

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Шапиро Давид Александрович

**ФАЗОВЫЕ ВОДЯНЫЕ ЗНАКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ЗАЩИТУ
ЦИФРОВОГО ВИДЕОКОНТЕНТА В ИНФОРМАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССАХ**

2.3.8. Информатика и информационные процессы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Сергеев Владислав Викторович,
доктор технических наук, профессор

Самара – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1. МЕТОДЫ ВСТРАИВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В ВИДЕО.....	10
1.1. Анализ текущего состояния исследований и постановка задачи.....	10
1.2. Требования к ЦВЗ.....	25
1.3. Коррекция ошибок в процессе извлечения.....	28
1.4. Тестовые материалы.....	31
Выводы и результаты первого раздела.....	46
РАЗДЕЛ 2. БАЗОВЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ ВИДЕО ФАЗОВЫМИ ЦВЗ.....	48
2.1. Алгоритм встраивания фазовых ЦВЗ.....	48
2.2. Схема извлечения.....	49
2.3. Оценка фазы сигнала.....	51
2.4. Сглаживание исходного видеосигнала.....	53
2.5. Нормировка фазы.....	53
2.6. Сглаживание последовательности фаз.....	57
2.7. Оптимизация параметров алгоритма для качественного извлечения видео.....	58
2.8. Влияние параметров модели синтезированного видео на качество извлечения.....	63
Выводы и результаты второго раздела.....	66
РАЗДЕЛ 3. УПРОЩЁННЫЙ МЕТОД ВСТРАИВАНИЯ ФАЗОВЫХ ЦВЗ... 68	68
3.1. Модификация алгоритмов встраивания и извлечения ЦВЗ.....	68
3.2. Оценка вычислительной сложности.....	69
3.3. Дополнительные процедуры обработки сигнала.....	70
Выводы и результаты по третьему разделу.....	73
РАЗДЕЛ 4. СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ВСТРАИВАНИЯ ФАЗОВЫХ ЦВЗ.. 75	75
4.1. Формирование ЦВЗ для спектрального метода.....	75
4.2. Изменение в алгоритме встраивания и извлечения.....	77

4.3. Оптимизация параметров для наиболее эффективной работы спектрального метода.....	79
4.4. Эффективность спектрального метода.....	82
Выводы и результаты по четвертому разделу.....	83
РАЗДЕЛ 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ВСТРАИВАНИЯ ФАЗОВЫХ ЦВЗ И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ.....	85
5.1. Эффективность работы метода при сжатии с потерями.....	85
5.1.1. Устойчивость базового метода к сжатию с потерями.....	85
5.1.2. Работа упрощённого метода при сжатии с потерями.....	97
5.1.3. Эффективность спектрального метода при сжатии с потерями.....	106
5.2. Корректность работы метода при распространённых атаках.....	117
5.2.1. Устойчивость метода к атаке зашумления.....	117
5.2.2. Устойчивость метода к потере синхронизации.....	123
5.2.3. Устойчивость метода к распространённым атакам.....	128
5.3. Сравнение представленных алгоритмов.....	129
5.4. Сравнение метода с существующими.....	132
Выводы и результаты по пятому разделу.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В XXI веке межпользовательская коммуникация в сети Интернет получила широкое распространение, в частности, увеличился объём обмена мультимедийными данными. Одним из наиболее востребованных видов мультимедийного контента являются видеоматериалы, которые могут использоваться для передачи между конкретными пользователями, размещения в открытом доступе, а также для продажи на специализированных платформах. Однако с развитием технологий увеличились риски несанкционированного использования видеоконтента в ходе информационных процессов, что может наносить как репутационный, так и финансовый ущерб правообладателю. В связи с этим актуальной задачей является разработка и внедрение эффективных механизмов защиты цифрового контента в информационных процессах.

В ходе жизненного цикла цифровое видео часто подвергается множеству преобразований: сжатию, фильтрации и изменению формата. Важной задачей становится обеспечение устойчивой защиты цифрового видеоконтента на всех этапах его существования в информационной среде.

В последние десятилетия для этих целей часто используются цифровые водяные знаки (ЦВЗ) — специальные метки, встраиваемые в цифровой контент с целью защиты информации (например, авторских прав или идентификации источника) и подтверждения целостности данных. В таком случае, даже если видео было скопировано или обработано, в нём все равно будет содержаться скрытая информация, и при извлечении ЦВЗ можно будет идентифицировать правообладателя.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и исследование метода защиты видео, применимого к широкому классу кодеков, обеспечивающего стойкость к распространённым атакам за счёт распределения ЦВЗ по всему объёму видеопотока.

Для достижения цели необходимо решить следующие основные задачи.

1. Анализ существующих методов активной (с использованием ЦВЗ) защиты цифровых видео, выработка требований к разработке нового метода.
2. Разработка нового метода и вычислительных алгоритмов защиты цифровых видео с использованием ЦВЗ.
3. Исследование работоспособности и оценка эффективности разработанного метода и алгоритмов защиты цифровых видео с использованием ЦВЗ.
4. Апробация разработанного метода и алгоритмов на реальных видеофайлах, проведение исследования предложенных алгоритмов и разработка рекомендаций по их выбору в зависимости от сферы применения.

Практическая значимость работы

Разработанные метод и алгоритмы могут быть использованы в составе информационных систем, обеспечивающих устойчивую защиту цифрового видеоконтента с ограниченным доступом и предотвращающих его несанкционированное использование при передаче и обработке.

Методология и методы исследования

В диссертационной работе используются методы статистического анализа, цифровой обработки сигналов, стеганографии и анализа изображений.

Научная новизна результатов

1. Предложен новый принцип и разработан метод встраивания в видео “фазовых” ЦВЗ, исключающий возможность извлечения защитной информации из отдельного кадра. Метод заключается в добавлении в каждый пиксель видеокadra, рассматриваемый как функция времени, слабой синусоиды с индивидуальной фазой. При этом сам ЦВЗ представляет собой двумерное поле (изображение) фаз в кадре.

2. Разработан алгоритм извлечения фазового ЦВЗ с помощью узкополосной цифровой фильтрации и постепенного накопления информации по последовательности кадров.

3. Разработана модификация исходного метода по защите видео, дополнительно снижающая вычислительную сложность алгоритма извлечения за счет использования предельной частоты встраиваемой синусоиды.

4. Разработана модификация исходного метода защиты видео, обеспечивающая дополнительную стойкость метода за счёт использования вторичного спектрального контейнера для ЦВЗ.

5. Предложена статистическая модель цифровых видео, описывающая их свойства на уровне набора автокорреляционных функций, а также эвристические алгоритмы оценки параметров этой модели по реальным видеоданным.

6. Получены новые результаты экспериментальных исследований разработанного метода и алгоритмов, позволяющие оценить эффективность работы метода и алгоритмов на видеофайлах, синтезированных по предложенной статистической модели.

7. Получены новые результаты экспериментальных исследований разработанного метода и алгоритмов на реальных видеофайлах, показывающие высокую стойкость метода к сжатию с потерями, осуществляемому популярными кодеками MPEG-2, H.264 и H.265, а также к другим видам атак на видео.

На защиту выносятся:

1. Метод защиты цифрового видеоконтента с использованием фазовых ЦВЗ.

2. Алгоритмы извлечения фазового ЦВЗ из защищенного видео в результате постепенного накопления информации по последовательности кадров.

3. Модификация метода защиты цифрового видеоконтента, направленная на повышение вычислительной эффективности извлечения ЦВЗ.

4. Модификация метода защиты цифрового видеоконтента, дополнительно повышающая стойкость к атакам за счёт использования вторичного спектрального контейнера для ЦВЗ.

5. Статистическая модель цифровых видео, описывающая их свойства на уровне набора автокорреляционных функций, а также эвристические алгоритмы оценки параметров модели по реальным видеоданным.

6. Результаты экспериментальных исследований разработанного метода, подтверждающие эффективность метода на реальных и синтезированных видео.

7. Результаты экспериментальных исследований разработанного метода и алгоритмов, демонстрирующие стойкость метода к типовым атакам, включая сжатие с потерями.

Соответствие специальности

Область исследования соответствует направлениям исследований паспорта научной специальности 2.3.8. Информатика и информационные процессы в части пунктов:

1. Разработка компьютерных методов и моделей описания, оценки и оптимизации информационных процессов и ресурсов, а также средств анализа и выявления закономерностей на основе обмена информацией пользователями и возможностей используемого программно-аппаратного обеспечения.

3. Разработка методов и алгоритмов кодирования, сжатия и размещения информации для повышения эффективности и надежности функционирования инфокоммуникационных систем при её хранении и передаче.

15. Разработка новых интернет-технологий, включая средства поиска, анализа и фильтрации информации, в том числе методы и технологии, обеспечивающие безопасный интернет.

17. Разработка методов обеспечения надежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации; разработка основ теории надежности и безопасности использования информационных технологий.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математического и статистического аппарата, экспериментальными исследованиями, обсуждением результатов диссертации на международных и отечественных конференциях.

Основные результаты диссертации были представлены на 5 научных конференциях:

1. Международная конференция «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ, Самара, Россия) - 2022 год;
2. 11th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS, США) – 2023 год;
3. Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ, Самара, Россия) - 2024 год;
4. 12th International Conference on Signal Processing & Integrated Networks (SPIN, Индия) – 2025 год;
5. XI Международная научная конференция "Информационные технологии и нанотехнологии" (ITNT-2025, Самарканд, Узбекистан) – 2025 год.

По теме диссертации опубликовано восемь работ (далее работы автора диссертации обозначаются символом «*»). Из них две работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК, четыре работы опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и/или WebOfScience, а также зарегистрирована программа для ЭВМ № 2025660321 «Метод защиты видео с помощью фазовых цифровых водяных знаков».

Результаты диссертационной работы использованы:

1. При выполнении проекта Российского научного фонда № 22-71-1009 «Методы защиты перспективных типов и форматов данных цифровыми водяными знаками».

2. При выполнении проекта «Методы идентификации мобильных динамических объектов по оптическим изображениям», выполняемого в Самарском университете по государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ (шифр проекта FSSS-2026-0003).

3. В ряде хоздоговорных НИОКР в АО «Самара-Информспутник».

4. В учебном процессе кафедры геоинформатики и информационной безопасности Самарского университета (дисциплина «Цифровые водяные знаки и стеганография»).

Соответствующие акты использования результатов приведены в приложениях к диссертации.

РАЗДЕЛ 1. МЕТОДЫ ВСТРАИВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В ВИДЕО

1.1. Анализ текущего состояния исследований и постановка задачи

К наиболее распространённым методам защиты видеоинформации относят юридическую регистрацию авторских прав, технологию DRM (Digital Rights Management) [1] и нанесение цифровых водяных знаков (ЦВЗ) [2]. Однако юридическая защита требует больших временных затрат на регистрацию прав, а также не гарантирует невозможность использования видеоизменённого контента злоумышленником. Использование системы DRM ограничивает различные действия с видео: копирование, модификацию и просмотр в рамках специальных платформ. Доступ к видео открывается сгенерированным при покупке ключом, соответственно, получить доступ к контенту без знания ключа невозможно. Однако такая система защиты не позволяет защититься от записи видео с экрана с использованием специализированных программ или съёмки экрана со стороннего устройства. В отличие от DRM, технология ЦВЗ не ограничивает доступ к видеоконтенту, а непосредственно изменяет его структуру, что позволяет отслеживать источник распространения и выявлять факты нарушения авторских прав даже после обработки видео.

ЦВЗ – это специальная метка, встраиваемая в цифровой контент с целью защиты информации и подтверждения целостности самой информации. Тем самым, даже если видео было скопировано незаконным путём, то в нём все равно будет содержаться встроенная скрытая информация, и при извлечении ЦВЗ правообладатель сможет доказать свои права на защищенный контент. Также ЦВЗ используются в рекламном бизнесе, чтобы рекламодатель мог в автоматическом режиме отслеживать появление своего видео в телевидении в необходимом слоте и в требуемом объёме.

ЦВЗ классифицируются на видимые и невидимые, причем оба типа могут применяться для защиты видеоконтента [3]. Их основное различие заключается в том, что видимые ЦВЗ воспринимаются зрительно, тогда как невидимые остаются незаметными для человеческого глаза. Видимые водяные знаки обладают рядом ограничений, среди которых можно выделить ухудшение визуального восприятия контента, а также возможность их удаления или маскирования путем обработки отдельных кадров. Поэтому в данной работе будут рассматриваться именно возможность встраивания ЦВЗ, не видимого для человеческого глаза. Также ЦВЗ подразделяются на стойкие, хрупкие и полухрупкие [4] в зависимости от способности противостоять разным типам атак. В рамках информационных процессов, где видео подвергается обработке и передаче, необходимы именно стойкие ЦВЗ. Они позволяют решать задачи защиты (например, подтверждение авторских прав) даже после модификации контента. Поэтому в дальнейшем в работе речь будет идти о стойких невидимых ЦВЗ.

На рисунке 1 показан классический треугольник, описывающий наиболее важные показатели [5] систем скрытого внедрения информации, к которым относят и системы встраивания ЦВЗ: незаметность, емкость и надежность. Эти три показателя противоречат друг другу, поэтому при выборе метода встраивания стремятся достичь компромиссных показателей.

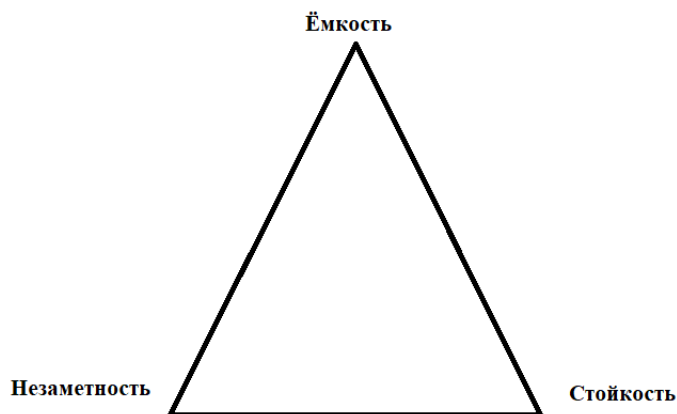


Рисунок 1 – Требования к методу сокрытия информации

Прежде чем рассматривать методы встраивания ЦВЗ, стоит отметить особенность видеоданных в сравнении с другими типами представления информации. В отличие от защиты изображений, важным требованием к ЦВЗ для видео является стойкость к возможному пропуску кадров и сцен, а также стойкость к сжатию видео с потерями.

В настоящее время существует множество различных методов встраивания ЦВЗ в видеоданные. Они могут быть глобально разделены [6,7] на два различных класса по типу встраивания: методы встраивания ЦВЗ в коэффициенты при сжатии видеопотока конкретным кодеком и методы встраивания ЦВЗ, не зависящие от выбора кодека. В случае использования кодек-независимого подхода можно выделить два подкласса: встраивание в каждый кадр и встраивание в группу кадров видео. Покадровое встраивание же подразумевает варианты встраивания ЦВЗ как в пространственную область, так и в частотную. Для встраивания в группу кадров могут использоваться как нейронные сети, так и аналитические модели. При использовании кодек-зависимых методов встраивание осуществляется в коэффициенты, получаемые в процессе кодирования (например, коэффициенты преобразования при сжатии). Выбор конкретных коэффициентов может осуществляться как вручную, так и с помощью нейронных сетей. Наглядно схема классификации текущих методов представлена на рисунке 2. Ниже подробнее описана каждая из представленных групп.

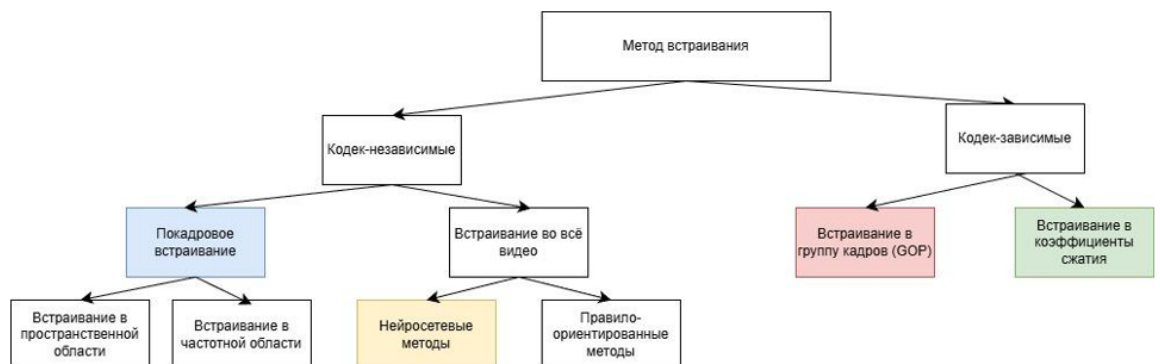


Рисунок 2 – Классификация методов встраивания ЦВЗ в видео

1.1.1. Встраивание ЦВЗ с помощью покадровых методов

Методы, независимые от выбора конкретного кодека можно разделить на два типа: те, которые осуществляют встраивание в каждый кадр видео и те, которые используют выборочное число кадров (поиск опорных кадров или групп кадров внутри сцены).

При покадровом встраивании водяного знака каждый кадр видео обрабатывается отдельно, учитывая только его пространственные характеристики. Такие методы делятся на два типа: одни внедряют метку непосредственно в пиксельные значения (пространственная область), а другие — в частотную область изображения.

Встраивание в пространственной области

Рассмотрим методы, основанные на встраивании в пространственную область, то есть ситуации, когда ЦВЗ встраивается независимо в каждый кадр исходной видеозаписи путем прямого изменения значения пикселей кадра. Преимуществом такого класса методов является простота его реализации, низкая вычислительная сложность, а также возможность встраивания большого объёма данных.

Одним из наиболее популярных методов из набора методов является метод встраивания в наименее значимые биты (НЗБ-встраивание, LSB – в англоязычной литературе). Первоначально данный метод был предложен для обработки изображений [8], при адаптации к видео он применяется к каждому отдельному кадру. Принцип его работы заключается во внедрении дополнительной информации, в частности цифрового водяного знака, в наименее значимые разряды пиксельных значений, что позволяет внести изменения, незаметные для человеческого восприятия, при сохранении визуальной целостности контента. При такой реализации любое изображение (кадр видео) можно представить в виде совокупности битовых плоскостей:

$$C(n_1, n_2) = C_1(n_1, n_2) + 2 \cdot C_2(n_1, n_2) + \dots + 2^{K-1} \cdot C_K(n_1, n_2), \quad (1)$$

где n_1, n_2 – координаты в изображении, K – разрядность двоичного кода пикселей, C – исходное изображение.

При таком представлении изображения изменения вносятся, как правило, в последние три битовые плоскости. Основными недостатками такого метода являются низкая стойкость к зашумлению, контрастированию, сжатию, а также различным геометрическим искажениям изображения. Поэтому в дальнейшем появились методы [9,10], в основе которых также используется НЗБ, но вводятся дополнительные этапы обработки изображений. Однако предлагаемые методы также предполагают встраивание ЦВЗ в каждый кадр видео и не обеспечивают стойкость к зашумлению.

В публикациях [11,12] метод НЗБ используется для встраивания в видео хрупких ЦВЗ [13]. Однако хрупкие ЦВЗ предназначены не для защиты авторских прав в условиях различных атак, а для обнаружения изменений в изображении или видео, а их основная цель – выявлять модификации и обеспечивать аутентичность. Поэтому данные алгоритмы не могут быть использованы для решения поставленной задачи.

В статьях [14, 15] представлены альтернативные подходы к встраиванию ЦВЗ в пространственную область видео с использованием адаптивных масок. В указанных работах ЦВЗ встраивается с учетом маски яркости, чтобы минимизировать его видимость в кадре. Однако встраивание в каждый кадр единого паттерна ограничивает емкость встраивания, а также может приводить к атакам оценивания [16].

Таким образом, к достоинствам всех методов встраивания в пространственной области можно отнести низкую вычислительную сложность, т.е. простоту реализации. Однако к недостаткам этого метода - низкую стойкость к яркостным преобразованиям, зашумлению, сжатию и геометрическим атакам.

Встраивание в частотной области

В связи с высокой уязвимостью методов встраивания ЦВЗ в пространственной области к атакам, перечисленным выше, широкое

распространение получили методы встраивания в частотной области. Они основываются на изменении спектральных характеристик видео, что делает ЦВЗ более устойчивым к зашумлению и различным яркостным и геометрическим искажениям.

Перед встраиванием кадры видео преобразуются из пространственной области в частотную (спектральную) область при использовании одного из распространённых методов спектральных преобразований. К таким методам относят быстрое преобразование Фурье (БПФ, FFT) [17] дискретное вейвлет-преобразование (ДВП, DWT) [17], дискретное косинусное преобразование (ДКП, DCT) [17] и т.д. Часто наряду с указанными методами используется сингулярное разложение (SVD) [20].

Одним из преимуществ использования ДКП является высокая энергетическая компактность [21], т.е. при использовании ДКП большая часть энергии изображения сосредоточена в небольшом количестве низкочастотных коэффициентов. Поскольку ДКП используется в некоторых распространённых форматах сжатия, таких как JPEG [22], это делает алгоритм на его основе более устойчивым для сжатия. При таком подходе изображение, представленное в пространственной области, можно представить в частотной.

Обычно каждый кадр исходного изображения разбивается на блоки, а ДКП применяется отдельно к каждому блоку изображения [23,24]. Встраивание ЦВЗ происходит в полученные коэффициенты ДКП по одному биту информации в каждый блок.

Изначально данный алгоритм разрабатывался для встраивания ЦВЗ в изображения, поэтому его применение к видео представляет собой обобщение. В результате возникает уязвимость, связанная с возможностью независимого извлечения водяного знака из каждого кадра, что упрощает задачу злоумышленнику. Кроме того, поскольку метод, основанный на ДКП, используется в сжатии изображений по стандарту JPEG его устойчивость к сжатию другими видеокодеками может оказаться недостаточной.

Другим распространённым способом представления изображений в частотной области является ДВП. Это преобразование позволяет получить иерархическую декомпозицию изображения, разделяя его на поддиапазоны разной частоты. На первом уровне преобразования изображение разделяется на четыре компонента: низкочастотную (LL1), две среднечастотные (LH1, HL1) и высокочастотную (HH1) области, где LL1 содержит основную информацию об изображении. Далее декомпозиция продолжается на низкочастотном компоненте (LL1), формируя последующие уровни (LL2, HL2, LH2, HH2 и т. д.). На практике для встраивания ЦВЗ часто используют тройное [25,26] разбиение на компоненты DWT-3, а в работе [27] использовался алгоритм, основанный на пятиуровневом разложении. Для преобразования и разложения изображения на поддиапазоны частот используются различные вейвлет-фильтры, включая вейвлеты Хаара [28], Добеши [29] и биортогональные фильтры [30], что позволяет эффективно анализировать его временно-частотные характеристики.

Алгоритм встраивания, основанный на использовании ДВП, может иметь проблемы при сжатии кодеком H.264, в котором используется другое спектральное преобразование (ДКП), поэтому для повышения стойкости к сжатию иногда рассматриваются алгоритмы, комбинирующие ДКП и ДВП [31, 32].

Всё чаще при встраивании ЦВЗ используется метод SVD (Singular Value Decomposition – Сингулярное разложение) [33], который позволяет выделять внутренние характеристики матрицы, называемые сингулярными значениями. Преимуществом использования такого разложения является повышенная устойчивость к атакам зашумления и сжатия. SVD используется для представления матрицы (кадра видео) в виде произведения собственных векторов и сингулярных значений:

Поскольку метод SVD показал свою эффективность, то его используют совместно с описанными выше представлениями изображений и видео в

частотной области. Так, в работе [34] SVD используется в связке с ДВП, а в работе [35] используется комбинация всех трех методов: ДКП, ДВП и SVD.

Следует упомянуть о широком распространении искусственного интеллекта (ИИ) в области внедрения ЦВЗ в видео. Согласно материалам, приведенным в [7], ИИ может использоваться для решения следующих задач:

- 1) оптимизация параметров при встраивании;
- 2) оптимизация извлеченных значений признаков;
- 3) поиск оптимизированной области для внедрения ЦВЗ с целью повышения стойкости
- 4) достижение компромисса между стойкостью и незаметностью.

У описанных выше алгоритмов покадрового встраивания, как в пространственную, так и в частотную область, есть общий недостаток: при их реализации встраивание происходит независимо в каждый кадр изображения. Это позволяет злоумышленнику иметь возможность оценки ЦВЗ в каждом кадре независимо друг от друга, тем самым собирая статистику о структуре и особенностях самого ЦВЗ. Один из возможных способов оценки возможности определения паттерна ЦВЗ при помощи расчета ВКФ описывается в статье [36]. Выявление сильной корреляции повышает вероятность удаления или подделки ЦВЗ, в связи с чем актуальной становится задача распределения ЦВЗ во времени между несколькими кадрами.

1.1.2. Использование выборочного числа кадров для встраивания

Для устранения недостатка, связанного с возможностью анализа ЦВЗ в каждом кадре, были предложены алгоритмы, в которых встраивание водяного знака осуществляется лишь в ограниченное количество кадров. Основная идея такого подхода заключается в усложнении процесса извлечения ЦВЗ для злоумышленника, поскольку водяной знак присутствует не во всех кадрах. Дополнительно это позволяет снизить вычислительные затраты, так как при встраивании обрабатывается меньший объем данных. В качестве целевых

кадров могут использоваться, например, моменты смены сцен [26,37] или кадры, отобранные с помощью специализированных алгоритмов [38].

Так в [38] изложена типовая идея алгоритмов, позволяющих избежать возможность извлечения из любого кадра. На первом этапе с помощью ключа перемешиваются кадры исходной видеопоследовательности, из которых затем выбираются n кадров для встраивания ЦВЗ. Затем каждый из выбранных кадров представляется в частотной области (в работах [26,37] используется DWT, а в работе [38] используется LWT (lifting wavelet transform, восходящее вейвлет-преобразование). Затем область высоких частот разбивается на блоки, которые в свою очередь также перемешиваются. И в каждый из блоков встраивается ЦВЗ, представляющий бинарную последовательность, которая также перемешивается с использованием нового ключа.

Основной проблемой использования таких алгоритмов является возможные проблемы с синхронизацией, поскольку интерполяция кадров или их перестановка может приводить к разрушению встроенного ЦВЗ [39]. В качестве альтернативы рассмотренным методам существуют также подходы, использующие коды синхронизации [40].

Основным преимуществом подходов, используемых в [41-43] является встраивание кодов синхронизации с целью избежать атак, направленных на временной компонент видео. Рассмотрим известные алгоритмы, реализующие встраивание дополнительной информации о номере кадра.

В работе [41] встраивание ЦВЗ происходит в видео, сжатое кодеком MPEG-2, в коэффициенты ДКП. Однако алгоритм встраивания использует специальный код для решения проблемы синхронизации. Сам встраиваемый ЦВЗ является периодическим, т.е. встраивается периодическая последовательность на 8 секунд или 16 IDR-кадров (опорных кадров, следующих каждые 0,5 секунд).

Ранее в работе [42] описывался алгоритм использования в качестве кода синхронизации периодической бинарной последовательности. Предложенный алгоритм регулирует степень временной избыточности ЦВЗ по кадрам видео

с помощью двух параметров: периода α и числа повторений β . Период α определяет, через сколько кадров происходит сброс генератора ключей, задавая интервал между кадрами для повторной синхронизации. Параметр β указывает, сколько последовательных кадров маркируется одним и тем же ключом перед генерацией нового ключа. В работе приводится адаптивный алгоритм управления переходами между состояниями. Уменьшение α и увеличение β приводит к повышению устойчивости системы. Однако, если значение β слишком велико, временная избыточность ЦВЗ может резко снижаться: при динамичных сценах или монтажной склейки синхронизация теряется и ЦВЗ становится сложнее извлечь. Таким образом, использование адаптивного управления переходами состояния позволяет встраивать последовательности разной длины в разные фрагменты видео, тем самым снижая влияния атак и повышая точность обнаружения ЦВЗ даже в динамичных видео.

В работе [43] демонстрируется еще один из способов встраивания ЦВЗ с учетом кода синхронизации. В приведенной работе позиция для встраивания ЦВЗ определяется на основании четырех опорных кругов. Это сделано с целью, чтобы метод был устойчив к атакам обрезки или поворота видео. В указанной позиции встраивается ЦВЗ, включающий в себя бит синхронизации, в один из блоков ДКП канала яркости U.

В таком случае извлечение бит синхронизации не хранит информацию о номере кадра, но позволяет найти информацию о центре кадра, куда встраивалась информация о ЦВЗ.

Таким образом, предложенные алгоритмы защищают видео от атак, связанных с потерей синхронизации, позволяя в любой момент определить местоположение ЦВЗ в кадре и произвести его извлечение по выбранным координатам.

В представленной диссертации предлагается метод, который позволяет извлекать ЦВЗ только из видеопоследовательности, а не из отдельно взятого

кадра. В настоящий момент уже существуют работы [44-47], описывающие методы с подобным свойством.

Однако в работах [44, 47] используется неслепой алгоритм встраивания, то есть для извлечения ЦВЗ необходимо использовать оригинальное видео, а не только защищенное. Алгоритм, описанный в работе [47] предполагает встраивание ЦВЗ в группу кадров (GOP – group of pictures), то при этом максимальный размер GOP определяется размером встраиваемой последовательности. В таком случае извлечение будет проводиться путём усреднения извлеченной последовательности по N кадрам (длине GOP). Такой подход допускает возможность извлечения из одного кадра в случае его попадания в группу кадров с отсутствием динамики, а также серьезно ограничивает ёмкость встроенной информации.

1.1.3. Использование кодек-зависимых методов для встраивания ЦВЗ

Поскольку в реальных системах видео практически не используется в несжатом виде, широкое распространение получили методы, в основе которых лежит использование конкретного кодека. В большинстве из существующих кодеков используется комбинация из внутрикадрового и межкадрового сжатия. Изначально для сжатия использовался кодек MPEG-2 [48], основанный на классическом алгоритме ДКП с обработкой изображений блоками фиксированного размера 8x8. В дальнейшем, появился кодек H.264/AVC, который позволил улучшить существующий алгоритм: вместо классического ДКП стал применяться целочисленный ДКП, что позволило значительно ускорить работу кодека. Также стали применяться блоки не только размером 8x8, но и 4x4, что позволяет лучше сохранять детализацию изображений. В кодеке H.265/HEVC появляется адаптивный подход: для внутрикадровой обработки используется метод DST (Discrete Sine Transform, дискретное синусное преобразование), а для межкадровой обработки сохранилось ДКП. Кроме того, H.265 ввел возможность обработки

значительно более крупными блоками (до 32×32 пикселей), что особенно эффективно для сжатия однородных областей изображения.

Так, в работах [49-51] предлагается метод внедрения ЦВЗ в видео, сжатое кодеком MPEG-2, за счёт модификация выбранных коэффициентов ДКП. Изначально вычисляется разница между DC-коэффициентами (коэффициентами, полученными при выполнении ДКП) текущими и последующим кадрам с целью обнаружения момента смены сцены. Затем в полученные коэффициенты ДКП встраивается ЦВЗ с определенным коэффициентом усиления, зависящим от текстуры и яркости блока.

В дальнейшем появились работы [52, 53], связанные с внедрением ЦВЗ в видео, сжатое с использованием кодека MPEG-4, которые представляли собой модифицированные версии подходов, применявшихся для MPEG-2. Так в работе [52] выбирается макроблоки и квантованные пары коэффициентов ДКП, которые будут в дальнейшем использоваться для встраивания. В каждом из макроблоков выбирается собственная амплитуда в зависимости от содержимого кадра и осуществляется встраивание в квантованные пары коэффициентов ДКП.

В работах, описывающих кодек-зависимые способ встраивания, наиболее часто встречается описание методов, использующих кодек H.264 [54-56]. Особенности использования H.264 по сравнению является размер макроблоков (в H.264 используются 4×4 , а в MPEG-2 16×16) и точностью предсказания. Это обеспечивает лучший анализ текстурности и выбор устойчивых областей для внедрения ЦВЗ. Однако, как и в случае с MPEG-2 и MPEG-4, встраивание чаще всего происходит в коэффициенты разложения. Так, в работе [56] используются AC-коэффициенты разложения ДКП [57] для макроблоков 4×4 в частотной области, а сами блоки выбираются на основе ненулевых квантованных коэффициентов (NZZ) [58].

Одним из современных и при этом популярных кодеков для сжатия видео является H.265 (HEVC). Поэтому в последние годы авторы многих работы по защите видео изучают методы встраивания, в основе которых лежит

указанный кодек [59-61]. В случае использования этого кодекса также встраивание происходит в частотную область у I-кадров [62], однако особенности кодекса позволяет осуществлять встраивание не только в ДКП-2 как в H.264, но и в ДКП-8(DCT-VIII и ДСП-1(дискретное синусное преобразование, DST-I), как это, например, описывается в работе [60].

Однако вышеприведенные алгоритмы имеют общий недостаток и не всегда могут быть использованы при произвольном выборе кодекса, в связи с этим нельзя говорить об универсальности метода. Помимо этого, в кодекориентированных методах существуют определенные места, в которые происходит встраивание, в частности I-кадры. Поэтому обрезка или замена таких уязвимых мест может нарушить возможность извлечения ЦВЗ.

1.1.4. Использование нейронных сетей для встраивания ЦВЗ

В последние годы получили распространение методы встраивания, основанные на нейронных сетях. Их популярность в задачах защиты видео объясняется, в частности, возможностью внедрения цифрового водяного знака не в отдельные кадры, а сразу в видеофрагменты, а также способностью нейросетей обучаться устойчивому извлечению метки даже из видео, подвергнувшегося различным типам атак. Типовая схема применения таких методов может выглядеть как показано на рисунке 3.

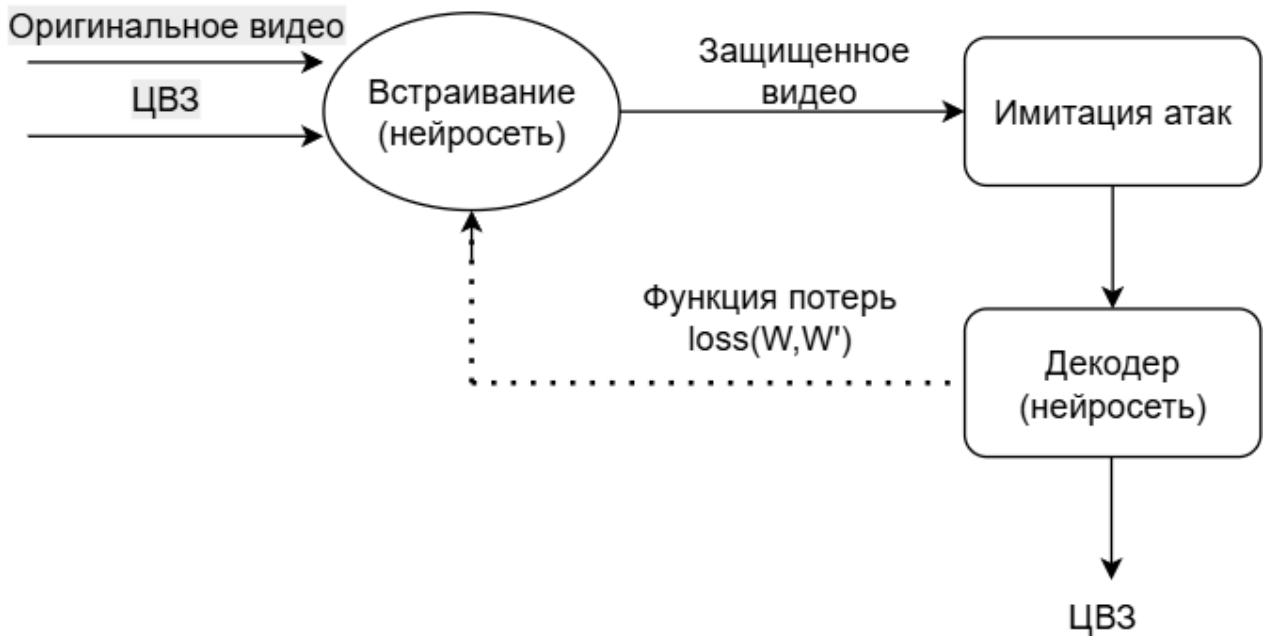


Рисунок 3 – Алгоритм встраивания ЦВЗ с помощью сверточной нейронной сети

На первом этапе с помощью сверточной нейронной сети (CNN) извлекаются признаки видео, на основе которых происходит встраивание. На втором этапе полученное защищенное видео подвергается различного рода атакам, таким как зашумление, сжатие с потерями и другим популярным искажениям. На последнем этапе сверточная нейронная сеть обучается извлечению уже на видео, подвергнутому различным атакам. Разница между исходным и извлеченным ЦВЗ для вычисления функции потерь, которая минимизируется в процессе совместного обучения нейросетей. Таким образом, обе нейросети обучаются совместно, повышая устойчивость модели к распространённым атакам.

В работе [45] для встраивания ЦВЗ используются пространственно-временные признаки видео. Для их извлечения предлагается использование 4х слоев 3D-сверток (Conv3D), применяемых к входному видеопотоку. В дальнейшем используются различные размеры ядер для свертки. Такая операция аналогична по сути встраиванию ЦВЗ не пространственную область, а в частотные компоненты. Встраиваемый ЦВЗ будет расширяться до размеров полученных пространственно-временных признаков. А само встраивание

будет осуществляться с использованием коэффициента, контролирующего баланс между качеством извлечения и заметностью ЦВЗ. В процессе обучения авторы применяли различные временные и пространственные искажения, а также различные типы видеокомпрессии. На каждой итерации исходного алгоритма обучения одно из указанных искажений выбирается случайным образом с равной вероятностью. Такой подход позволяет обеспечить устойчивость модели за счёт одновременного обучения кодировщика на этапе встраивания и декодера на этапе извлечения к корректной работе в условиях широкого спектра возможных искажений. В дополнение к архитектурам на основе CNN, для повышения скрытности встраивания всё чаще используется дискриминатор с использованием состязательных сетей (GAN) [45,63,64]. Встраивание с применением дискриминатора позволяет модели обучаться на задаче различения оригинального и модифицированного видеофрагмента, что заставляет нейронную сеть встраивать ЦВЗ с меньшим искажением исходного видео.

Использование алгоритмов искусственного интеллекта позволяет распределить ЦВЗ в пространственно-временной области видео, тем самым избегая возможности извлечения из одного кадра, но использование такого алгоритма требует большого объёма оперативной памяти для обработки вектора признаков, а также больших вычислительных мощностей и временных затрат для обучения нейронной сети. Помимо этого, важным недостатком систем с использованием нейронных сетей является низкая гибкость к встраиваемому формату. Так в работах [45,59,65] описывается, что модель обучалась для встраивания бинарного ЦВЗ фиксированного размера. В рамках данной диссертации ставилась задача разработка метода, позволяющего встраивать последовательность различной длины, при этом допускающей использование вектора вещественных чисел в качестве ЦВЗ.

Постановка задачи

Таким образом, в ходе обзора замечено, что некоторые из существующих методов позволяют извлекать ЦВЗ независимо из одного кадра видео, что позволяет злоумышленнику собирать больше информации. Авторы наиболее актуальных работ, часто используют набор кадров для встраивания ЦВЗ, однако для этих целей используются нейронные сети, что требует больших вычислительных мощностей для обучения, при этом полученная модель требует на вход бинарную последовательность фиксированного размера, что также ограничивает возможность применения метода.

В связи с этим, в данной диссертации ставится задача разработки нового метода защиты видеoinформации с помощью ЦВЗ, который бы не позволял злоумышленнику иметь возможность извлечения информации из отдельного кадра видео. Разрабатываемый такой метод должен сочетать стойкость к типовым атакам (сжатие, шум, потеря синхронизации) и высокую эффективность при извлечении. При этом метод должен быть вычислительно эффективным и универсальным, т.е. не зависеть от типа и содержания видеоданных.

1.2. Требования к ЦВЗ

Для практической реализации предложенного метода встраивания ЦВЗ и анализа результатов его работы необходимо обозначить требования [66], позволяющие корректно функционировать системе защиты видео:

- Незаметность встроенного цифрового знака.
- Устойчивость к злоумышленным искажениям (атакам).
- Достаточный объём встраиваемой информации (это даёт возможность использовать предложенный метод не только для защиты видео, но и для стеганографической передачи информации).
- Простота извлечения и интерпретации ЦВЗ.

Исходя из указанных выше требований, было принято решение в данной работе в качестве ЦВЗ использовать бинарный QR-код [67], как уже ранее

зарекомендовавшее себя решение [68]. В технологии его использования заложено две полезные особенности: возможность извлечения с высокой скоростью с помощью любого портативного устройства (такого как телефон) и возможность исправления ошибок (частично поврежденный код может быть успешно прочитан). К преимуществам использования этой технологии также можно отнести высокую ёмкость скрытого сообщения, поскольку, в отличие от обычного изображения, QR-код позволяет разместить в себе ссылку на ресурс, включающий полную информацию о правах пользования защищаемого видео.

Также важным достоинством именно QR-кода является возможность простого сравнения каждого элемента встраиваемого и извлекаемого QR-кода, что позволяет высчитывать процент их совпадения, т.е. получать эмпирическую оценку вероятности правильного извлечения (в рамках аналогичных задач такую метрику называют BER (Bit Error Rate) [69]):

$$P = \frac{N_+}{N}, \quad (2)$$

где N_+ - количество правильно извлеченных элементов, N – общее число элементов QR-кода.

По принятой спецификации [70] QR-коды делятся на версии в зависимости от объёма встраиваемой информации. Номера версий варьируются от 1 до 40. Каждая версия имеет особенности в конфигурации и количестве элементов (модулей) составляющих QR-код. Версия 1 содержит 21×21 модулей, версия 40 - 177×177 . От версии к версии размер кода увеличивается на 4 модуля в каждую сторону. QR-код имеет специальный механизм увеличения надежности хранения зашифрованной информации за счет помехоустойчивого кодирования. При этом, естественно, увеличение уровня исправления ошибок уменьшает объём встроенной информации. Часть элементов QR-кода носит служебный характер и используется не для встраивания информации, а для его позиционирования. Для целей данного исследования указанные особенности реальных QR-кодов не являются

существенными и поэтому игнорируются, т.е. все их элементы считаются равнозначными и несущими один бит встраиваемой информации.

В данной работе в вычислительных экспериментах в основном применялся QR-код, состоящий из 65×65 (Version 12) квадратных элементов, представленный на рисунке 4а. Такой размер QR-кода позволяет встроить достаточное количество информации, но при этом не занимать всё пространство кадра. При моделировании в ходе экспериментов элементам QR-кода назначались случайные равновероятные значения 0 или 1.

В некоторых экспериментах для исследования возможности увеличения ёмкости встраиваемого QR-кода также использовались коды других размеров, например, 89×89 (version 18) элементов (см. рисунок 4б). Важно отметить, что при использовании обоих QR-кодов в качестве одного бита использовался квадрат размеров 16×16 . Это сделано в целях возможности дополнительного увеличения вероятности извлечения за счёт усреднения по квадратным площадкам.

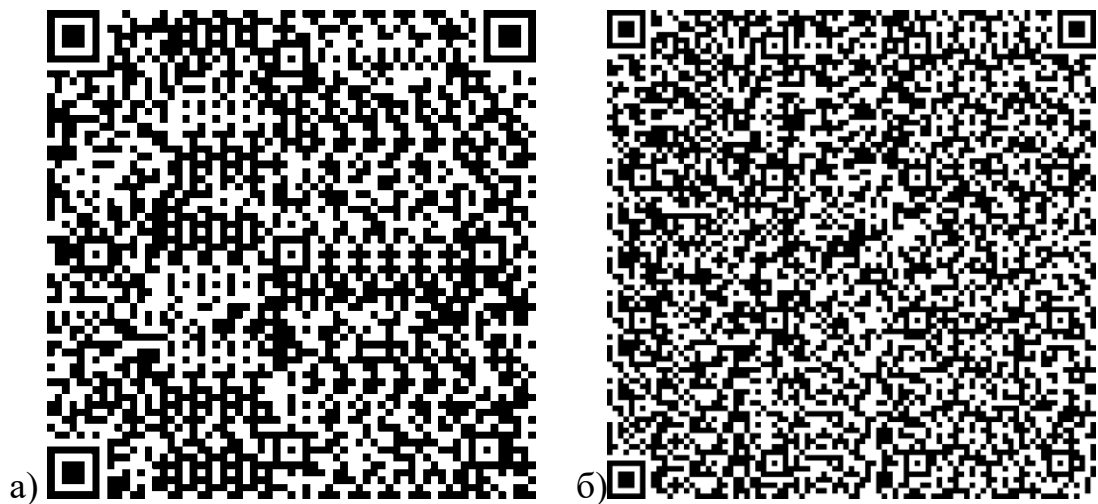


Рисунок 4 – QR-коды размеров 65×65 и 89×89

В случае необходимости повышения вероятности извлечения информации из встраиваемой последовательности можно использовать код Рида-Соломона [71] в чистом виде.

1.3. Коррекция ошибок в процессе извлечения

Использование QR-кода в реальных ЦВЗ-системах имеет свои ограничения. QR-код поддерживает 4 уровня коррекции ошибок, обеспечивающие разную степень избыточности: 'H', 'Q', 'M', 'L', где уровень 'H' предоставляет наибольший объём корректирующей информации, а 'L' — наименьший. При возрастании уровня корректируемых ошибок объём встраиваемой информации, соответственно, снижается.

Проблема извлечения информации из QR-кода заключается в том, что некорректные биты проявляются в случайных пикселях кадра. В то время, как заявленный объём корректируемых ошибок рассчитан при скапливании некорректных бит в центре кадра, то есть без затрагивания служебных битов информации. В связи с этим необходимо проанализировать каков реальный процент некорректных бит допустим для успешного извлечения информации. С результатами данного исследования можно ознакомиться на рисунке 5.

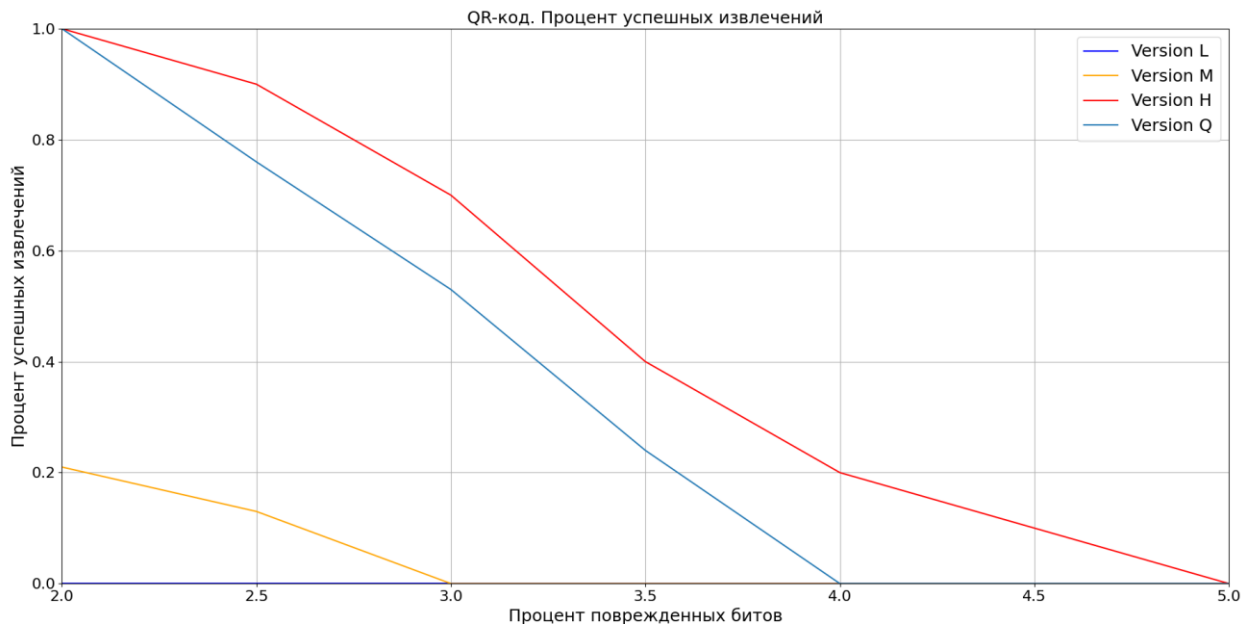


Рисунок 5 – Процент успешных попыток извлечения в зависимости от процента повреждённых бит QR-кода

Для проведения эксперимента было сгенерировано четыре QR-кода различных версий, которые хранили в себе 50 символов информации.

