

Выбор кодека для видеокодирования цифрового контента

Д.В. Гадасин¹, В.В. Елина¹, Р.В. Гришин¹, А.В. Алёшинцев²

¹Московский технический университет связи и информатики, Москва

²Московский государственный строительный университет, Москва

Аннотация: Выбор лучшего способа сжатия видео становится особенно важным, потому что объем онлайн-видео стремительно растет. По прогнозам, к 2026 году люди будут смотреть на 82% больше видео через интернет, чем в 2020-м. Это значит, что нужно найти компромисс между качеством изображения, скоростью обработки и размером файлов. Чтобы добиться нужных параметров, важно грамотно подобрать кодек.

В работе произведено сравнение пяти популярных кодеков — MPEG-2, MPEG-4, VP9, MJPEG и ProRes. Каждый из них по-своему быстро сжимает видео, даёт разный размер файла и разное качество картинки. Ставилась цель — выяснить, какой кодек лучше всего подходит для разных задач: видеозвонков, профессиональной съемки и онлайн-трансляций.

Для экспериментов использовался сервер с четырьмя ядрами процессора, 8 ГБ оперативной памяти и SSD на 80 ГБ. Проведены измерения, как быстро каждый кодек работает, какой размер выходного файла получается и каково качество видео. По итогам этих испытаний составлены рекомендации, какой кодек выбирать и как его можно улучшить в разных сценариях.

Ключевые слова: видеокодек, MPEG-2, MPEG-4, VP9, MJPEG, ProRes, AVC, сжатие, кодирование.

Введение. Согласно данным Cisco Visual Networking Index (VNI), объем потребительского интернет-видеотрафика вырос в 4,3 раза с 2017 по 2022 год, и к 2022 году составил около 240,2 эксабайта в месяц, что эквивалентно 82 миллиардам DVD-дисков в месяц. Также прогнозируется, что к 2026 году трафик увеличится на 82% по сравнению с 2020 годом. Видеоконтент в настоящее время составляет около 82% всего интернет-трафика, что обуславливает критическую важность выбора эффективных алгоритмов видеокодирования.

Актуальность оптимизации видеокодирования определяется необходимостью обработки растущих объемов потокового видеоконтента в условиях ограниченных пропускных способностей сетей связи. Современные видеокодеки содержат более 50 настраиваемых параметров, что существенно усложняет задачу оптимального выбора конфигурации кодирования.

Процесс видеокодирования представляет собой ключевой этап цифровой обработки видеосигналов в системах передачи данных, эффективность кодирования напрямую зависит от внешних параметров системы: пропускной способности канала связи, вычислительных ресурсов устройств, характеристик сетевой инфраструктуры, разрешения и динамических свойств обрабатываемых видеосцен.

Российские исследователи выделяют, что различные условия кодирования одного видеофрагмента приводят к существенным различиям в объемах результирующих файлов и требованиях к вычислительным ресурсам [1-3]. При этом динамичные видеосцены требуют применения более совершенных алгоритмов сжатия по сравнению со статичными изображениями, с применением определённых правил [4].

Выбор алгоритма видеокодирования оказывает определяющее влияние на эффективность обработки мультимедийного контента. Современные алгоритмы компрессии оцениваются по трем основным критериям: скорости выполнения кодирования, степени сжатия данных и качеству восстанавливаемого изображения. Применение конкретного кодека определяется спецификой решаемых задач — от организации видеосвязи в реальном времени до профессиональной обработки контента или потоковой передачи данных [5, 6], с учётом маршрута [7].

Для комплексной оценки производительности кодеков в практических условиях необходимо проведение экспериментальных исследований, учитывающих как однопоточные режимы обработки, так и многозадачные сценарии использования [8]. Анализ результатов базируется на ключевых показателях эффективности: временных характеристиках обработки, степени компрессии выходных данных и объективных метриках качества видеоизображения, включая PSNR (пиковое отношение сигнал-шум) и SSIM (индекс структурного сходства).

