	1331,1	80,2	0,320
HEIC	0,964 [0,846–1,173]	541,9	78,5	0,325
JPEG 2000	2,400 [2,397–3,000]	213,2	128,9	0,833
JPEG XL	1,107 [0,861–1,432]	101,0	91,8	0,301



Рис. 2. Сопоставление объёма, времени обработки и индекса совокупных затрат

По интегральному критерию лидировал WebP ($I=0,178$), затем JPEG ($I=0,217$). AVIF дал меньший файл, но кодировался 1331,1 мс против 119,8 мс у WebP; HEIC — в 4,5 раза дольше WebP. JPEG XL уступил WebP по объёму и декодированию, JPEG 2000 — по совокупности показателей.

В 231 наборе весов JPEG лидировал в 57,1 % случаев, WebP — в 26,8 %, AVIF — в 16,0 %. AVIF предпочтителен при приоритете трафика, JPEG — времени, WebP — баланса требований.

Практически AVIF целесообразен для подготовленных ресурсов, WebP — для динамической генерации, JPEG — как временная граница.

Ограничения: локальный стенд, учёт запуска процесса, тёплый кэш и отсутствие субъективной панели; абсолютные значения требуют проверки на смартфоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гипотеза исследования подтверждена, что минимальный объём файла и минимальные совокупные затраты обеспечиваются различными форматами. При едином пороге структурного качества AVIF показал наименьший медианный удельный объём — 0,751 бит/пикс., тогда как WebP обеспечил минимальное значение интегрального индекса ($I=0,178$). JPEG чаще лидировал при увеличении веса временных затрат, что подтверждает зависимость итогового выбора от принятой системы приоритетов. Следовательно, формат сжатия целесообразно выбирать с учётом не только размера файла, но и профиля доставки контента, времени кодирования и допустимой задержки декодирования на клиентском устройстве. Предложенная методика позволяет формализовать такой выбор и может применяться при проектировании мобильных клиентских приложений с различными сценариями обработки визуального контента. Код, 1 056 строк “качество–размер“, 720 временных наблюдений, агрегированные результаты и контрольные суммы SHA-256 приложены.

Использованные источники:

1. ITU-T. Information technology — Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements and guidelines. Recommendation T.81. Geneva, 1992. URL: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?id=2633> (дата обращения: 06.06.2026).
2. Zern J., Massimino P., Alakuijala J. WebP Image Format. RFC 9649. IETF, 2024. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9649.html> (дата обращения: 09.06.2026).

3. Guyon Y., Barnes L., Chang W.-T. AV1 Image File Format (AVIF). Version 1.2.0. Alliance for Open Media, 2025. URL: <https://aomediacodec.github.io/av1-avif/v1.2.0.html> (дата обращения: 10.06.2026).
4. ISO/IEC 23008-12. Information technology — High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments — Part 12: Image File Format. Geneva: ISO, 2022.
5. ITU-T T.800 — ISO/IEC 15444-1:2024. Information technology — JPEG 2000 image coding system: Core coding system. Geneva, 2024.
6. Alakuijala J., Sneyers J., Versari L., Wassenberg J. JPEG XL Image Coding System: White Paper. Version 2.0. ISO/IEC JTC 1/SC29/WG1 N100400, 2023. URL: <https://ds.jpeg.org/whitepapers/jpeg-xl-whitepaper.pdf> (дата обращения: 18.06.2026).
7. 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. Vol. 13, No. 4. P. 600–612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861.
8. Eastman Kodak Company. Kodak Lossless True Color Image Suite: 24 lossless PNG images. URL: <https://r0k.us/graphics/kodak/> (дата обращения: 27.06.2026).