Случайным образом 100 раз инвертировались различные 2-5% бит информации в сгенерированных QR-кодах (служебные биты QR-кода изменению не подвергались). По итогам эксперимента видно, что наилучший процент возможен при использовании версии QR-кода Н, однако даже в таком случае высокая вероятность извлечения происходит лишь при уровне значений ошибочных бит $< 3\%$.

Для оценки альтернативных методов кодирования было проведено аналогичное исследование для кодов Рида–Соломона. Данный код определяется двумя параметрами: максимальной длиной последовательности символов и количеством ошибочных символов, которые могут быть корректно восстановлены. Каждый символ кодируется 8 битами, поэтому повреждение одного бита делает весь символ ошибочным. Был проведен эксперимент аналогичный эксперименту с QR-кодом, результаты которого представлены на рисунке 6.

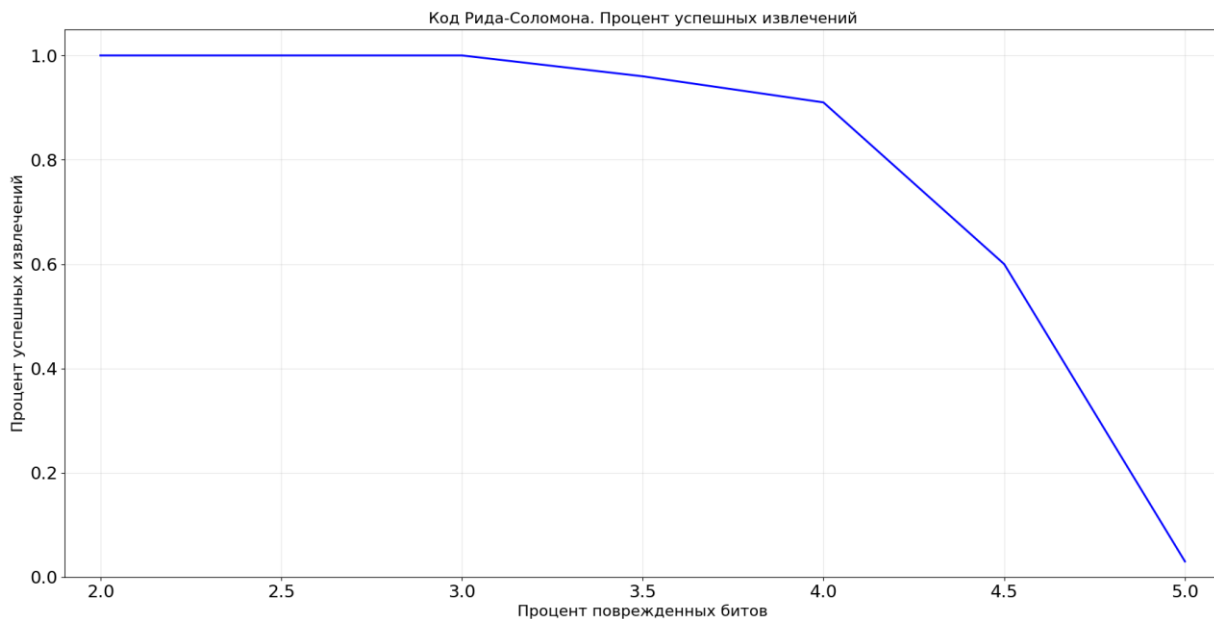


Рисунок 6 – Процент успешных попыток извлечения в зависимости от процента повреждённых бит кода Рида-Соломона

На основании графика можно сделать выводы, что уровень значений ошибочных бит, при котором происходит успешное извлечение увеличился незначительно (вырос до 4%).

Несмотря на это, коды Рида–Соломона позволяют существенно повысить надёжность извлечения благодаря большей гибкости настройки механизмов его использования. Наибольший вклад для повышения возможности извлечения дало множественное дублирование последовательности символов с последующим голосованием большинством при извлечении. Для демонстрации эффективности метода был проведён эксперимент, в котором требовалось, чтобы итоговая длина последовательности (включая избыточные повторения) не превышала 7921 бит - размер области встраивания, соответствующей QR-коду 89×89 бит. В эксперименте варьировалось количество повторений последовательности и допустимый уровень избыточности с целью выяснить максимально допустимый объём встраивания при минимальной корректности извлеченной последовательности. Результаты эксперимента приведены на рисунке 7.

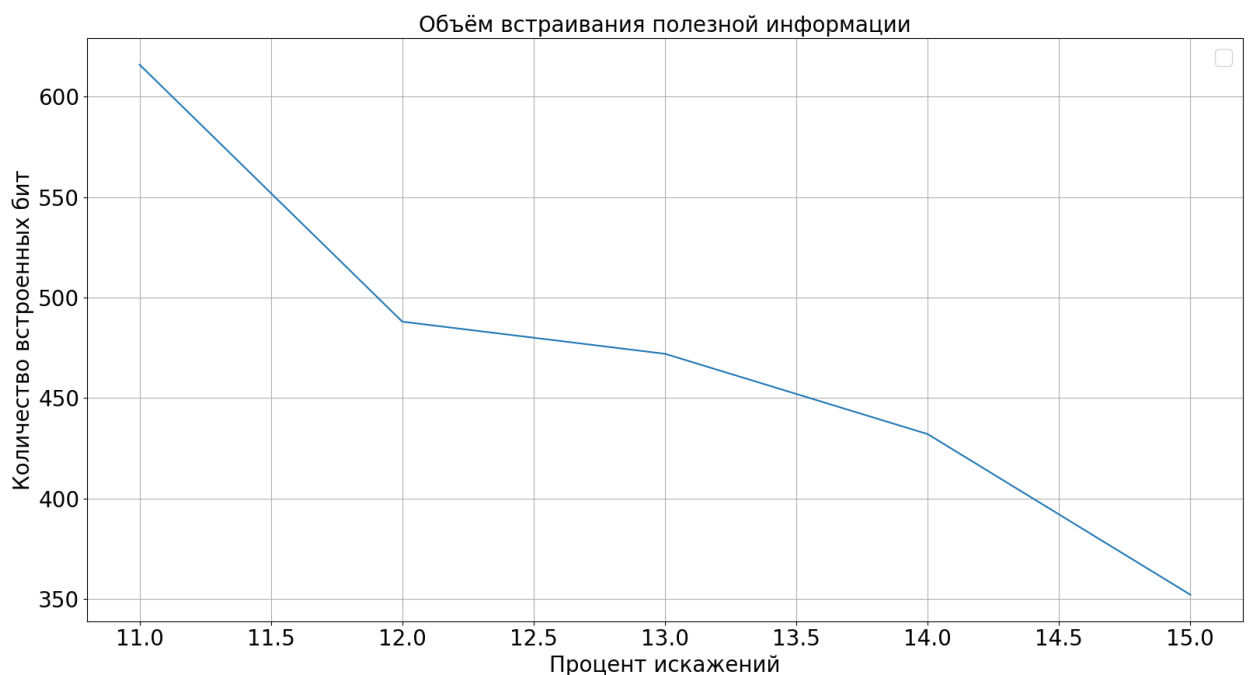


Рисунок 7 – Допустимый объём встраивания для успешного извлечения при разном уровне искажения

На графике можно заметить, что при встраивании 432 битов информации возможно извлечение при искажении 14% битов исходной последовательности, что ранее было освещено в работе [72*]. Таким образом, можно считать ЦВЗ правильно извлеченным, если $P > 0,86$.

Предложенный механизм повышения помехоустойчивости рассматривался отдельно для каждого кадра. Возможно дальнейшее повышение качества за счёт использования всех кадров видеопоследовательности. В таком случае значение каждого модуля определяется голосованием по нескольким кадрам, что уменьшает влияние временных артефактов. При этом для голосования следует отбирать только кадры без резких изменений сцены. А сами моменты смены сцен можно определить за счёт расчёта межкадровой дисперсии. Тем самым, те кадры, на которых значение дисперсии будет превышать определенный порог, исключаются из процесса голосования.

1.4. Тестовые материалы

Для возможности корректно оценивать рассмотренные в работе методы необходимо сформировать датасет из различных по характеристикам видеозаписей. Характеристики, описывающие видео, можно разделить на пространственные и временные. Пространственные описывают каждый кадр видео отдельно, а временные – изменения кадров, происходящие во времени. Поскольку подбор и хранение большого объёма видео отнимает много временных и вычислительных ресурсов, целесообразно использовать в исследовании синтезированные видео с характеристиками, варьируемыми в широких пределах. Таким образом, в настоящей работе эксперименты проводились и на реальных видео, и на синтезированных.

1.4.1. Реальные видео

В качестве датасета из реальных видео использовался UCF-101 [73] – датасет, состоящий из более чем 10000 коротких видео, с различным характером действий человека в кадре. Важной особенностью этого датасета — сбор видео из открытых источников, что обеспечивает вариативность

условий съёмки в реальных условиях. Продолжительность клипов составляет 5–10 секунд при разрешении 320×240 пикселей и частоте кадров 25–30 fps.

Также среди реально существующих видео отдельно были выбраны три разных по своим характеристикам видеозаписи: “RealBarca”, “Road1”, “LutGaya” с размером кадров видео 1920x1080 пикселей, что соответствует стандарту Full HD (видео высокой четкости) [74].

Ниже приведено описание каждого из рассматриваемых реальных видео:

- RealBarca

Данное видео является нарезкой опасных моментов из футбольного матча. Частота смены кадров 30 кадров/сек. На данном видео наблюдается достаточно частая смена ракурсов и динамичный монтаж. В ходе этого монтажа в кадре сменяются крупные планы на футболистов с общим планом на футбольное поле. Один из кадров видео представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Кадр из видео “RealBarca”

- Road1

Данное видео является видеозаписью с дорожной камеры, которая статично расположена над дорогой. Частота смены кадров 50 кадров/сек. Соответственно, это малодинамичное видео с отсутствием всякого монтажа. Один из кадров видео представлен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Кадр из видео “Road1”

- LutGaya

Данное видео является вырезанным фрагментом из фильма. Частота смены кадров 25 кадров/сек. На этом фрагменте мы наблюдаем динамичный отрывок из фильма, представляющий собой клиповый формат. Съёмка включает в себя динамичный монтаж, а также регулярно меняющиеся планы. Один из кадров видео представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Кадр видео “LutGaya”

1.4.2. Синтезированные видео

Генерация синтезированных видео происходила при помощи модели, предложенной в рамках данной диссертации и описанной в работе [75*]. Её использование позволяет быстро управлять как характеристиками отдельных кадров, так и динамикой смены сцен самого видеопотока. При этом важным условием при разработке такой модели является небольшое число параметров, которых можно оценить по реальным видео.

Приемлемое сходство между реальными и синтетическими видео, достаточное для многих исследовательских задач, достигается при использовании четырехкомпонентной модели, в соответствии с которой каждый кадр видео описывается следующим выражением:

$$S = \mu + T + N_T + N_S, \quad (3)$$

где S - кадр видео;

μ - псевдослучайное двумерное мозаичное поле, моделирующее регистрируемую сцену. Оно обновляется (заново генерируется) в моменты смены сцены, происходящие с заданной интенсивностью, регулярно или случайно. Параметры мозаики выбираются исходя из заданного значения ее статистических параметров (в предположении их постоянства и пространственной изотропности в кадре): среднего, дисперсии и коэффициента корреляции между соседними пикселями;

T - текстурная компонента, описывающая случайные колебания яркости на наблюдаемых объектах сцены. Задается моделью двумерного стационарного случайного поля с нулевым средним, заданной дисперсией и коэффициентом корреляции между соседними пикселями В пределах одной сцены компонента остается неизменной, но регенерируется при каждой смене сцены.

N_T – текстурный шум, вырожденная текстурная компонента, представляющая собой двумерное поле некоррелированных случайных величин с нулевым средним и заданной дисперсией. Как и текстурная компонента, этот шум не изменяется в течение одной сцены, но обновляется при ее смене.

N_S – шум видеодатчика (сенсорный шум), вызванный физическими эффектами в фоточувствительных элементах. Как и предыдущая компонента, представляет собой двумерное поле некоррелированных случайных величин с нулевым средним и заданной дисперсией. Но в отличие от нее, шум случайно изменяется как в пространстве, так и во времени: его значения генерируются заново для каждого кадра.

Еще одним параметром модели, характеризующим динамические свойства видео, является интенсивность смены кадров λ . С помощью данного параметра регулируется имитация монтажных склеек в итоговом видео. При смене сцены изображение генерируется заново по формуле (3) с использованием новых начальных значений генератора случайных чисел, задействованного в процедуре моделирования.

В качестве опорных данных, по которым проходила оценка компонентов модели, использовался один цветовой канал кадров видео, описанных в пункте 1.4.1.

Оценка параметров модели

Для оценки основных параметров модели, требуемых для синтеза кадров синтетического видео, применялась пространственная и временная автокорреляционные функции (АКФ). Известно и экспериментально подтверждено [76,77], что АКФ двумерного изображения (кадра), как правило, экспоненциально убывает в любом направлении от начала координат. Предполагая изотропность АКФ, ее можно описать следующей формулой:

$$B(k_1, k_2) = D\rho^{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}, \quad (4)$$

где ρ – коэффициент корреляции между соседними пикселями по горизонтали или вертикали, D – дисперсия. k_1, k_2 – дискретные (целочисленные) аргументы АКФ.

Согласно исследованию [78], более точную аппроксимацию АКФ изображений удастся получить при использовании двухэкспоненциальной модели с аддитивным добавлением двух независимых шумов:

$$B(k_1, k_2) = D_M \rho_M^{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} + D_T \rho_T^{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} + D_1 \delta(k_1, k_2) + D_2 \delta(k_1, k_2), \quad (5)$$

где ρ_M и ρ_T – коэффициенты корреляции между пикселями мозаики и текстуры соответственно, D_M, D_T – дисперсия мозаики и текстуры соответственно, D_1, D_2 – дисперсии текстурных и сенсорных шумов, $\delta(k_1, k_2) = \begin{cases} 1, & \text{при } k_1, k_2 = 0 \\ 0, & \text{при } k_1, k_2 \neq 0. \end{cases}$ – дискретная дельта-функция, характеризующая некоррелированные шумы.

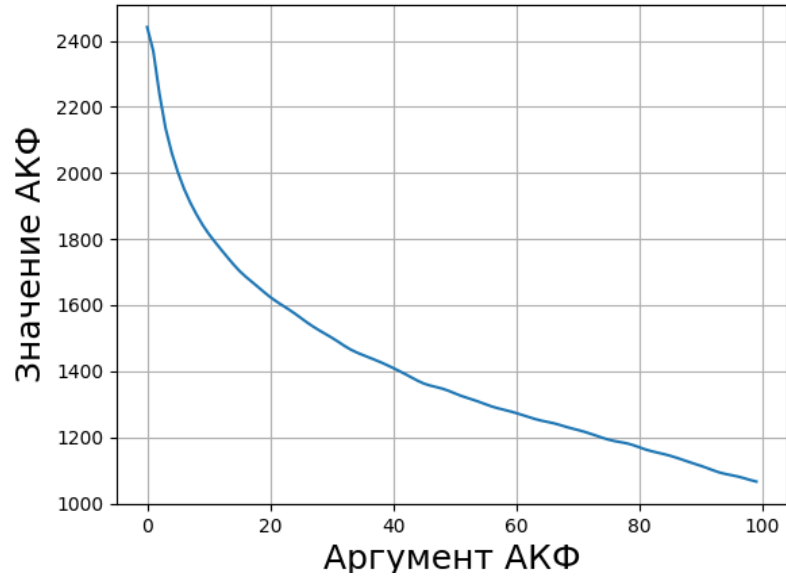
В этой формуле первое слагаемое представляет собой медленную экспоненту и отвечает за кусочно-постоянную (мозаичную) составляющую изображения (компоненту модели (3)), а остальные описывают корреляционные свойства суммы $T + N_T + N_S$.

С учетом предполагаемой изотропности статистических свойств синтезируемого изображения (кадра) далее ограничимся рассмотрением одного (например, горизонтального) сечения АКФ:

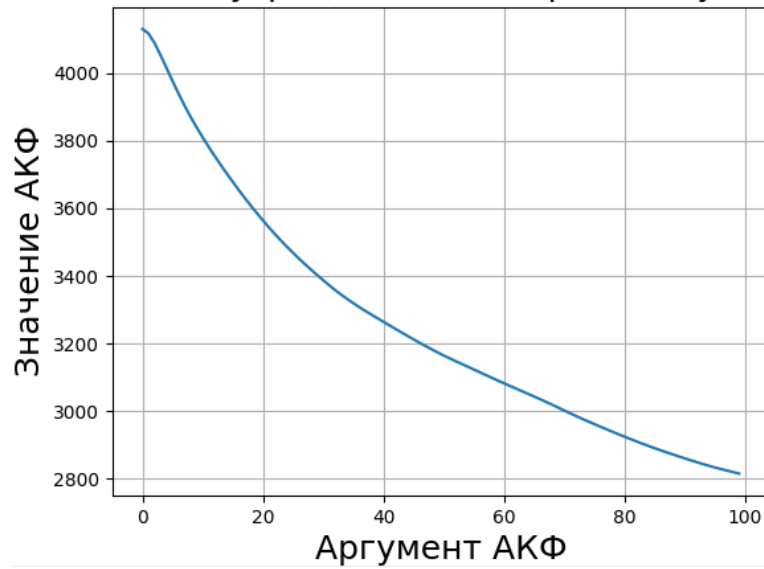
$$B(k_1) = B(k_1, 0) = D_M \rho_M^{|k_1|} + D_T \rho_T^{|k_1|} + [D_1 + D_2] \delta(k_1). \quad (6)$$

Для экспериментальной проверки допустимости такого представления было выбрано три различных по своим характеристикам видео (см. пункт 1.4.1). На рисунке 11 для них приведены графики сечений АКФ, усредненные по нескольким кадрам.

АКФ усредненного кадра RealBarca



АКФ усредненного кадра LutGaya



АКФ усредненного кадра Road

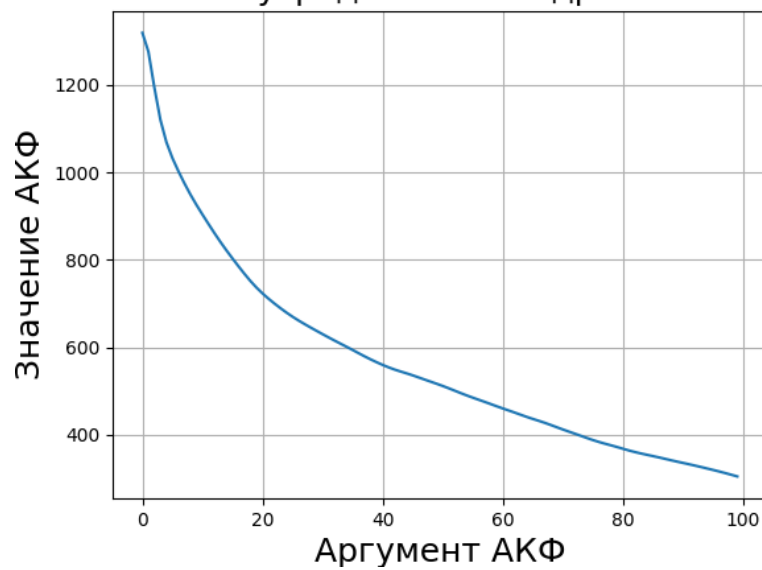
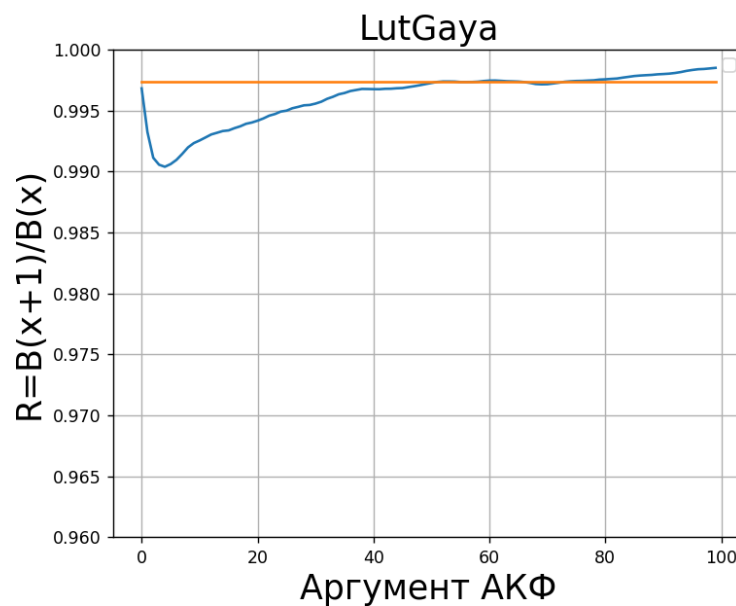
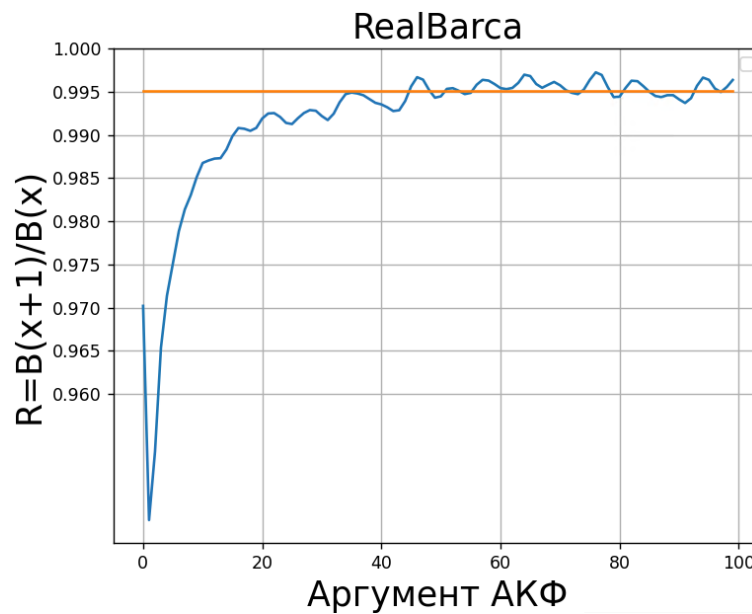


Рисунок 11 – Графики сечений АКФ тестовых видео

Отмечу, что при $k_1 \neq 0$ в формуле (6) остаются ненулевыми только два первых слагаемых, т.е. АКФ представляет собой сумму двух экспонент с разной скоростью убывания. Для оценки параметра ρ_M «медленной» экспоненты, отвечающей за мозаичную компоненту μ модели (3), анализируется график отношения двух последовательных значений АКФ (см. рисунок 12):

$$R = \frac{B(k_1 + 1)}{B(k_1)}. \quad (7)$$



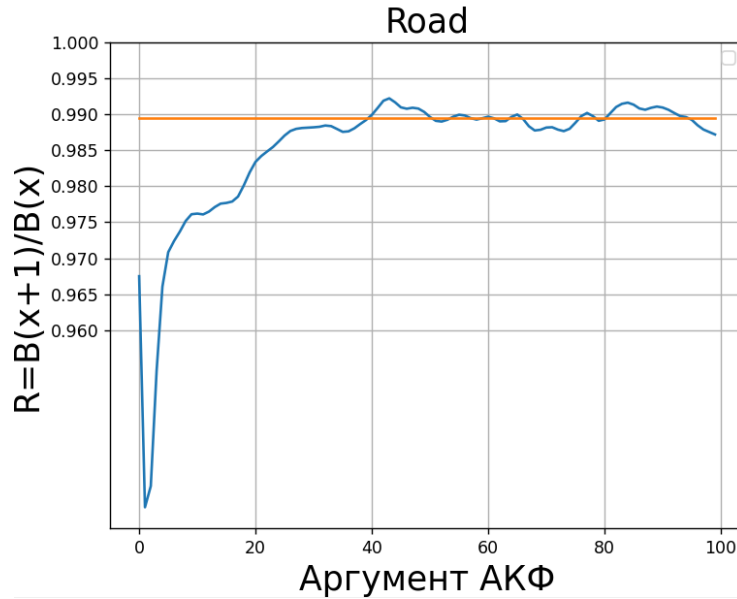


Рисунок 12 – Графики отношения последовательных значений пространственной АКФ кадров тестовых видео

Из приведенных графиков видно, что по мере возрастания аргумента «быстрая» (отвечающая за текстуру) экспонента затухает и перестает влиять на значение R , которое становится примерно постоянным и равным ρ_M :

$$R \approx \frac{D_M \rho_M^{|k_1+1|}}{D_M \rho_M^{|k_1|}} = \rho_M. \quad (8)$$

Стабилизация величины R наблюдается примерно в диапазоне $50 < k_1 < 100$, для меньших значений аргумента искажающее влияние оказывает быстрая экспонента, а для больших – неустойчивость статистической оценки для малых значений АКФ. В указанном диапазоне оценку параметра ρ_M можно получить простым усреднением, а затем, при известном ρ_M , подобрать значение дисперсии D_M мозаичной компоненты модели, обеспечивающее наиболее точную аппроксимацию экспериментально полученной АКФ отрезком экспоненты.

После этого можно вычесть из модели (5) оцененную медленную экспоненту:

$$B^*(k_1) = B(k_1) - D_M \rho_M^{|k_1|} = D_T \rho_T^{|k_1|} + [D_1 + D_2] \delta(k_1), \quad (9)$$

и повторить описанную выше процедуру для получения оценок параметров D_T, ρ_T текстурной компоненты модели.

Оставшиеся два параметра модели (5) - дисперсии шумов - в рамках анализа отдельного изображения (кадра видео) наблюдаются только в виде суммы:

$$D_1 + D_2 = B(0) - D_M - D_T. \quad (10)$$

Для нахождения этих значений по отдельности требуется перейти к анализу последовательности кадров. При рассмотрении областей соседних кадров, на которых не происходит движения или смены сцены, различия будут наблюдаться только за счёт влияния случайного сенсорного шума. Дисперсия разности двух соседних кадров в таких областях кадра равна удвоенному значению дисперсии сенсорного шума (при наличии движущихся объектов она будет больше). Поэтому формулу для оценки параметра D_2 можно записать в виде

$$D_2 = \frac{\sum_{N_s} \sum_{N_1, N_2} [x(m, k_1, k_2) - x(m + 1, k_1, k_2)]^2}{N_s N_1 N_2} \quad (11)$$

где N_1, N_2 - размеры статической области кадра, N_s - количество кадров, по которому усредняется дисперсия.

Оставшийся параметр модели - дисперсия текстурного шума - вычисляется исходя из значений остальных параметров модели из выражения (10).

На основе рассчитанных оценок каждой компоненты модели (3) (см. ниже) построим АКФ, аппроксимирующую АКФ кадров тестовых реальных видео. На рисунке 13 приведены как отдельные составляющие такой АКФ, так и итоговый график полученной функции.

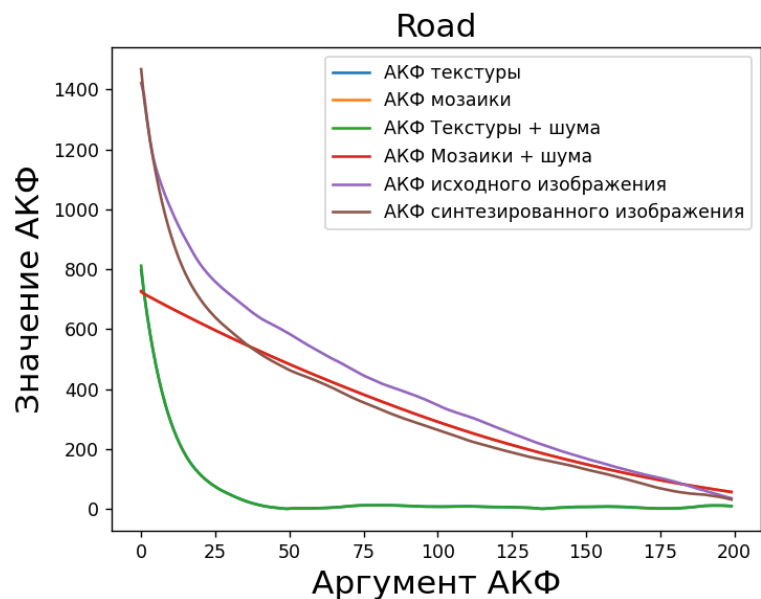
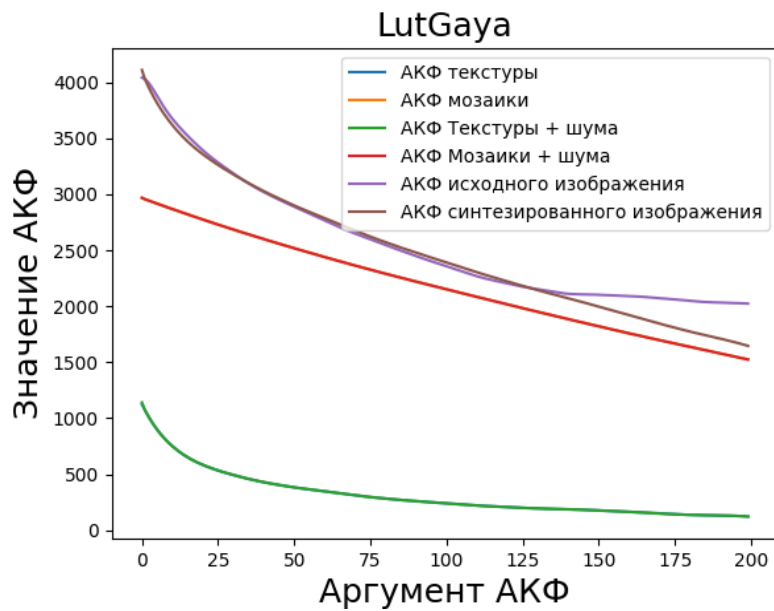
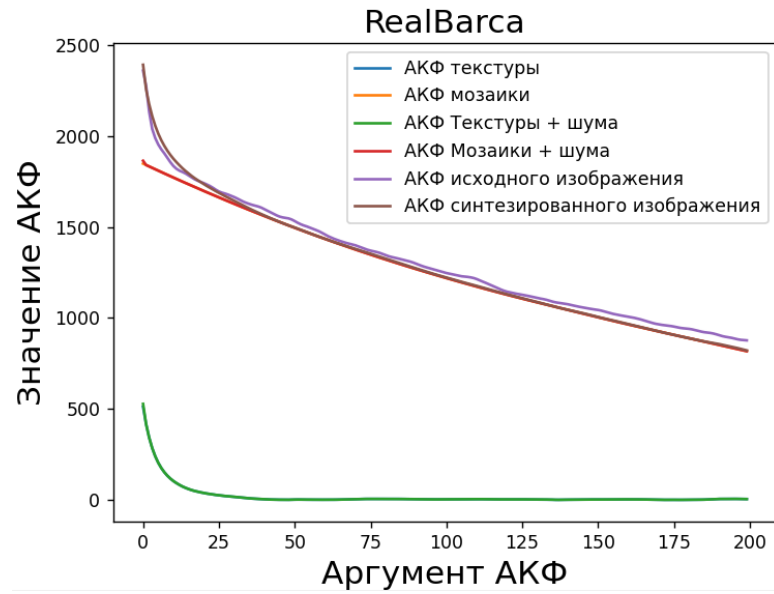


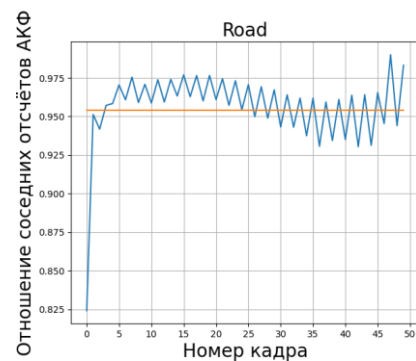
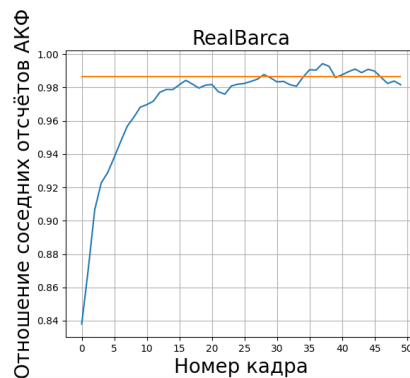
Рисунок 13 – График пространственной АКФ

При переходе от синтезирования отдельных кадров к синтезированию видео важным параметром является интенсивность потока смены сцен λ . Предполагаем, что смены сцены происходят независимо в случайные моменты дискретного времени (определяемые номерами кадров), а значения каждого пикселя изменяются как кусочно-постоянная (если пренебречь шумами) функция с независимыми значениями. Такое поведение может быть описано моделью стационарного обобщенного телеграфного сигнала [79]. Соответственно, временная АКФ этого сигнала будет иметь экспоненциальный вид:

$$B_X(n) = D_X e^{-\lambda|n|} = D_X \rho_X^{|n|}, \quad (12)$$

где n – целочисленный аргумент АКФ, D_X – дисперсия случайного кусочно-постоянного процесса, λ – интенсивность потока переключения его значений, ρ_X – коэффициент корреляции между соседними значениями временной АКФ.

Поскольку оценка временной АКФ на ее малых значениях перестает быть информативной, то для нахождения коэффициента корреляции ρ_X по формуле, аналогичной (4), будем использовать первые 50 отсчетов. В результате усреднений значений R в диапазоне $20 < n < 50$ будет получен коэффициент корреляции ρ_X .



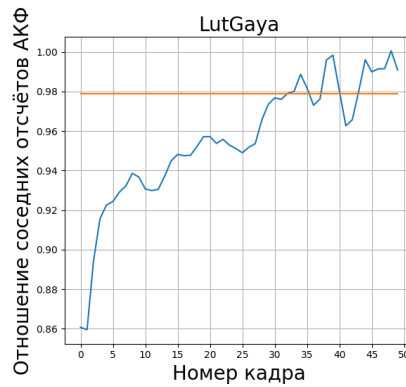


Рисунок 14 – Графики отношения последовательных значений временной АКФ тестовых видео

Оценив величину коэффициента корреляции, можно вычислить параметр интенсивности смены сцены λ :

$$\rho_X = e^{-\lambda}, \quad \lambda = -\ln \rho_X \quad (13)$$

Оценка параметров по реальным видео

Для демонстрации действия процедуры оценки параметров модели воспользуемся тремя реальными видео, описанными выше.

В таблице 1 представлены оцененные параметры модели видео, на которые можно в дальнейшем ориентироваться при формировании синтезированных тестовых видеоизображений. Чтобы получить достаточно представительный датасет тестовых видео, при проведении вычислительных экспериментов следует рассматривать расширенный диапазон возможных изменений параметров модели, что и отражено в предпоследнем столбце таблицы.

Таблица 1 - Статистические характеристики модели, построенной по рассматриваемым видео

Параметр	RealBarca	LutGaya	Road1	Рассматриваемый диапазон	Среднее значение
Математическое ожидание	73	70	134	[50;200]	125

Параметр	RealBarca	LutGaya	Road1	Рассматриваемый диапазон	Среднее значение
Общая дисперсия	2365	3891	1279	[1000;5000]	3000
Коэффициент корреляции мозаики	0,9959	0,9957	0,9917	[0,99;0,998]	0,994
Дисперсия мозаики	1855	2780	770	[500;3000]	1750
Дисперсия текстуры	477	1088	492	[300;1500]	900
Коэффициент корреляции текстуры	0,878	0,963	0,907	[0,85;0,97]	0,91
Дисперсия текстурного шума	30	22	16	[10;40]	25
Дисперсия сенсорного шума	3	1	1	[1;5]	3
Интенсивность потока смены сцен	0,014	0,022	0,047	[0,01;0,05]	0,025

Формирование кадра синтезированного видео

В работах [80,81] описаны алгоритмы, позволяющие создать псевдослучайное кусочно-постоянное (мозаичное) изображение по заданным дисперсии, математическому ожиданию и коэффициенту корреляции. При этом яркости фрагментов полученного изображения распределяются согласно

нормальному распределению. На основе описанных алгоритмов были построены кусочно-постоянные поля, пример которых приведен на рисунке 15.

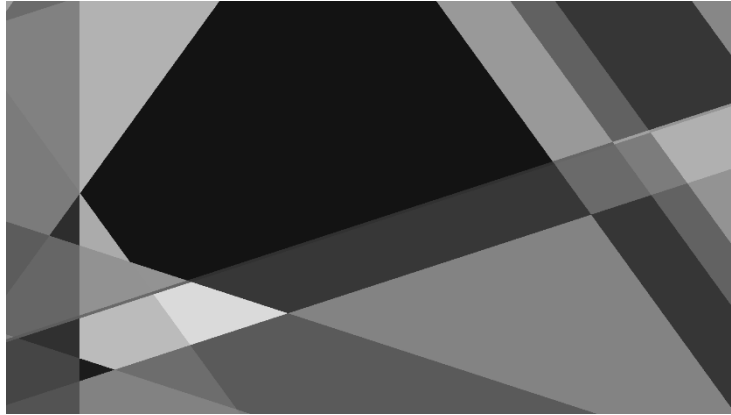


Рисунок 15 – Пример кусочно-постоянной составляющей изображения.

На основе имеющейся модели АКФ можно получить отдельно текстурную составляющую с использованием известного спектрального метода синтеза изображения [82]. Подробное описание этого метода не представляет значимости в рамках выполняемой диссертационной работы, но, если кратко, он состоит в выполнении преобразования:

$$T(n_1, n_2) = IDFT \left(DFT(\xi(n_1, n_2)) \cdot \sqrt{DFT(B(n_1, n_2))} \right), \quad (14)$$

где $T(n_1, n_2)$ – текстурное изображение, $\xi(n_1, n_2)$ – поле белого шума с единичной дисперсией, DFT – прямое, $IDFT$ – обратное преобразование Фурье.

Примером генерации полученного текстурного изображения может служить рисунок 16.

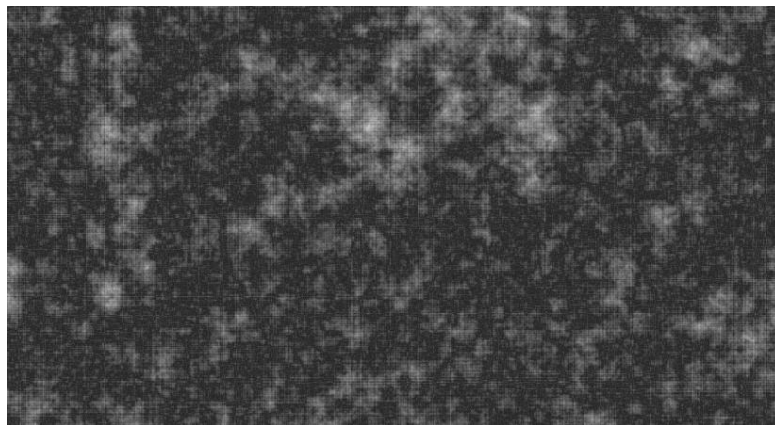


Рисунок 16 – Пример синтезируемой текстуры изображения

Поскольку реализация моделирования происходила на кадрах разного рода видео, то производилось синтезирование серии изображений отдельно для каждого видео. Так, на рисунках 17 продемонстрированы соседние кадры видео с характеристиками идентичными виде “RealBarca” в момент, имитирующий смену сцены.

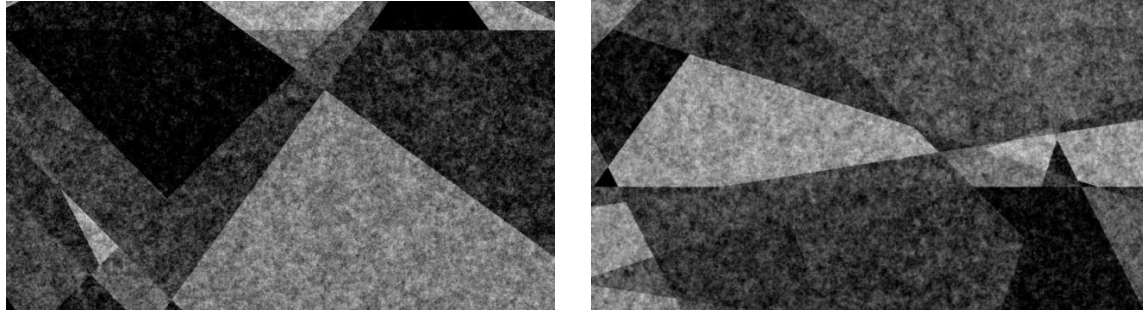


Рисунок 17 – Примеры кадров синтезированного видео с характеристиками аналогичными “RealBarca”

Приведённые изображения отличаются друг от друга визуально, но при этом сохраняют пространственные и яркостные статистические характеристики, идентичные кадру оригинального видео.

Выводы и результаты первого раздела

В данном разделе рассмотрены современные методы, используемые для защиты видеoinформации с использованием добавления в видеокadres стойких цифровых водяных знаков (ЦВЗ).

1) Приведена классификация существующих методов по типу встраивания, а также расписаны особенности каждой из этих групп. В ходе обзора замечено, что существуют достаточно мало методов, исключающих извлечение из каждого конкретного кадра видео. Авторы наиболее актуальных работ, которые встраивали ЦВЗ распределенно в набор кадров, использовали в своих методах нейронные сети, что требует больших вычислительных мощностей на уровне обучения, а сами методы являются негибкими к формату встраивания.

2) Поэтому в данном разделе предложен и описан метод встраивания фазовых ЦВЗ для защиты видеoinформации, который добавляет ЦВЗ независимо в каждый кадр, но обеспечивает распределение его энергии по множеству кадров видео. По сравнению с алгоритмами, использующими нейронные сети, алгоритм, реализующий предложенный метод и представленный в настоящей диссертационной работе, является более простым, предсказуемым и допускает ручное управление его параметрами.

3) Перечислены требования, необходимые для корректного использования алгоритмов встраивания ЦВЗ в реальных системах. Предложено использовать в качестве встраиваемого ЦВЗ условный QR-код. Для него введен в рассмотрение основной параметр эффективности алгоритма – вероятность правильного извлечения элемента QR-кода, по которому в диссертации будет происходить сравнение различных алгоритмов.

4) Для тестирования работы алгоритмов требуется большой датасет, состоящий из видео с различными яркостными, пространственными и динамическими характеристиками. Предложена четырехкомпонентная статистическая модель синтетических видео, а также разработана процедура оценки статистических параметров каждой компоненты модели. Разработан алгоритм синтеза видео со статистическими характеристиками, соответствующими реальным видео.

РАЗДЕЛ 2. БАЗОВЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ ВИДЕО ФАЗОВЫМИ ЦВЗ

В данном разделе приведено описание методов по встраиванию и извлечению фазовых ЦВЗ. Поскольку в разделах 3 и 4 будут предложены модификации метода, то для простоты описываемый метод будем называть “базовым”.

2.1. Алгоритм встраивания фазовых ЦВЗ

В настоящей диссертации предлагается новый метод [83*,84*] встраивания двумерного фазового ЦВЗ в цифровой видеосигнал. За счёт распределенного во времени характера ЦВЗ удается достичь его визуальную неразличимость и повышенную стойкость к различным искажениям видеосигналов и атакам. Суть метода состоит в добавлении к каждому пикселю видеосигнала малозаметной синусоидальной последовательности, развивающейся во времени и имеющей индивидуальную (изменяющуюся от пикселя к пикселю) фазу. Встраиваемое изображение ЦВЗ соответствует двумерному полю этих фаз. Из отдельного кадра видеопоследовательности извлечь такой ЦВЗ невозможно, однако из любой достаточно продолжительной серии кадров он извлекается с низкой вычислительной сложностью и с высоким качеством.

В приведенном исследовании будет описываться встраивание ЦВЗ в одноканальный (чёрно-белый) видеосигнал, поэтому и ЦВЗ будет использоваться тоже только полутоновой. Возможное обобщение метода на случай многокомпонентного (цветного) видеосигнала представляется тривиальным.

Пусть $x_0(m)$ — m -й кадр исходной видеопоследовательности, а $x_0(m, n_1, n_2)$ — значение пикселя с координатами (n_1, n_2) в m -м кадре. Встраивание фазового ЦВЗ состоит в аддитивном добавлении к исходному

видеосигналу синусоидальной компоненты, начальная фаза которого определяется изображением ЦВЗ:

$$x(m, n_1, n_2) = x_0(m, n_1, n_2) + w(m, n_1, n_2), \quad (15)$$

$$w(m, n_1, n_2) = A \sin(\theta m + \varphi(n_1, n_2)) \quad (16)$$

где A – амплитуда; θ – опорная частота; $\varphi = \varphi(n_1, n_2)$ – фаза; m – номер кадра; n_1 и n_2 – координаты пикселя в кадре; $x_0(m, n_1, n_2)$ – кадры исходного видеоизображения.

Следует отметить, что при встраивании водяного знака в реальные кадры видео модифицированные значения пикселей подвергаются квантованию и округляются до ближайших целых значений в допустимом диапазоне $[0;255]$. В случае амплитуды $A = 1$ в формуле (15) все значения кроме точек максимума и минимума синусоиды будут меньше единицы и при квантовании не дадут изменений. Поэтому для этого и последующих методов при $A = 1$ значения больше 0, будут округляться до 1, а меньше 0 – до -1. В таком случае встраиваться будет бинарное изображение.

Поскольку в разделах 3 и 4 будут представлены модификации текущего метода, то в дальнейшем указанный метод будет именоваться как «базовый».

2.2. Схема извлечения

Процесс извлечения фазовых ЦВЗ из видео будет происходить в несколько этапов, каждый из которых будет подробно описан в этом разделе. В схеме на рисунке 18 приведен общий алгоритм, т.е. все этапы извлечения ЦВЗ из защищенного видео.