Такой подход позволяет определить оптимальные решения для заданных параметров видеопотоков и рабочих сценариев [9, 10]. В рамках данного исследования определим следующие характеристики алгоритмов видеокодирования: временная эффективность кодирования — скорость выполнения алгоритмов компрессии; степень сжатия данных — отношение объемов исходного и сжатого видеофайла; качественные характеристики изображения - разрешение, частота кадров, глубина цветопередачи и уровень компрессии.

Для проведения экспериментального исследования создана испытательная конфигурация, включающая три основных компонента: источник видеоданных, вычислительную систему для обработки и устройство архивирования преобразованных видеофайлов. В качестве исходного материала использовался видеофайл в формате MP4 с битрейтом 1843 кбит/с, разрешением 576×360 пикселей, частотой 10 кадров в секунду, закодированный с использованием алгоритма AVC.

На сервере осуществляется преобразование данного потока в форматы различных видеокодеков. Процесс преобразования включает применение специализированных алгоритмов обработки, основными анализируемыми параметрами которых являются: коэффициент компрессии, изменение пространственного разрешения и модификация временного разрешения. Вычислительная система реализована на базе четырехъядерного процессора с тактовой частотой 3,3 ГГц, 8 ГБ оперативной памяти и твердотельного накопителя NVMe объемом 80 ГБ. Структурная схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Блок-схема эксперимента на рис. 2.

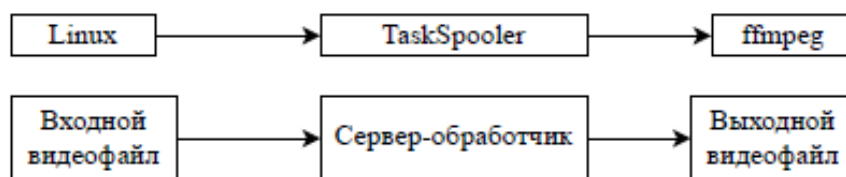


Рис. 1. – Структурная схема стенда



Рис. 2. - Блок-схема эксперимента

Экспериментальная методика. Включает четыре последовательных этапа: подготовку видеоданных, настройку программно-аппаратного окружения, выполнение кодирования и сбор метрик для последующего анализа. В качестве исходного материала используется видео в формате AVC (H.264) с разрешением 1920×1080 , частотой 29,97 кад/с (NTSC), битрейтом 12 Мбит/с, цветовым пространством YUV 4:2:0 (8 бит), без звуковой дорожки.

Этап подготовки данных начинается с накопления и предварительной обработки видеоматериала, на этой стадии выполняется контроль качества исходных кадров, удаление дубликатов и артефактов, а также преобразование контейнерных форматов и генерация метаданных для учёта параметров ролика. Данной процедурой обеспечивается корректность и полнота исходного массива, что критично для надёжности результатов.

Конфигурирование рабочей среды предусматривает установку и настройку необходимых инструментов (в том числе FFmpeg) и кодеков MPEG-2, MPEG-4, VP9, MJPEG и ProRes. Выбор комбинации стандартов и параметров компрессии позволяет найти оптимальный компромисс между качеством изображения и объёмом выходных файлов. По завершении обработки фиксируются ключевые атрибуты выходных файлов: разрешение, кадровая частота, битрейт и контейнерный формат, что даёт возможность оценить и сравнить производительность кодеков.

Процесс кодирования организуется в виде алгоритмической цепочки. Сначала происходит декодирование входного потока в промежуточный формат, после чего устанавливаются целевые параметры компрессии и

запускается режим многопоточной обработки, применение параллельных вычислений существенно ускоряет процедуру без значимого снижения качества. Завершающая стадия заключается в постобработке — проверке целостности, мониторинге метрик и журналировании операций. Логическая модель обработки видеокодеков представлена на рис. 3.

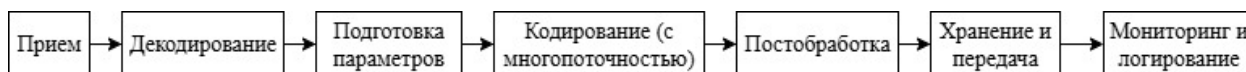


Рис. 3. – Логическая модель обработки видеокодеков

Сбор и анализ данных заключается в выгрузке готовых видеофайлов в систему долговременного хранения, откуда они извлекаются для измерения объективных показателей: скорости кодирования, коэффициента сжатия и качества изображения (PSNR, SSIM) в различных сценариях использования. Такой подход обеспечивает комплексную оценку эффективности каждого кодека в практических условиях.