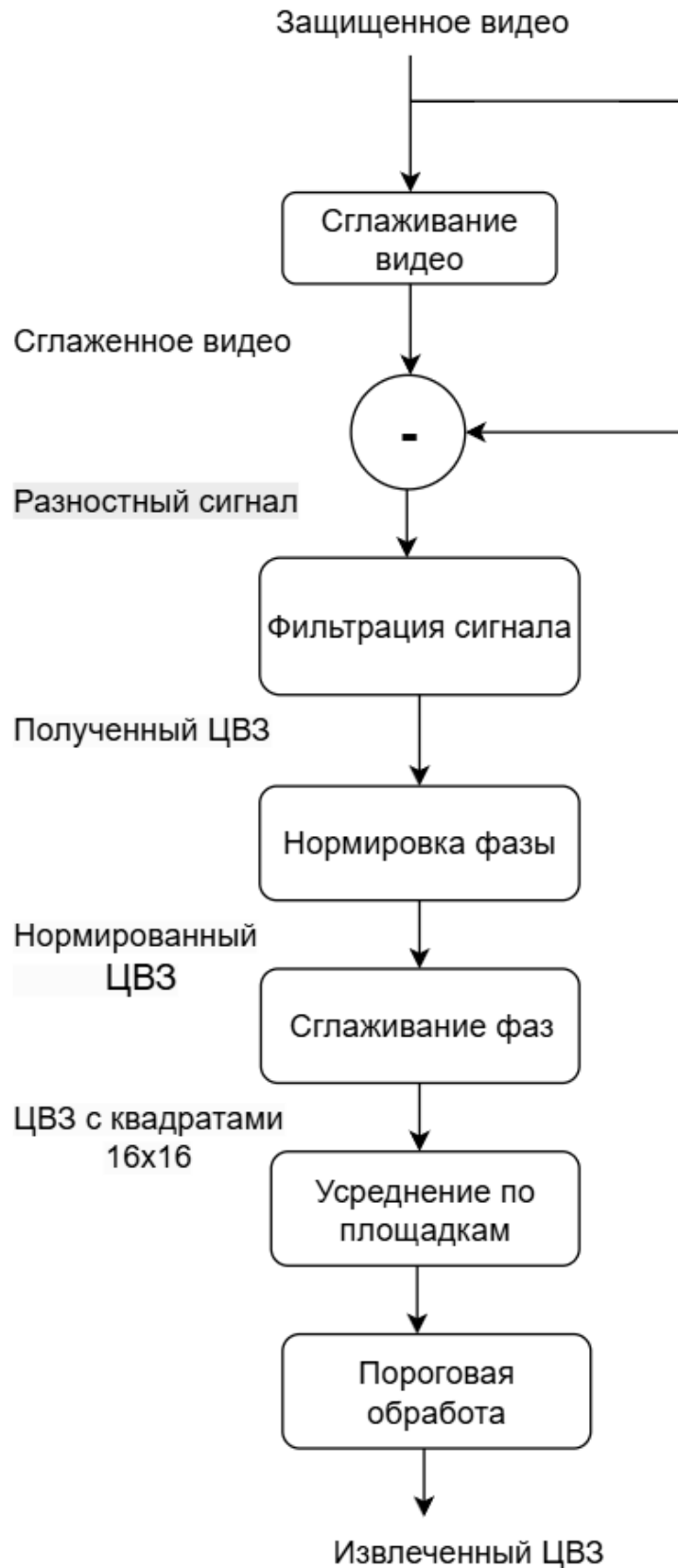


Рисунок 18 – Схема извлечения ЦВЗ из защищенного видео

В приведенной схеме основным этапом алгоритма является процесс фильтрации сигнала, описанный ниже в п 2.2. Остальные пункты данной схемы

являются этапами либо предобработки, либо постобработки сигнала для улучшения точности работы алгоритма. Большинство из описанных этапов могут быть применены независимо для каждого пикселя видео (обрабатывают его как одномерную функцию дискретного времени), но на этапе нормировки фазы необходимо рассматривать полностью пространство кадра. Заключительный этап усреднения по площади квадратов размером 16×16 также подразумевает важность пространственного расположения всех пикселей исходного QR-кода.

2.3. Оценка фазы сигнала

Поскольку встроенная информация содержится в фазовой составляющей синусоиды, встроенной в каждый пиксель, то для её извлечения требуется соответствующим образом отфильтровать исходный сигнал. При этом извлечение будет происходить отдельно из каждого пикселя кадров видео. Обозначим его для краткости как одномерную последовательность – функцию номера кадра - $x(m)$. Для выделения фазы встроенной синусоиды можно использовать любой узкополосный (настроенный на частоту θ) цифровой фильтр, например, линейную инвариантную к сдвигу систему (ЛИС-систему) с комплекснозначной импульсной характеристикой (ИХ):

$$h(m) = \alpha^m e^{i\theta m} u(m), \quad (17)$$

где α - параметр затухания ИХ ($0 < \alpha < 1$); $u(m)$ - функция единичного скачка; m - номер кадра.

Данная ЛИС-система преобразует входной вещественный сигнал $x(m)$ в выходной комплекснозначный:

$$y(m) = h(m) * x(m) = y_c(m) + iy_s(m), \quad (18)$$

где $y_c(m)$ - вещественная часть выходного сигнала; $y_s(m)$ – мнимая часть выходного сигнала; * – символ линейной свертки последовательностей.

Удобно реализовать такую ЛИС-систему с помощью разбиения ИХ на вещественную и мнимую часть:

$$h_c(m) = \alpha^m \cos(\theta m) u(m), \quad (19)$$

$$h_s(m) = \alpha^m \sin(\theta m) u(m). \quad (20)$$

Тогда обработка сигнала будет выполняться с помощью пары преобразований:

$$y_c(m) = h_c(m) * x(m), \quad (21)$$

$$y_s(m) = h_s(m) * x(m). \quad (22)$$

Из выражений (19-20) можно получить, что пара преобразований (21)-(22) реализуется с помощью следующих разностных уравнений:

$$f(m) = 2\alpha \cos(\theta) f(m-1) - \alpha^2 f(m-2) + x(m), \quad (23)$$

$$y_c(m) = f(m) - \alpha \cos(\theta) f(m-1), \quad (24)$$

$$y_s(m) = \alpha \sin(\theta) f(m-1), \quad (25)$$

где $f(m)$ - некоторая промежуточная последовательность.

Вещественную и мнимую компоненты выходного сигнала, полученные в результате преобразований (24) и (25), можно интерпретировать как оценки синусной и косинусной составляющей колебания с частотой θ и фазой φ , добавленной к сигналу в качестве ЦВЗ:

$$y_c(m) = h_c(m) * x(m) = B \cos(\theta m + \varphi), \quad (26)$$

$$y_s(m) = h_s(m) * x(m) = B \sin(\theta m + \varphi). \quad (27)$$

где B – некоторая амплитуда.

Далее решаем систему линейных уравнений относительно нужных нам "фазовых" сигналов, в которых устранена зависимость от опорной частоты ЦВЗ:

$$C(m) = B \cos(\theta) = \cos(\theta m) y_c(m) + \sin(\theta m) y_s(m), \quad (28)$$

$$S(m) = B \sin(\theta) = \cos(\theta m) y_s(m) - \sin(\theta m) y_c(m). \quad (29)$$

После этого выделяем фазу в диапазоне $[0, 2\pi)$:

$$\varphi = \begin{cases} \arctg\left(\frac{S(m)}{C(m)}\right), & C(m) \geq 0; S(m) \geq 0 \\ \arctg\left(\frac{S(m)}{C(m)}\right) + \pi, & C(m) < 0; \\ \arctg\left(\frac{S(m)}{C(m)}\right) + 2\pi, & C(m) \geq 0, S(m) < 0. \end{cases} \quad (30)$$

2.4. Сглаживание исходного видеосигнала

Поскольку исходная видеопоследовательность может содержать динамичные сцены или монтажные склейки, она может иметь случайные флуктуации и скачки. При этом сама видеопоследовательность от сцены к сцене обладает различным средним значением в кадре. Поэтому необходимо сделать её более гладкой с помощью процедуры экспоненциального сглаживания [85] что позволяет устранить резкие переходы и снизить влияние текущего среднего значения. Для этого воспользуемся сглаживающей ЛИС-системой первого порядка:

$$\tilde{x}(m) = \beta_1 \tilde{x}(m-1) + (1 - \beta_1)x(m), \quad (31)$$

где $\tilde{x}(m)$ – сглаженное значение пикселя; β_1 – параметр сглаживания ($0 < \beta_1 < 1$).

Далее на этап непосредственного извлечения фазы будет подаваться только разница между исходным и сглаженным кадром.

$$\bar{x}(m) = \tilde{x}(m) - x(m), \quad (32)$$

2.5. Нормировка фазы

Фаза синусоиды является периодической функцией с периодом 2π . Поскольку ширина рабочего диапазона φ_{max} , в котором может извлекаться

фаза, равна $\frac{\pi}{2}$, то может возникать ситуация, в которой верхнее значение диапазона окажется больше 2π , что вследствие циклического сдвига даст значение близкое к нулю. Такая ситуация может привести к некорректному отображению ЦВЗ, и, как следствие, неправильному процессу обработки полученной фазы.

Проиллюстрируем описанное явление на примере встраивания изображения бинарного ЦВЗ в тестовое видео. Извлеченная фазы в течение видео изменяется по синусоиде, как показано на рисунке 19.

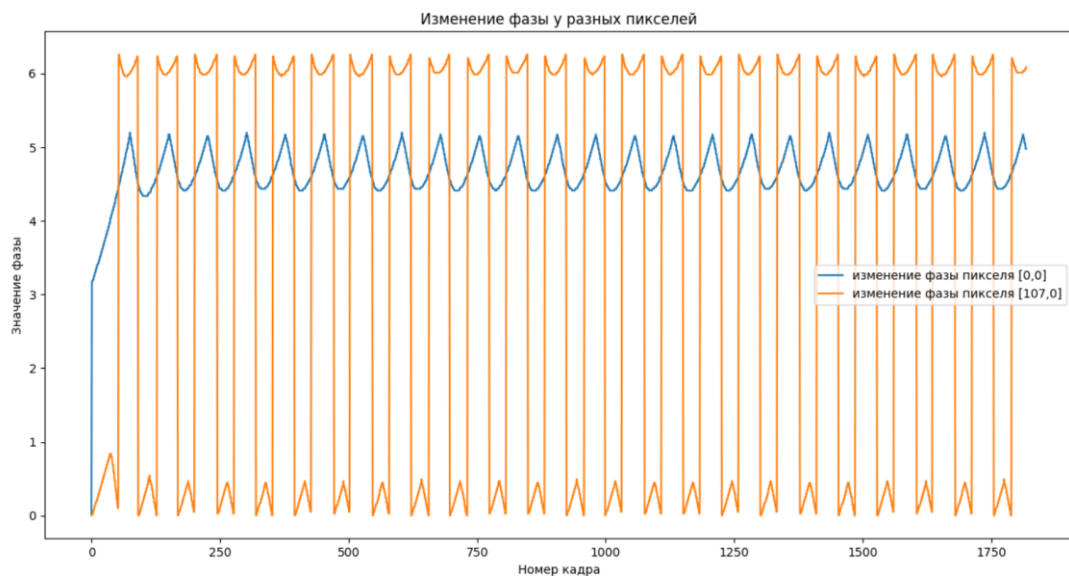


Рисунок 19 – График изменения фазы на отфильтрованном видео

По этому графику можно увидеть проблему “перескока фаз”, т.е. резкой смены значения с $\varphi \approx 2\pi$ до $\varphi \approx 0$ у одного из пикселей, что может приводить к некорректному фазовому изображению. Чтобы избежать этой проблемы, требуется реализовать алгоритм нормировки фазы, то есть сохранить корректное расположение начала фазы в пространстве.

Для реализации этого алгоритма необходимо анализировать всё множество пикселей кадра в целом, а не каждый в отдельности. Для этого построим круговую гистограмму фазового изображения, чтобы определить место, в котором сконцентрированы значения фазы.

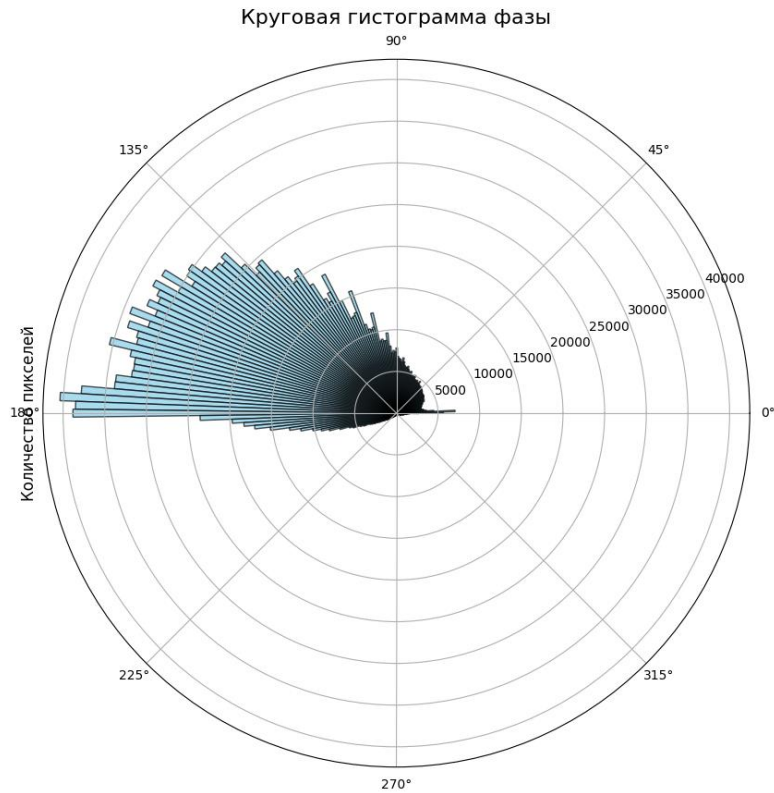


Рисунок 20 – Круговая гистограмма распределения полученных значений фазы

По полученной гистограмме необходимо корректно определить центр тяжести, находящийся в середине получаемого ЦВЗ. Для нахождения центра тяжести полученной фазы найдем независимо первый момент для координаты по оси абсцисс M_x и ординат M_y .

$$M_x = \sum_{i=0}^N \varphi_{xi} p_{xi} ; \quad (33)$$

$$M_y = \sum_{i=0}^N \varphi_{yi} p_{yi} ; \quad (34)$$

φ_{xi} – значение фазы по оси абсцисс, p_{xi} – вероятность возникновения значения фазы по оси абсцисс, φ_{yi} – значение фазы по оси ординат, p_{yi} – вероятность возникновения значения фазы по оси ординат.

Тогда центр тяжести фаз в кадре в целом можно вычислить по общей формуле аналогичной (30):

$$M_1 = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{M_y}{M_x}\right), & M_x \geq 0; M_y \geq 0; \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{M_y}{M_x}\right) + \pi, & M_x < 0; \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{M_y}{M_x}\right) + 2\pi, & M_x, M_y < 0; \end{cases} \quad (35)$$

Далее анализируется полученное положение центра тяжести M фаз на круге. В благоприятном случае его значения будут находиться в диапазоне $[0; 2\pi)$, как показано на рисунке 21, который является отображением гистограммы на рисунке 19.

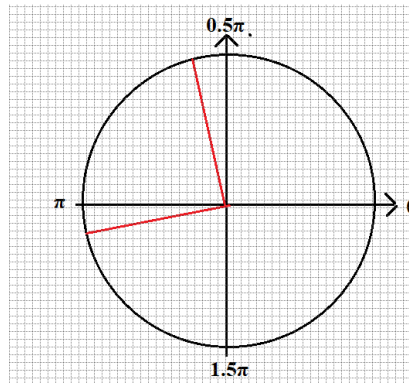


Рисунок 21 – Благоприятный случай расположения значений фазы

В таком случае полученное фазовое изображение можно привести к байтовому формату следующим образом:

$$W = \frac{255}{\varphi_{max}} (\varphi - \varphi_0) = \frac{255}{\varphi_{max}} (\varphi - M_1 + 0,5\varphi_{max}). \quad (36)$$

где φ_{max} – ширина рабочего диапазона. M_1 – центр тяжести.

Но стоит отметить, что пересчёт фазы по формуле (37) корректен только при значении $M_1 \in [\frac{\pi}{4}; \frac{7\pi}{4}]$, т.е. не включает точку перескока. Поэтому необходимо рассмотреть ситуации, когда середина указанного диапазона попадает в интервалы $(\frac{7\pi}{4}; 2\pi)$ или $(0; \frac{\pi}{4})$, как показано на рисунке 22. В этих случаях необходимо циклично сдвинуть значение в середину диапазона.

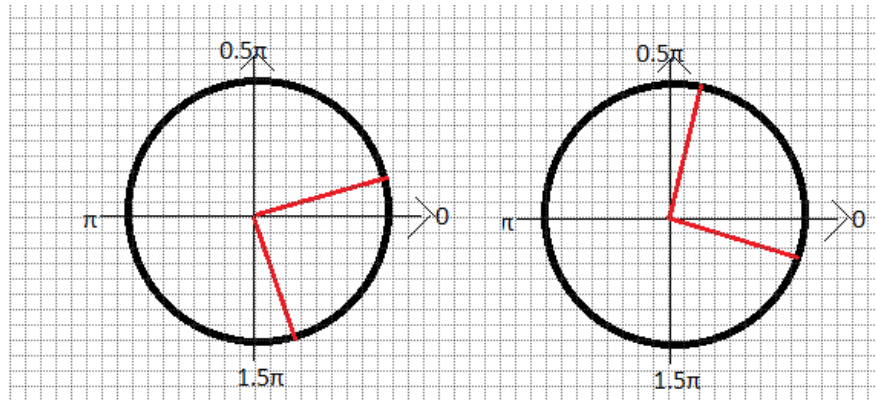


Рисунок 22 – Попадание центра тяжести в диапазон $(\frac{7\pi}{4}; \frac{9\pi}{4})$

Для ситуаций, показанных на рисунке 20, требуется за счёт циклического сдвига фазы вернуть её в корректный интервал. В том случае, если центр тяжести $M \in (0; \frac{\pi}{4})$, то представление фазы в пространственной области будет рассчитываться по формуле (37):

$$W = \frac{255}{\varphi_{max}} (\varphi - 2\pi - M + 0,5\varphi_{max}). \quad (37)$$

В случае, когда $M \in (\frac{7\pi}{4}; 2\pi)$, то значение W считается по формуле (38):

$$W = \frac{255}{\varphi_{max}} (\varphi + 2\pi - M + 0,5\varphi_{max}). \quad (38)$$

Таким образом, с помощью формул (36-38) можно корректно вычислять ЦВЗ в каждом кадре видеопоследовательности в независимости от номера кадра и расположения фаз на круговой гистограмме.

2.6. Сглаживание последовательности фаз

Вычисленная по формулам (36-38) и нормированная фаза синусоиды, встроенной в пиксель, в идеале не зависит от номера кадра m . Однако в реальных условиях она претерпевает случайные возмущения, связанные с динамикой содержания основного видео, сменой сцен, шумами и т.п. Поэтому будем рассматривать эту фазу снова как функцию m и применять к ней

усреднение во времени с помощью простой процедуры экспоненциального сглаживания, реализуемой ЛИС-системой первого порядка:

$$\bar{\varphi}(m) = (1 - \beta_2)\bar{\varphi}(m - 1) + \beta_2\varphi(m), \quad (39)$$

где $\bar{\varphi}$ – сглаженное значение фазы пикселя; β_2 – параметр сглаживания ($0 < \beta_2 < 1$).

2.7. Оптимизация параметров алгоритма для качественного извлечения видео

Для проведения исследования необходимо определить оптимальные значения ключевых параметров метода (амплитуды встраиваемой синусоиды A , ее частоты θ , параметров затухания ИХ узкополосной ЛИС-системы α и двух сглаживаний β_1, β_2 , которые обеспечат максимальную точность извлечения ЦВЗ. Для этого была проведена серия экспериментов на синтезированном видео, статистические характеристики которого указаны в таблице 1 в столбце со средними значениями параметров. Методика исследования состояла в фиксации всех параметров алгоритма, кроме одного варьируемого, и последовательном рассмотрении всех параметров в качестве варьируемых. Это позволило выделить и исследовать влияние каждого параметра на эффективность метода.

Значение амплитуды требуется брать как можно малым для минимизации визуальной видимости ЦВЗ. Поэтому в дальнейших исследованиях использовалась амплитуда $A = 1$. Вначале найдём параметры опорной частоты, предварительно зафиксировав значения параметра затухания $\alpha = 0,99$, параметра сглаживания исходного видеосигнала $\beta_1 = 0,99$, параметра сглаживания $\beta_2 = 0,99$. Значение опорной частоты будем варьировать в диапазоне $\theta \in [0,1; \pi)$ с шагом 0,5 на видеозаписи, состоящей из 1000 кадров с высокой интенсивностью. Результаты эксперимента показаны на рисунке 23.

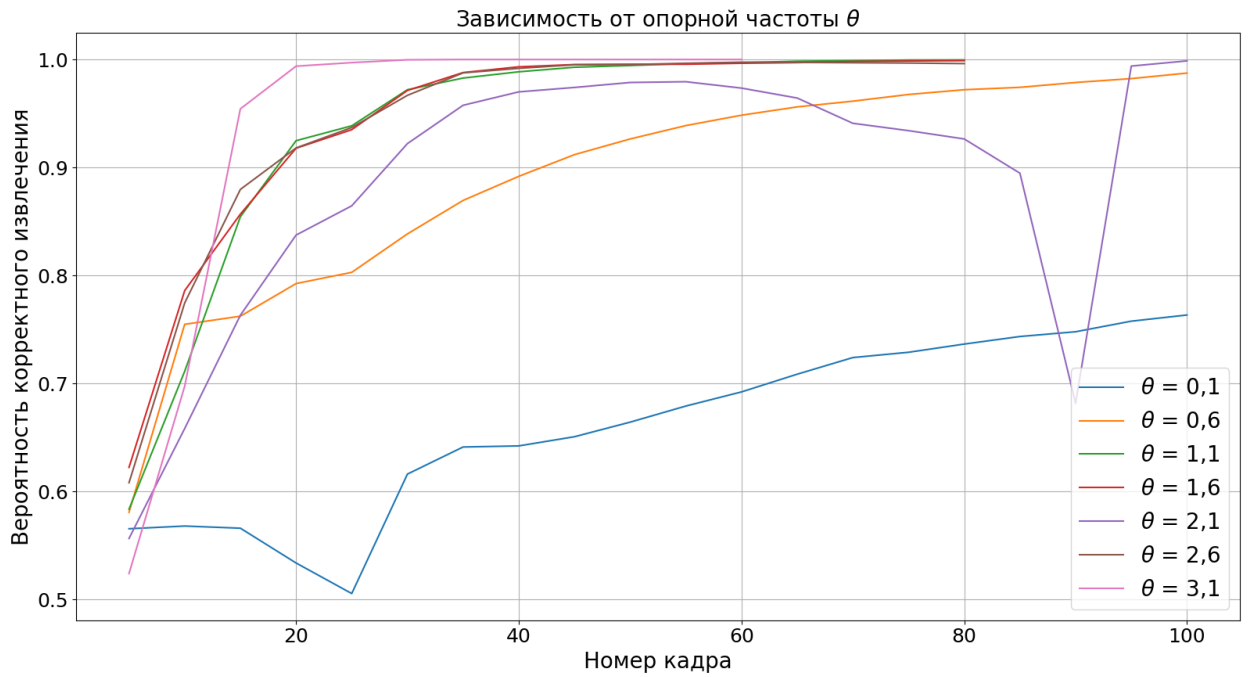


Рисунок 23 – Зависимость точности извлечения от опорной частоты видео на синтезированном видео

Из приведенного графика можно заметить, что результаты извлечения улучшаются при увеличении опорной частоты. Далее сузим диапазон исследований на основе полученного графика для определения единственной частоты, которая будет использоваться в дальнейших исследованиях.

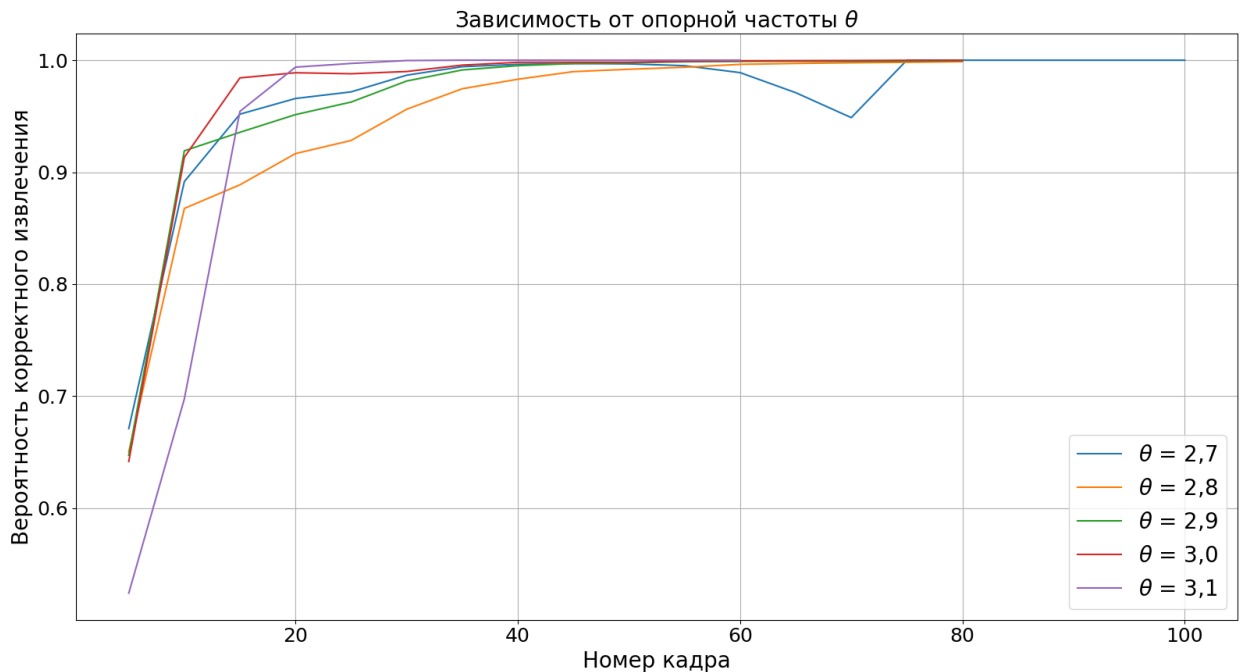


Рисунок 24 – Зависимость точности извлечения от опорной частоты на синтезированном видео в узком диапазоне

На рисунке 24 представлен процесс извлечения при опорной частоте в диапазоне $\theta \in [2,7; 3,1]$. Эксперименты показали, что лучшие результаты получены при частоте, приближающейся к π . Значение $\theta = 3$ будет использоваться при проведении последующих экспериментов.

Далее исследуем зависимость точности извлечения от параметра затухания узкополосной ЛИС-системы, используемой при извлечении. Эксперимент будет происходить на том же синтезированном видео из 100 кадров. Исходя из принципа работы ЛИС-системы, рассматриваются значения α близкие к 1. Варьироваться параметр затухания будет в диапазоне $\alpha \in [0,89; 0,99]$. Эксперименты по его влиянию показаны на рисунке 25.

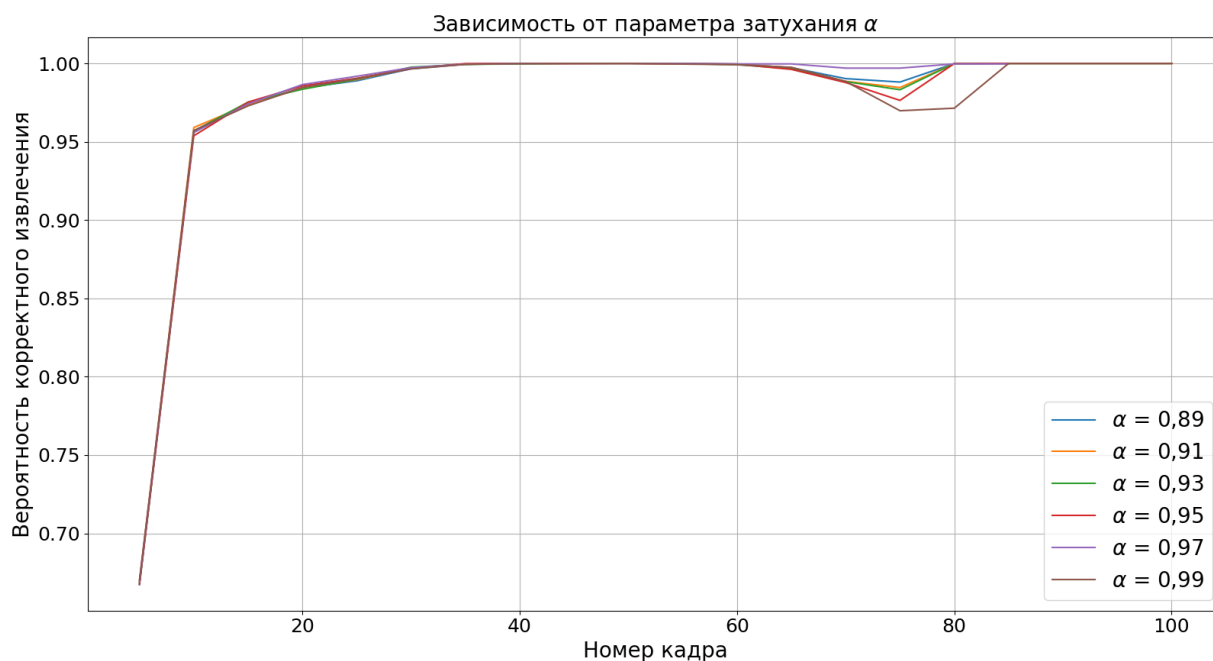


Рисунок 25 – Зависимость точности извлечения от параметра затухания на синтезированном видео

Исходя из представленного графика, видно, что наиболее качественно извлечение будет происходить при максимизации параметра затухания $\alpha = 0,97$. Поэтому в дальнейших экспериментах используем такое значение.

Осталось определить значение для параметров ЛИС-систем, используемых для сглаживания исходного видеосигнала и фазы после ее выделения и нормировки. Исходя из формулы (31) логично исследовать

параметр сглаживания исходного видеосигнала близким к 1. Рассматривались значения параметра сглаживания β_1 от 0,89 до 0,99. Графики, иллюстрирующие извлечение ЦВЗ при таком изменении, продемонстрированы на рисунке 26.

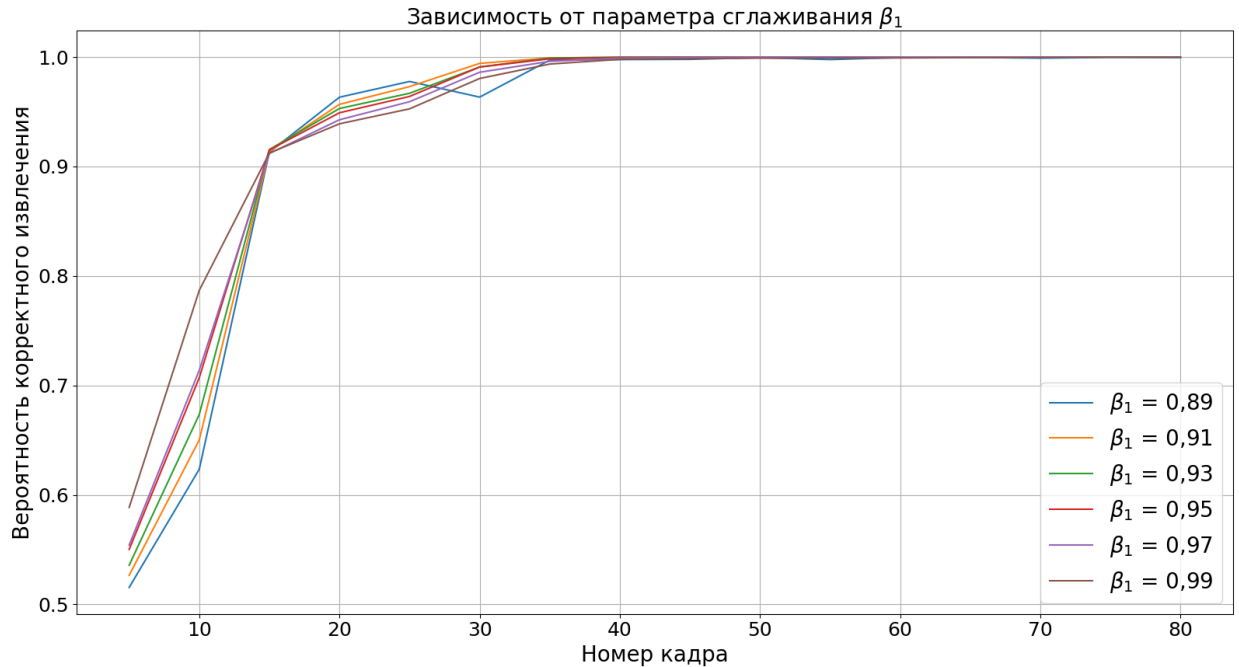


Рисунок 26 – Зависимость точности извлечения от параметра сглаживания на синтезированном видео

Из графика видно, что наименьшая подверженность смене кадров и стабильный рост точности извлечения наблюдается при параметре $\beta_1 \in [0,91; 0,95]$, поэтому зафиксируем его на значении $\beta_1 = 0,93$.

Заключительным этапом процедуры извлечения ЦВЗ является процедура сглаживания фазы с помощью ЛИС-системы (по формуле 39) с параметром сглаживания фазы β_2 . На рисунке 27 приведен график, демонстрирующий влияние этого параметра на вероятность корректного извлечения.

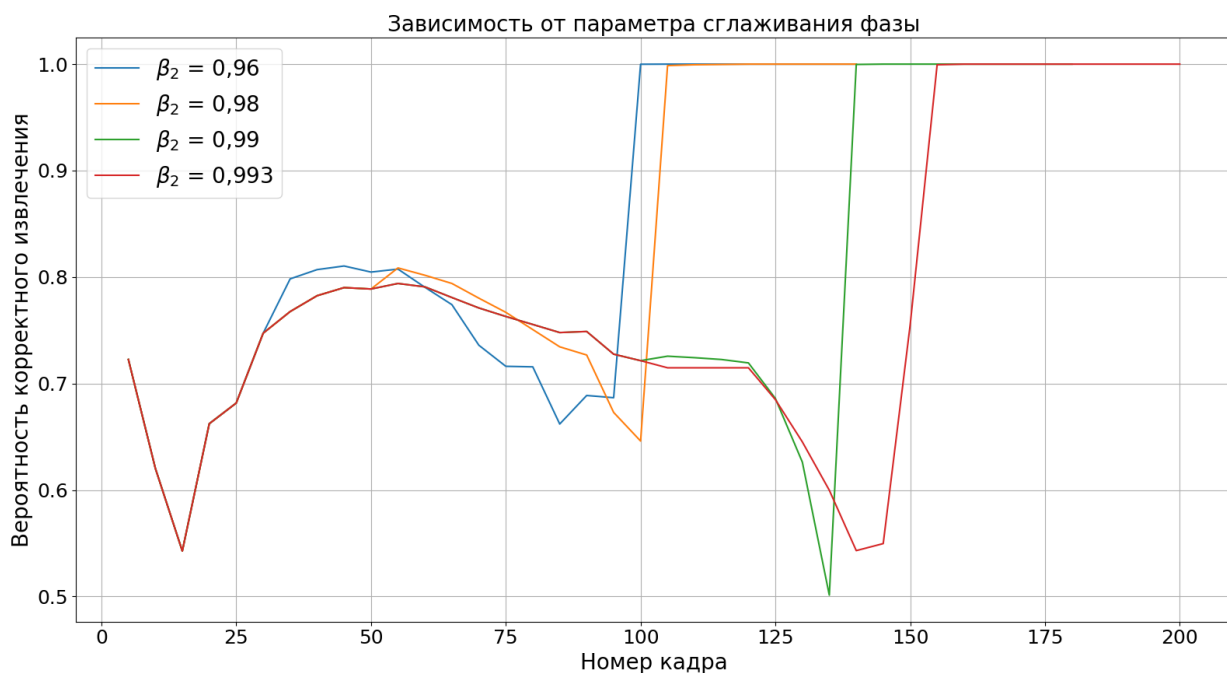


Рисунок 27 – Зависимость точности извлечения от параметра сглаживания фазы на синтезированном видео

Так, из приведенного графика видно, что наименьшее количество кадров для извлечения требуется при параметре сглаживания фазы $\beta_2 = 0,96$.

При выбранных параметрах $\alpha, \beta_1, \beta_2, \theta$ проведем исследование по извлечению ЦВЗ при возрастании амплитуды синусоиды. Результаты исследования приведены на рисунке 28.

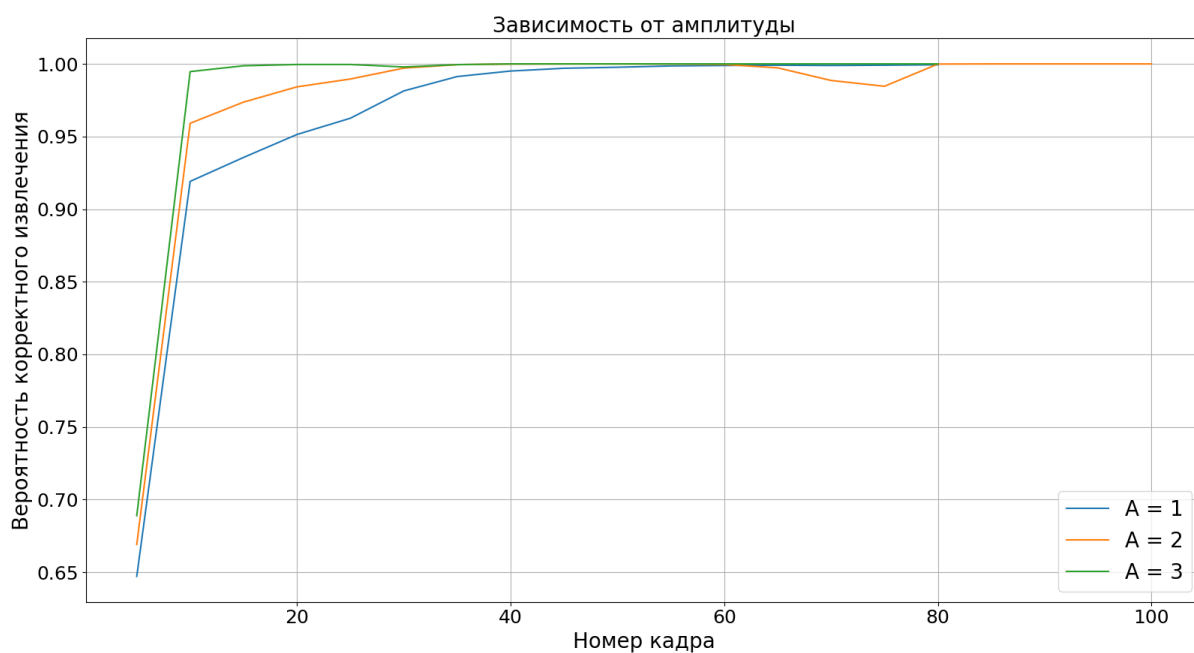


Рисунок 28 – Зависимость точности извлечения от амплитуды

Возрастание амплитуды приводит к лучшей точности извлечения, а также позволяет избавиться от необходимости делать ЦВЗ бинарным). Поэтому в реальной системе лучше использовать ЦВЗ с амплитудой $A = 2; 3$.

2.8. Влияние параметров модели синтезированного видео на качество извлечения

Для корректной постановки дальнейших экспериментов требуется определить влияние параметров видео на точность извлечения ЦВЗ (по формуле (3)) из последнего рассматриваемого кадра видео. Анализировалась зависимость от каждого из восьми определенных в этой работе параметров (математическое ожидание, дисперсии мозаики и текстуры, коэффициенты корреляции мозаики и текстуры, дисперсии сенсорного и текстурного шума, а также интенсивность смены сцен видеопотока), приведённых в таблице 1. Для этого было синтезировано видео с фиксацией всех параметров на уровне усредненных значений кроме одного изменяемого.

Результаты экспериментов по влиянию математического ожидания кадра видео представлены на рисунке 29. В рамках эксперимента его изменяли от 50 до 110.

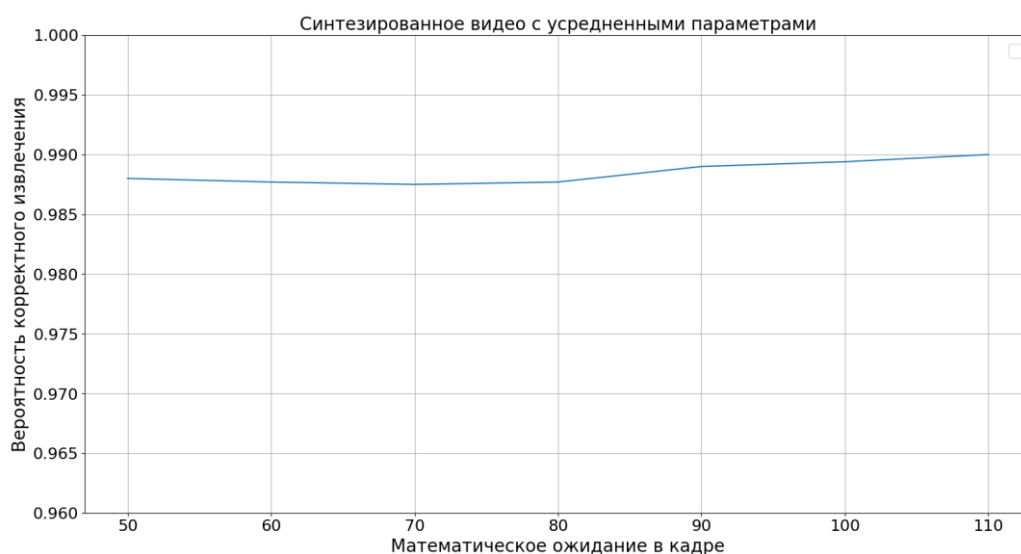


Рисунок 29 – Зависимость точности извлечения от математического ожидания кадров видео

На графике видно, что точность извлечения ЦВЗ практически не зависит от яркости кадров видео.

Далее рассмотрим влияние как дисперсии кусочно-постоянного изображения, так и отдельно дисперсии текстуры. Первая изменялась в пределах от 1500 до 3500, а вторая от 300 до 1000. Графики зависимости представлены на рисунке 30.

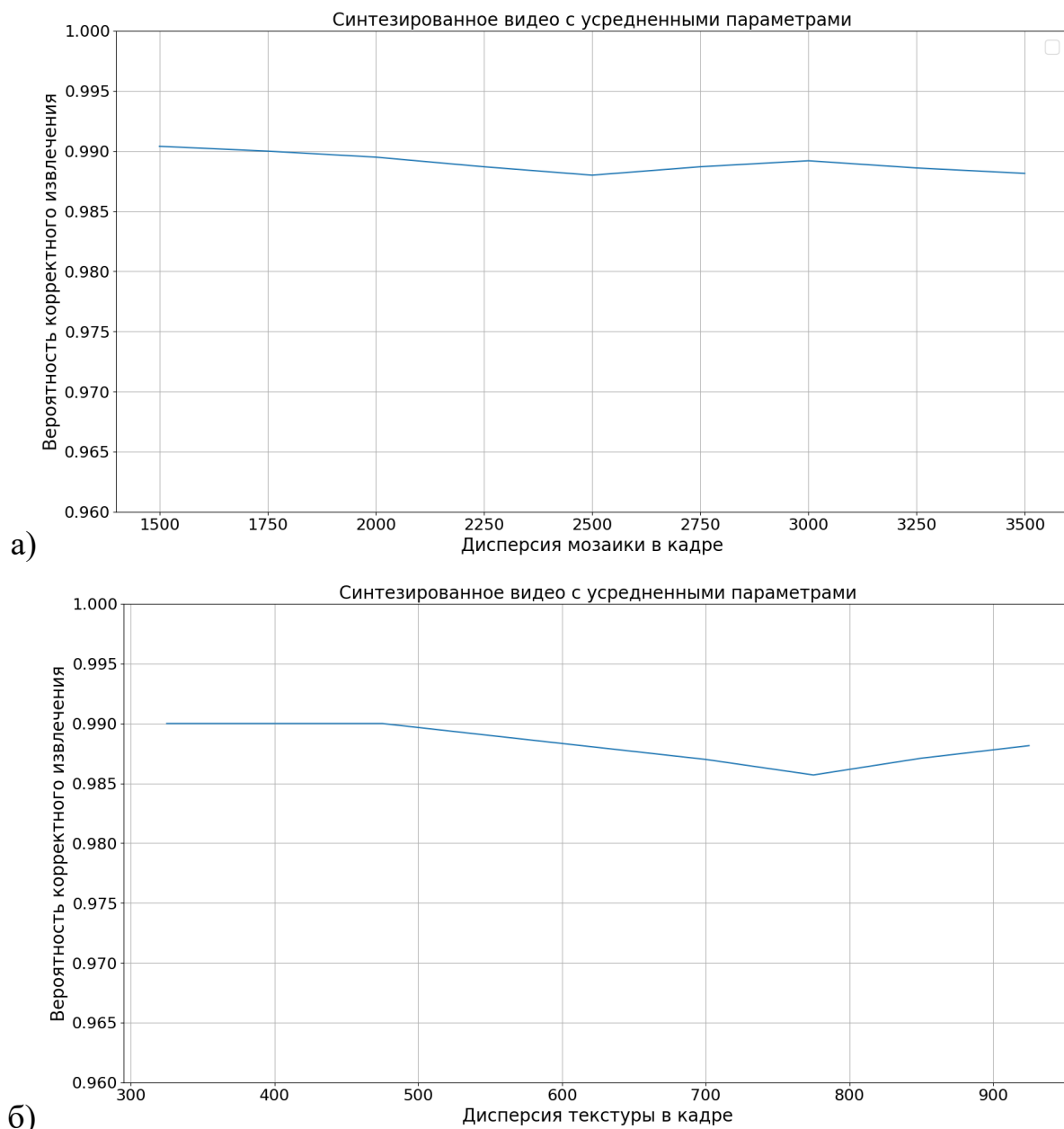


Рисунок 30 – Зависимость точности извлечения а) от дисперсии мозаики; б) от текстуры кадров видео

На графиках видно, что изменения дисперсии в каждом кадре не влияют напрямую на точность извлечения ЦВЗ, отклонение в точности извлечения незначительно.

На рисунках 31а и 31б заметно аналогичная ситуация и с коэффициентом корреляции мозаики и текстуры. Влияние шумов на извлечение будет рассмотрено в разделе 5.

Из графиков 30-32 можно сделать выводы, что точность извлечения практически не зависит от статистических характеристик каждого кадра. Это может объясняться тем, что и процесс встраивания, и процесс извлечения ЦВЗ полностью (за исключением этапа нормировки фаз) происходит независимо для каждого пикселя кадра.

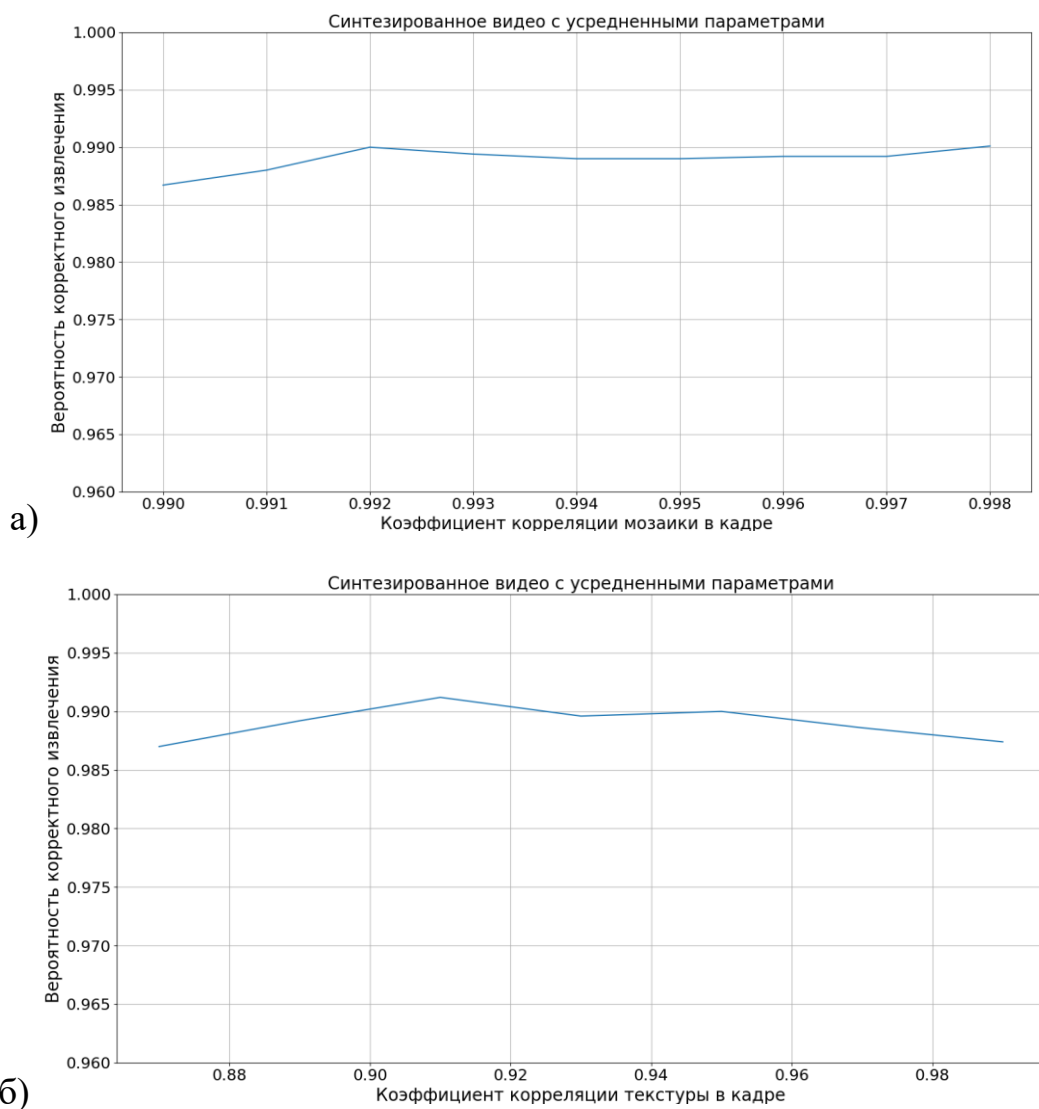


Рисунок 31 – Зависимость точности извлечения а) от коэффициента корреляции мозаики; б) текстуры кадров видео

Далее рассмотрим зависимость точность извлечения от временной характеристики видео, то есть от интенсивности потока смены сцен. На рисунке 32 представлен график изменения точности извлечения при возрастании параметра интенсивности.