Формула (1) показывает отношение размера видеофайла, сжатого при помощи определенного кодека, к размеру файла исходного видео и называется степенью сжатия [8], рассчитываемой по формуле:

$$C = R / P \quad (1)$$

где: C – степень сжатия файла, P – размер сжатого файла, R – размер исходного файла.

Сценарий многопоточного кодирования. Данный сценарий предназначен для сравнительного анализа производительности видеокодеков в однопоточном и многопоточном режимах. Испытания проводятся с исходным видеопотоком формата AVC (H.264) разрешением 1920×1080 пикселей, частотой 29,97 кад/с (NTSC), битрейтом 12 Мбит/с, цветовым пространством YUV 4:2:0 (8 бит), без звуковой дорожки.

В каждом тесте исходный файл обрабатывается кодеками libx265 (H.265), MPEG-2, MPEG-4, VP9, MJPEG и ProRes с использованием 1 и 4 рабочих потоков. На вход подается заранее подготовленный материал, а

каждый поток кодирует по 600 кадров для статистической достоверности результатов. Этапы включают: приём видеопотока, декодирование, параллельное кодирование заданным числом потоков, мониторинг fps, общее время обработки и размер выходного файла, а также сохранение результата в файловое хранилище для последующего анализа.

Сценарий обработки коротких видео. В этом сценарии исследуется эффективность кодеков при обработке видеороликов длительностью до 1 минуты (≈ 600 кадров), характерных для стриминга и социальных сетей. Входные файлы имеют разрешение 576×360 или 1920×1080 пикселей, битрейт от 1,843 Кбит/с до 12 Мбит/с, частоту 10 или 29,97 кад/с, формат YUV 4:2:0 (8 бит), без аудио.

Каждый видеоролик кодируется кодеками MPEG-2, MPEG-4, VP9, MJPEG и ProRes с одинаковым числом прогонов для обеспечения статистики. Процедура включает загрузку исходника, настройку битрейта и разрешения, последовательное кодирование, фиксацию fps, размера файла и выходного формата, а также сохранение результатов для дальнейшего сравнения.

Сценарий обработки цветного динамичного видео. Сценарий моделирует кодирование динамичных цветных сцен высокого разрешения (1920×1080 , 29,97 кад/с, 12 Мбит/с, YUV 4:2:0, 8 бит, без аудио). Для эксперимента используется фрагмент длиной ≈ 1 минута (1800 кадров).

После предварительной очистки и коррекции аномалий видеопоток загружается, кодируется кодеками MPEG-2, MPEG-4, VP9, MJPEG и ProRes с фиксацией скорости в кратности реального времени, размера выходного файла и качества сжатия. Результаты накапливаются для расчёта средних значений, стандартных отклонений и ковариаций, что позволяет оценить стабильность алгоритмов в условиях высокой динамики и цветного содержимого.

Результаты экспериментальных исследований. При обработке 600-кадрового фрагмента с применением многопоточности все кодеки продемонстрировали значительное ускорение от 30% до 60%.

1. libx265: 4 потока 232 fps, 2,58 с, 118 КБ при 2,84 кбит/с; 1 поток – 156 fps, 3,83 с.
2. MPEG-2: 4 потока 180 fps, 3,33 с, 216 КБ при 5,2 кбит/с; 1 поток – 110 fps, 5,45 с.
3. MPEG-4: 4 потока 210 fps, 2,86 с, 130 КБ при 3,1 кбит/с; 1 поток – 140 fps, 4,29 с.
4. VP9: 4 потока – 120 fps, 5 с, 105 КБ при 2,5 кбит/с; 1 поток – 75 fps, 8 с.
5. MJPEG: 4 потока – 300 fps, 2 с, 250 КБ при 6,7 кбит/с; 1 поток – 180 fps, 3,33 с.
6. ProRes: 4 потока – 250 fps, 2,4 с, 400 КБ при 10,5 кбит/с; 1 поток – 160 fps, 3,75 с.

Эксперименты с короткими видео, представленные в таблице № 1 показали, что кодеки демонстрируют разные компромиссы между скоростью и степенью сжатия: наиболее высокая скорость у MJPEG и ProRes, а оптимальное сжатие при приемлемой скорости — у MPEG-4 и libx265 (H.265). Контрольные метрики включали fps (кратность реального времени), размер файла и относительный битрейт в каждом сценарии, что позволило выявить лучшие решения для задач потокового вещания и профессиональной обработки материалов.

Нулевая величина fps обусловлена тем, что время кодирования оказалось слишком малым для корректного измерения частоты кадров в стандартных утилитах. Линейный график «ускорение многопоточности» представлен на рис.4.

Таблица № 1

Экспериментальные характеристики кодеков

Кодек	Обработано кадров	Скорость кодирования	fps	Размер файла
MPEG-2	600	132×	0,0	400 кб
MPEG-4	600	134×	0,0*	244 кб
VP9	600	16,6×	66	113 кб
MJPEG	600	161×	0,0*	980 кб
ProRes	600	124×	0,0*	1 520 кб

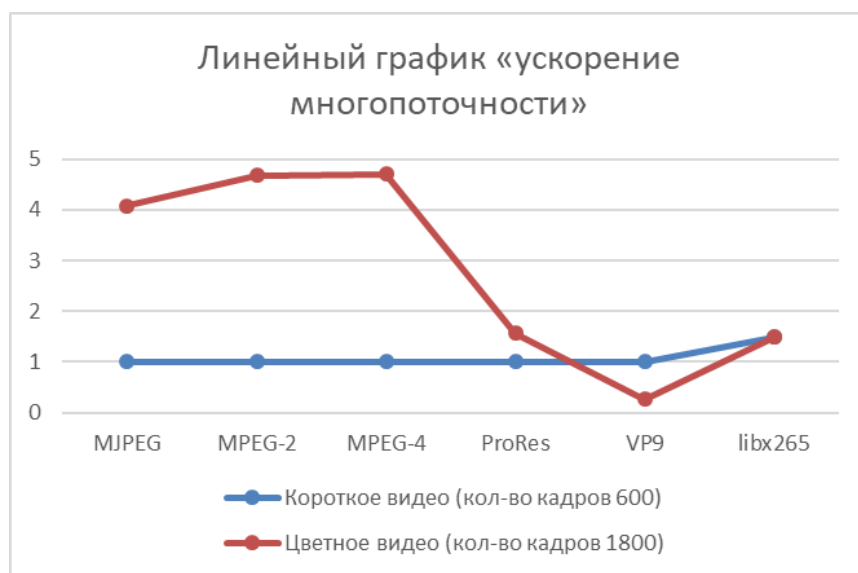


Рис. 4. – Линейный график «ускорение многопоточности»

В настоящем исследовании выполнена серия экспериментов по кодированию цветного динамического видеопотока формата AVC (NTSC) с разрешением 1920×1080 пикселей, битрейтом 12 Мбит/с и частотой 29,970 кадра/с. Для оценки производительности и эффективности сжатия были использованы пять видеокодеков: MPEG-2, MPEG-4 (H.264), VP9, MJPEG и Apple ProRes. Во всех испытаниях количество обрабатываемых кадров составляло 1800, что эквивалентно примерно 60 секундам исходного видео. Результаты кодирования цветного динамического видео представлены в таблице № 2.

Таблица № 2

Характеристики кодеков для цветного динамичного видео

Кодек	Обработано кадров	Скорость ($\times$ real-time)	Размер файла (байт)
MPEG-2	1800	4,68	22 921 194
MPEG-4	1800	4,70	18 636 486
VP9	1800	0,266	3 477 106
MJPEG	1800	4,08	106 062 502
ProRes	1800	1,57	1 238 140 034

Среднее значение (математическое ожидание) рассчитывается по формуле:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

где n — количество наблюдений, x_i — значение i -го измерения.