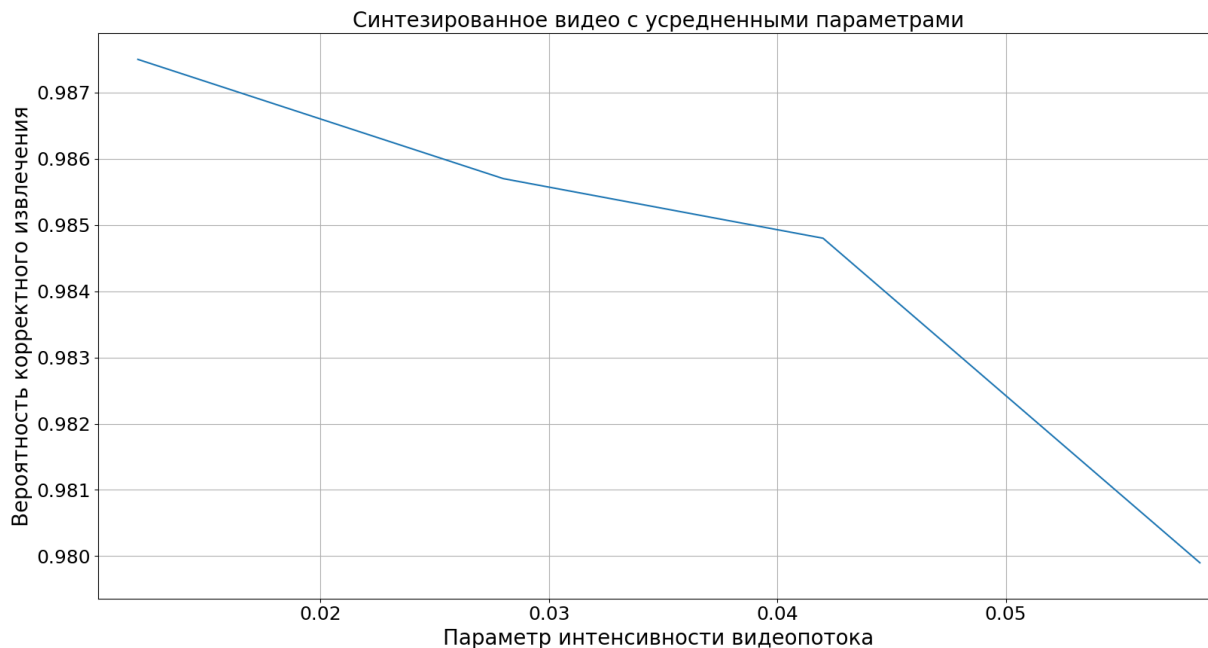


Рисунок 32 – Зависимость точности извлечения от интенсивности видеопотока

Из графика видно, что при увеличении интенсивности потока уменьшается точность извлечения ЦВЗ. Это связано с тем, что увеличению интенсивности приводит к более частой смене сцены, и соответственно процесс накапливания ЦВЗ будет начинаться каждый раз с новой сцены.

Поэтому в дальнейших экспериментах корректно будет использовать усредненные значения параметров кадра, а варьировать только интенсивность потока.

Выводы и результаты второго раздела

1) В данном разделе был рассмотрен алгоритм извлечения фазового ЦВЗ из видеозаписи, в которую он был встроен методом, описанным в пункте 1.2. В пунктах 2.2-2.5 подробно описан алгоритм, состоящий из пяти этапов.

Эти этапы включают в себя этапы предобработки подаваемого на вход видео (сглаживание подаваемого сигнала и его вычитание из полученного), два этапа постобработки ЦВЗ (нормировка фазы и сглаживание фазы), полученного в результате фильтрации сигнала и непосредственно саму узкополосную фильтрацию сигнала, позволяющую получить фазу.

2) В пункте 2.6 описан метод, позволяющий подобрать оптимальные параметры алгоритма, при которых точность извлечения будет максимальной.

3) В пункте 2.7 анализируется влияние каждого из параметров модели на итоговый результат извлечения. По результатам проведенных экспериментов оказалось, что единственным из параметров, оказывающим серьезное влияние на эффективность метода, является интенсивность видеопотока.

4) Также результаты экспериментов, описанных в пунктах 2.6 и 2.7, доказывают корректность извлечения при использовании метода фазовых ЦВЗ.

РАЗДЕЛ 3. УПРОЩЁННЫЙ МЕТОД ВСТРАИВАНИЯ ФАЗОВЫХ ЦВЗ

Методы встраивания и извлечения фазового ЦВЗ, описанные в 1 и 2м разделах, продемонстрировали как высокую эффективность (качество извлечения ЦВЗ), так и необходимость выполнения довольно большого объёма вычислений, особенно на стадии извлечения ЦВЗ.

В данном разделе описывается модификация [86*,87*] описанного метода, направленная, в первую очередь, на снижение его вычислительной сложности. Во-первых, в эксперименте, описанном в пункте 2.6, установлено, что эффективность метода возрастает с увеличением частоты встраиваемой синусоиды. Поэтому в данном разделе рассматривается возможность взять предельно высокую (с учетом дискретности аргумента) частоту синусоиды, при которой она превращается в осциллирующую последовательность, состоящую из плюс-минус единиц.

Во-вторых, фаза такой вырожденной синусоиды может принимать только два возможных значения, задающие смещение осциллирующей последовательности на один шаг. В этой ситуации ЦВЗ неизбежно становится бинарным изображением, что накладывает соответствующие ограничения на формат встраиваемого ЦВЗ.

Поскольку ключевой особенностью данной модификации является уменьшение вычислительной сложности, в рамках настоящей работы она будет называться «упрощённым методом».

3.1. Модификация алгоритмов встраивания и извлечения ЦВЗ

Формула встраивания ЦВЗ будет отличаться от формулы, используемой в (15), за счёт использования предельной опорной частоты. Теперь суть встраивания состоит в аддитивном добавлении к каждому пикселю осциллирующей последовательности $\pm(-1)^m$, начальный знак которой задается бинарным изображением ЦВЗ:

$$w(m, n_1, n_2) = A(-1)^{m+B(n_1, n_2)}, \quad (40)$$

где A – амплитуда, $B(n_1, n_2) \in \{0, 1\}$ - бинарное изображение ЦВЗ.

Процесс извлечения также изменится относительно описания, приведенного в пункте (2.2), однако по-прежнему происходит независимо для каждого пикселя. Для упрощённого алгоритма импульсная характеристика, используемая в (19), преобразуется следующим образом:

$$h(m) = a^m(-1)^m u(m). \quad (41)$$

ЛИС-системе с такой ИХ соответствует следующее разностное уравнение первого порядка:

$$f(m) = x(m) - \alpha f(m - 1). \quad (42)$$

Следует заметить, что последовательность $f(m)$ является осциллирующей, она меняет знак в каждом кадре. Поэтому далее выполняется инвертирование чётных кадров видеопоследовательности:

$$y(m) = (-1)^m f(m). \quad (43)$$

Тем не менее извлеченный ЦВЗ может получиться как в правильном, так и в инвертированном виде (в негативе). На практике эта неопределенность легко решается введением в изображение ЦВЗ области с заранее заданными бинарными значениями пикселей. В экспериментах ниже данная проблема решалась проверкой на совпадение с эталоном как извлеченного ЦВЗ, так и его инвертированного варианта – и принимался к рассмотрению тот, где ошибок извлечения меньше.

Далее последовательность $y(m)$, постепенно стабилизирующаяся по мере преобразования входного сигнала и накопления информации, с помощью пороговой обработки преобразуется в искомое значение элемента B встроенного бинарного ЦВЗ:

$$B(m) = \begin{cases} 1 & \text{при } y(m) \geq 0 \\ 0 & \text{при } y(m) < 0. \end{cases} \quad (44)$$

3.2. Оценка вычислительной сложности

Сравним вычислительную сложность упрощённого метода и базового, описанного в разделе 2. Заметим, что формула (15) справедлива для обоих случаев, а встраиваемое изображение (для модифицированного метода оно задается формулой (40)) формируется заранее и один раз на всё видео. Поэтому можно считать, что этап встраивания ЦВЗ у обоих методов имеет одинаковую сложность.

На этапе извлечения предложенный метод требует вычислений по формулам (42), (43), т.е. выполнения всего одного умножения и двух сложений/вычитаний для одного пикселя в кадре (сравнение с порогом считаем вычитанием). Аналогичная оценка по формулам (23-25,28-29) показывает, что в базовом методе необходимо выполнять не менее 10 вещественных умножений и шести вещественных сложений на пиксель. Если считать указанные арифметические операции равнозатратными, то предлагаемый метод имеет, как минимум, пятикратное преимущество в вычислительной эффективности перед базовым. Также стоит отметить, что упрощённый метод позволяет избавиться от этапа сглаживания последовательности кадров, а также от этапа сглаживания фазы при постобработке извлечённого ЦВЗ.

3.3. Дополнительные процедуры обработки сигнала

Как и при рассмотрении базового метода фазовых ЦВЗ, существует проблема, связанная с наличием скачкообразного изменения сигнала при смене сцены видеоряда или при появлении дополнительных объектов в кадре. Такая ситуация может приводить к разрушению накопленного ЦВЗ и невозможности извлечения ЦВЗ в произвольный момент времени.

Для решения этой проблемы были исследованы несколько методов с учётом специфики измененного метода. Изначально исследовалась

возможность использования процедуры экспоненциального сглаживания, реализуемой с помощью ЛИС-системы первого порядка, описанной выражением (31).

В качестве второго метода рассматривалось использование разностного сигнала в ЛИС-системе первого порядка. Разностный сигнал позволяет минимизировать влияние одиночных скачков яркости на итоговый результат извлечения. Тогда вместо формулы (42) можно использовать её модифицированный вариант:

$$f(m) = \Delta(m) - \alpha f(m - 1), \quad (46)$$

где

$$\Delta(m) = x(m) - x(m - 1). \quad (47)$$

Дополнительно уменьшить негативный эффект от скачков яркости можно достичь при двустороннем ограничении разностного сигнала:

$$\Delta(m) = \begin{cases} 2A & \text{при } x(m) - x(m - 1) > 2A, \\ x(m) - x(m - 1) & \text{при } |x(m) - x(m - 1)| \leq 2A, \\ -2A & \text{при } x(m) - x(m - 1) < -2A. \end{cases} \quad (48)$$

Ограничение будет происходить на значение составляющие две амплитуды ЦВЗ, поскольку на ровной поверхности разность между соседними кадрами будет заключаться в значении встроенного ЦВЗ, которое в соседних кадрах равно 1 и -1 соответственно.

Для выявления лучшего метода, позволяющего минимизировать ущерб, возникающий из-за яркостных скачков, проведем эксперимент на синтезированном видео с 16 яркостными скачками на видеозапись, состоящую из 200 кадров.

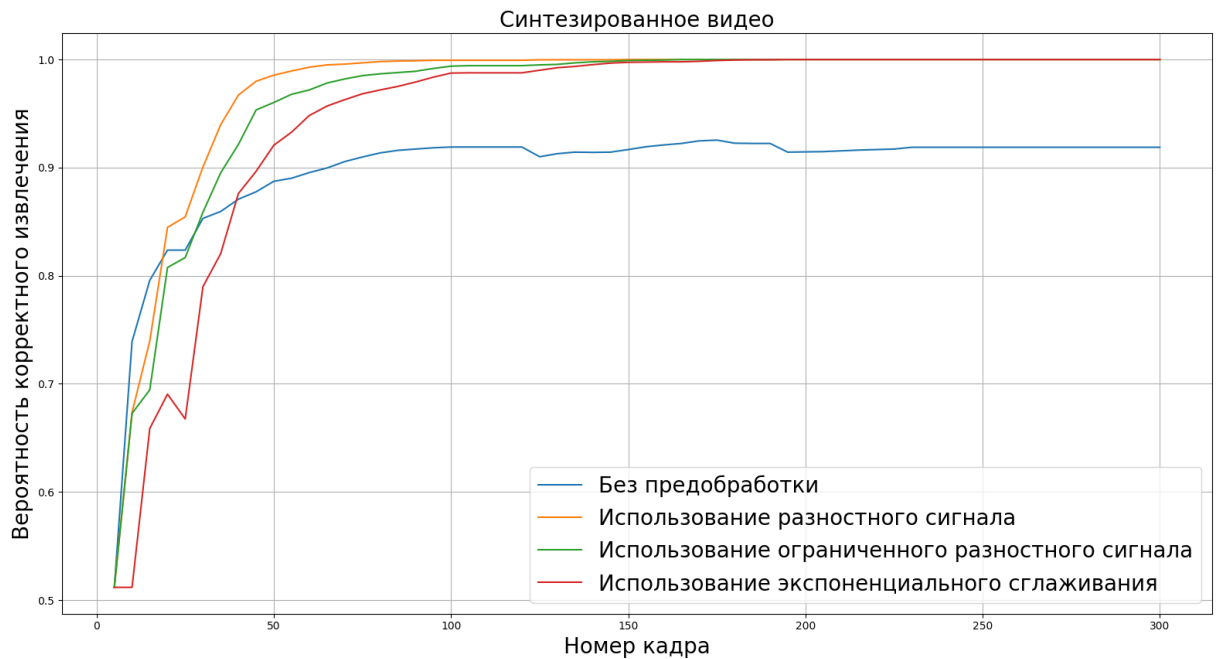


Рисунок 33 – Сравнение методов обработки сигналов на синтезированном видео с высокой интенсивностью

Из получившихся результатов можно увидеть, что для простейшего варианта алгоритма, описанного в пункте 3.1, точность извлечения подвержена сильным перепадам в ходе процесса извлечения. При применении сглаживания ЛИС-системой (см. выражение (33)) таких резких перепадов не происходит, но точность извлечения низкая для коротких интервалов обработки видео. Наилучший результат показал метод с использованием разностного сигнала (формулы 46-47). По графику видно, что стабильного и полностью корректного результата извлечения ЦВЗ удаётся достичь уже за 150 кадров.

С учетом выбранного варианта для сглаживания сигнала рассмотрим влияние амплитуды ЦВЗ на вероятность корректного извлечения на примере того же синтезированного видео (рисунок 34).

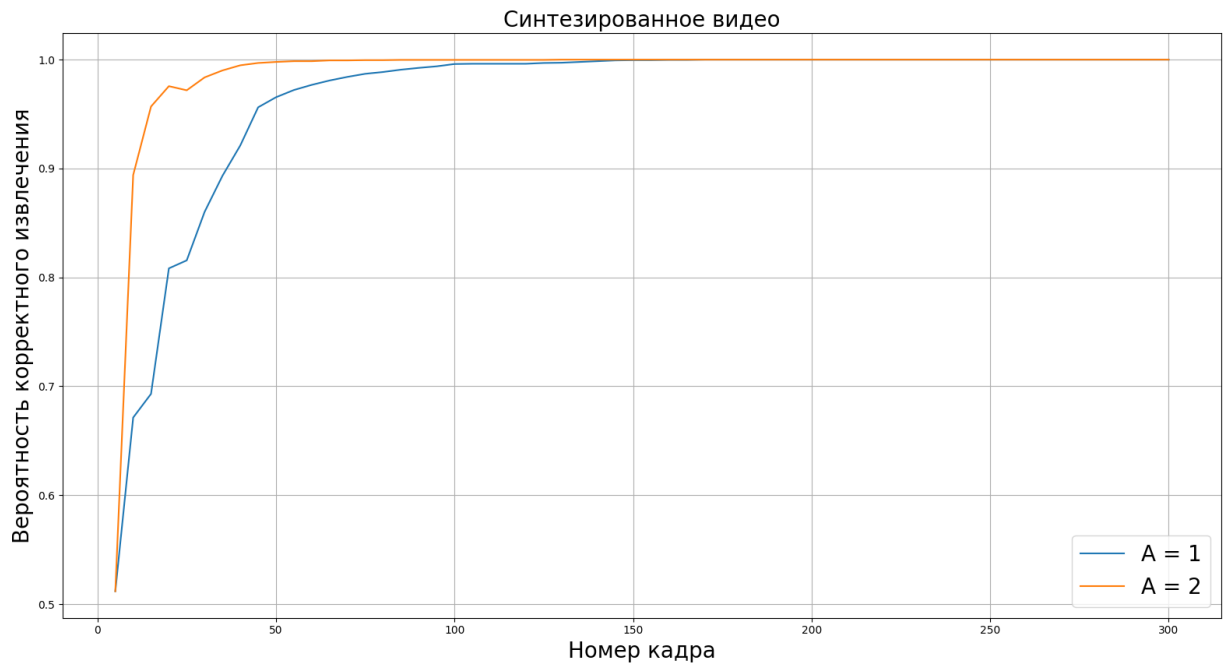


Рисунок 34 – Сравнение методов обработки сигналов на синтезированном видео с высокой интенсивностью

По графику видно, что увеличение амплитуды приводит к более быстрому накоплению ЦВЗ в видео. Однако даже при минимальной амплитуде $A = 1$ ЦВЗ полностью корректно извлекается за 80 кадров.

Выводы и результаты по третьему разделу

- 1) Предложен упрощённый метод встраивания фазовых ЦВЗ в видео. По результатам его исследования сделан вывод, что он позволяет пятикратно ускорить базовый метод за счёт существенно упрощения вычислительного аппарата, поскольку использует предельно высокую допустимую опорную частоту. Также использование упрощённого метода избавляет от нескольких дополнительных процедур на этапе постобработки извлечённого ЦВЗ.
- 2) Результаты экспериментов, приведенных в пункте 3.3 показывают, что метод позволяет быстрее (за меньшее число кадров) извлекать ЦВЗ из защищённого видео.

3) Приведены результаты экспериментов, анализирующие различные варианты сглаживания полученного сигнала. Исходя из результатов эксперимента наименьшее количество кадров для извлечения требуется при использовании разностного сигнала для ЛИС-системы. Уравнения, описывающие принцип сглаживания, приведены в формулах (46)-(47).

4) Следует отметить, что данный метод допускает использование в качестве ЦВЗ только бинарных изображений, что несколько сужает возможности его практического применения. Но для случаев бинарных ЦВЗ, например, QR-кода, использование модифицированного метода безусловно является рациональным.

РАЗДЕЛ 4. СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ВСТРАИВАНИЯ ФАЗОВЫХ ЦВЗ

Базовый метод встраивания фазовых ЦВЗ, подробно описанный в разделах 1-2, не ограничивается использованием бинарных ЦВЗ. Однако в выше описанной части диссертации в качестве ЦВЗ использовалась именно бинарная последовательность (в виде QR-кода). В данном разделе исследуется возможность использования полутонного изображения в качестве ЦВЗ.

В качестве подхода к созданию такого типа ЦВЗ выбрана идея использования вторичного контейнера как метода скрытой передачи информации, ранее описанная в работах [88,89]. Вместо прямого встраивания в видеокадры, исходный QR-код помещается в контейнер, сформированный в спектральной области, что усложняет задачу злоумышленнику, так как сам ЦВЗ уже не связан напрямую с основным видеопотоком. В дальнейшем для краткости в данной работе эту модификацию [90*] будем именовать как «спектральный метод».

Ниже подробней рассматривается алгоритм формирования ЦВЗ для дальнейшего встраивания.

4.1. Формирование ЦВЗ для спектрального метода

Поскольку сам алгоритм встраивания будет аналогичен базовому алгоритму, то подробнее рассмотрим принцип формирования ЦВЗ.

Изначальным ЦВЗ будет спектральное изображение, в котором расположен QR-код, а встраиваться в фазовую компоненту будет его пространственное представление, полученное в результате обратного ДПФ. Для соблюдения изотропности изображения после применения ОДПФ, QR-код разбивается на два равных по размеру фрагмента: первый располагается в левом верхнем углу спектра, а второй в правом верхнем. В нижних углах спектра расположены зеркальные копии соответствующих фрагментов, что

позволяет сохранить вещественность изображения в пространственной области. На рисунке 35 показан пример модуля спектра размерами 1024x1024 и его отображение пространственной области.

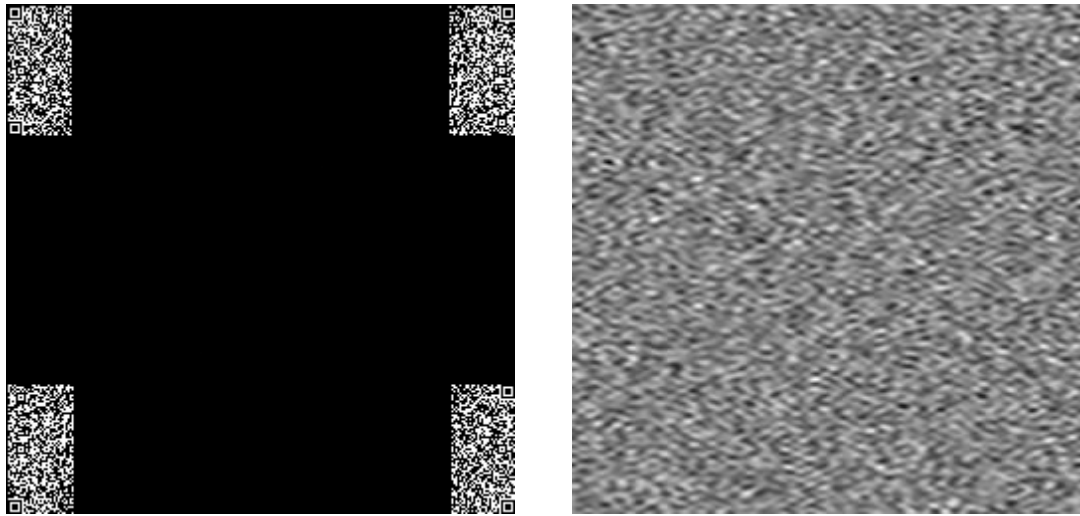


Рисунок 35 – ЦВЗ в спектральной (модуль) и пространственной области

Далее рассмотрим влияние размеров QR-кода на дисперсию ЦВЗ. В спектральной области $W(m_1, m_2)$ представляет собой совокупность из L комплексных экспонент. Оценка дисперсии ЦВЗ $w(n_1, n_2)$, переведенного в пространственную область будет выражаться следующим образом:

$$D_w = \frac{1}{N^2} \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} |w(n_1, n_2)|^2, \quad (49)$$

где N – размер ДПФ.

Согласно теореме Парсеваля[91], выполняется равенство:

$$\sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} |w(n_1, n_2)|^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=0}^{N-1} |W(m_1, m_2)|^2. \quad (50)$$

Следовательно, исходя из уравнений (49)-(50), можно сделать вывод, что дисперсия ЦВЗ выражается следующим образом:

$$D_w = \frac{1}{N^4} \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=0}^{N-1} |W(m_1, m_2)|^2 = \frac{L^2}{N^4} \quad (51)$$

Таким образом, среднеквадратичное отклонение ЦВЗ в пространственной области определяется формулой:

$$\sigma_w = \sqrt{D_w} = \frac{L}{N^2} \quad (52)$$

Тогда получается, что дисперсия прямо пропорциональна квадрату размера QR-кода и обратно пропорциональна квадрату размера контейнера ДПФ.

Исходя из статистического критерия «трёх сигм», можно заключить, что колебания яркостных значений изображения $w(n_1, n_2)$ находятся в диапазоне $(-3\sigma_w, 3\sigma_w)$, т.е. $6\sigma_w$.

Полученный ЦВЗ приводится к диапазону $[0, 255]$. Это означает, что ЦВЗ в пространстве, полученный после ДПФ, должен быть умножен на коэффициент $Q = \frac{256}{6\sigma_v} = 42,67 \frac{N^2}{L}$, а затем линейно сдвинут в указанный диапазон.

4.2. Изменение в алгоритме встраивания и извлечения

В целом алгоритмы встраивания и извлечения ЦВЗ совпадают с алгоритмами, описанными в пункте 1.2. Однако в модифицированном методе, как уже было сказано выше, изображение ЦВЗ сразу получается полутоновым, как результат выполнения обратного ДПФ над бинарным спектром - QR-кодом:

$$\{\varphi(n_1, n_2)\} = \text{ОДПФ}\{(\Phi(k_1, k_2))\} \quad (53)$$

где ОДПФ – оператор обратного преобразования, $\Phi(k_1, k_2)$ комплекснозначный дискретный спектр (QR-код):

$$\begin{aligned} \Phi(k_1, k_2) &= \Phi^*(K - k_1, K - k_2) \\ &= \begin{cases} e^{i\xi(k_1, k_2)} & \text{при } \{k_1, k_2\} \in D_{QR}, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad 0 \leq k_1, k_2 \leq K - 1, \quad (54) \end{aligned}$$

(*) - знак комплексного сопряжения, K – размер двумерного дискретного спектра (квадратного), $\xi(k_1, k_2)$ – случайные величины, лежащие в диапазоне $[0, 2\pi)$, D_{QR} – область, соответствующая единичным значениям элементов QR-кода. Симметричное отображение спектра в (54) обеспечивает вещественность изображения $\varphi(n_1, n_2)$ [82]. Использование комплексных

экспонент со случайными показателями вместо единиц исключает кумулятивный эффект от сложения косинусоидальных спектральных компонент, приводящих к аномально большому значению $\varphi(0, 0)$. Наглядно схему встраивания можно описать рисунком 36.

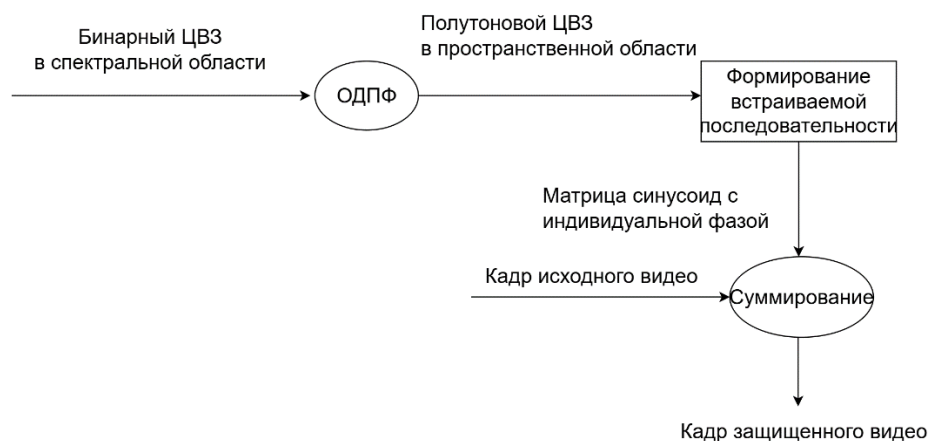


Рисунок 36 – Схема встраивания ЦВЗ

Дополнительным преимуществом спектрального метода является свойство ДПФ [92], позволяющее встраивать ЦВЗ периодически по всему кадру видео. Благодаря этому свойству ДПФ, встроенный ЦВЗ можно извлекать из любого фрагмента кадра, а финальное значение QR-кода восстанавливается на основе усреднения результатов извлечения из разных областей изображения.

При извлечении ЦВЗ сначала применяется алгоритм, описанный в работе [83*,84*], затем полученное фазовое изображение переводится в спектр:

$$\Phi(k_1, k_2) = \text{ДПФ}\{\varphi(n_1, n_2)\}, \quad (55)$$

где ДПФ – оператор прямого преобразования.

После чего вычисляются модули спектральных компонент, являющиеся искомыми элементами бинарного QR-кода. К полученной последовательности извлеченных бинарных изображений дополнительно применяется процедура экспоненциального сглаживания с помощью ЛИС-системы.

Добавляется дополнительный этап, связанный с переводом ЦВЗ из пространственной области обратно в спектральную путём обратного ДПФ.

Важным отличием предлагаемого метода будет процесс постобработки полученного ЦВЗ. В отличие от исходного метода, где каждый бит усреднялся по площади 16×16 , здесь используется усреднение по множеству извлеченных ЦВЗ из разных фрагментов кадра. При размерах кадра N_1, N_2 и стороне встраиваемого QR-кода N_w существует $(N_1 - N_w)(N_2 - N_w)$ вариантов извлечения ЦВЗ, по которым будет происходить усреднение. Однако на практике такое количество извлечений несет высокую вычислительную сложность, поэтому можно обойтись меньшим числом.

Наглядно приведенный алгоритм можно рассмотреть на рисунке 37.

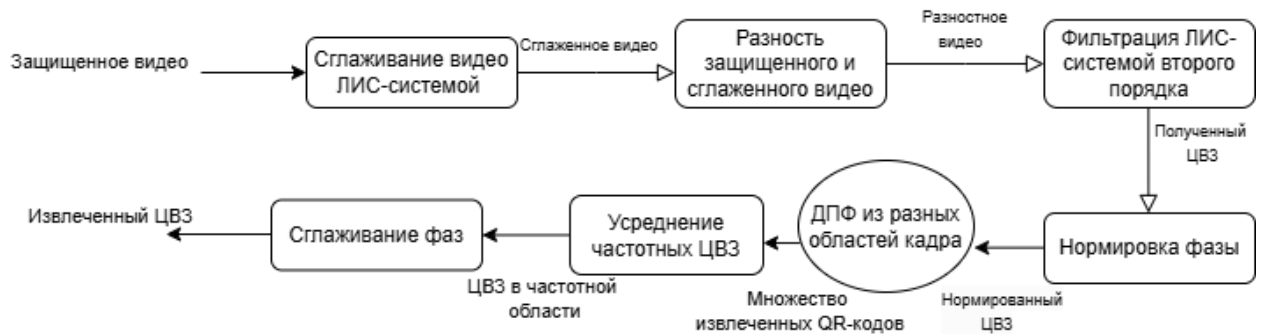


Рисунок 37 – Схема извлечения ЦВЗ

4.3. Оптимизация параметров для наиболее эффективной работы спектрального метода

Для оценки эффективности предложенного метода рассматривалось встраивание ЦВЗ в синтезированное видео с характеристиками, идентичными оригинальным видео. В рамках экспериментов использовался разный размер ДПФ - вторичного контейнера для хранения QR-кода, а также разный размер самого QR-кода. При выборе параметров необходимо было найти компромисс между качественным извлечением, высокой емкостью, а также незаметностью ЦВЗ в каждом кадре видео. Для исследования использовались следующие размеры QR-кода: 49×49 , 65×65 , 81×81 , и размеры ДПФ 256×256 , 512×512 , 1024×1024 .

На рисунке 38 приведена зависимость оценки вероятности (формула 6) корректного извлечения QR-кода размером 65x65 от размера ДПФ (вторичного контейнера). Для этого эксперимента ЦВЗ встраивался с амплитудой $A = 2$, во всю область кадра. Размер выборки, используемой для усреднения, определяется размером шага, используемого для прохода по изображению. Увеличение размера окна ДПФ приводит к пропорциональному росту вычислительной сложности алгоритма. В настоящем исследовании извлечение данных осуществлялось последовательно по всему кадру с шагом 16 пикселей с последующим усреднением результатов.

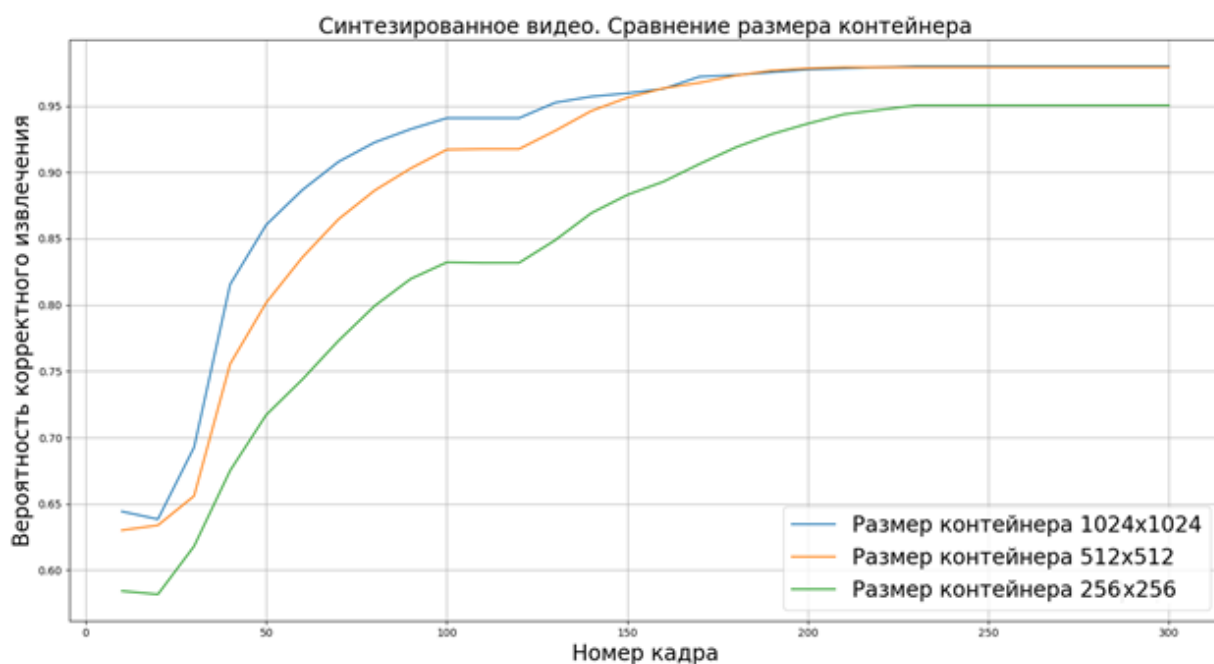


Рисунок 38 – Зависимость точности извлечения от размеров контейнера

Исходя из полученных результатов, можно заметить, что с увеличением размера исходного контейнера улучшается качество извлечения. Это связано с тем, что на больших контейнерах лучше детектируются волновые паттерны каждого бита в пространственной области. В связи с этим далее будем использовать контейнер размера 1024x1024.

Следующий шаг исследования - анализ влияния размера QR-кода на оценку вероятности его правильного извлечения из видеопоследовательности. График зависимости такого влияния приведен на рисунке 39.

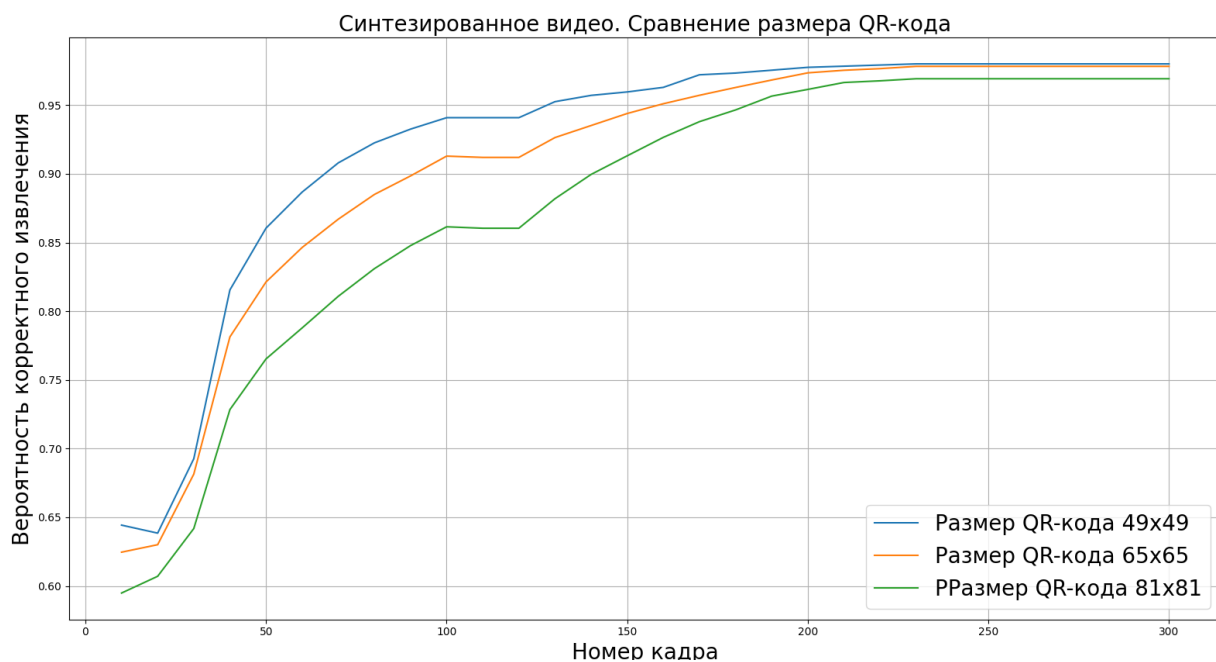


Рисунок 39 – Зависимость точности расположения QR-кода внутри
ДПФ

В предыдущих экспериментах QR-код располагался в низких частотах контейнера (в углах изображения спектра), как было показано на рисунке 32. Экспериментально исследуем возможность расположения ЦВЗ в средних и высоких частотах. Пример полученного в результате смещения спектра приведен на рисунке 40.

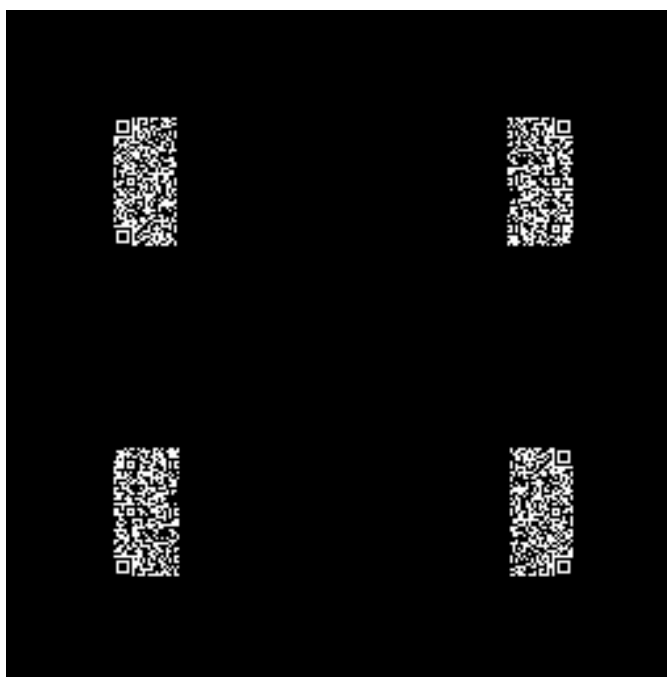


Рисунок 40 – Представление ЦВЗ в спектральной области

В рамках эксперимента сместим положение QR-кода из углов ближе к центру исходного спектра: на 10 и 40 пикселей соответственно. Результаты оценки вероятности корректного извлечения приведены на рисунке 41.

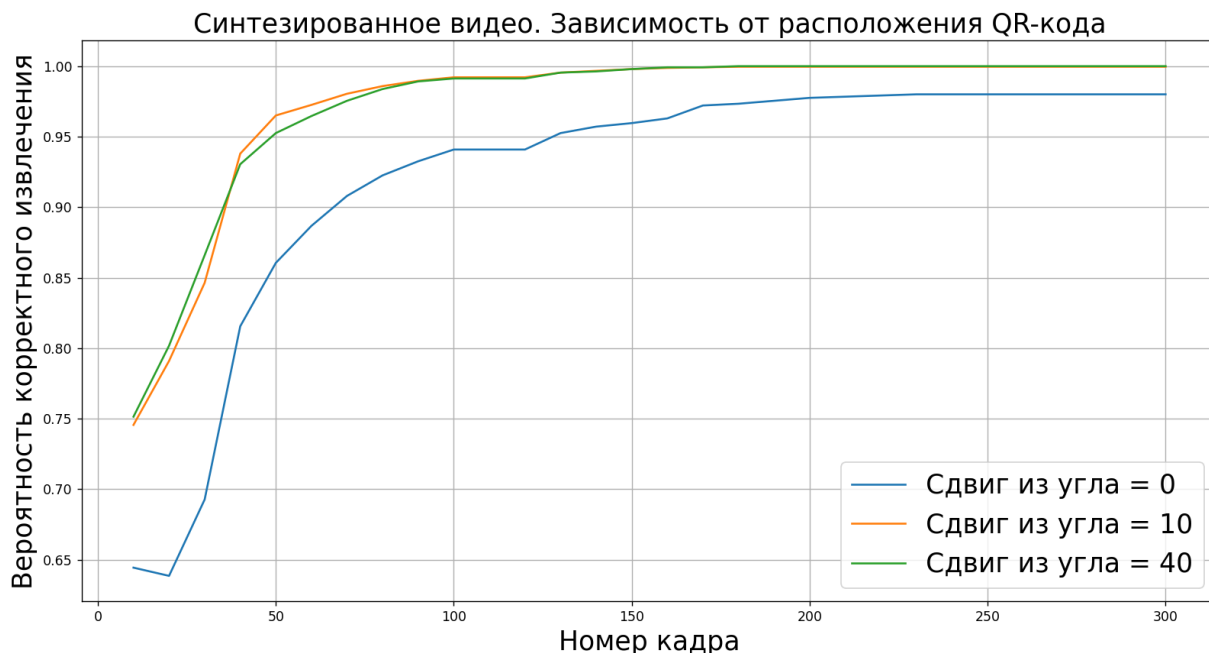


Рисунок 41 – Зависимость вероятности извлечения от расположения QR-кода

По графику можно наблюдать, что по мере перемещения QR-кода в средние частоты точность улучшается. Однако основным преимуществом использования низких частот является стойкость ЦВЗ к вносимым искажениям, в частности сжатию с потерями. Поэтому окончательные выводы об эффективности смещения расположения QR-кода из угла можно сделать только после проведения соответствующих экспериментов, результаты которых будут приведены в разделе 5.

4.4. Эффективность спектрального метода

Наконец, требуется провести сравнение, как изменяется вероятность корректного извлечения при увеличении амплитуды ЦВЗ. Увеличение амплитуды даёт возможность быстрее накапливать ЦВЗ, но делает его более визуально заметным как для легальных пользователей, так и для

злоумышленников. В прямой зависимости вероятности правильного извлечения от амплитуды ЦВЗ можно убедиться на примере рисунка 42.

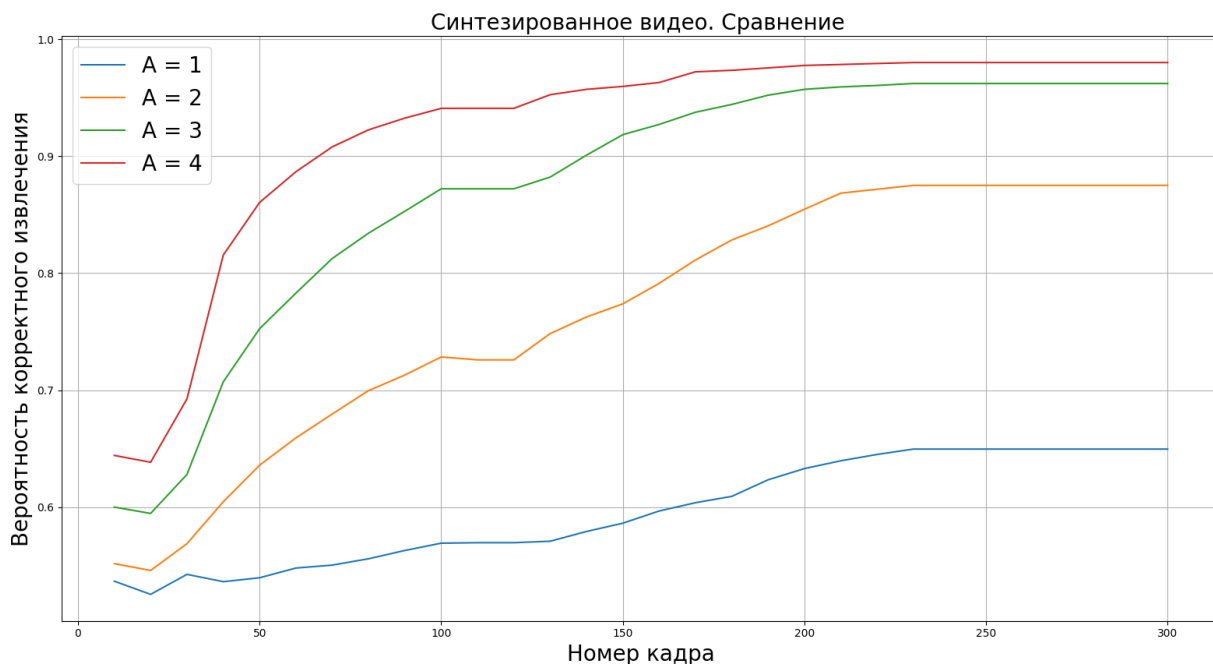


Рисунок 42 – Вероятность корректного извлечения ЦВЗ при различных амплитудах

Из полученных графиков видно, что даже при амплитуде встраиваемого ЦВЗ $A = 2$ достаточно 300 кадров, чтобы процент совпадения извлекаемого и исходного QR-кода превышал 0,86.

Выводы и результаты по четвертому разделу

1) В данном разделе предложен модифицированный метод защиты видео с помощью фазовых ЦВЗ, отличающийся от метода, описанного во втором разделе, использованием вторичного контейнера (дискретного спектра Фурье), и тем самым обеспечивающий дополнительную защищенность видеоконтента и удобство извлечения защитной информации. Использование вторичного контейнера усложняет задачу злоумышленнику, так как сам ЦВЗ уже не связан напрямую с основным видеопотоком.

2) Проведена серия экспериментов, позволяющая исследовать возможность применения метода, а также лучшие условия для его

применения. Эксперименты показали, что увеличение размера ДПФ положительно влияет на точность извлечения. Для размеров кадров видео 1920x1080 наилучшие результаты получаются при контейнере наибольшим из рассматриваемых размеров 1024×1024. При этом размеры самого встраиваемого QR-кода рекомендуется брать меньшие, чтобы сохранить максимальную вероятность корректного извлечения. Расположение ЦВЗ в области высоких частот ДПФ позволяет дополнительно увеличить вероятность извлечения QR-кода из встроенного контейнера.

3) По сравнению с базовым методом, описанным во втором разделе, и с упрощённым методом, описанным в третьем разделе, спектральный подход требует большего количества кадров для успешного извлечения на несжатом видео. При этом, как и в базовом методе, существует возможность управлять допустимым уровнем вносимых искажений в зависимости от типа видео и решаемых задач.