Стандартное отклонение (среднеквадратичное отклонение) для генеральной совокупности вычисляется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M)^2} \quad (3)$$

На основании полученных данных рассчитаны среднеквадратичные отклонения для показателей скорости и размера файлов:

Скорость кодирования:

1. Среднее значение: $M = 3,059$
2. Стандартное отклонение: $\sigma = 1,81$

Размер выходного файла:

1. Среднее значение: $M = 277\,847\,464$ байт
2. Стандартное отклонение: $\sigma = 4,81 \times 10^8$ байт

Исходные данные для ковариационного анализа сведены в таблицу № 3. В качестве параметров, по которым будет строиться матрица ковариации, были выбраны: средняя и медианная скорости кодирования, а также

минимальный, максимальный и средний размер файлов, который получается при кодировании определенным кодеком.

Таблица № 3

Исходные данные наблюдения

Наблюдение	Ср. скорость (×)	Мед. скорость (×)	Ср. объём (МБ)	Мин. объём (МБ)	Макс. объём (МБ)
libx265, 4 пот. (600 к.)	232.00	232.00	0.115	0.115	0.115
libx265, 1 пот. (600 к.)	156.00	156.00	0.115	0.115	0.115
Короткое цвет. (600 к.)	113.52	132.00	0.636	0.110	1.484
Цветное динамич. (1800 к.)	3.07	4.08	271.414	3.396	1209.336
Чёрно-белое (1800 к.)	3.30	4.51	233.516	3.174	1034.370

После того, как были определены параметры для построения матрицы ковариации была построена сама матрица. Для того, чтобы получить матрицу ковариации необходимо рассчитать среднеквадратичные отклонения для показателей скорости и размера файлов. Полученные значения сведены в таблицу № 4 .

$$Cov = \frac{1}{n} (X - M)^T (X - M) \quad (4)$$

Поскольку матрица масштабируется квадратично по коэффициенту преобразования признаков, для оптимизации таблицы размеры файлов переведены из байтов в мегабайты. Дисперсии объёмов стали меньше в 10^{12} раз, а ковариации отношения скорости к объёму в 10^6 раз.

Из таблицы видно, что быстрые кодеки обычно дают меньший размер файла, тогда как более медленные решения чаще приводят к более крупным выходным данным. Внутри групп метрик наблюдается согласованность, скоростные показатели тесно связаны между собой, так же, как и объёмные характеристики между собой.

Таблица № 4

Выборка основных метрик видеокодеков

Параметры	Средняя скорость	Медианная скорость	Средний объём (МБ)	Минимальный объём (МБ)	Максимальный объём (МБ)
Средняя скорость	7895.33	7895.79	-10.1686	-0.1277	-45.2163
Медианная скорость	7895.79	7947.90	-10.4809	-0.1317	-46.6082
Средний объём (МБ)	-10.1686	-10.4809	16.1500	0.2021	71.8535
Минимальный объём (МБ)	-0.1277	-0.1317	0.2021	0.0025	0.8989
Максимальный объём (МБ)	-45.2163	-46.6082	71.8535	0.8989	319.6887

Ковариационный анализ показывает выраженную отрицательную связь между скоростью и объемом, значит ускорение кодирования сопутствует снижению среднего размера файла. Объёмные параметры демонстрируют сильные зависимости, рост среднего объёма сопровождается ростом максимального, а повышение минимального объёма связано с увеличением пиковых значений.

Ниже в таблице № 5 собраны ключевые результаты серии экспериментов с кодеками на различном видеовходе.

На заключительном этапе, результаты эксперимента были спроецированы в единую систему координат, определяющую взаимосвязь между скоростью кодирования и финальным размером выходного файла для кодека разных типов (рис.5).