РАЗДЕЛ 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ВСТРАИВАНИЯ ФАЗОВЫХ ЦВЗ И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ

Для возможности использования алгоритмов защиты видео в реальных системах, необходимо проверить их соответствие ключевым требованиям, описанным в пункте 1.3. К основным требованиям системы защиты с использованием стойких ЦВЗ относятся незаметность встраивания, высокая емкость встраиваемого сообщения, стойкость алгоритма к наиболее распространённым атакам. Далее приведены результаты исследований, направленных на проверку выполнения этих требований для каждого из алгоритмов, изложенных в разделах 2-4. Для этого использовались три различных видео, состоящих из 3000 кадров, содержание которых описывалось ранее в пункте 1.4: “RealBarca”, “LutGaya” и “Road1”.

5.1. Эффективность работы метода при сжатии с потерями

При использовании ЦВЗ в реальной системе защиты видео требуется проверить возможность корректного извлечения ЦВЗ из видео, подверженного компрессии (сжатого). Возможность сжимать видео крайне важна в современном мире, поскольку несжатое видео занимает огромный объём памяти, а также требует больших временных затрат на передачу видео. Следовательно, встроенный ЦВЗ должен корректно извлекаться как из набора исходных кадров, так и из сжатого видео. В настоящий момент наиболее распространены для сжатия три кодека: H.264, H.265[93] и MPEG-2 [94].

Важным преимуществом метода, предлагаемого в настоящей диссертации, является независимость от используемого кодека. Поэтому для каждого из рассмотренных алгоритмов возможно применять любой из указанных кодеков.

5.1.1. Устойчивость базового метода к сжатию с потерями

Рассмотрим работу базового метода при сжатии каждым из кодеков. При встраивании будем использовать изображение размером 1424x1424, представляющее собой QR-код из 89x89 элементов (изображен на рисунке 5б). Встраивание указанного ЦВЗ происходило как с амплитудой $A=1$, так и с $A=2$ при фиксации остальных параметров на значениях, указанных в пункте 2.6.

Степень сжатия обычно характеризуется с помощью битрейта - количества данных, используемых для кодирования одной секунды видео. Снижение битрейта приводит к уменьшению объёма видео, но и снижению качества самого видео. В реальных системах используемый битрейт может отличаться в зависимости от целей. Для сравнения: YouTube рекомендует битрейт 8-12 Мбит/с для загружаемых видео в 1080x1920 пикселей, тогда как для живого стриминга (например, Twitch) допустимый минимум 5-6 Мбит/с. В нашем эксперименте использовались значения 15, 10 и 5 Мбит/с, чтобы охватить весь диапазон. В ходе работы процедура извлечения прерывалась в случае, когда вероятность извлечения стабильно превышала значение $P > 0,99$.

Изначально рассмотрим возможность извлечения ЦВЗ из видео, которое будет сжиматься с помощью кодека H.264.

Для видео, содержащего опасные моменты спортивного матча, "RealBarca", график зависимости корректности извлечения от времени, приведен на рисунке 43.

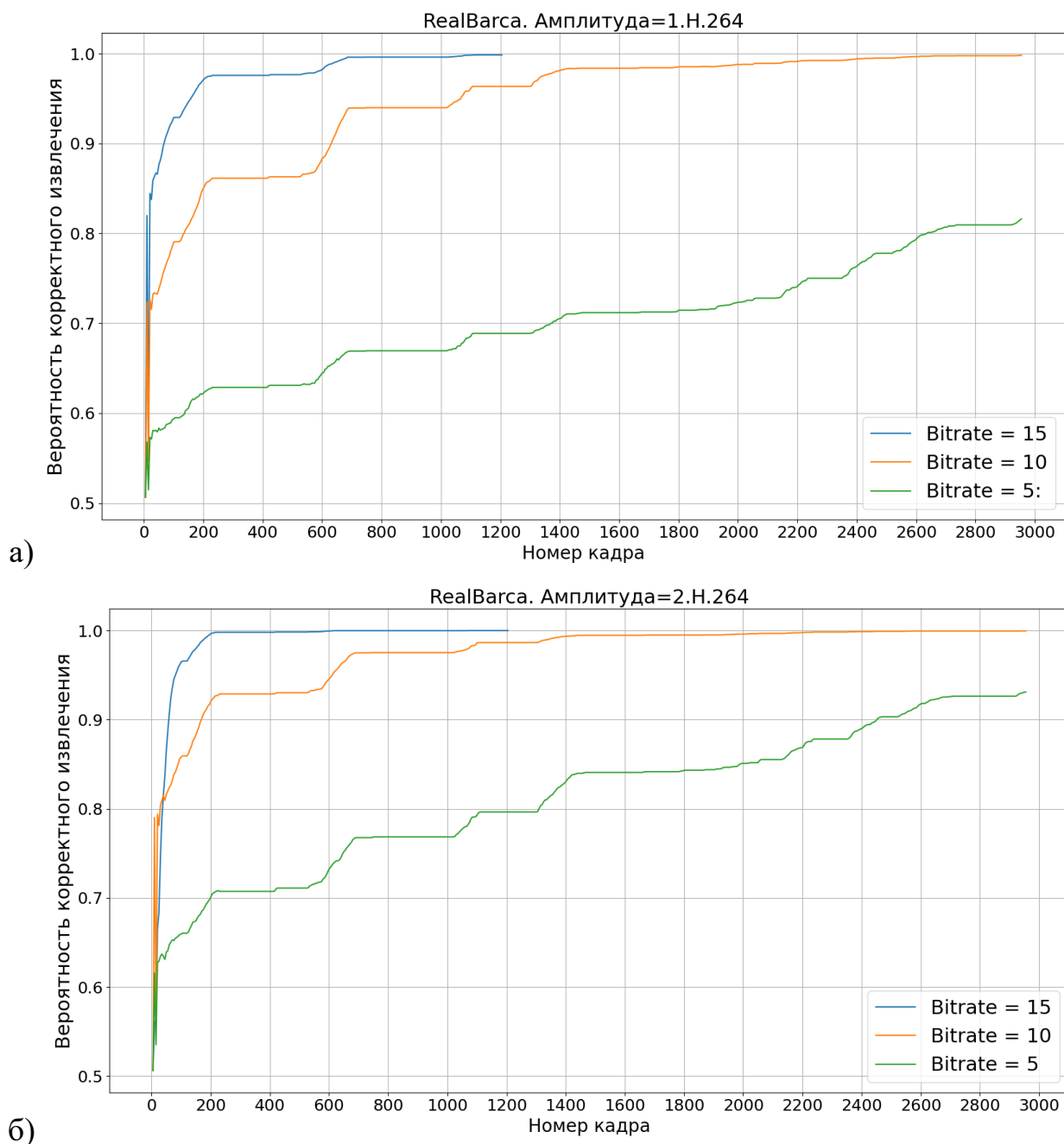


Рисунок 43 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом с использованием кодека H.264 для видео “RealBarca” при амплитуде ЦВЗ а) $A = 1$; б) $A = 2$

По полученным результатам видно, что при битрейте 15 и 10 Мбит/сек ЦВЗ извлекается полностью корректно менее чем за 1000 кадров даже при минимальной амплитуде встраивания. При битрейте 5 Мбит/сек амплитуды ЦВЗ $A = 1$ недостаточно, чтобы за 3000 кадров корректно восстановить втроенную последовательность. Но с увеличением амплитуды 2200 кадров достаточно для возможности восстановления битовой последовательности.

Для видео, содержащего динамические сцены “LutGaya”, аналогичные графики зависимости приведены на рисунке 44.

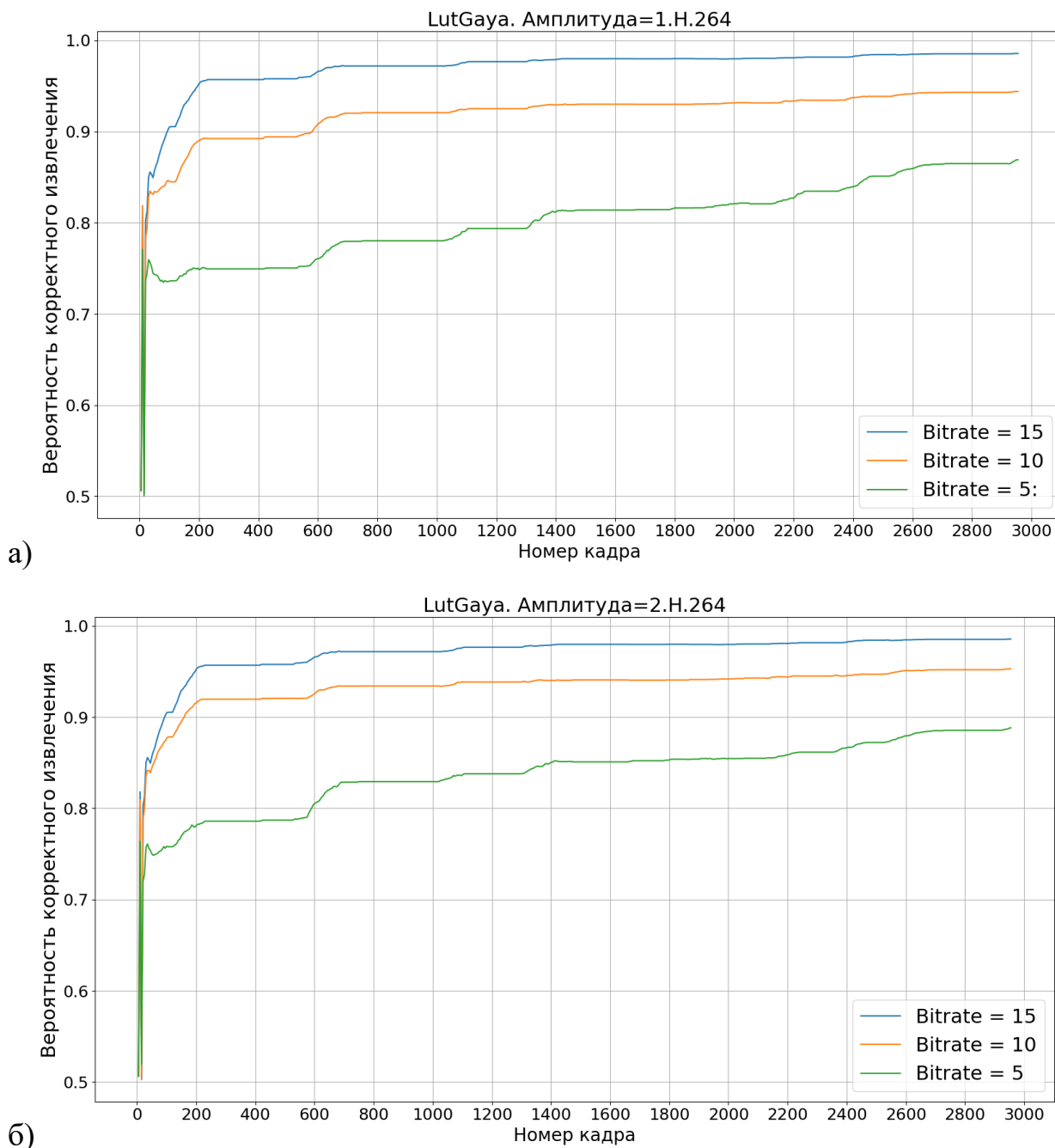


Рисунок 44 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом с использованием кодека H.264 для видео “LutGaya” при амплитуде ЦВЗ а) $A = 1$; б) $A = 2$

По полученным результатам видно, что даже при минимальном из рассматриваемых битрейтов 5Мбит/сек возможно извлечение за рассматриваемые 3000 кадров с амплитудой встраивания $A = 2$. При $A = 1$

вероятность извлечения также постоянно возрастает с увеличением количества встраиваемых кадров.

Для статического видео, на котором показаны кадры с камеры дорожного движения “Road1”, графики такой зависимости приведены на рисунке 45.

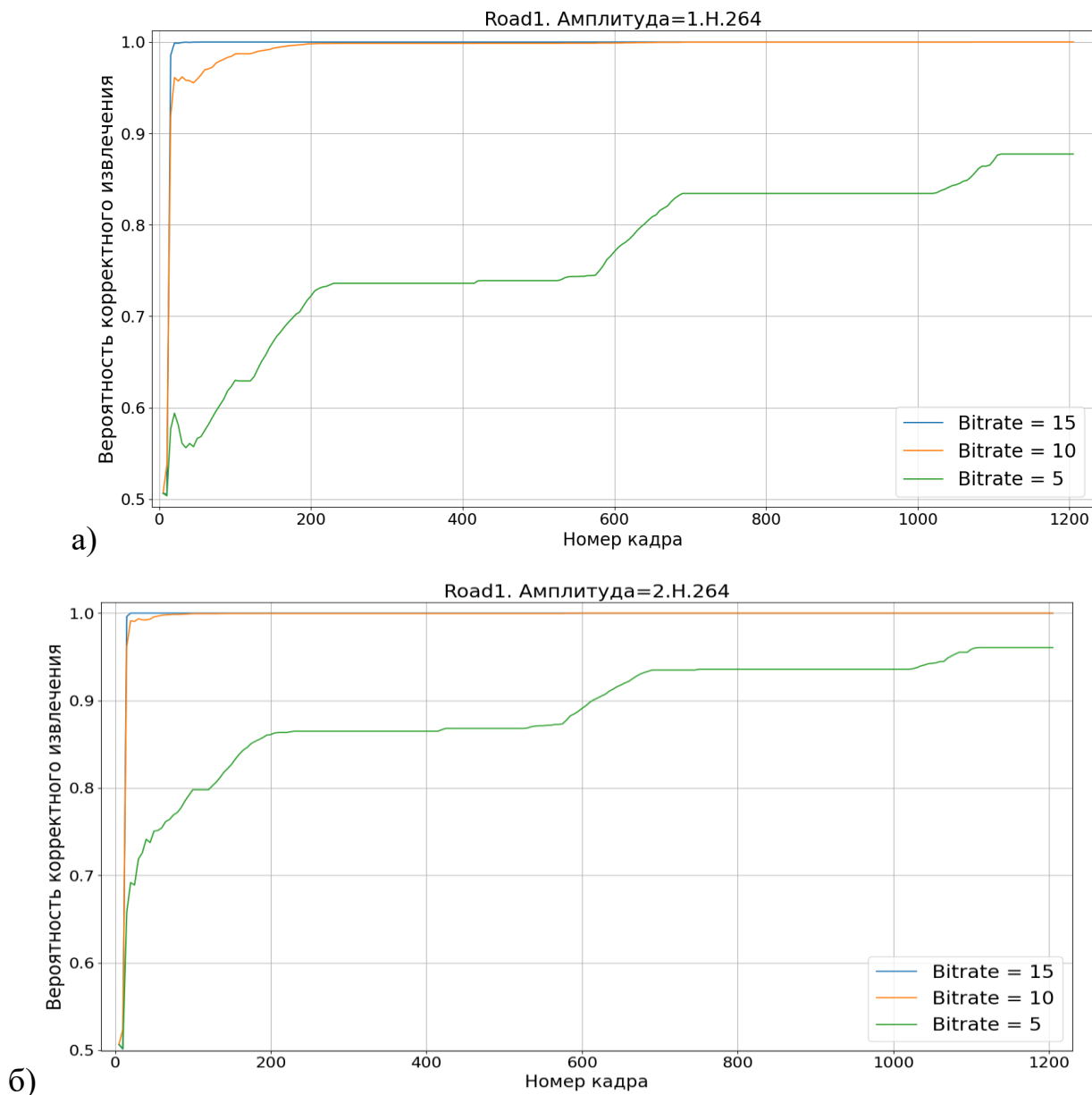


Рисунок 45 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом с использованием кодека Н.264 для видео “Road1” при амплитуде ЦВЗ а) $A = 1$; б) $A = 2$

Исходя из полученных результатов видно, что для любого из рассмотренных битрейтов 1200 кадров достаточно, чтобы достичь уровня приемлемого для корректного извлечения ЦВЗ из видео при амплитуде

встроенного ЦВЗ $A = 1$. При увеличении амплитуды до $A = 2$ достаточно 600 кадров для возможности извлечь встроенное сообщение даже при битрейте равным 5Мбит/сек.

Рассмотрим аналогичные видео для случая сжатия видео с использованием более нового кодека H.265.

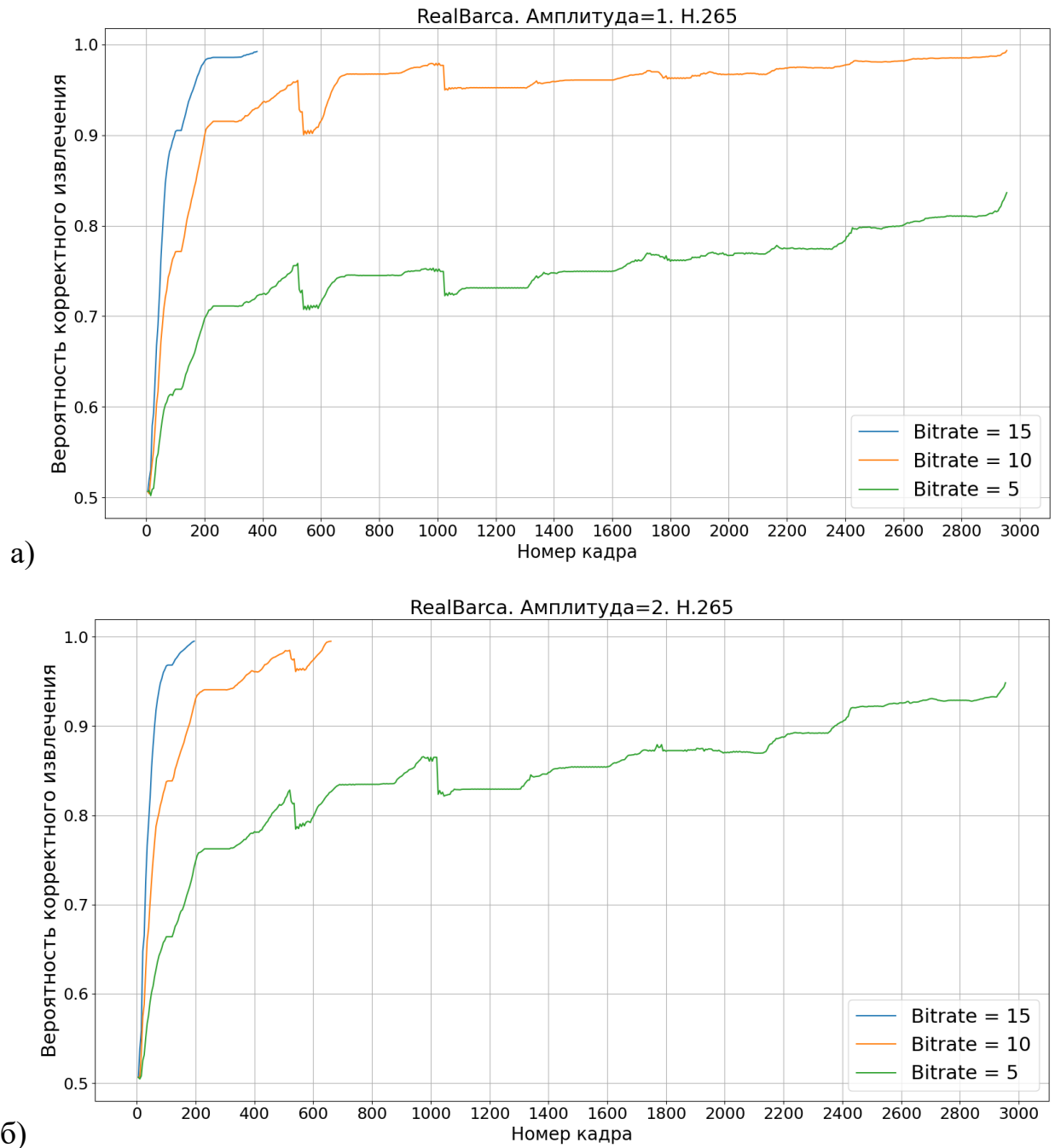
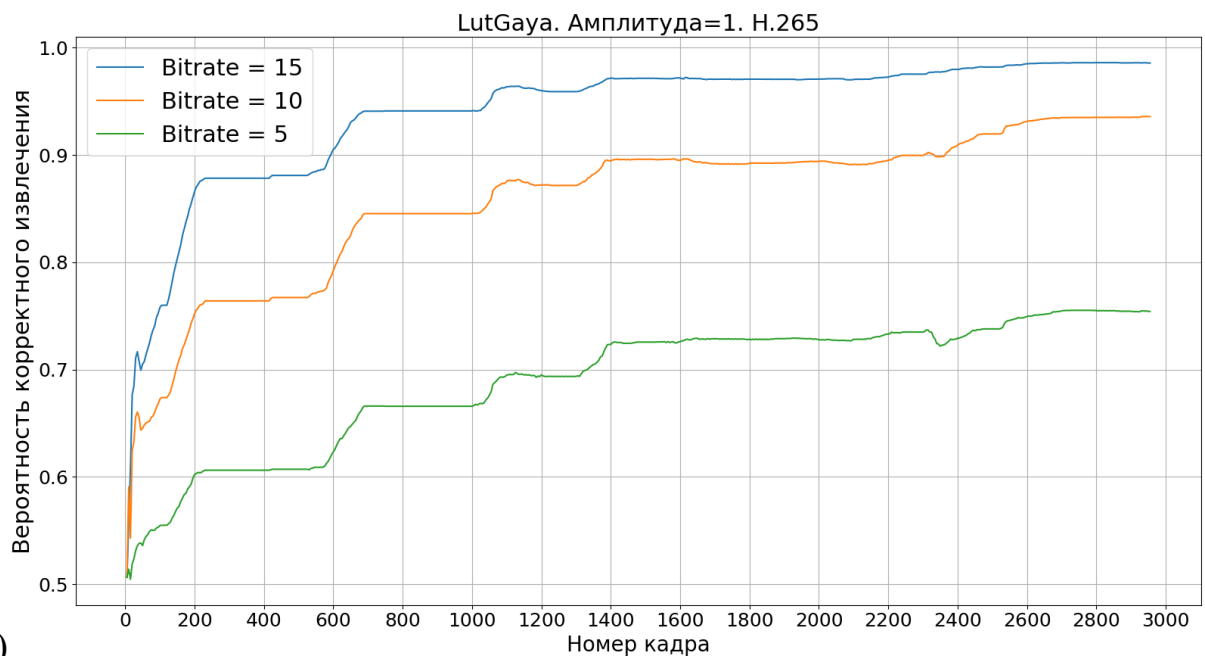


Рисунок 46 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом с использованием кодека H.265 для видео “RealBarca” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

По полученным графикам видно, что при амплитуде $A=2$ при сжатии до битрейта 10Мбит/сек с кодеком H.265 требуется 170 кадров возможности корректного извлечения и 600 кадров для полного совпадения между исходной и извлеченной последовательностью. В случае дополнительного сжатия до 5Мбит/сек требуется уже 1800 кадров для возможности корректного и стабильного извлечения ЦВЗ. При минимальной амплитуде $A = 1$ при сжатии до битрейта 5Мбит/сек 3000 кадров оказывается недостаточным для качественного извлечения, однако тенденция графика позволяет сделать предположение, что увеличение количества кадров позволит корректно извлекать встроенную информацию.



а)

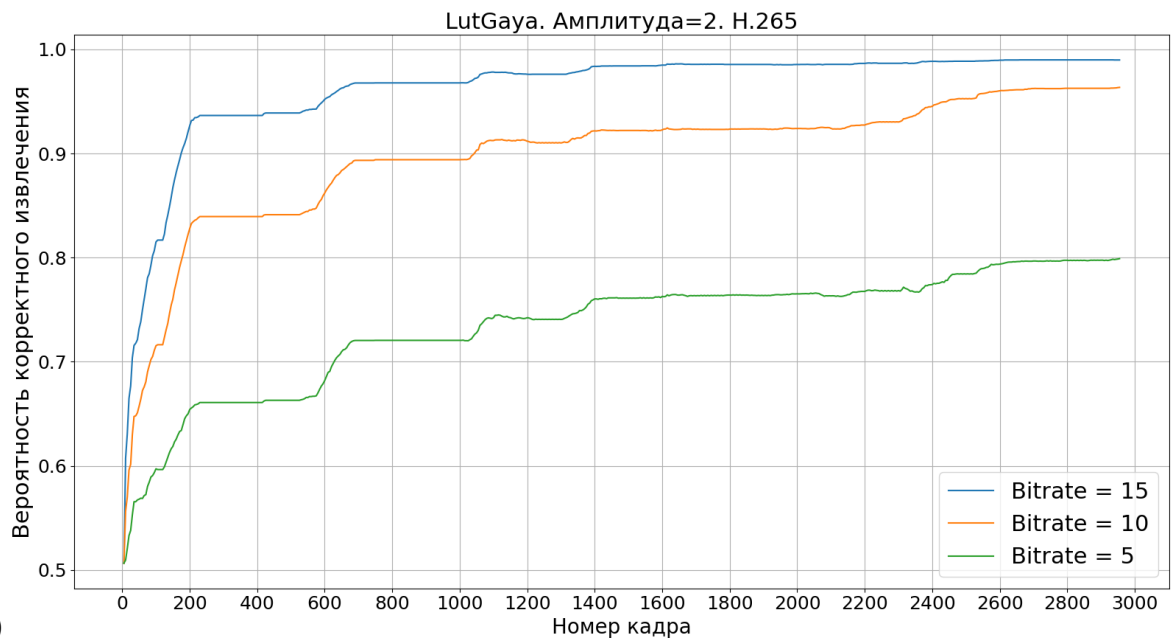
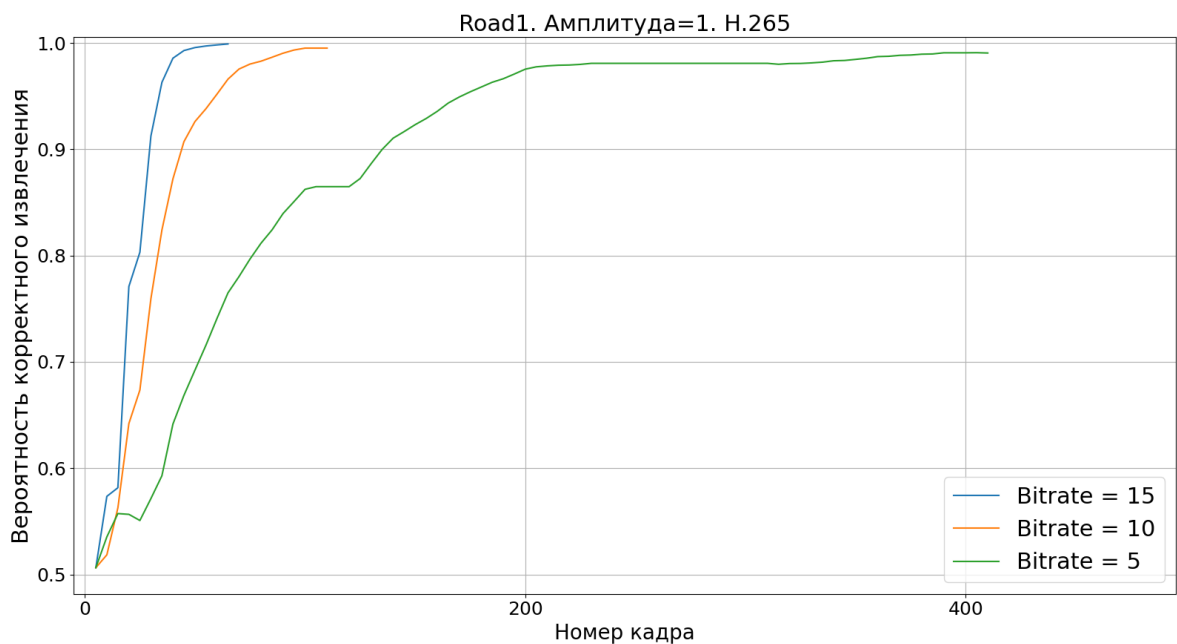


Рисунок 47 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом с использованием кодека H.265 для видео “LutGaya” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

При анализе аналогичных графиков для видео “LutGaya” можно заметить, что при сжатии с битрейтом 10Мбит/сек даже при минимальной амплитуде ЦВЗ $A = 1$ получается качественное извлечение за 1200 кадров. Однако при сжатии до битрейта 5Мбит/сек за 3000 кадров удается добиться уровня $P = 0,8$, но увеличение амплитуды или длины видео способствует достижению необходимого уровня вероятности корректного извлечения.



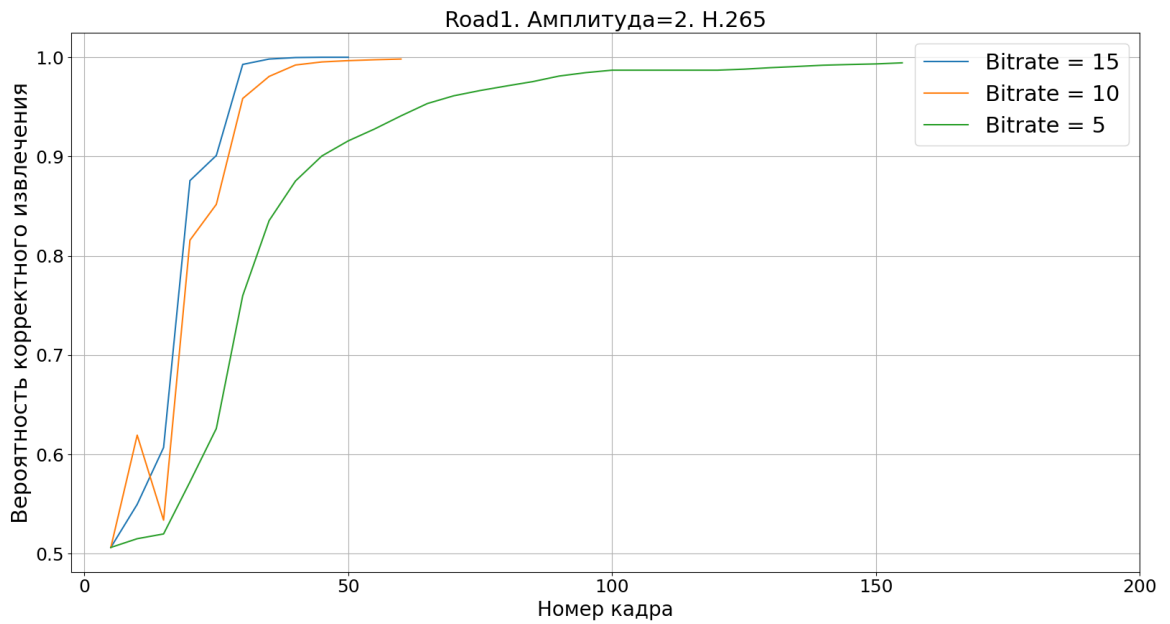


Рисунок 48 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом с использованием кодека H.265 для видео “Road1” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

При сжатии малодинамичного видео “Road1” ЦВЗ удается корректно извлекать даже при серьезном сжатии за малое количество кадров. Для битрейта 5Мбит/сек достаточно 400 кадров для полного совпадения последовательности для ЦВЗ с амплитудой $A = 1$ и 130 кадров для ЦВЗ с амплитудой $A = 2$.

Стоит заметить, что использование более современного кодека H.265 позволяет сжимать видео таким образом, чтобы ЦВЗ с большей вероятностью корректно извлекался из рассмотренных видео. При этом для более динамичного видео такого как “LutGaya” использование кодека H.265 позволяет хуже извлекать ЦВЗ чем H.264.

Аналогичный комплекс процедур происходил при встраивании и извлечении из видео, сжатого с помощью кодека MPEG-2.

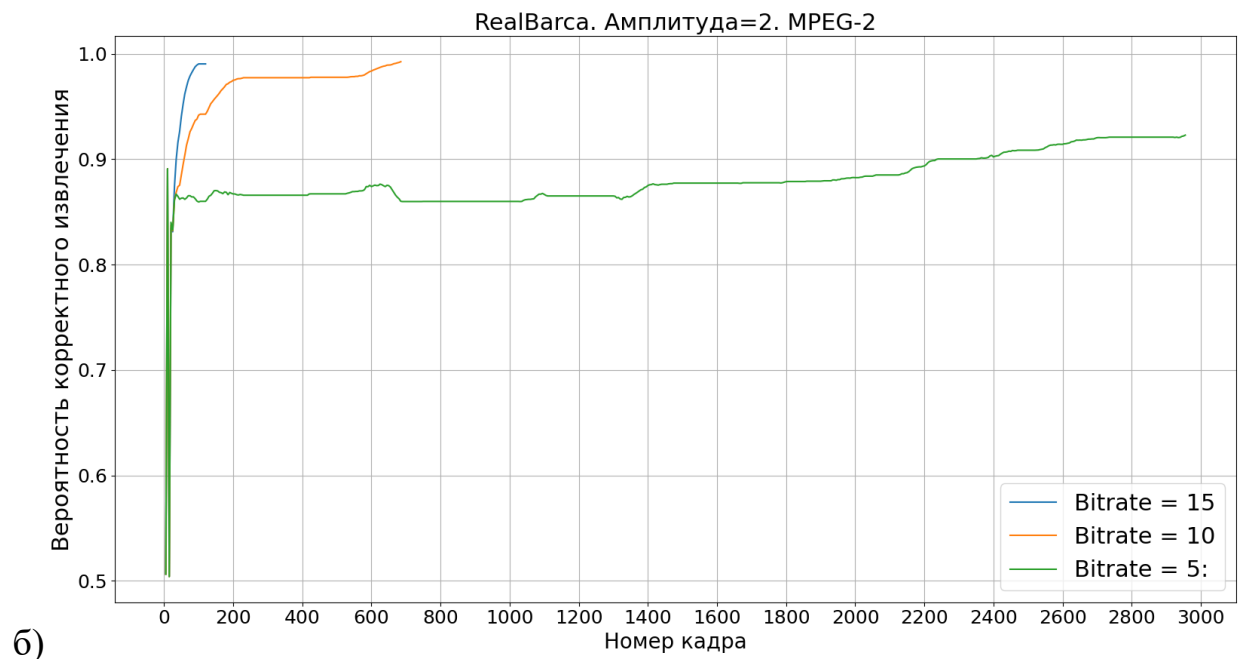
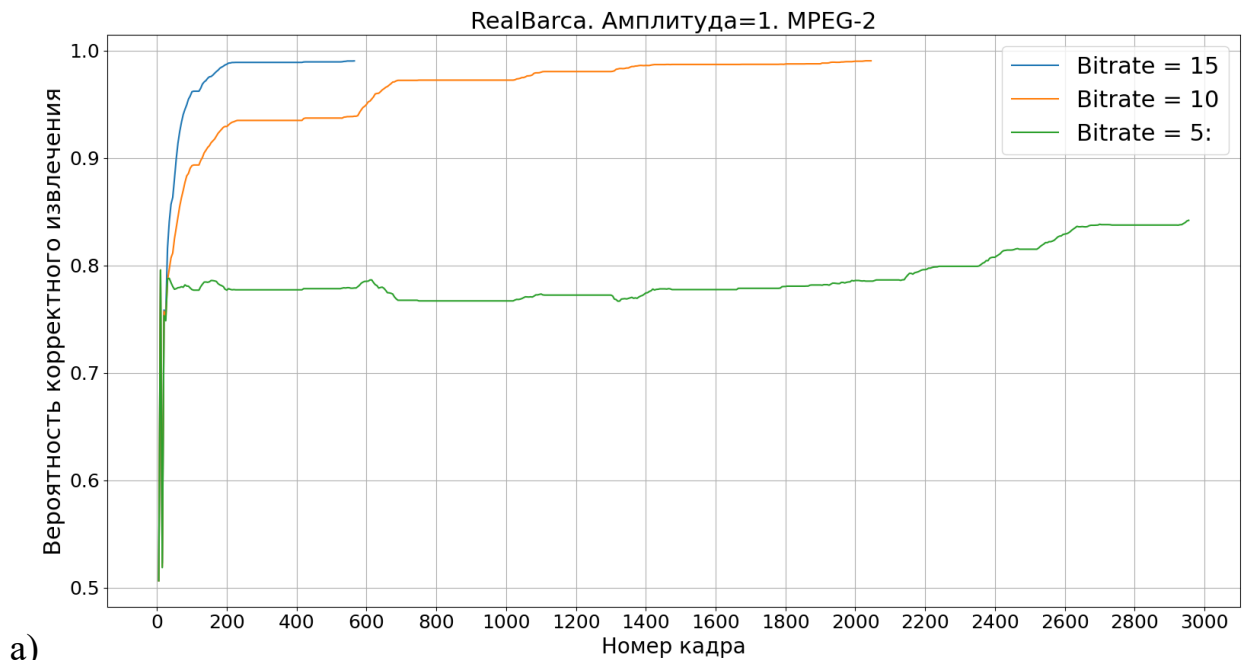


Рисунок 49 – Вероятность корректного извлечения ЦВЗ при использовании кодека MPEG-2 на примере видео “RealBarca” для а) $A = 1$;
б) $A = 2$

Исходя из результатов, представленных на рисунке 49, видно, что корректное извлечение при встраивании ЦВЗ с амплитудой $A = 2$ при сжатии кодеком MPEG-2 с битрейтом 5Мбит/сек достаточно 1100 кадров для возможности корректного извлечения. При сравнении кодека с более современными моделями H.264 и H.265 можно заметить, что указанный кодек показывает сопоставимые результаты в контексте точности извлечения ЦВЗ.

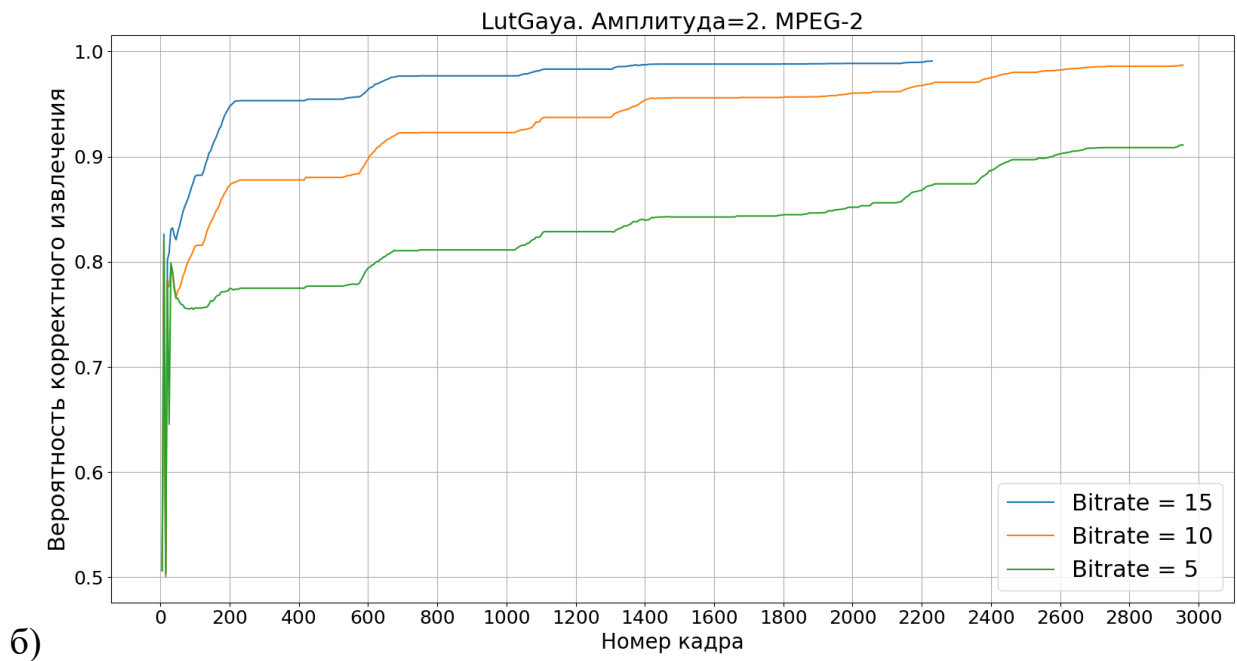
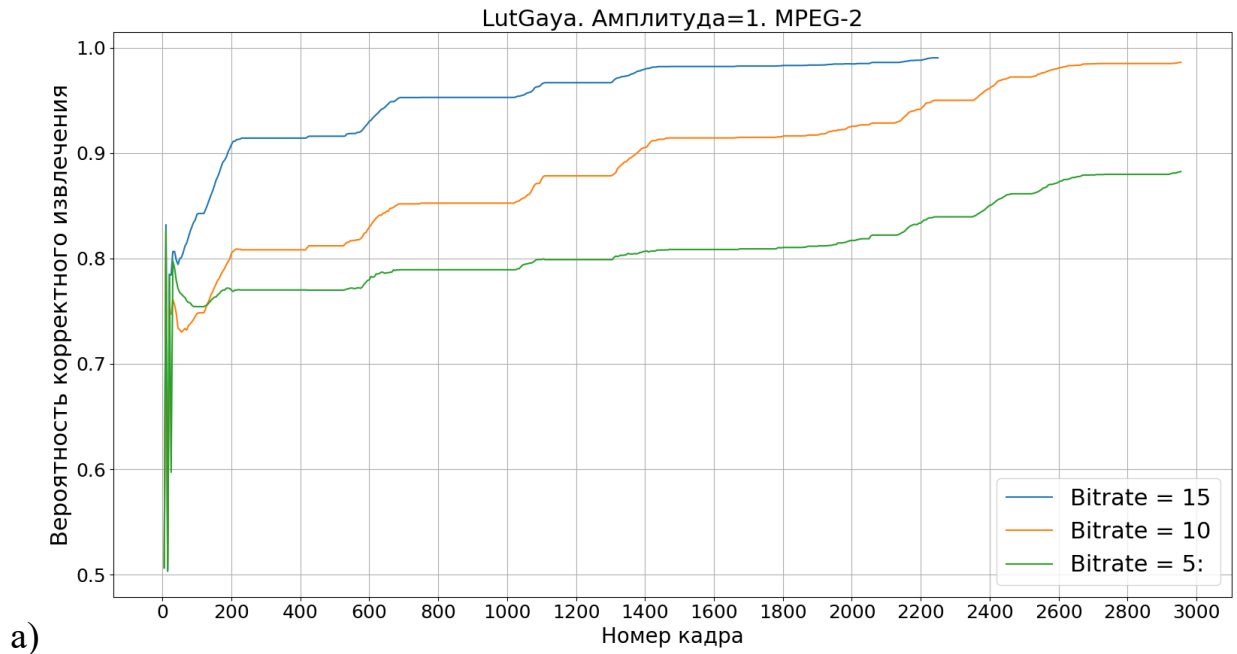


Рисунок 50 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом с использованием кодека MPEG-2 для видео “LutGaya” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

Для более динамичного видео “LutGaya” использование базового алгоритма в сочетании с кодеком MPEG-2 показало лучшие результаты чем при использовании других кодеков. В таком случае 2900 кадров оказывается достаточно, чтобы корректно извлекать ЦВЗ даже с битрейтом 5Мбит/сек и амплитуде ЦВЗ $A = 1$

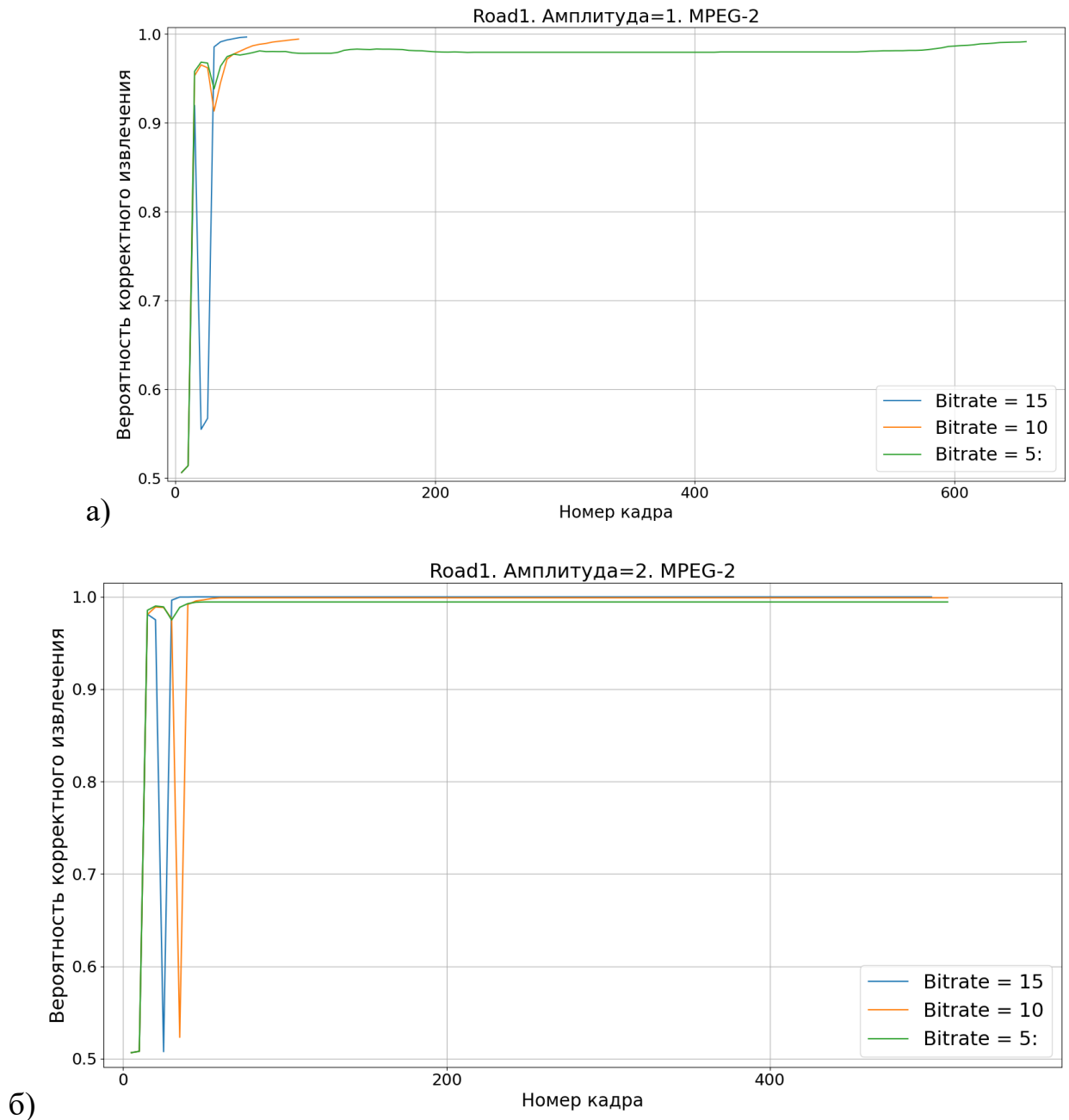


Рисунок 51 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом с использованием кодека MPEG-2 для видео «Road1» для а) $A = 1$; б) $A = 2$

Для видео «Road1» с амплитудой внедрения $A=1$ 600 кадров обеспечивают стопроцентное извлечение ЦВЗ. Однако благодаря избыточности встраиваемой последовательности, основанной на помехоустойчивом кодировании, корректное восстановление становится возможным уже при рассмотрении менее чем 100 кадров.

5.1.2. Работа упрощённого метода при сжатии с потерями

Рассмотрим влияние сжатия при использовании упрощённого метода для встраивания ЦВЗ. Сжатие, как и раньше, будет происходить с использованием сжатия до значений 15;10 и 5Мбит/сек с использованием тех же трех кодеков (H.264, H.265 и MPEG-2).

На рисунках 52а,б приведены результаты работы алгоритма для видео “RealBarca” при использовании кодека H.264.