Таблица № 5

Результаты экспериментов

Кодек	Количество кадров	Скорость кодирования	Размер выходного файла
libx265 (4 потока)	600	232 кадра/с	118.097 кб
libx265 (1 поток)	600	156 кадров/с	118.097 кб

MPEG2	600	132x	400 кб
MPEG-4	600	134x	244 кб
VP9	600	16.6x	113 кб
MJPEG	600	161x	0.98 мб
ProRes	600	124x	1.52 мб
MPEG2 (цветное)	1800	4.68x	22,921,194 байт
MPEG-4 (цветное)	1800	4.7x	18,636,486 байт
VP9 (цветное)	1800	0.266x	3,477,106 байт
MJPEG (цветное)	1800	4.08x	106,062,502 байт
ProRes (цветное)	1800	1.57x	1,238,140,034 байт
MPEG2 (черно-белое)	1800	4.85x	21,091,954 байт
MPEG-4 (черно-белое)	1800	4.66x	21,091,954 байт
VP9 (черно-белое)	1800	0.291x	3,249,250 байт
MJPEG (черно-белое)	1800	4.51x	90,373,338 байт
ProRes (черно-белое)	1800	2.19x	1,059,795,714 байт
MPEG2 (длинные видео)	157,487	18.9x	308,228,216 байт
MPEG-4(длинные видео)	157,487	18.9x	306,789,452 байт
MJPEG (длинные видео)	157,487	10.8x	819,461,529 байт
ProRes (длинные видео)	157,487	10.8x	8,198,315,997 байт

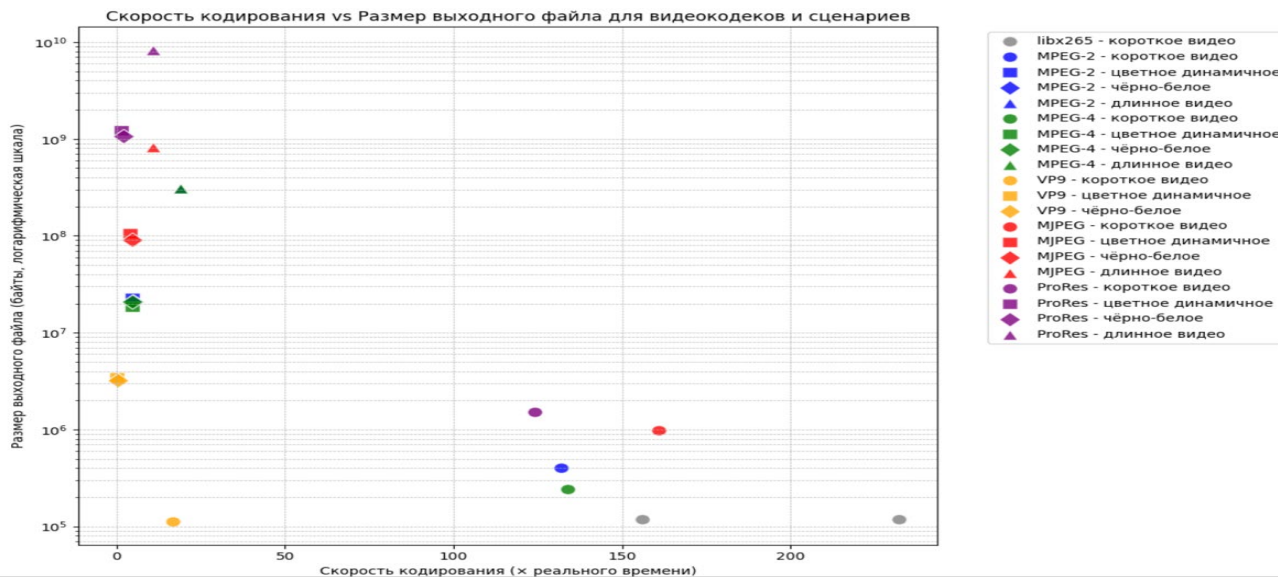


Рис. 5. – График «скорость кодирования на размер выходного файла»

Заключение

MPEG-4 выступает в качестве универсального и сбалансированного решения для широкого круга задач кодирования видео: он обеспечивает совместимость, приемлемую скорость обработки и умеренный размер файла.

Для коротких видеороликов (до 1 минуты) оптимальны два подхода: VP9 демонстрирует наилучшее качество при максимальном сжатии, хотя требует значительно больших вычислительных ресурсов и уступает по скорости;

MPEG-4 обеспечивает разумный компромисс между скоростью кодирования и размером выходного файла, что делает его предпочтительным выбором для оперативной обработки и передачи коротких фрагментов.