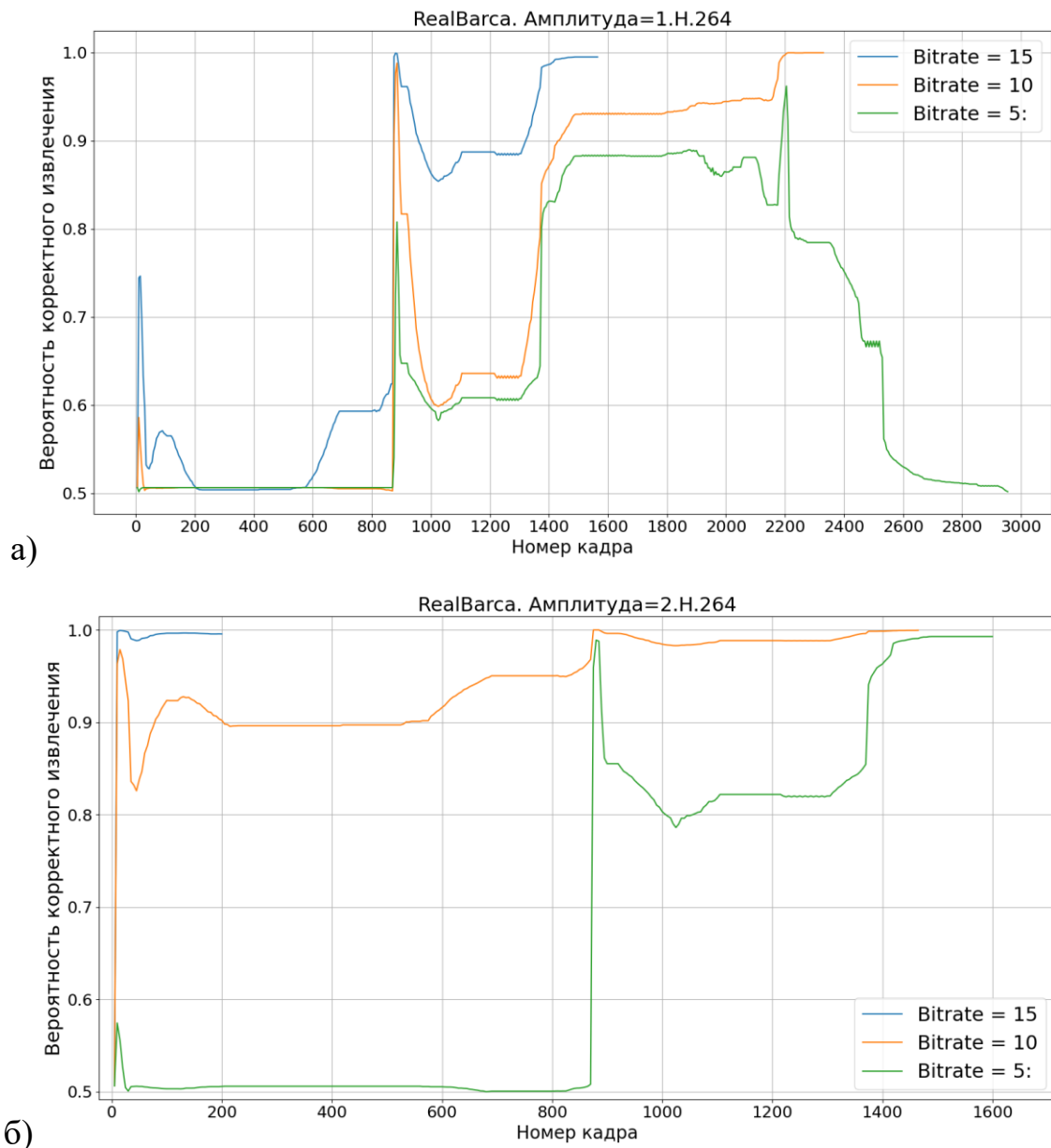


Рисунок 52 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом с использованием кодека H.264 для видео “RealBarca” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

Исходя из результатов, приведенных на графиках, видно, что извлечение происходит менее стабильно чем при использовании базового метода, однако при меньшем уровне сжатия (битрейт 15 Мбит/сек) извлечение будет происходить за меньшее число кадров.

Далее на рисунках 53а, б приведены графики корректности извлечения на примере видео “LutGaya”.

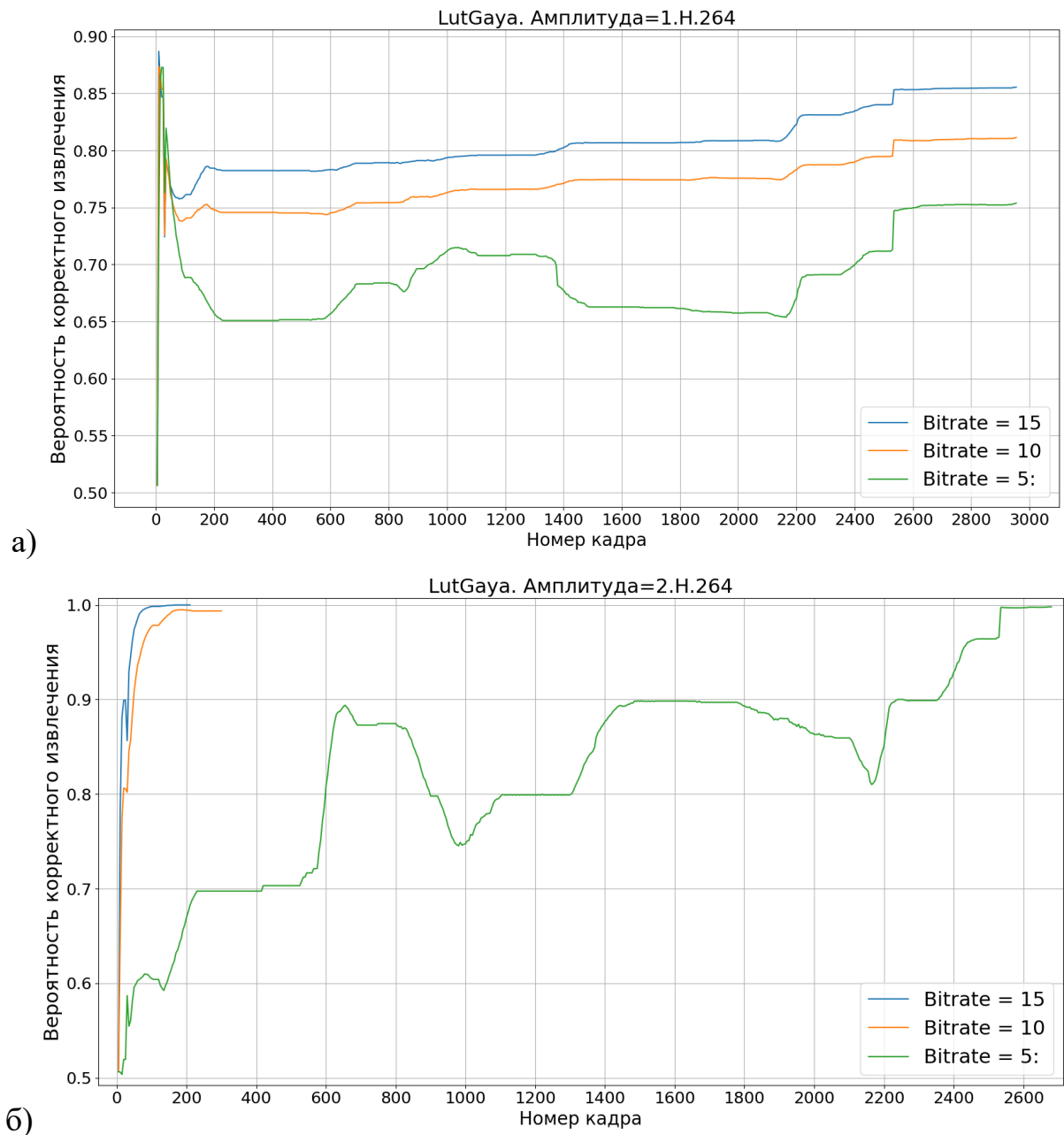


Рисунок 53 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом с использованием кодека H.264 для видео “LutGaya” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

По графику видно, что при встраивании ЦВЗ с амплитудой $A = 1$ 3000 кадров оказывается недостаточно для возможности корректного извлечения даже при сжатии до битрейта 15Мбит/сек. С увеличением амплитуды до $A = 2$ извлечение происходит корректно при любом из рассматриваемых уровней сжатия. В сравнении с базовым методом вероятность корректного извлечения увеличивается, однако кривая накопления ЦВЗ менее монотонно возрастает, чем в базовом методе.

На рисунке 54а, б приведены графики извлечения при сжатии кодеком H.264 для видео “Road1”.

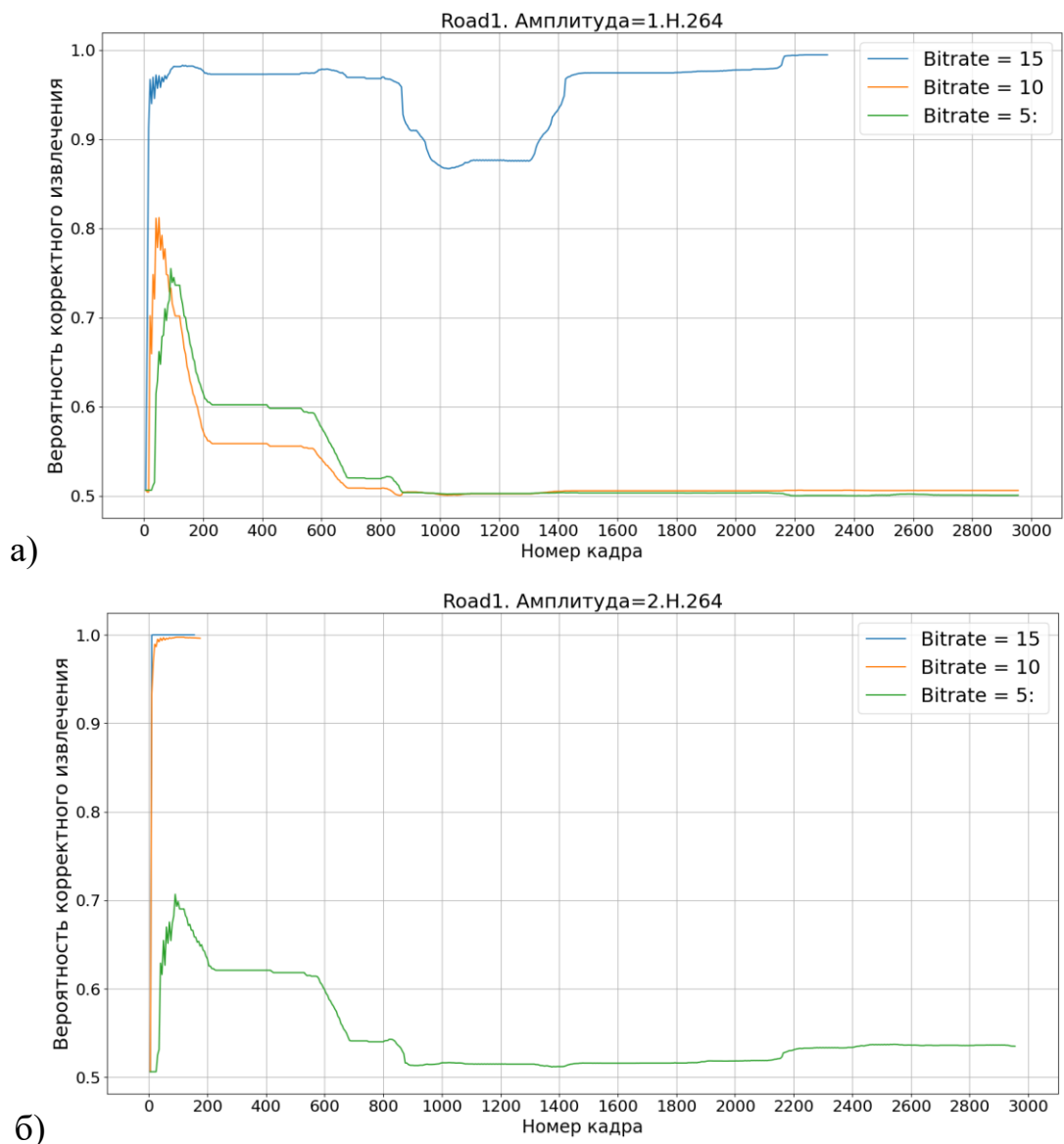


Рисунок 54 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом с использованием кодека H.264 для видео “Road1” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

По представленным графикам можно сделать вывод, что при сжатии до битрейта 15Мбит/сек для извлечения достаточно небольшое количество кадров. При сжатии до уровня 10Мбит/сек достаточно 300 кадров для полностью корректного восстановления последовательности, но при $A = 1$ извлечение становится невозможно. А при еще большем уровне сжатия извлечение невозможно как для $A = 1$, так и для $A = 2$.

Также был проанализирована стойкость упрощённого метода для сжатия кодеком H.265. На рисунках 55-57 приведены результаты извлечения для трёх видео.

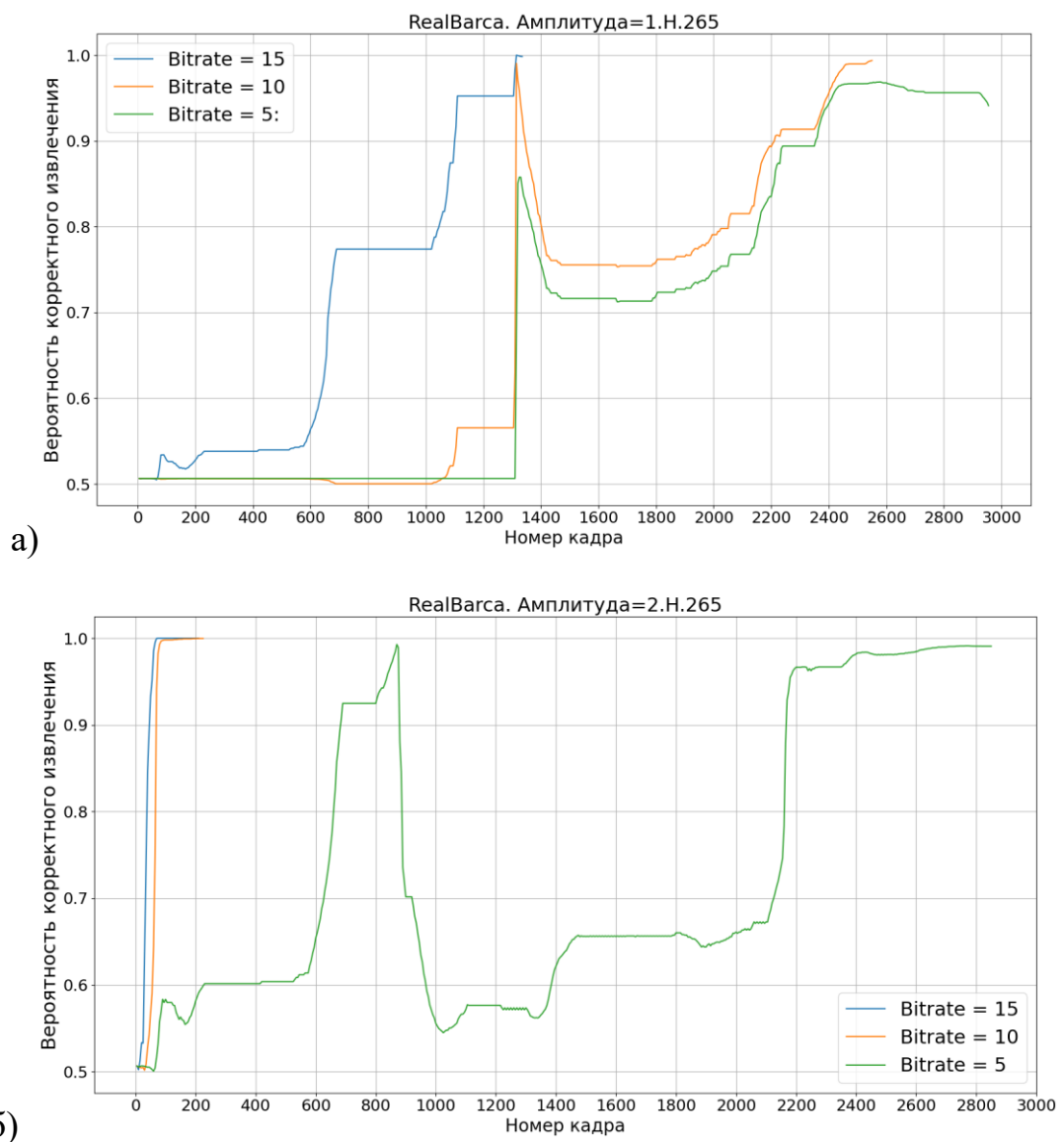


Рисунок 55 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом с использованием кодека H.265 для видео “RealBarca” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

По графикам на рисунке 52 можно заметить, что картина с нестабильным извлечением похожа на ту, что наблюдается и при использовании кодека H.264, однако извлечение возможно и при использовании битрейта 5Мбит/сек. Однако в сравнении с базовым методом наблюдается худшая ситуация при использовании аналогичного кодека и уровней сжатия.

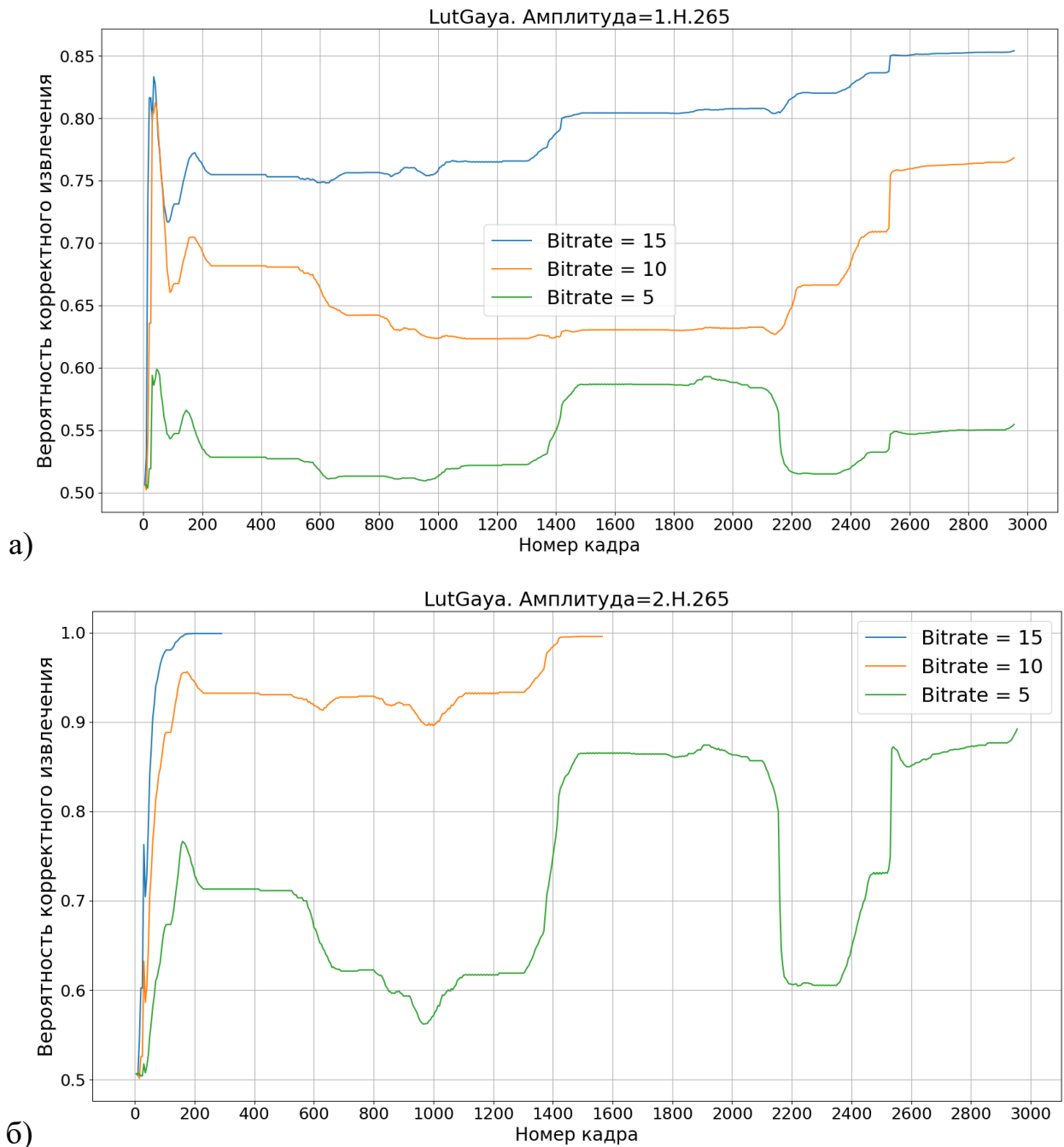


Рисунок 56 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом с использованием кодека H.265 для видео “LutGaya” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

При рассмотрении результатов, описанных на рисунке 56, можно заметить, что при амплитуде $A = 2$ вероятность корректного извлечения достигает целевого значения $P = 0,86$ при каждом из рассматриваемых битрейтов. Однако, как и в случае с кодеком H.264, в сравнении с базовым методом, в упрощённом методе результат извлечения менее стабилен. При этом в сравнении с кодеком H.264 результаты извлечения оказались хуже.

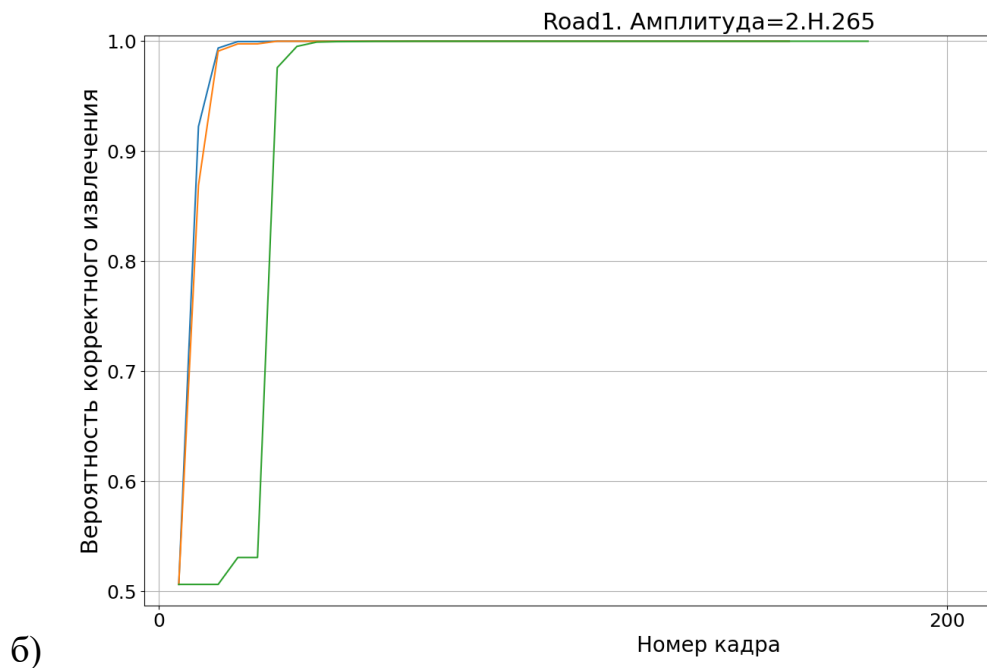
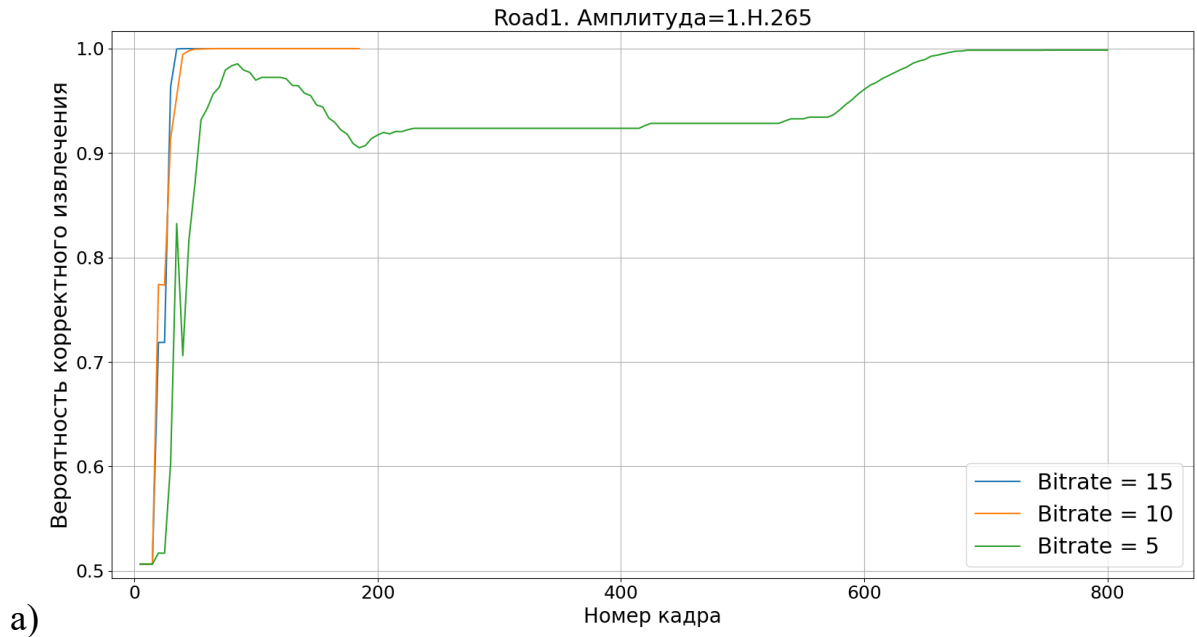


Рисунок 57 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом с использованием кодека H.265 для видео “Road1” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

Для спокойного видео “Road1” результаты оказались лучше чем при сжатии с помощью кодека H.264. При сравнении результатов работы с базовым, упрощённый метод показывает лучшие результаты по скорости достижения качественного извлечения, но несущественно.

Наконец, рассмотрим возможность извлечения при использовании наиболее старого кодека MPEG-2. На рисунках 58-60 проиллюстрирована работа упрощённого метода при использовании этого кодека.

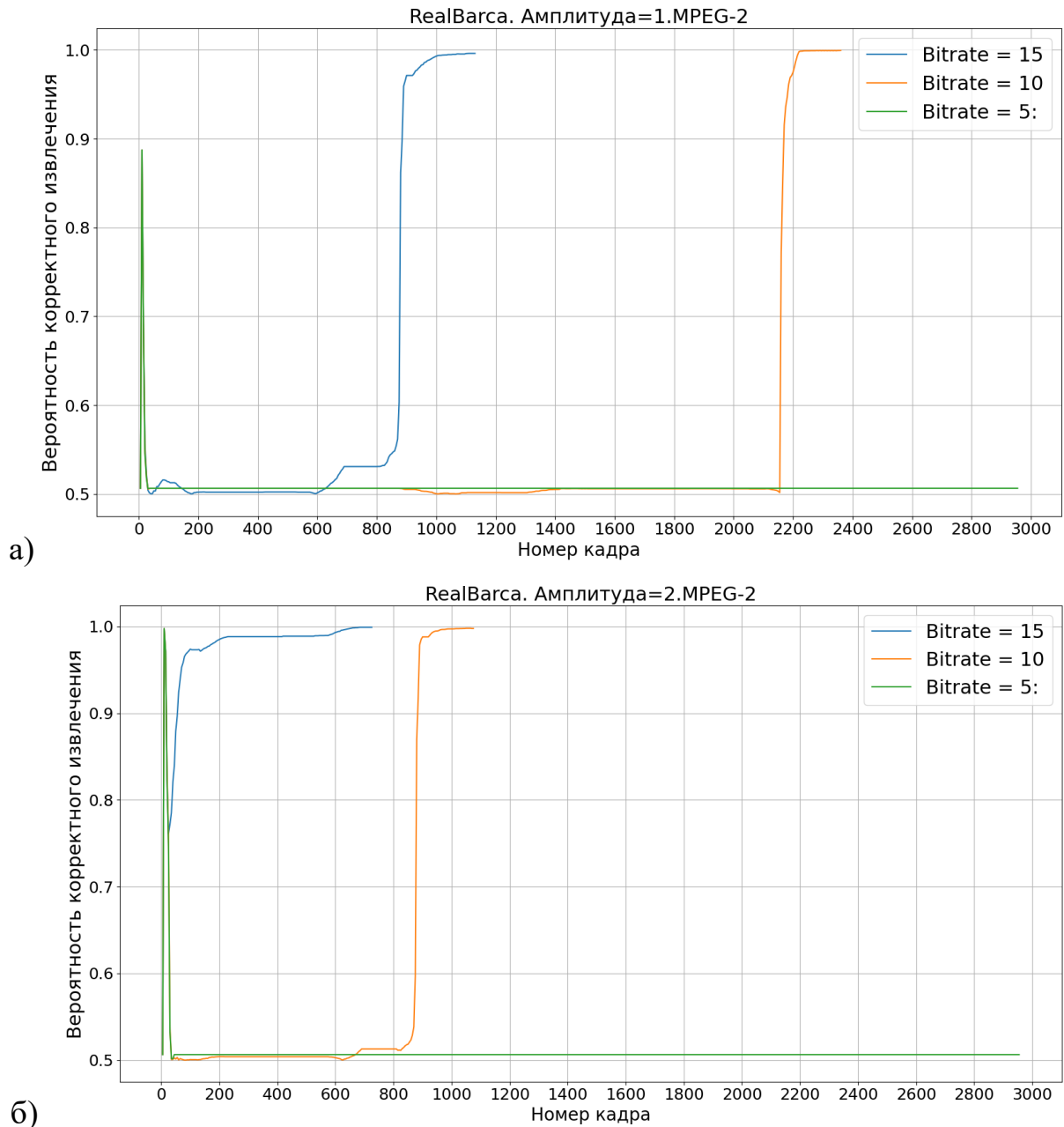


Рисунок 58 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом с использованием кодека MPEG-2 для видео “RealBarca” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

Проанализировав полученные результаты, можно увидеть, что при амплитудах $A = 1$ и $A = 2$ невозможно качественно извлечь встроенную информацию за 2500 кадров при сжатии до битрейта 5Мбит/сек. А при использовании битрейта 10Мбит/сек требуется 850 и 2150 кадров для амплитуд $A = 1$ и $A = 2$ соответственно.

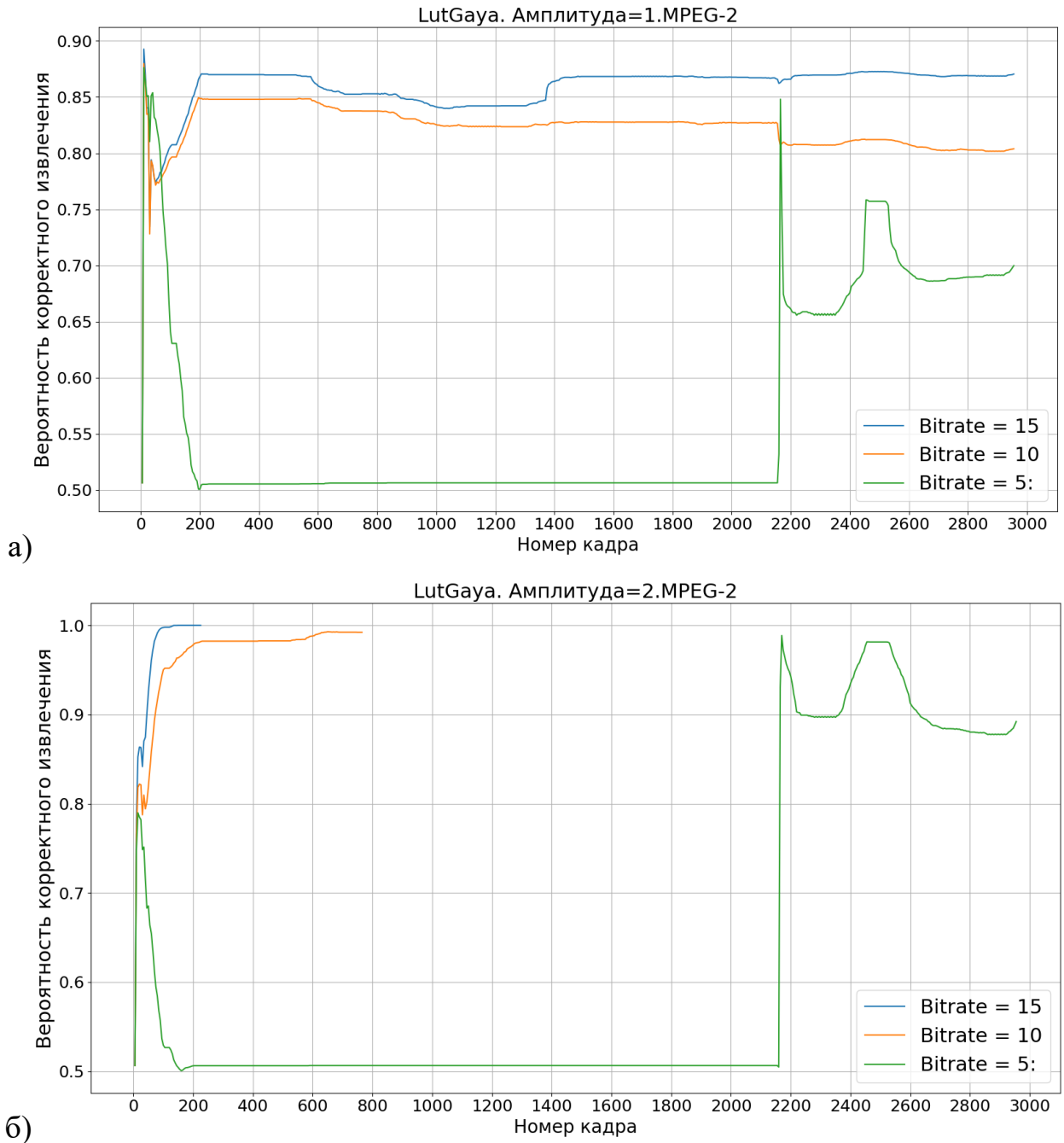


Рисунок 59 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом с использованием кодека MPEG-2 для видео “LutGaya” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

При рассмотрении графиков для видео “LutGaya” можно заметить, что требуется большее число кадров для начала качественного извлечения, чем у этого видео (при сжатии до 5Мбит/сек) с использованием кодеков H.265 и H.264. По сравнению с базовым, упрощённый метод позволяет быстрее извлекать ЦВЗ при высоком битрейте, но с увеличением компрессии его эффективность снижается.

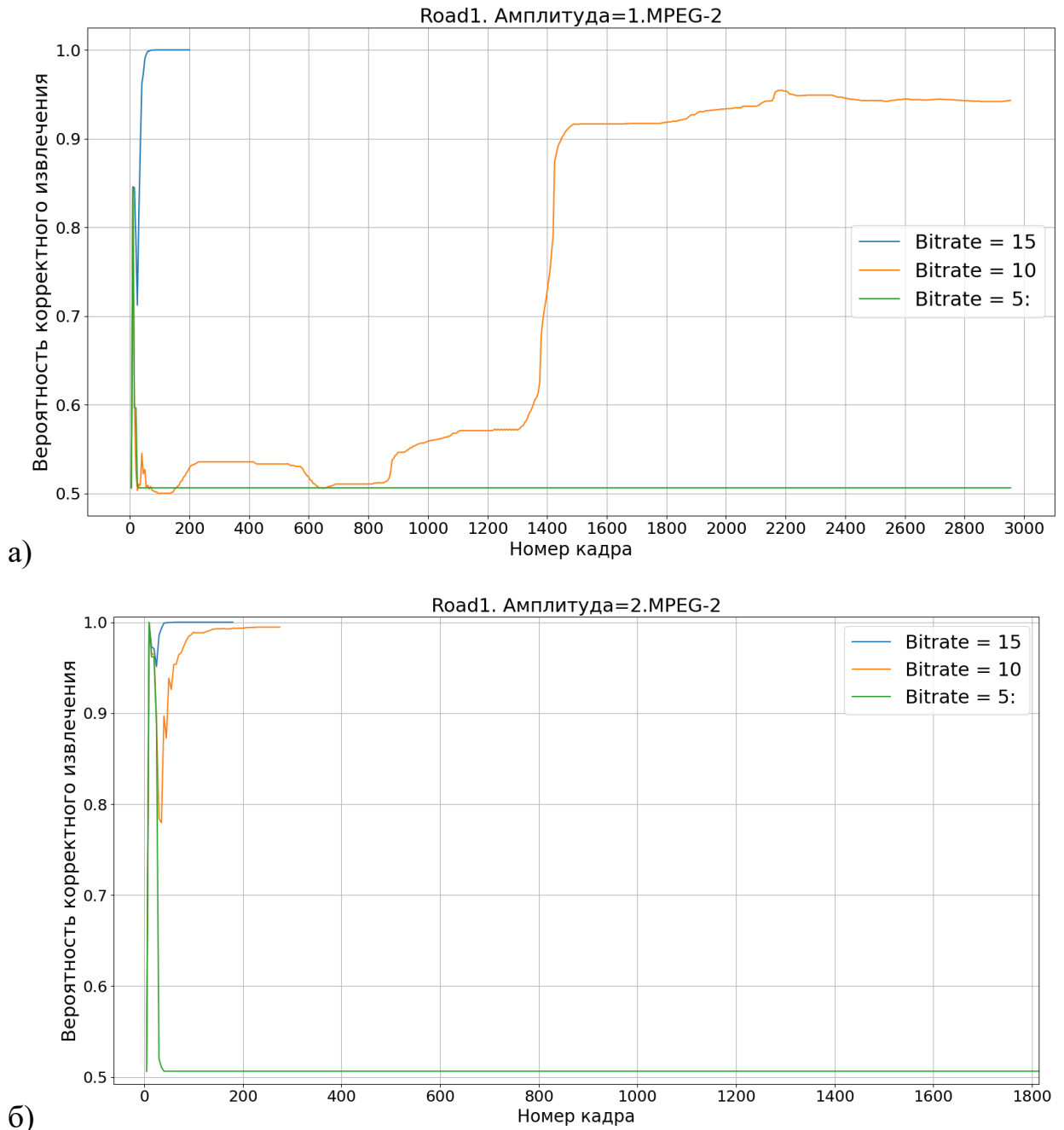


Рисунок 60 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом с использованием кодека MPEG-2 для видео “Road1” для а) $A = 1$; б) $A = 2$

При использовании кодека MPEG-2 корректное извлечение при битрейте равном 5Мбит/сек не происходит за 3000 кадров, При большем битрейте ЦВЗ корректно извлекается, но более медленно чем при использовании более современных кодеков.

5.1.3. Эффективность спектрального метода при сжатии с потерями

В пункте 4.2.1 были выбраны оптимальные параметры как для размеров самого ДПФ, так и для расположения QR-кода внутри контейнера. Поскольку в указанном разделе тестирование проходило на синтезированном видео, то необходимо протестировать подбор параметров на реальном видео. На рисунке 61 приведен пример корректности извлечения ЦВЗ при его расположении в разных областях спектра для несжатого видео “RealBarca”. Само встраивание происходило с амплитудой ЦВЗ $A = 3$.

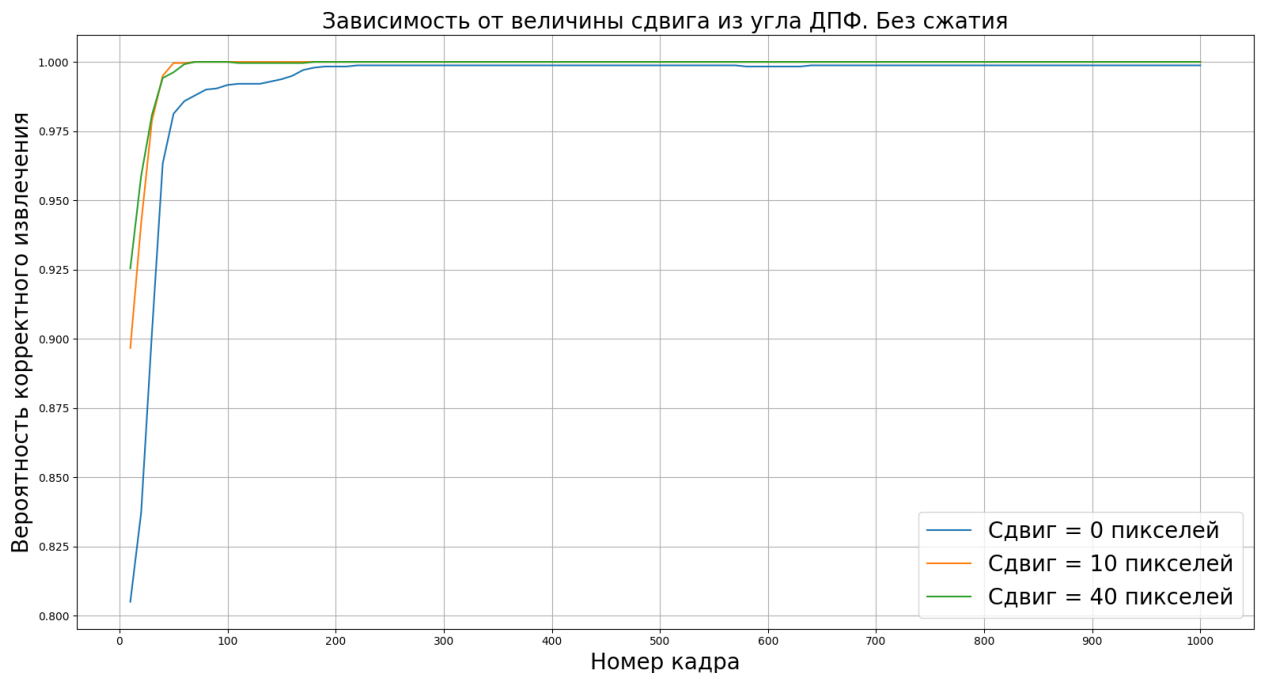


Рисунок 61 – Зависимость корректности извлеченного ЦВЗ от его расположения внутри ДПФ на примере видео “RealBarca”

По полученным результатам видно, что выводы можно сделать аналогичные тем, которые были получены в пункте 4.2.1 о том, что при

расположении ЦВЗ (QR-кода) в центре спектрального контейнера качество извлечения увеличивается. Однако для окончательного вывода необходимо протестировать эту гипотезу в ситуации, близкой к реальной, т.е. при сжатии видеозаписи. Для этого после добавления ЦВЗ в то же видео будет использоваться кодек H.264 для сжатия видеозаписи до битрейта 15 и 5 Мбит/сек. Результаты извлечения последовательности из видео представлены на рисунке 62.

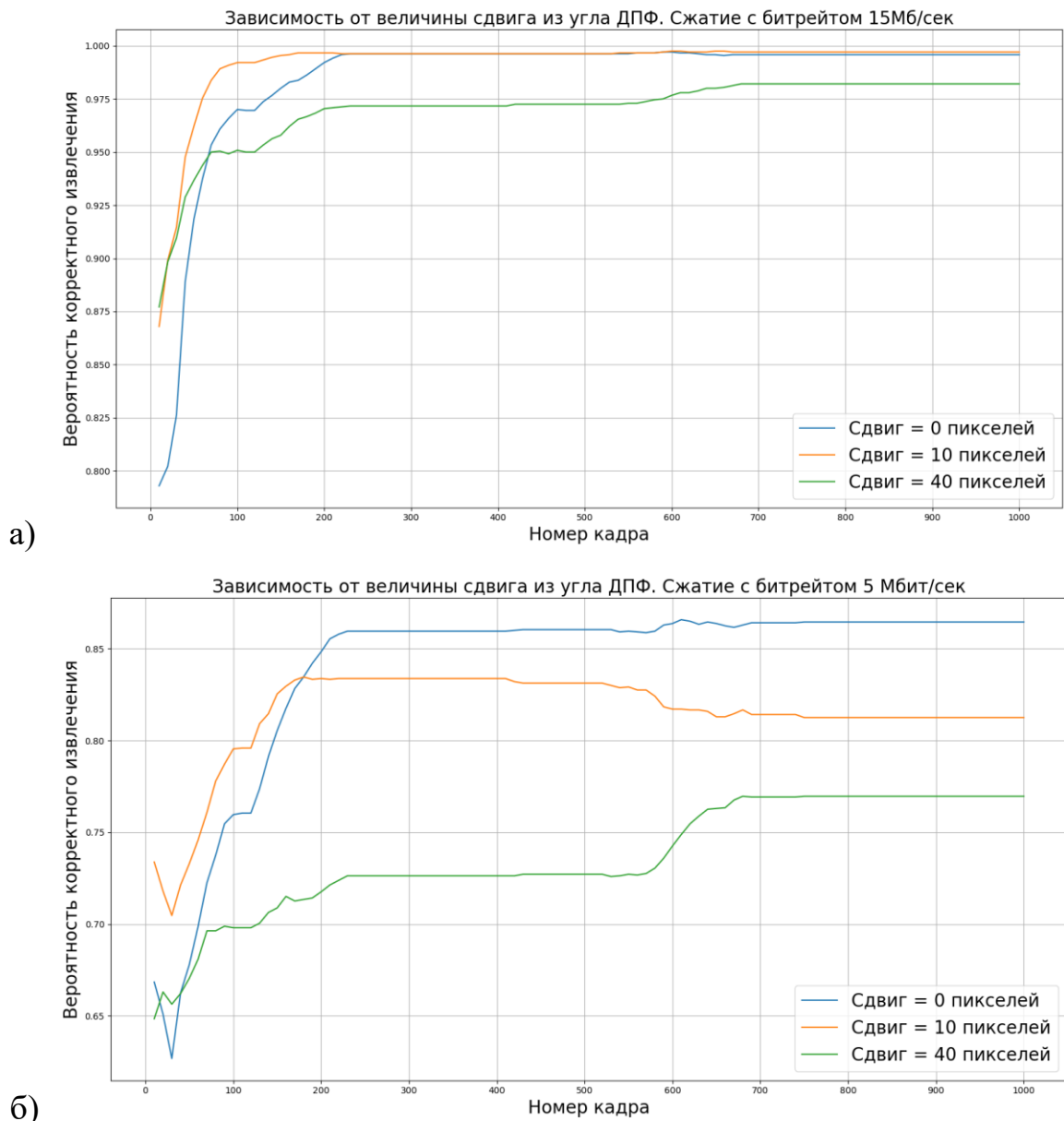
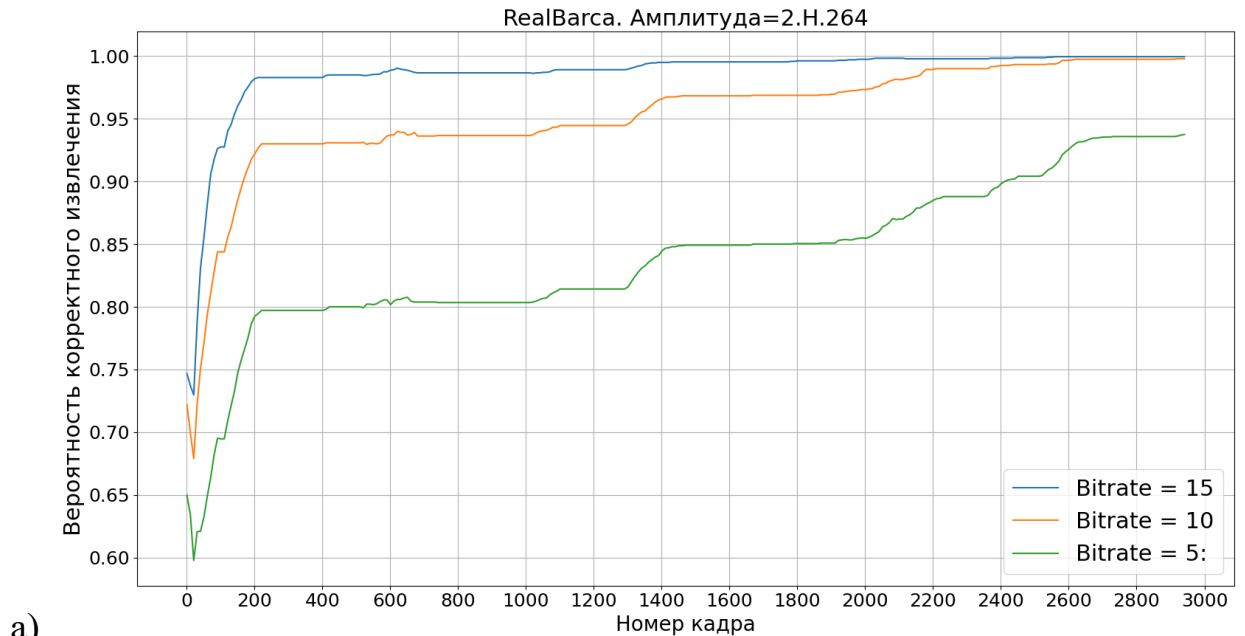
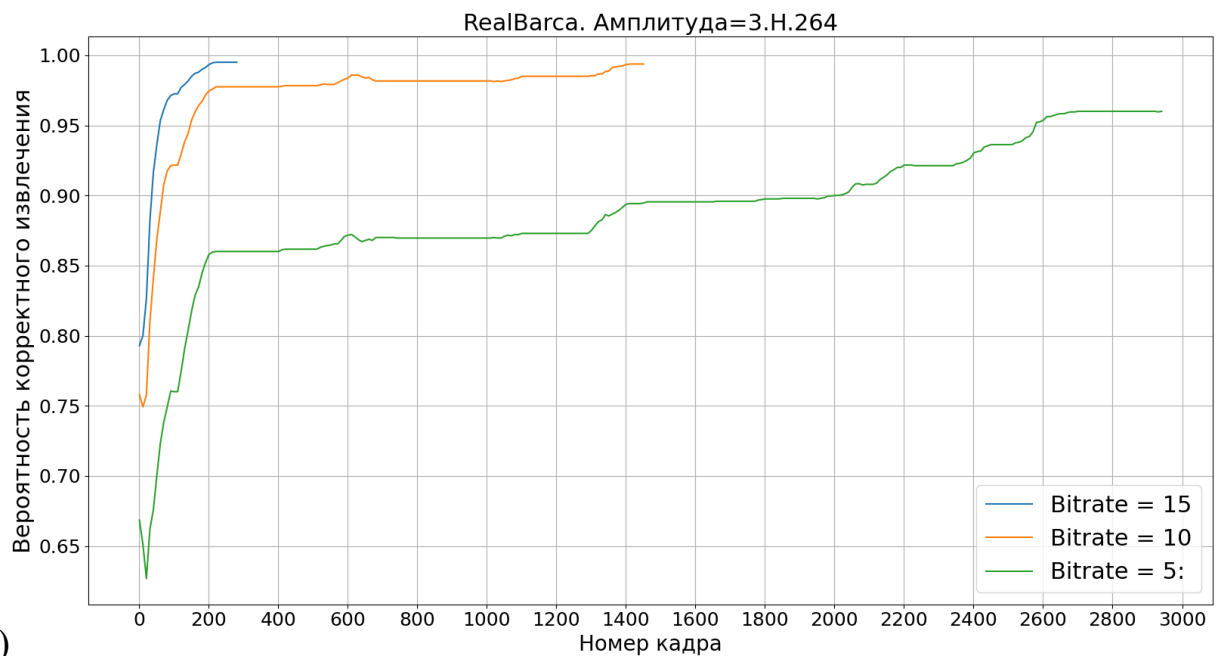


Рисунок 62 – Зависимость корректности извлеченного ЦВЗ от его расположения внутри ДПФ при сжатии с потерями при использования спектрального метода встраивания для битрейта а)15 Мбит/с; б)5 Мбит/с;

При анализе результатов, полученных при сжатии, можно заметить, что при увеличении уровня сжатия результаты с расположением QR-кода в углу ДПФ (в области низких частот) оказываются лучше, чем при смещении к центру. Поэтому в дальнейших экспериментах будет использоваться вариант, при котором QR-код находился в углу.