При кодировании цветного динамичного контента стандарта AVC (1920×1080, 12 Мбит/с, 29,97 кадр/с) наиболее сбалансированным оказался MPEG-4 — он сохраняет достойное качество видео и при этом не генерирует избыточно большие файлы. VP9 демонстрирует наименьший объём выходных данных, однако его низкая скорость кодирования делает его менее подходящим для реального времени.

В случае чёрно-белого динамичного видео MPEG-4 остаётся универсальным решением, позволяющим одновременно добиться высокой производительности и компактности файлов. MPEG-2, в свою очередь, показывает высокую скорость кодирования при чуть большем размере выходного файла, что делает его предпочтительным для сценариев, где критична именно скорость обработки.

Для длинных видеоматериалов (продолжительностью более часа) оптимальным выбором являются MPEG-2 и MPEG-4: оба кодека обеспечивают высокую скорость перекодирования и умеренный размер результирующего файла, позволяя эффективно обрабатывать большие объёмы данных без значительного расхода дискового пространства.

Рекомендации. Исходя из вышеуказанных экспериментов можно сказать, что при применении видеокодеков, рекомендуется учитывать следующие аспекты. Использование кодека MPEG-2 целесообразно для длительных видео, таких как фильмы и телевизионные передачи, а также для DVD-

видеопроизводства, поскольку он демонстрирует высокую скорость кодирования (18.9x для длинных видео) и обеспечивает приемлемое качество при умеренном размере файлов (308,228,216 байт). Данный кодек также обладает широкой поддержкой на различных устройствах и платформах, что делает его предпочтительным выбором в ситуациях, требующих совместимости с устаревшими системами или высокой скорости кодирования при обработке больших объемов видео. Кодек MPEG-4 является оптимальным для потокового видео, видеосвязи, онлайн-платформ, таких как YouTube, благодаря своему балансу между качеством, скоростью кодирования (18.9x для длинных видео) и размером выходного файла (306,789,452 байт). Он обеспечивает более эффективную компрессию по сравнению с MPEG-2, сохраняя высокое качество изображения, что делает его идеальным выбором в условиях ограниченной полосы пропускания. Наконец, кодек VP9 рекомендуется использовать в случаях, когда необходимо минимизировать размер файла при высоком качестве изображения, например, для онлайн-стриминга с высоким разрешением, он обеспечивает отличное качество сжатия, позволяя достигать меньших размеров выходных файлов (3,477,106 байт для цветного динамичного видео), хотя скорость кодирования может быть значительно ниже (0.266x для цветного видео). В связи с этим, VP9 является предпочтительным выбором для платформ, где скорость загрузки играет важную роль.

Выводы

Исходя из проведенного эксперимента можно предположить, что для задач, где ключевые приоритеты — скорость кодирования и умеренный размер итоговых файлов, практичнее выбирать MPEG-2 или MPEG-4, поскольку они обеспечивают быстрое кодирование и стабильную совместимость в типичных рабочих конвейерах. Кодеки ProRes и VP9 уступают по временным характеристикам при объемной перекодировки.

В случае ограниченной полосы пропускания и минимизации битрейта при сохранении высокого визуального качества рациональнее использовать VP9, так как он имеет более высокий коэффициент сжатия и следовательно, занимает меньше места в системах хранения данных, но в то же время требует существенно больше вычислительных и временных ресурсов.

Исходя из этого, если необходимо обеспечить скорость кодирования и быстрое установление совместимости, то желательно применять кодеки MPEG-2, MPEG-4, тогда как для сетевой доставки (с приоритетом качества при низком битрейте) лучше использовать VP9. Кодек ProRes следует рассматривать как промежуточный производственный формат, а не целевой для распространения.