а)



б)

Рисунок 63 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом с использованием кодека H.264 для видео “RealBarca” для а) $A = 2$; б) $A = 3$

По представленным графикам видно, что для видео “RealBarca” при битрейте 5Мбит/сек достаточно 2200 кадров для амплитуды $A = 2$ и 1500 кадров для $A=3$ для возможности корректно извлекать ЦВЗ. При большем битрейте удаётся достичь и уровня полного совпадения извлеченной последовательности.

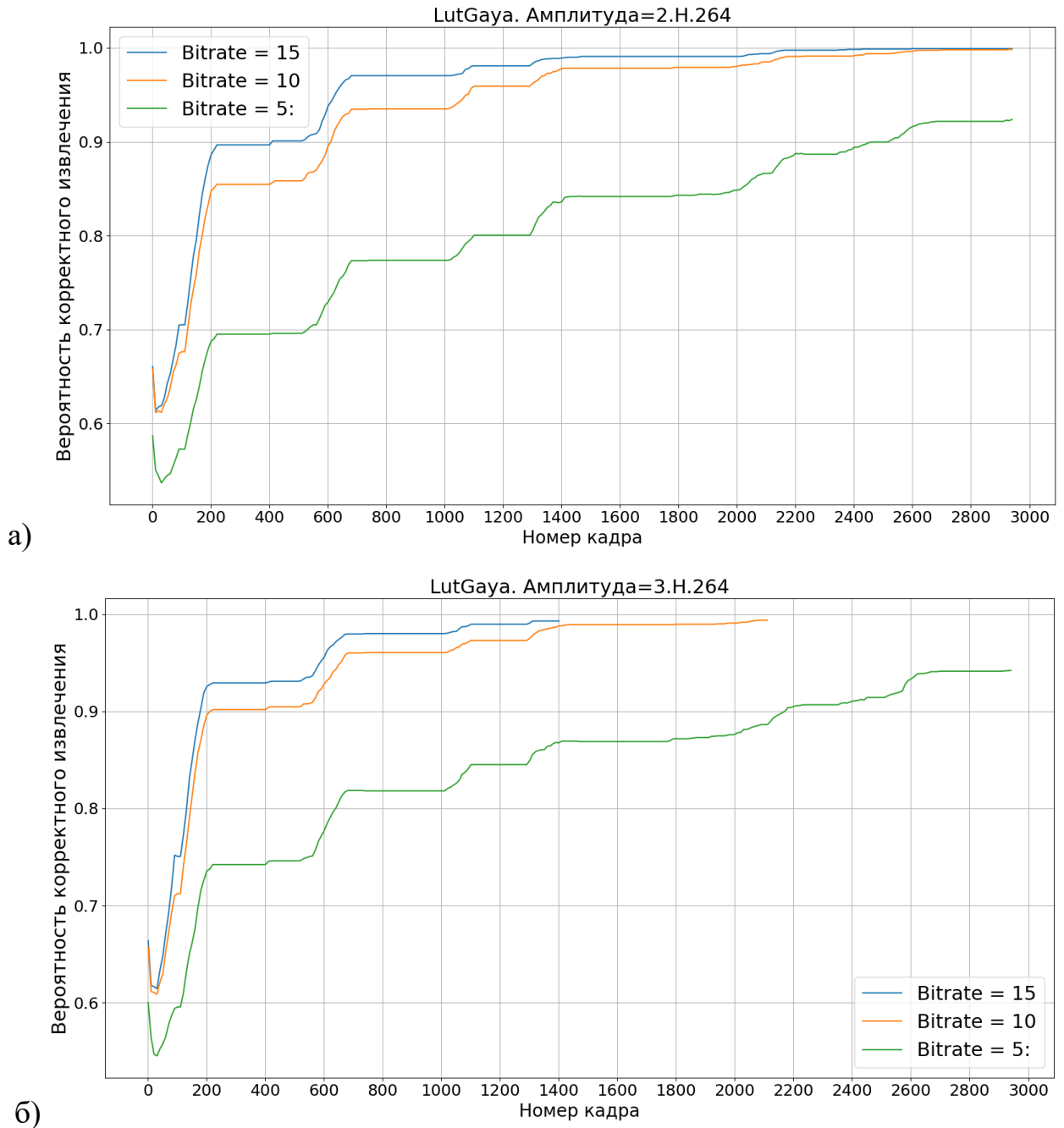


Рисунок 64 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом с использованием кодека H.264 для видео “LutGaya” для а) $A = 2$; б) $A = 3$

На более динамичном видео “LutGaya” при амплитуде ЦВЗ $A = 2$ рассматриваемого числа кадров хватает, чтобы добиться полного совпадения последовательности при битрейте 15 и 10 Мбит/сек. А уменьшение битрейта до 5 Мбит/сек снижает уровень извлечения, но всё равно позволяет добиться хорошего результата $P > 0,9$.

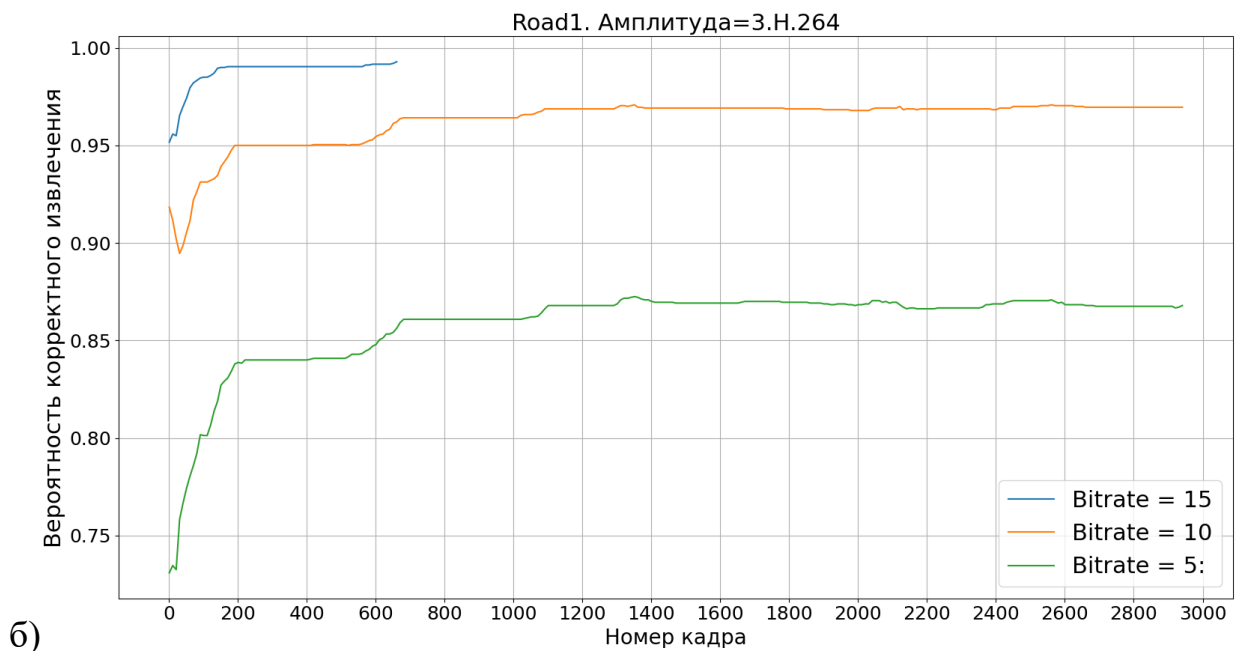
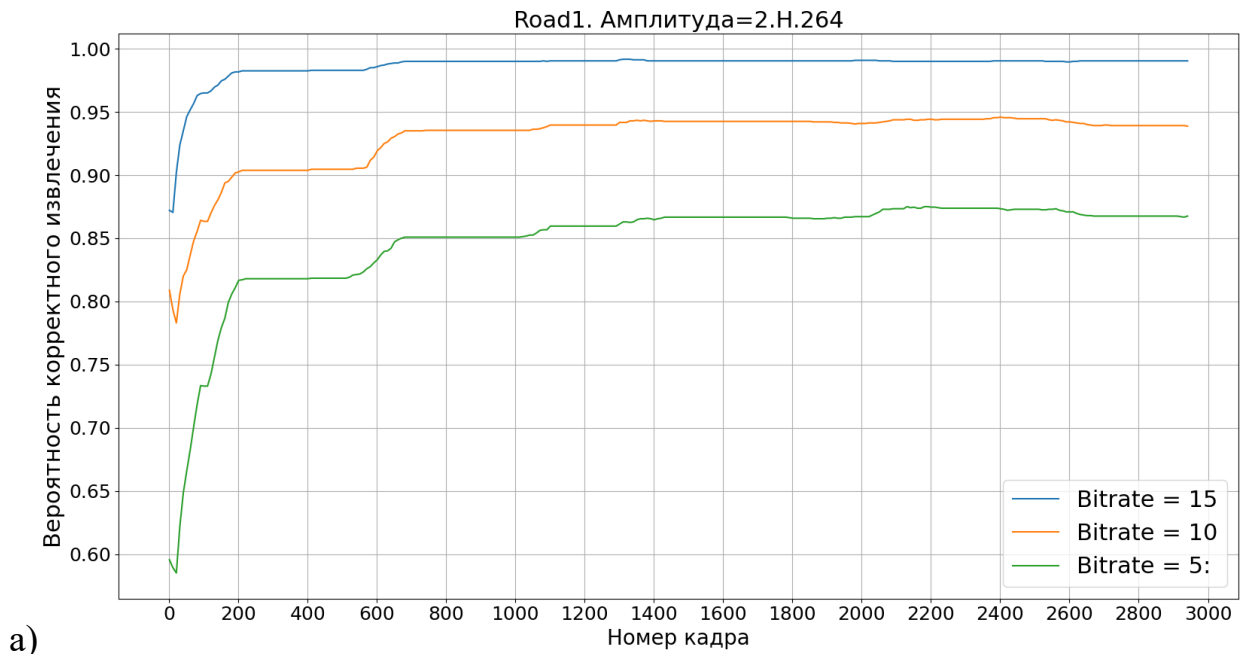


Рисунок 65 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом с использованием кодека Н.264 для видео “Road1” - записи с камеры дорожного наблюдения для а) $A = 2$; б) $A = 3$

Для этой видеозаписи наблюдается эффект, что увеличение амплитуды привело к улучшению извлечения для битрейтов 10 и 15 Мбит/сек, однако практически не изменила эффективность извлечения ЦВЗ при маленьком битрейте. Это может быть связано с тем, что с увеличением уровня сжатия на статичном фоне, кодек H.264 использует агрессивное пространственное и временное сжатие, тем самым подавляя высокочастотные компоненты. Такая ситуация привела к снижению вероятности корректного извлечения при битрейте 5 Мбит/сек.

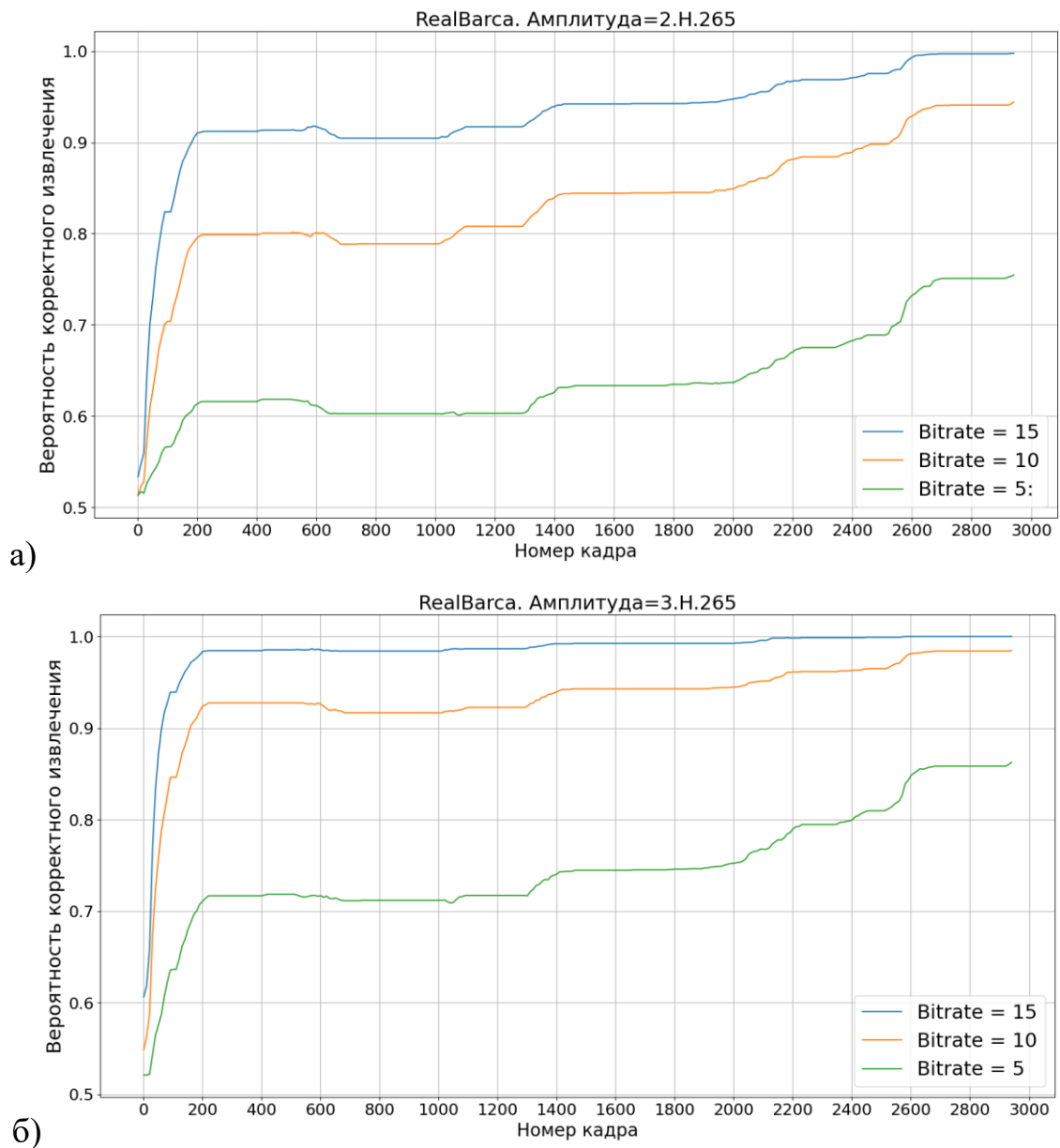


Рисунок 66 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом с использованием кодека H.265 для видео “RealBarca” для а) $A = 2$; б) $A = 3$

По сравнению с кодеком H.264 использование кодека H.265 снижает вероятность корректного извлечения ЦВЗ, однако при использовании амплитуды $A = 3$ по-прежнему возможно извлечение данных даже при битрейте 5Мбит/сек.

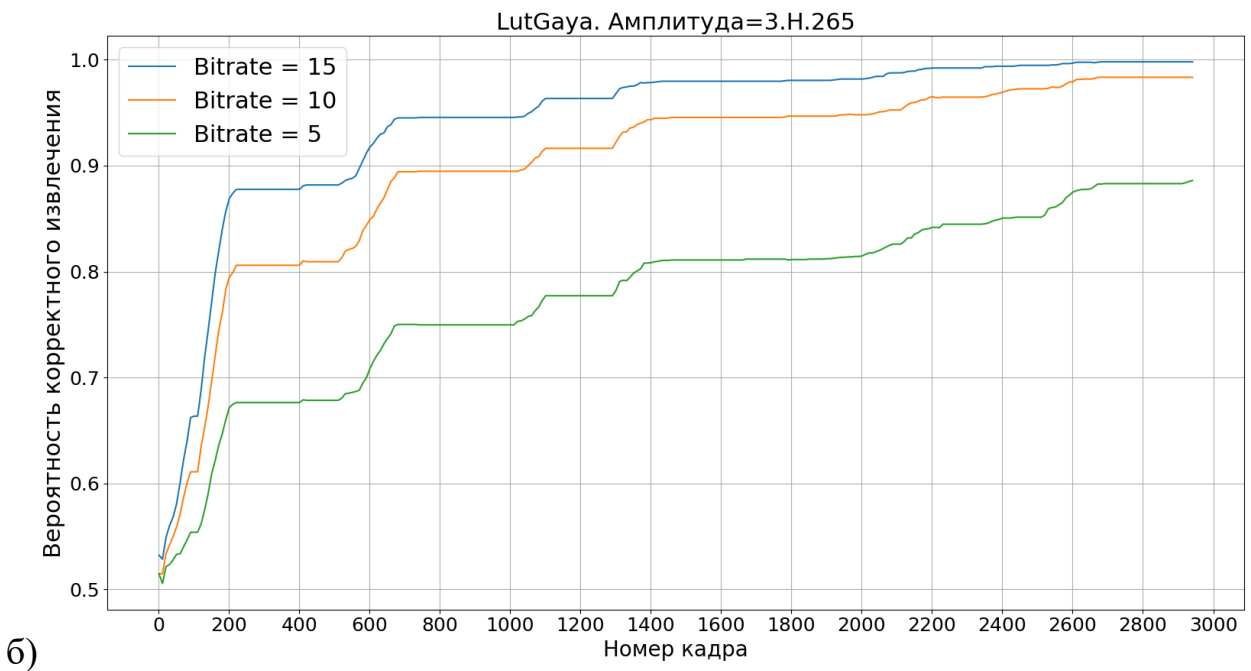
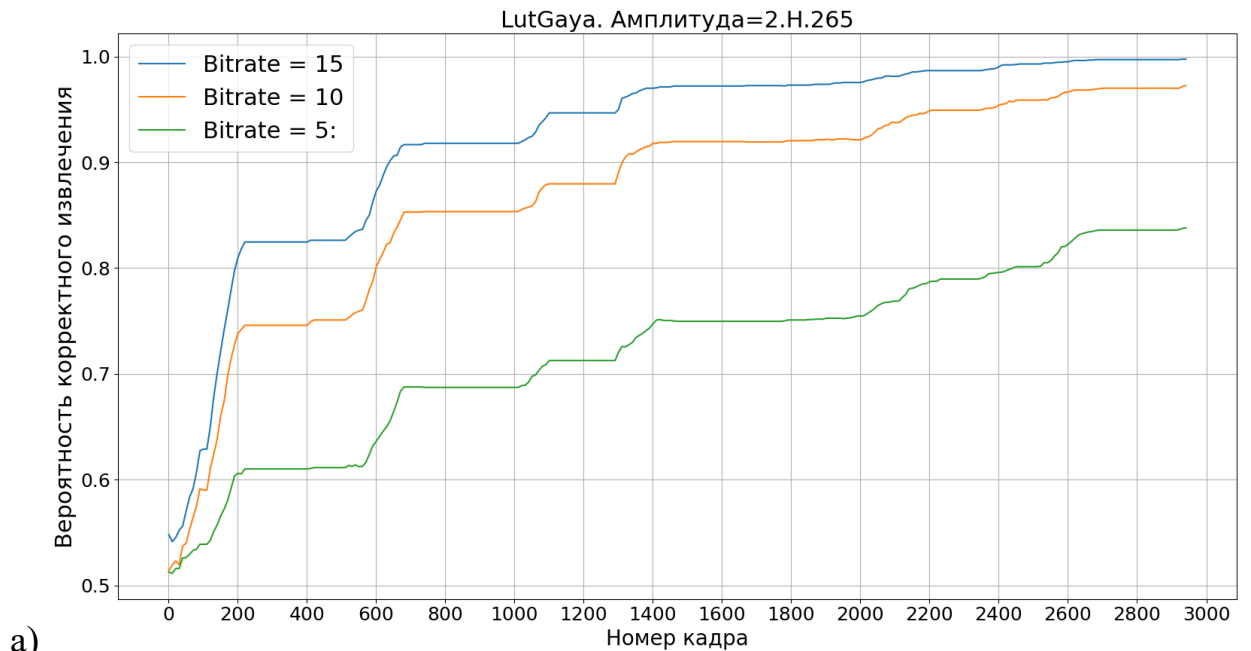
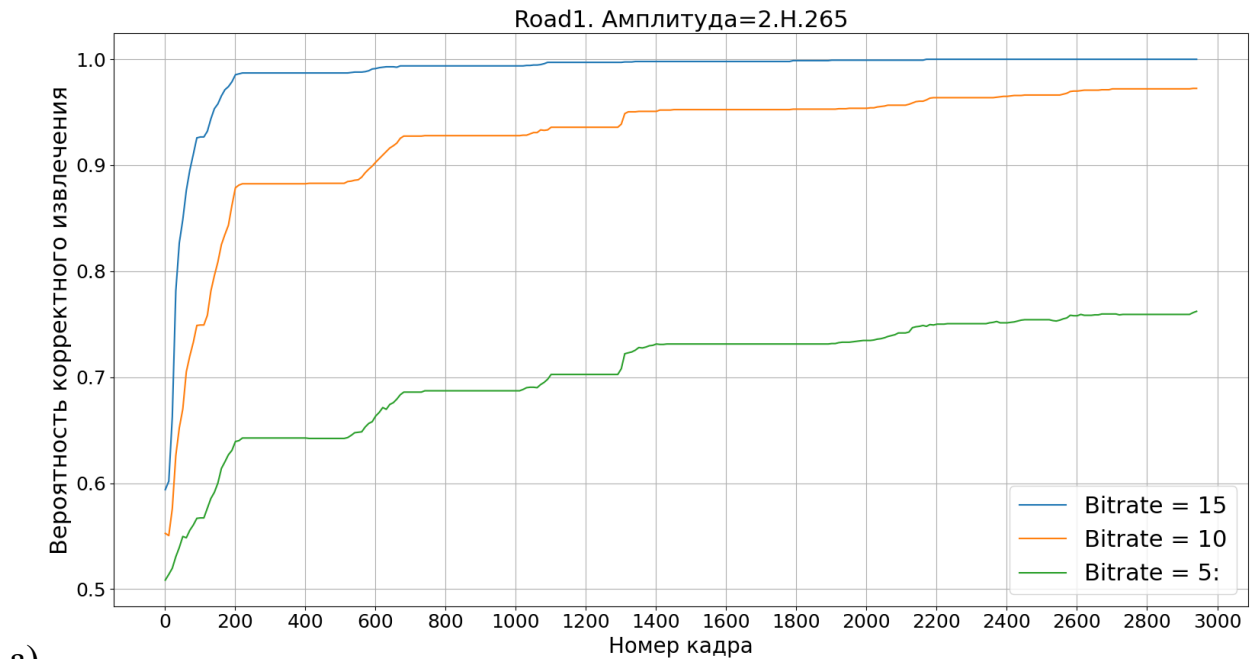


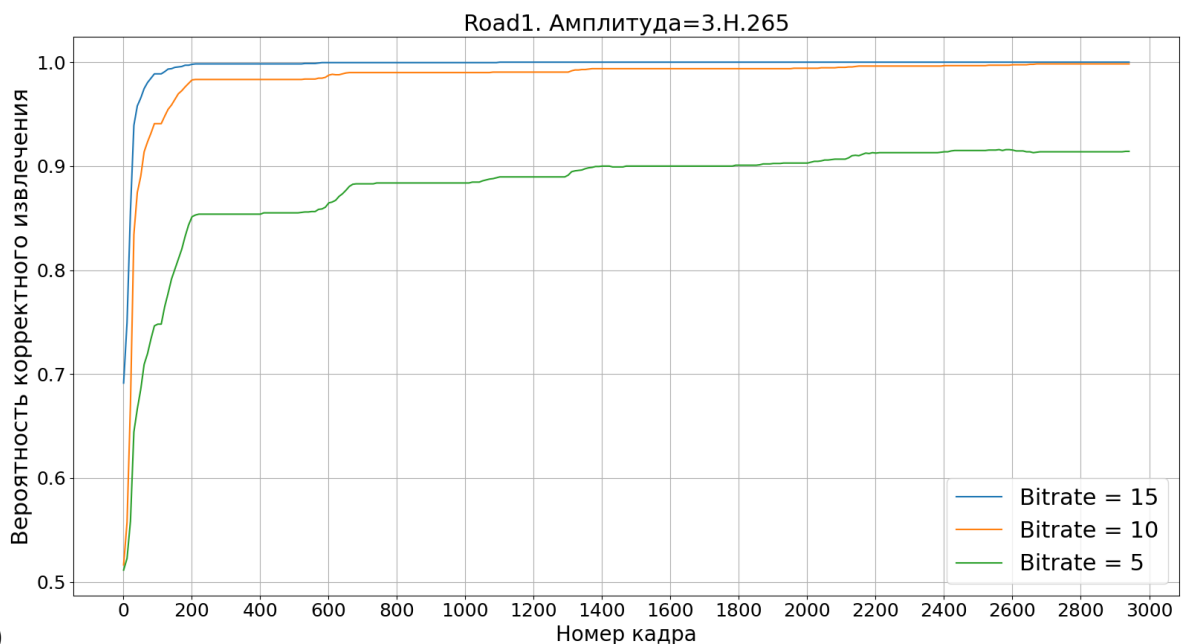
Рисунок 67 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом с использованием кодека H.265 для видео

“LutGaya” для а) $A = 2$; б) $A = 3$

Аналогичная ситуация в сравнении с кодеком H.264 наблюдается и при обработке видео “LutGaya”, т.е. вероятность извлечения, ниже чем при использовании кодека H.264, однако она выше, чем при использовании этого кодека в базовом и упрощённом методах.



а)



б)

Рисунок 68 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом с использованием кодека H.265 для видео “Road1” для а) $A = 2$; б) $A = 3$

На видео “Road1” при амплитуде $A = 2$ использование кодека H.265 показывает точность ниже, чем H.264, однако с возрастанием амплитуды до

$A = 3$ использование H.265 улучшает результаты. На примере видео “Road1” в сравнении с упрощённым методом точность извлечения стабильна и выше, однако хуже, чем в использовании базового метода.

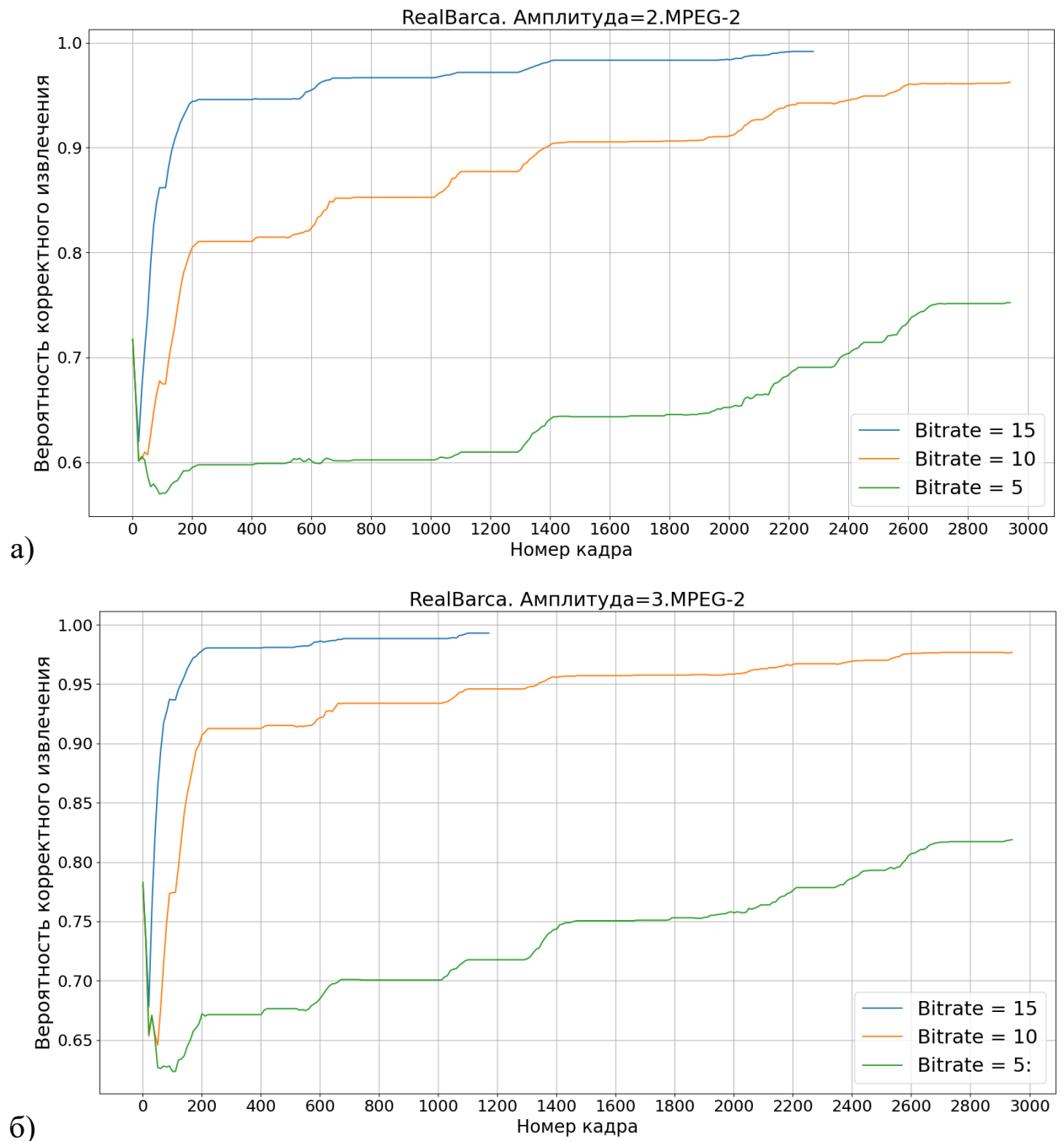


Рисунок 69 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом с использованием кодека MPEG-2 для видео “RealBarca” для а) $A = 2$; б) $A = 3$

Использование кодека MPEG-2 при сильном сжатии снижает вероятность корректного извлечения ЦВЗ по сравнению с более

современными кодеками, однако все равно позволяет извлекать ЦВЗ, хотя и с использованием большего количества кадров. Спектральный подход позволяет постепенно накапливать ЦВЗ с лучшим результатом чем при использовании упрощённого метода, однако использование кодека MPEG-2 при использовании спектрального метода показывает результат хуже, чем базовый метод.

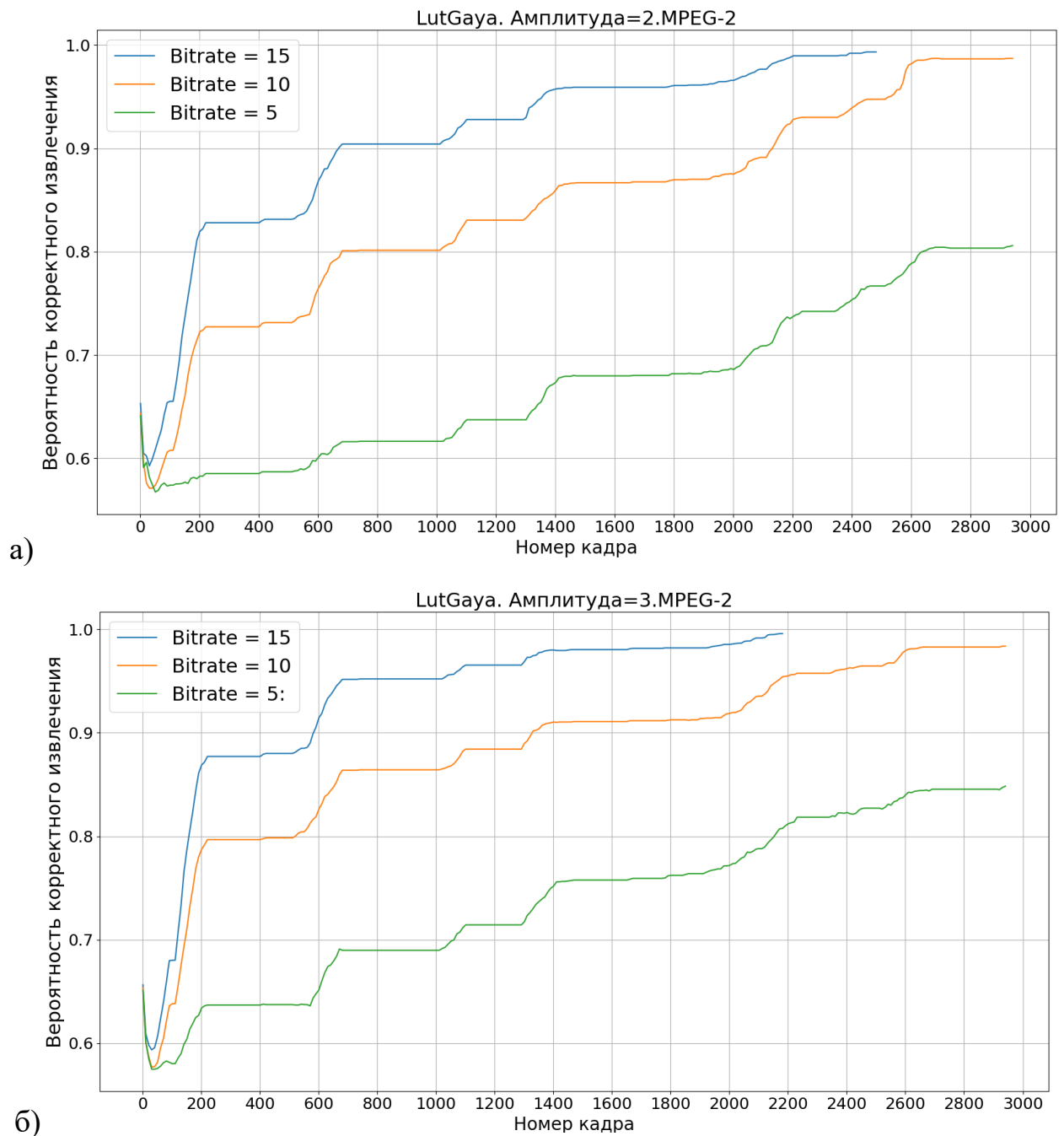


Рисунок 70 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом с использованием кодека MPEG-2 для видео “LutGaya” для а) $A = 2$; б) $A = 3$

При анализе работы спектрального метода на примере видео “LutGaya” можно заметить, что результаты сжатия с помощью MPEG-2 также ниже чем при использовании других кодеков. При этом встраивание ЦВЗ с амплитудой $A = 3$ даёт результат ниже, чем при использовании упрощённого и базового метода.

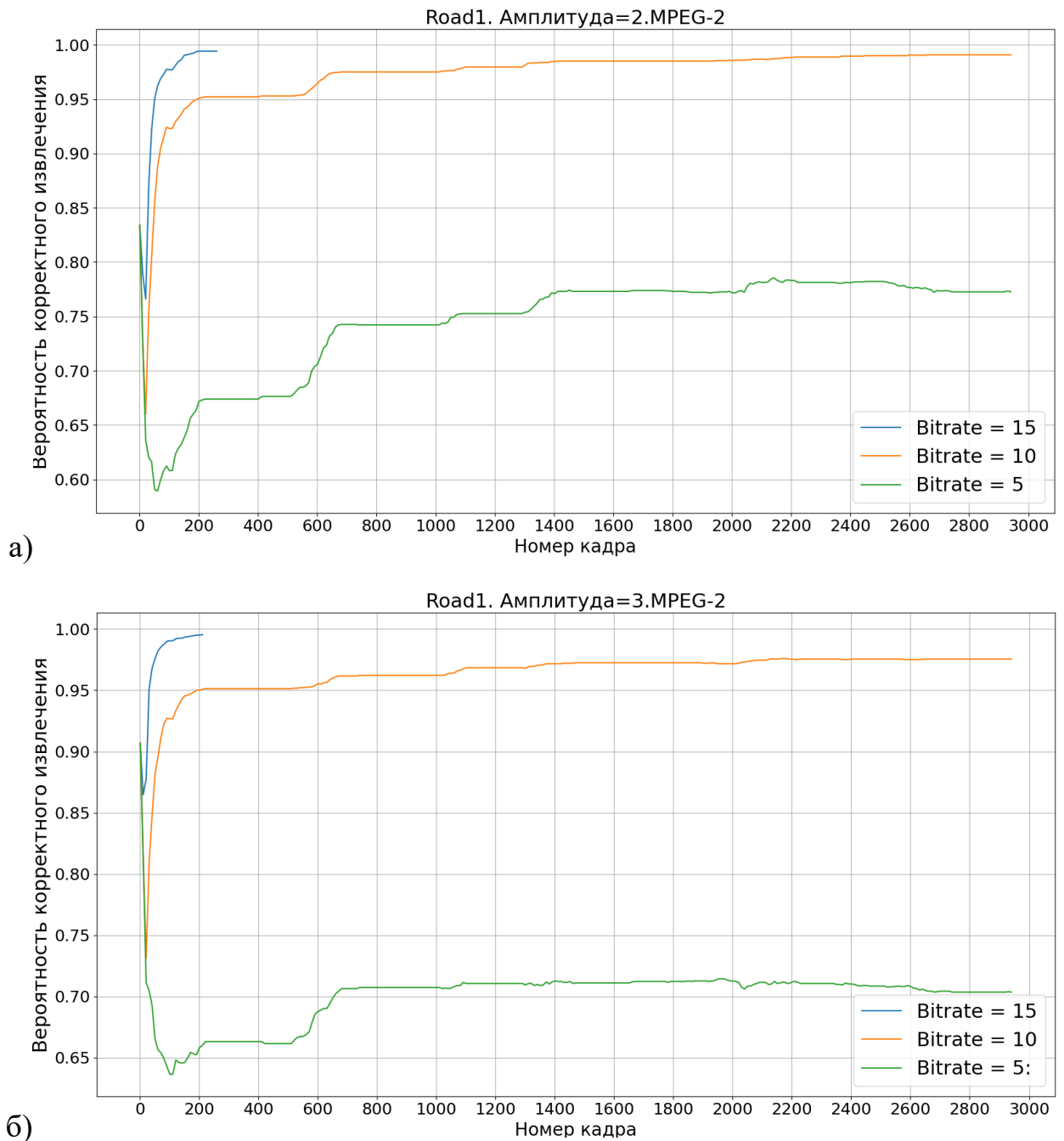


Рисунок 71 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом с использованием кодека MPEG-2 для видео “Road1” для а) $A = 2$; б) $A = 3$

При встраивании ЦВЗ спектральным методом в спокойное видео камеры видеонаблюдения можно заметить, что увеличение амплитуды приводит падению вероятности извлечения как и при использовании кодека H.264.

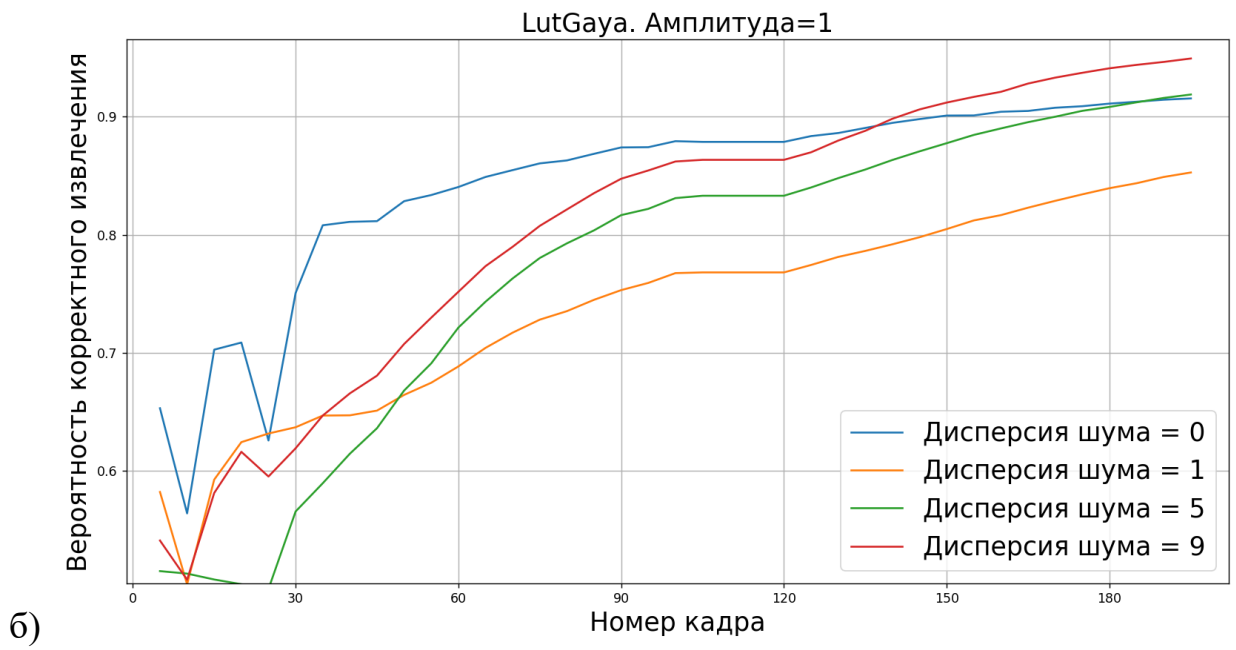
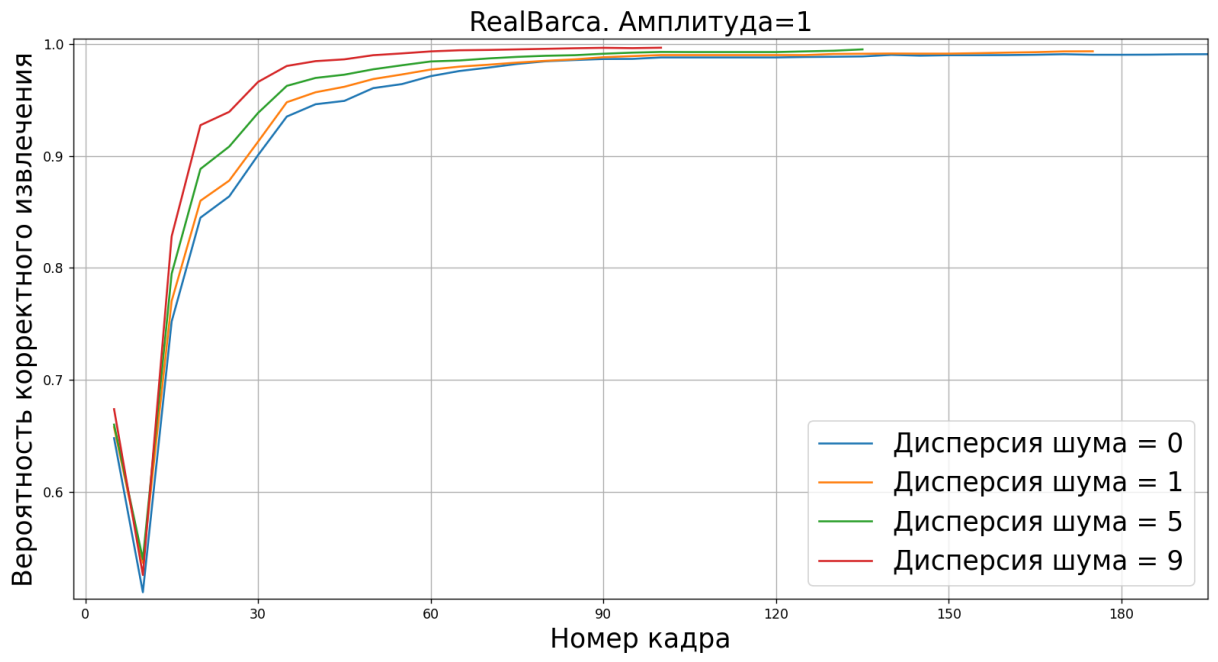
5.2. Корректность работы метода при распространённых атаках

Для тестирования и сравнения алгоритмов необходимо проверить их стойкость к другим распространённым искажениям [95] : таким как зашумление и потеря синхронизации. Наложение незначительного шума может происходить как намеренно для повреждения ЦВЗ, так и в результате съёмки с реальной камеры или некорректной передачи сигнала. Ранее в пункте 2.7 исследовалось наложение шума на синтезированные видео, поэтому данный пункт посвящен исследованию стойкости к шумам на примере реальных видео. Проверка возможности извлечения ЦВЗ независимо от момента начала видео также важна. Это связано с тем, что видео может быть обрезано как умышленно, так и случайно, а ЦВЗ должен оставаться корректно извлеченным даже при частичном доступе к видеопотоку.