Литература

1. Носенко Ф. А., Ким Е. Д., Еремин И. А., Власюк И. В. Исследование методов выбора параметров видеоконтрольных устройств для потребления медиаконтента стриминговых сервисов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2025. Т. 16, № 1. С. 4-13.
2. Керенцева Н. Д., Трофимов А. И., Галич С. В. Анализ видекодека VP9, применяемого в мультипротокольной платформе Jitsi // НБИ технологии. 2023. Т. 17, № 1. С. 29-34. DOI: 10.15688/NBIT.jvolsu.2023.1.5.
3. Богатырев Е. Н., Молодецких И. А., Ватолин Д. С., Галактионов В. А. Исследование качества сжатого видео после повышения разрешения: бенчмарк и метрика качества // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2022. № 81. С. 1-24. DOI: 10.20948/prepr-2022-81.
4. Вакурин И. С., Трemasова Л. А., Алешинцев А. В., Гадасин Д. В. Формирование поискового запроса для поиска информации в предметной области с применением Закона Ципфа и правила трёх сигм // Инженерный вестник Дона. 2025. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9866.

5. Ibraheem M., Dvorkovich A., Al-Khafaji I. A Comprehensive Literature Review on Image and Video Compression: Trends, Algorithms, and Techniques // *Ingénierie Systèmes Inf.* 2024. V. 29. pp. 863-876.

6. Moina-Rivera W., Gutiérrez-Aguado J., Garcia-Pineda M. Video quality metrics toolkit: An open-source software to assess video quality // *SoftwareX.* 2023. V. 23. Article 101427. DOI: 10.1016/j.softx.2023.101427.

7. Shvedov, A. V., Gadasin D. V., Alyoshintsev A. V. Segment routing in data transmission networks // *T-Comm.* 2022. V. 16, No. 5. pp. 56-62. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-5-56-62.

8. Бучатский А. Н., Лосев А. П. Особенности применения объективных метрик оценки качества видео для современных кодеков // *65-я НТК ППС 2025: Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 45-50.*

9. Алешинцев А. В., Санников В. Г. Оптимальный многочастотный модем для межмодульного взаимодействия систем гибридных коммуникаций цифрового города // *Инженерный вестник Дона.* 2024. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9610.

10. Донец Е. С. Анализ методов кодирования видеоинформации для условий передачи видео в канале с малыми скоростями // *Актуальные тенденции и инновации в развитии российской науки: Сборник научных статей. Том Ч. XI. Москва: Издательство "Перо", 2021. С. 61- 68.*

References

1. Nosenko F. A., Kim Ye. D., Yereimin I. A., Vlasyuk I. V. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov.* 2025. V. 16, № 1. pp. 4-13.

2. Kerentseva N. D., Trofimov A. I., Galich S. V. *NBI tekhnologii.* 2023. V. 17, № 1. pp. 29-34.

3. Bogatyrev Ye. N., Molodetskikh I. A., Vatolin D. S., Galaktionov V. A. Preprinty IPM im. M.V. Keldyshat'. 2022. № 81. pp. 1-24.
4. Vakurin I. S., Tremasova L. A., Alyoshintsev A.V., Gadasin D.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9866.
5. Ibraheem M., Dvorkovich A., Al-Khafaji I. [A Comprehensive Literature Review on Image and Video Compression: Trends, Algorithms, and Techniques]. Ingénierie Systèmes Inf. 2024. V. 29. pp. 863-876.
6. Moina-Rivera W., Gutiérrez-Aguado J., Garcia-Pineda M. [Video quality metrics toolkit: An open-source software to assess video quality]. SoftwareX. 2023. V. 23. pp. 101427.
7. Shvedov A.V., Gadasin D.V., Alyoshintsev A.V. T-Comm: Telekommunikacii i transport. 2022. V. 16. № 5. pp. 56-62.
8. Buchaskiy A. N., Losev A. P. 65-ya NTK PPS 2025: Sbornik nauchnykh statey. V. 3. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy im. prof. M.A. Bonch-Bruyevicha, 2025. pp. 45-50.
9. Alyoshintsev A.V., Sannikov V.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9610.
10. Donets Ye. S. Aktual'nyye tendentsii i innovatsii v razvitii rossiyskoy nauki: Sbornik nauchnykh statey. V. CH. XI. Moskva: Izdatel'stvo «Pero», 2021. pp. 61-68.

Дата поступления: 14.09.2025

Дата публикации: 29.10.2025