Каждый из описанных в разделах (2)-(4) метода защиты видео проверялся на стойкость к указанным искажениям.

5.2.1. Устойчивость метода к атаке зашумления

Проверим стойкость базового метода при наложении шума. Ранее это проверялось в пункте 2.7, где в рамках эксперимента к каждому кадру защищенного видео (ЦВЗ встраивался с амплитудой $A = 2$) будет добавляться белый шум с дисперсией $D = 1$; $D = 5$ и $D = 9$. Как и в ранее описанных экспериментах, использовались три различных видео. На графике на рисунке 72 приведены результаты работы алгоритма извлечения при использовании базового метода в случае наложения шумов.



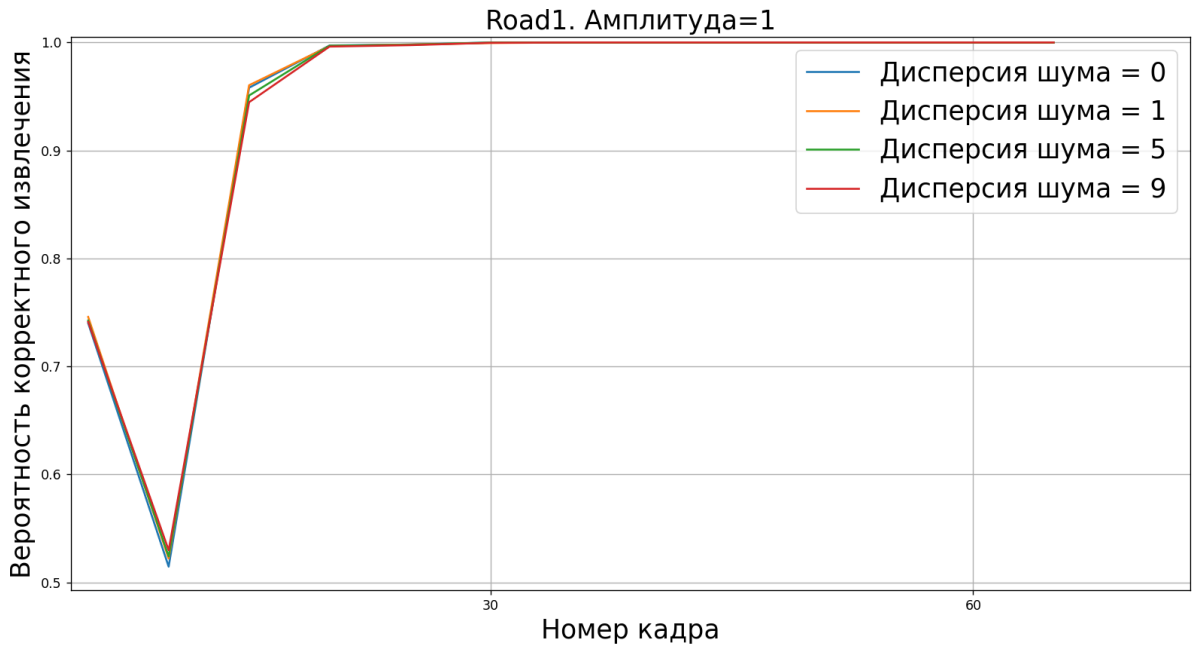
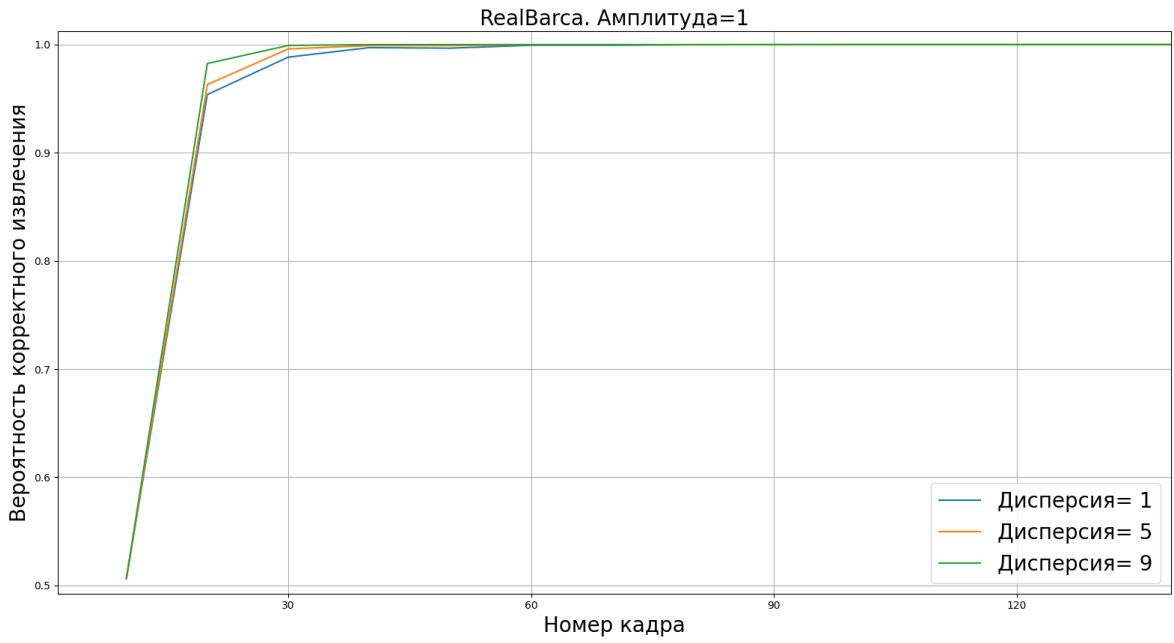


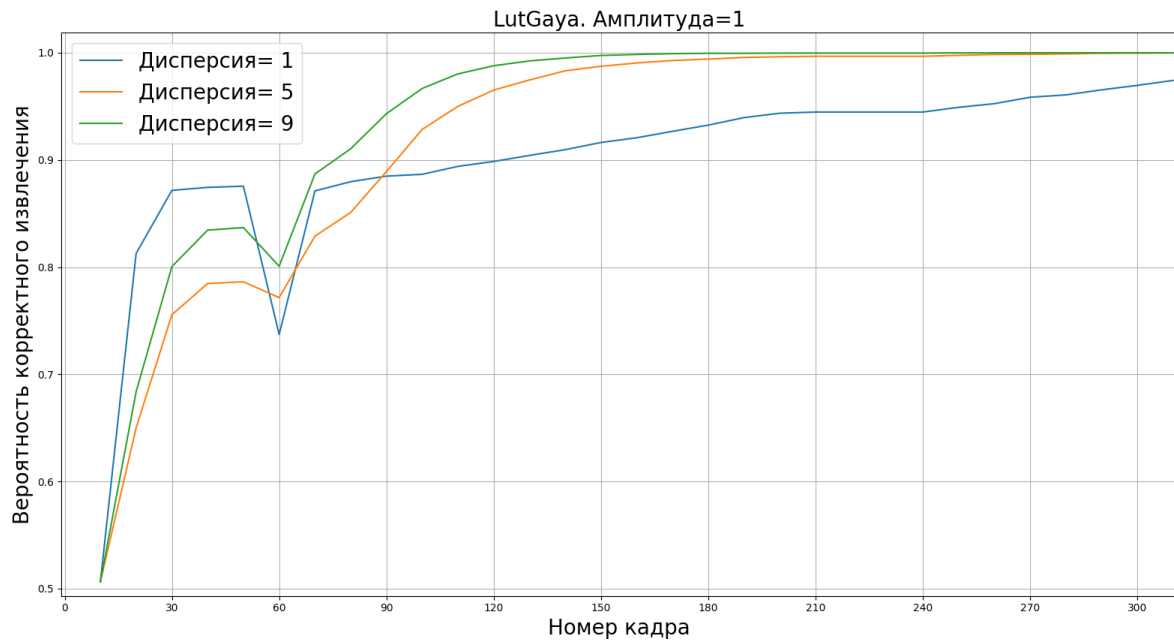
Рисунок 72 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом при зашумлении видеозаписей а)RealBarca; б)LutGaya; в)Road1

Исходя из графиков, приведенных на рисунках 72, видно, что добавление шума практически не влияет на корректность извлечения.

Аналогичные эксперименты по стойкости к зашумлению и потере синхронизации были проведены и для упрощённого метода. На рисунке 73 представлены графики при добавлении белого шума с дисперсией $D=1$, $D=5$ и $D=9$ для трех видео, которые защищались с помощью встраивания ЦВЗ с амплитудой $A=1$.



а)



б)

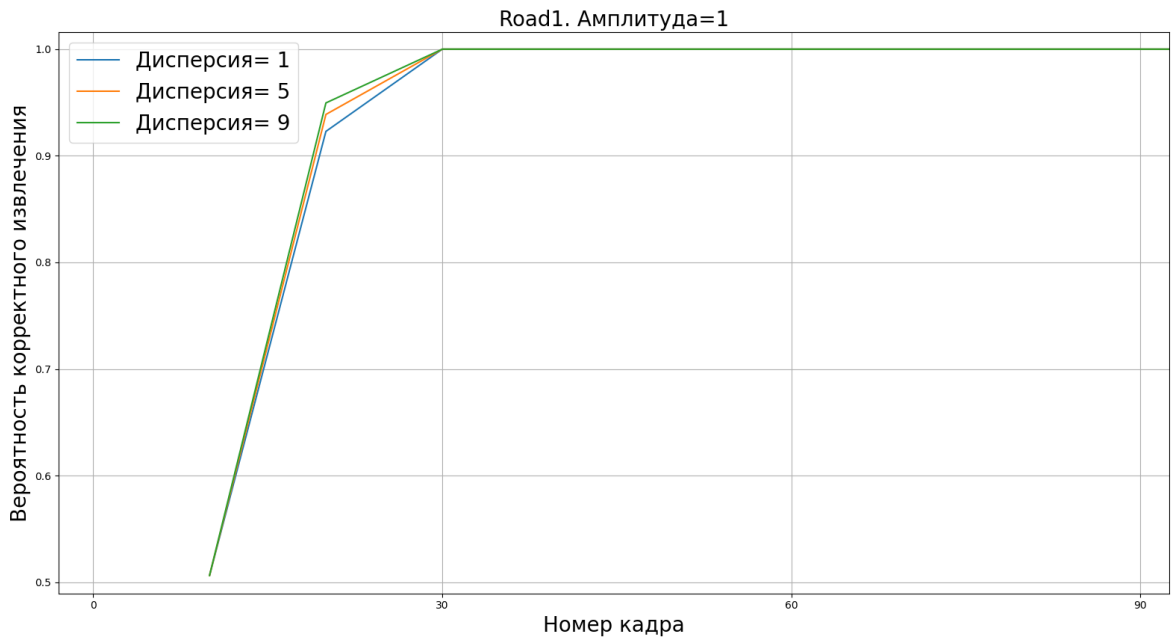
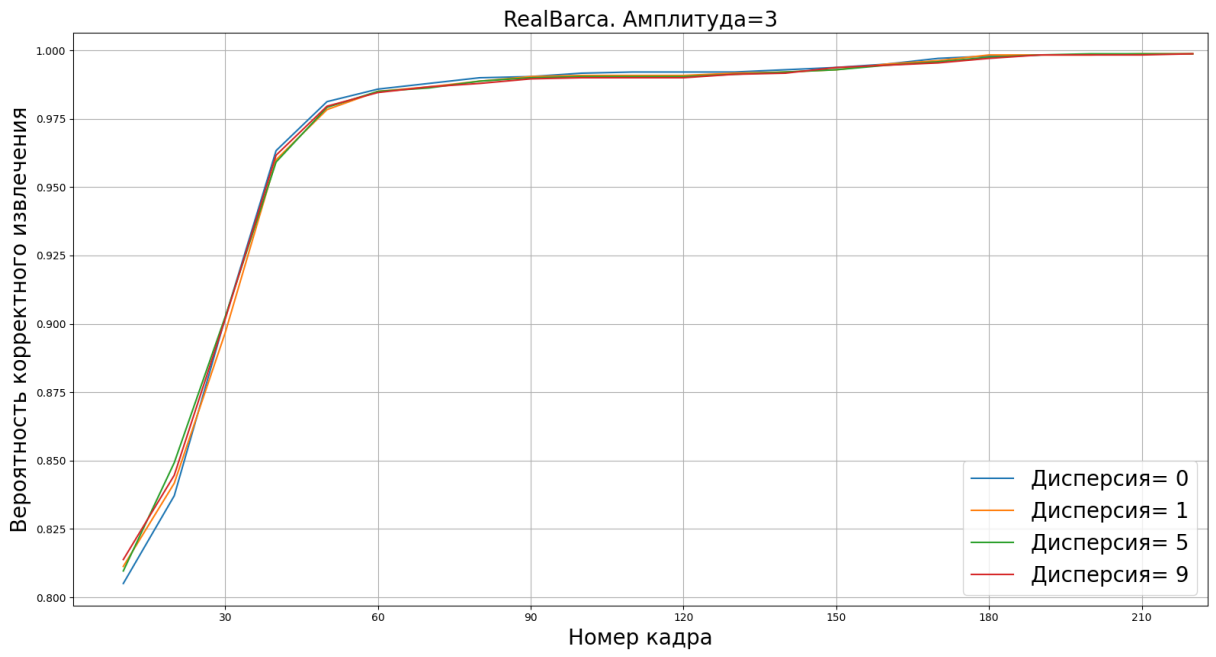


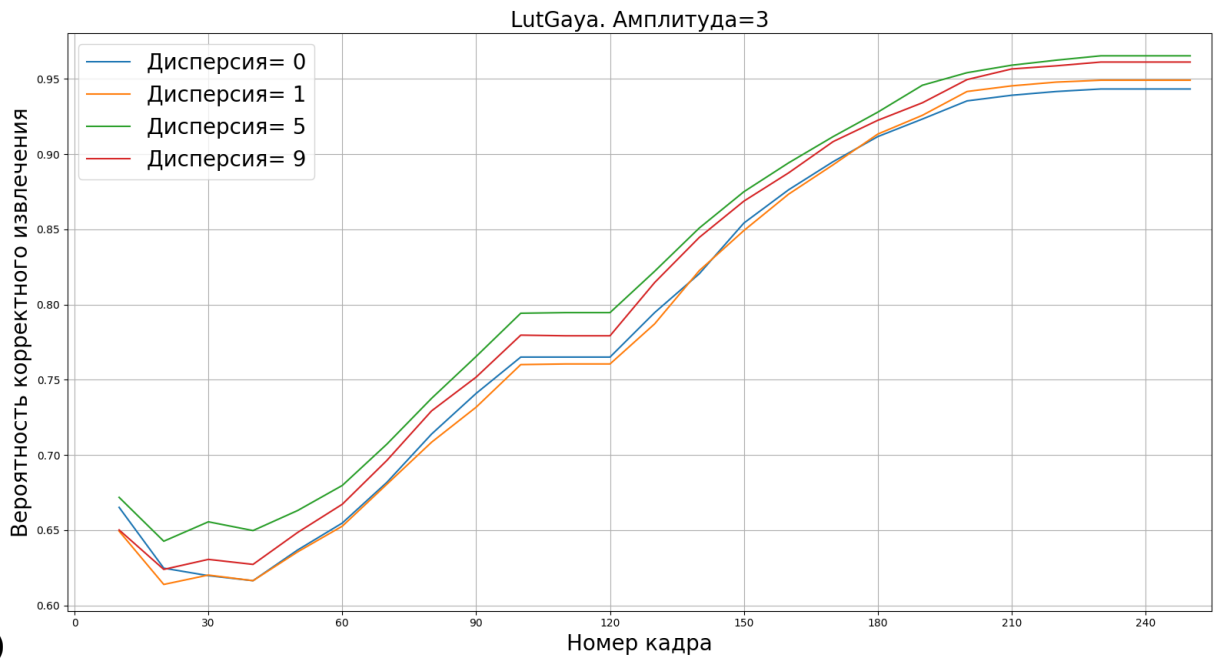
Рисунок 73 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом при зашумлении видеозаписей а)RealBarca; б)LutGaya; в)Road1

По графикам на рисунке 73 видно, что добавление шума не оказало влияния на качество извлечения. Следовательно, упрощённый метод является также стойким к возникновению незначительного шума.

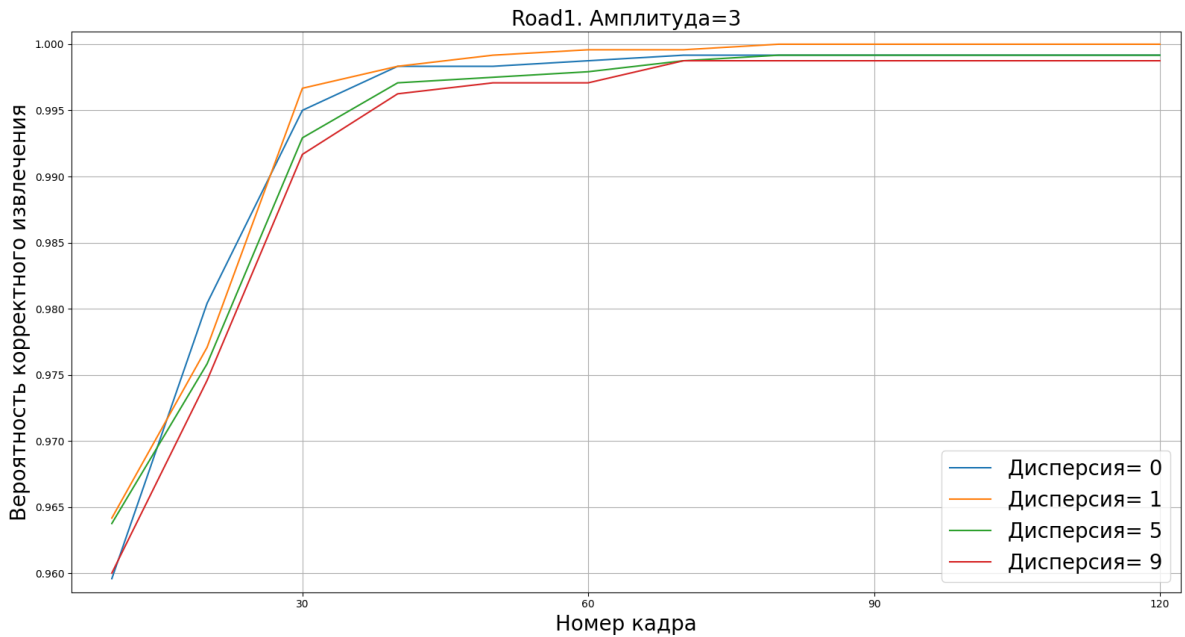
Эксперименты по добавлению шумов были проведены и для спектрального метода встраивания. При проведении текущего эксперимента ЦВЗ с амплитудой $A=3$ встраивался в несжатое видео, на которое перед извлечением накладывался шум с дисперсией $D=1;5;9$. Результаты работы, полученные в ходе экспериментов приведены на рисунке 74.



а)



б)



в)

Рисунок 74 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом при зашумлении видеозаписей а)RealBarca; б)LutGaya; в)Road1

По графику видно, что добавление шума к кадрам защищенного видео не оказывает влияния на способность алгоритма к корректному извлечению ЦВЗ. Следовательно, указанный метод также является стойким к зашумлению (хоть и приводит к незначительному ухудшению качества извлечения).

5.2.2. Устойчивость метода к потере синхронизации

Далее осуществлялась проверка, насколько корректно извлекается ЦВЗ в зависимости от кадра начала извлечения. График такой зависимости для каждого из трех рассмотренных видео приведен на рисунке 75.

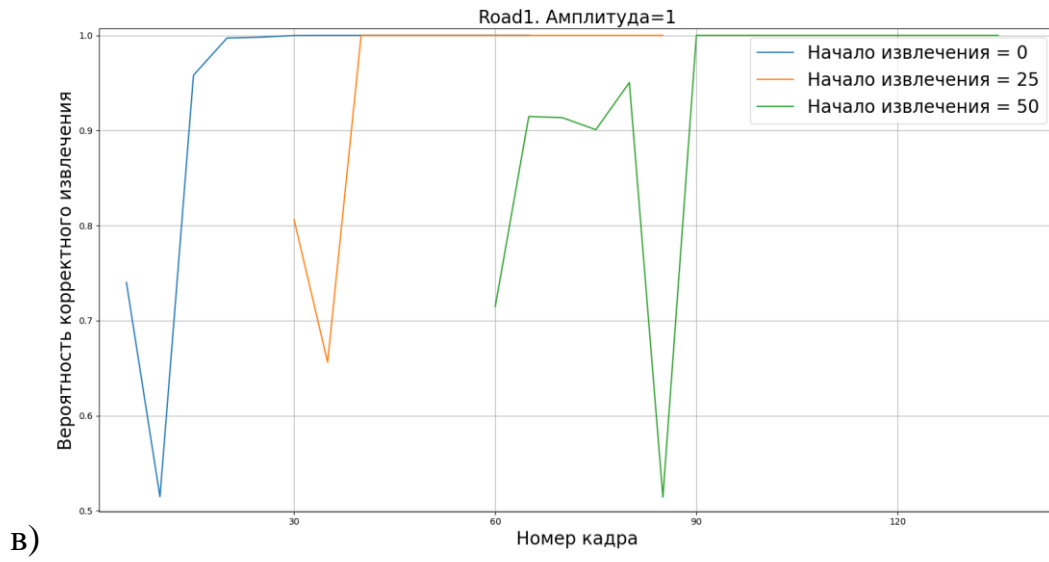
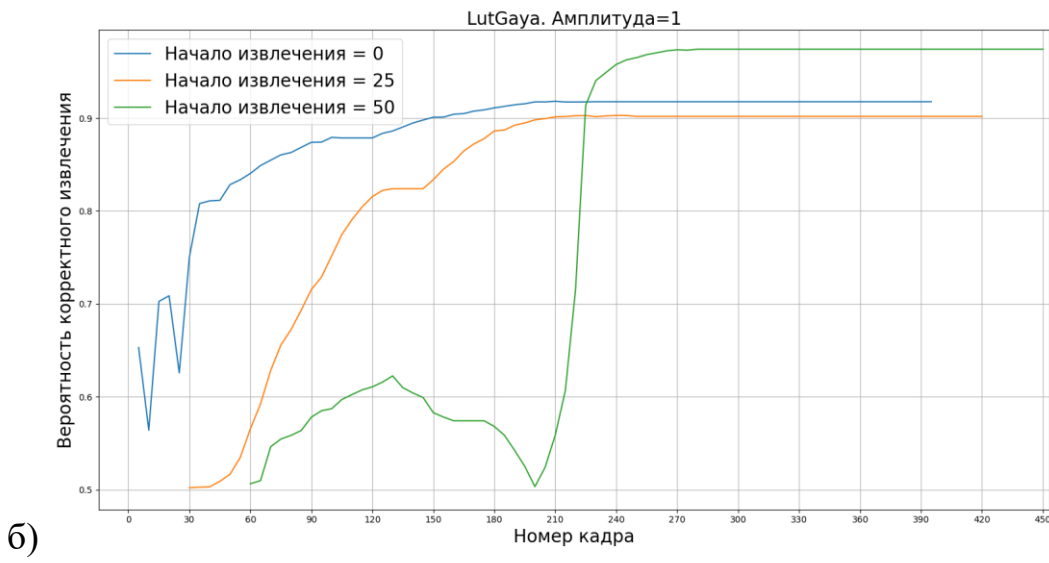
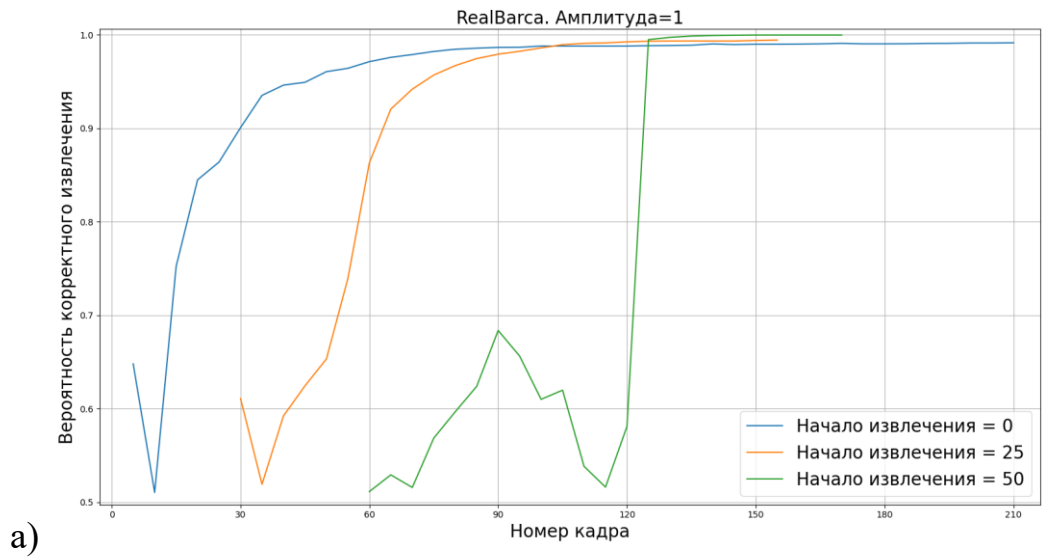
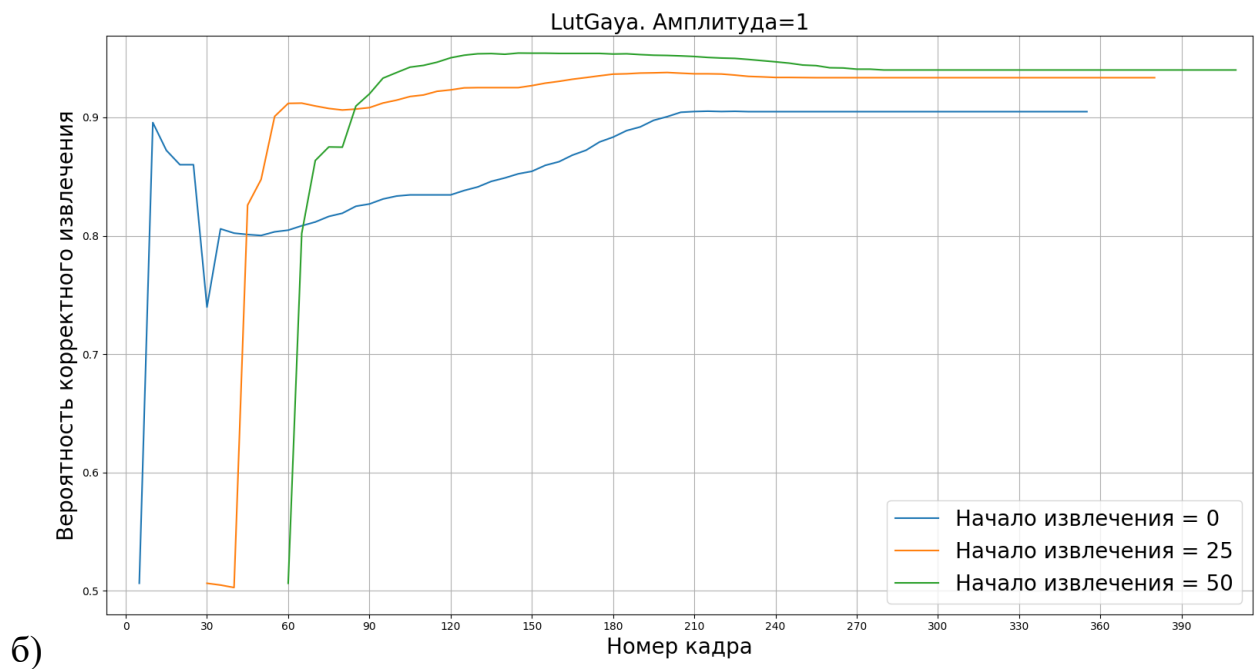
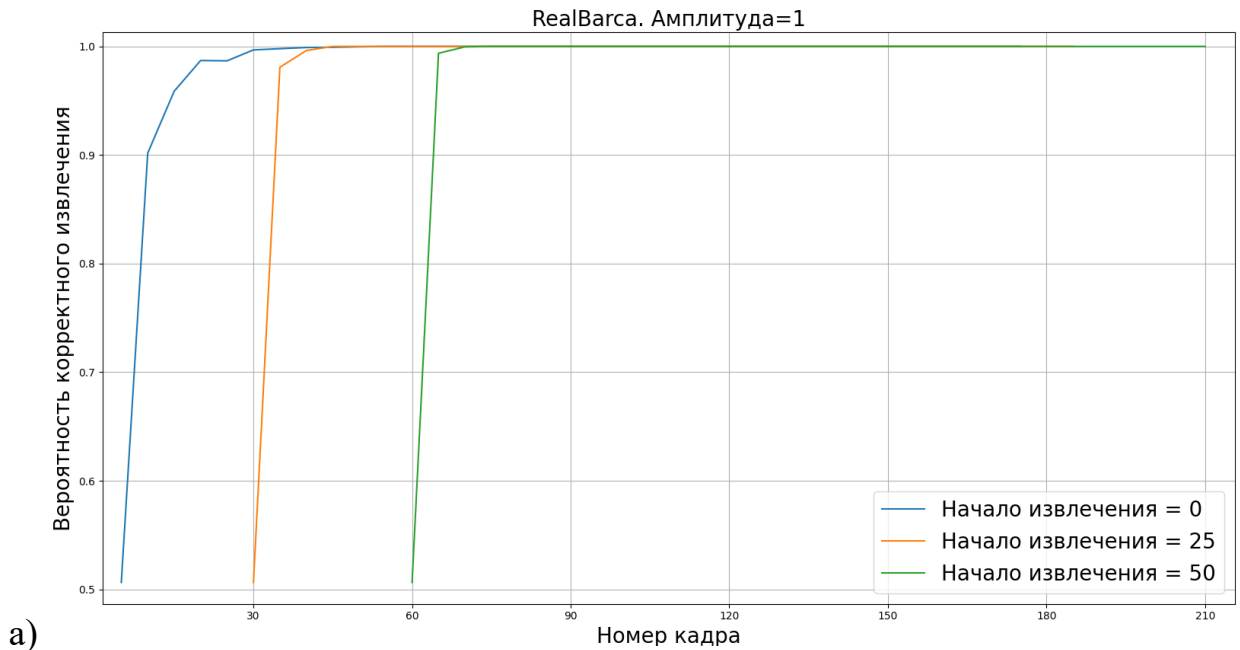


Рисунок 75 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом при потере синхронизации для видеозаписей

а)RealBarca; б)LutGaya; в)Road1

По графикам видно, что извлечение происходит корректно вне зависимости от момента его начала. Больше влияние оказывает содержание видео в момент начала извлечения.

Далее, на рисунке 76 приведен график извлечения ЦВЗ в случае начала извлечения в случайный момент времени.



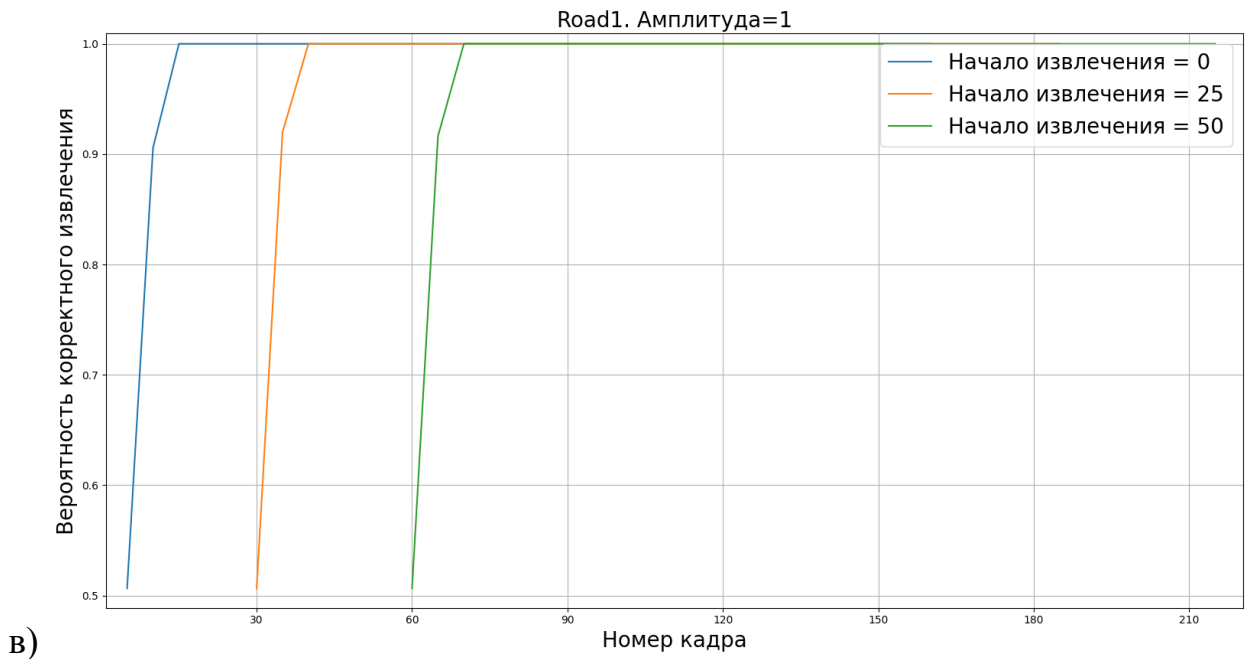
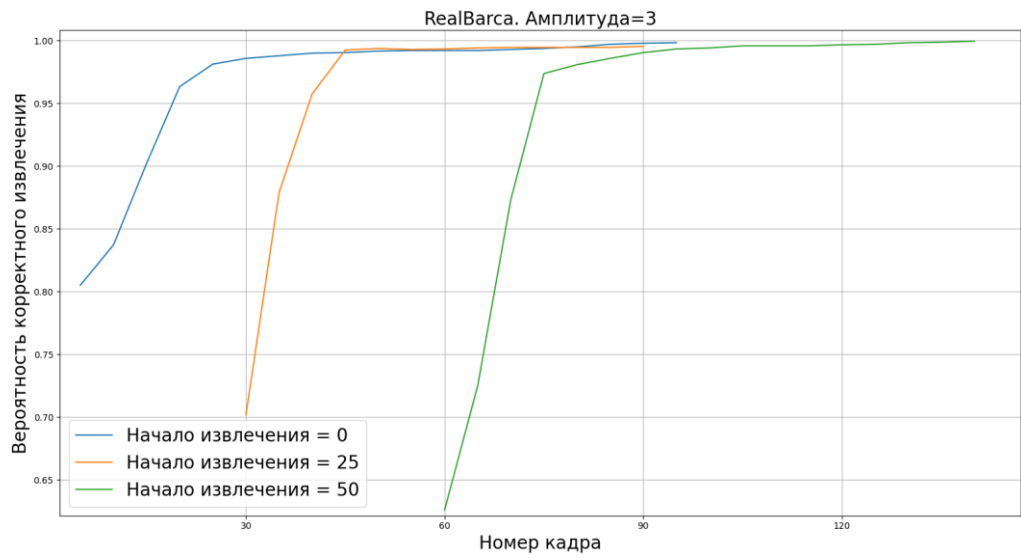


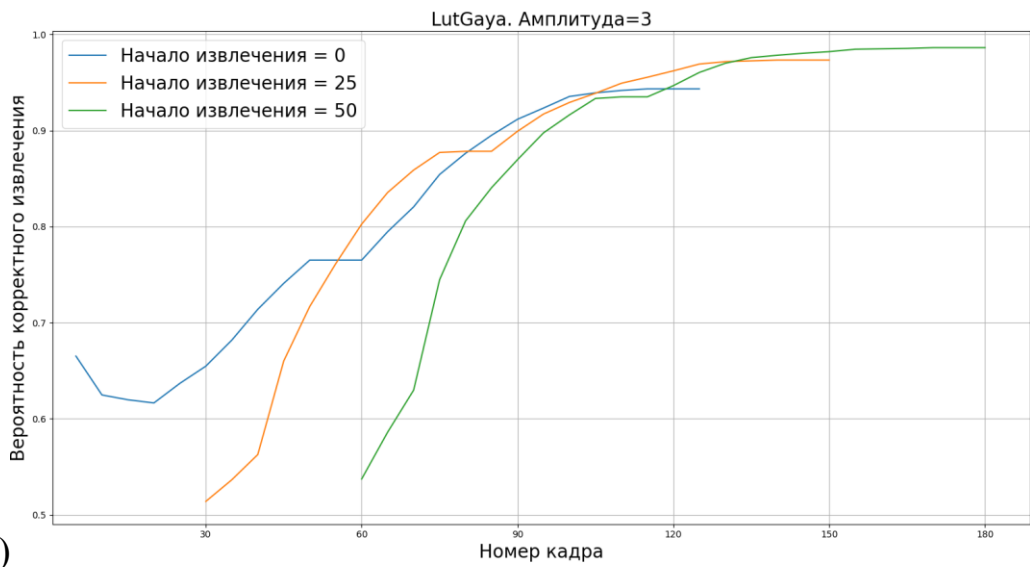
Рисунок 76 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ упрощённым методом при потере синхронизации для видеозаписей а)RealBarca; б)LutGaya; в)Road1

Исходя из полученных результатов видно, что для видео “Road1” и “RealBarca” кривые роста вероятности извлечения практически не меняются в зависимости от номера кадра. У видео “LutGaya” есть отличия в зависимости от кадра начала извлечения, но в любом случае за небольшое число кадров точность извлечения превышает необходимое значение $P \geq 0,86$.

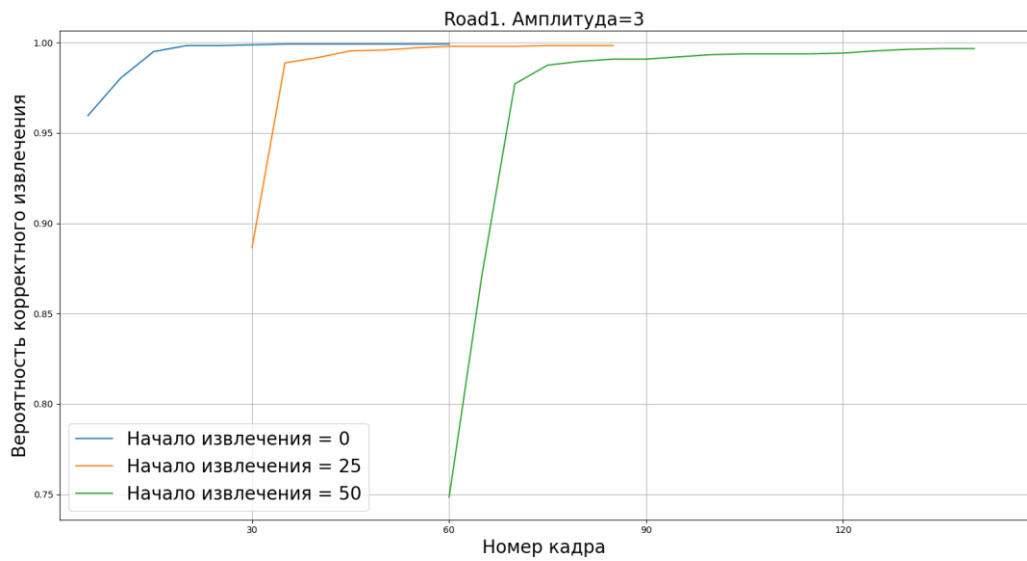
Далее на рисунке 77 приведен результат эксперимента, показывающего возможности извлечения ЦВЗ в любой момент времени с помощью спектрального метода.



а)



б)



в)

Рисунок 77 – Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ спектральным методом при потере синхронизации для видеозаписей а)RealBarca; б)LutGaya; в)Road1

По представленным графикам видно, что скорость извлечения ЦВЗ скорее зависит от происходящего в кадре в конкретный момент, а извлечение возможно в любой момент времени.

5.2.3. Устойчивость метода к распространённым атакам

Стоит также отметить, что фазовый метод демонстрирует стойкость к другим распространённым искажениям, таким как геометрические или яркостные атаки. Среди геометрических атак рассмотрим обрезку и поворот видео на небольшой угол, которые часто используются при попытках удаления ЦВЗ.

Устойчивость к этим атакам обеспечивается за счёт использования помехоустойчивого кода, в частности QR-кода, в структуре внедряемого ЦВЗ. Избыточность помехоустойчивого кода позволяет восстанавливать информацию даже по поврежденному QR-коду, тем самым обеспечивая стойкость к незначительным обрезкам по краям кадров видео. Кроме того, поисковые узоры (четыре специальных квадрата в каждом из углов) QR-кода позволяет методу быть стойким к поворотам кадра, поскольку позволяют определять его ориентацию в кадре. Даже если видео было переснято под углом или повернуто, алгоритм способен обнаружить поисковые метки, определить угол поворота и выполнить автоматическое выравнивание QR-кода перед декодированием.

Одной из распространённых яркостных атак на видео является атака контрастирования. При такой атаке осуществляется серия арифметических преобразований отдельно над каждым пикселем изображения, тем самым растягивая или сужая диапазон значений яркости, которые принимают пиксели изображения. Однако такие действия не способны разрушить ЦВЗ, поскольку извлечение ЦВЗ будет происходить независимо из каждого пикселя видео вне зависимости от диапазона яркости пикселей в целом.

Стойкость к наиболее распространённым атакам была проверена на датасете UCF-101, наборе видео с длиной 5-10 секунд с разрешением кадров 240x320 пикселей. В таблице 2 представлены вероятности извлечения при применении типовых атак на видео: сжатие, добавление шума и контрастирование. Для каждого типа атак приведены минимальные, максимальных и средние значения метрики.

Таблица 2 - Стойкость метода к распространённым атакам

Тип атаки	Минимальное	Максимальное	Среднее
Без атак	0.98	1	0,998
Сжатие H.264	0.847	1	0,993
Защумление	0,97	1	0,997
Контрастирование	0,777	1	0,975

Из приведенной таблицы видно, что фазовый метод является стойким к рассмотренным атакам. Снижение показателей при сжатии и изменении контрастности обусловлено малым количеством кадров в выборке и спецификой исходного видеоматериала. При увеличении количества кадров вероятность корректного извлечения возрастает и достигает значений, гарантирующих надежную работу метода.

5.3. Сравнение представленных алгоритмов

Одним из важнейших критериев, связанных с встраиванием ЦВЗ является их незаметность в защищаемом контенте. Наиболее распространённой метрикой, оценивающая незаметность встраивания, является PSNR (Peak signal noise to ratio) [4].

В таблице 3 приведены оценки этой метрики для каждого из методов на первых 100 кадрах каждого из видео.

Таблица 3 - Значение метрики PSNR в зависимости от метода встраивания и амплитуды ЦВЗ

		Базовый метод	Упрощённый метод	Спектральный метод
RealBarca	A = 1	46,864	46,857	48,159
	A = 2	45,464	41,848	46,462
	A = 3	41,87	38,548	43,226
	A = 4	39,485	36,136	40,85
LutGaya	A = 1	48,058	48,048	49,266
	A = 2	46,671	42,678	47,419
	A = 3	43	39,351	44,175
	A = 4	40,5	36,933	41,822
Road1	A = 1	47,347	47,313	48,139
	A = 2	45,777	41,958	46,441
	A = 3	41,954	38,577	43,199
	A = 4	39,506	36,13	40,823

Из приведенной таблицы видно, что при сопоставимой амплитуде ЦВЗ наименьшее визуальное искажение вносит спектральный метод, а наибольшее – упрощённый метод. Поэтому в экспериментах, описанных выше, при использовании спектрального метода допускалось встраивание ЦВЗ с амплитудой $A = 3$.

Далее сравним используемые методы по качеству извлечения из несжатого набора кадров и в реальных условиях. Во втором случае используется сжатие различными кодеками с используемым битрейтом 5 Мбит/сек.

Таблица 4 - Сравнение рассматриваемых методов для несжатого видео

Название видео	Номер кадра, начиная с которого ЦВЗ корректно извлекается		
	Базовый метод	Упрощённый метод	Спектральный метод
RealBarca	25	20	210
LutGaya	190	115	300
Road1	15	15	150

Для данного эксперимента при использовании базового и упрощённого метода встраивание происходило с амплитудой $A=1$, а при использовании

спектрального — с амплитудой $A=2$. Однако даже несмотря на более высокую амплитуду встраивания, использование спектрального метода требует большего числа кадров для корректного извлечения.

Далее приведена таблица, которая наглядно сравнивает описываемые подходы при одинаковом битрейте с использованием трёх различных кодеков. В рамках исследования спектрального метода осуществлялось встраивание QR-кода размером 49x49 бит, а при использовании упрощённого и базового использовался QR-размером 89x89 бит, однако сравнение указанных методов корректно, поскольку при встраивании базовым и упрощённым вероятность корректного извлечения никак не зависит от размера QR-кода. При этом, поскольку одинаковая амплитуда ЦВЗ в разных методах даёт разное искажение видео (таблица 2), то для спектрального метода использовался ЦВЗ с амплитудой на 1 превышающее значение у базового и упрощённого метода.

Таблица 5 - Вероятность корректного извлечения в конце сжатого видео (битрейт 5Мбит/сек)

Название видео	Амплитуда ЦВЗ	Базовый метод			Упрощённый метод			Спектральный метод($A + 1$)		
		H.264	H.265	MPEG-2	H.264	H.265	MPEG-2	H.264	H.265	MPEG-2
RealBarca	$A = 1$	0,816	0,836	0,842	0,5	0,91	0,5	0,94	0,76	0,75
	$A = 2$	0,931	0,949	0,923	1	0,99	0,5	0,96	0,87	0,83
LutGaya	$A = 1$	0,87	0,75	0,88	0,75	0,55	0,7	0,92	0,84	0,8
	$A = 2$	0,89	0,8	0,91	1	0,91	0,89	0,94	0,88	0,85
Road1	$A = 1$	0,88	1	1	0,5	1	0,5	0,86	0,76	0,77
	$A = 2$	0,96	1	1	0,53	1	0,5	0,87	0,92	0,7

Из полученной таблицы видно, что упрощённый метод показывает нестабильные результаты при извлечении, зависящие от выбранного кодека и типа видео. Наиболее высокие результаты показывает спектральный метод в большинстве из рассмотренных случаев, однако указанный метод подразумевает возможность встраивания меньшего числа информации поскольку размер QR-кода 49x49 битов.

На основе полученных результатов экспериментов можно сделать вывод, что при необходимости передать небольшой объём информации по каналу передачи, использующему сильное сжатие с потерями, лучше всего использовать спектральный метод. В случае необходимости встраивания ЦВЗ

большого объёма при использовании сжатия, более приоритетным является использование базового метода. Если требуется быстрая передача видео при малом объёме сжатия или без него, то оптимальным является упрощённый метод встраивания.

5.4. Сравнение метода с существующими

Предложенный в данной работе метод относится к категории алгоритмов, в которых встраивание цифрового водяного знака выполняется во всё видео. Основным преимуществом такого подхода перед покадровыми методами является стойкость к атакам оценивания по одному кадру.

Классическая атака на покадровые методы основана на корреляционном анализе между остаточными сигналами соседних кадров. Если в каждом кадре присутствует одинаковый ЦВЗ, то после устранения низкочастотной структуры изображения остаётся почти идентичная высокочастотная компонента.

Подробно метод определения наличия корреляции между кадрами описан в работе [36]. Для его корректной реализации требуется вычисление разности между кадром с водяным знаком и соответствующим оригинальным кадром:

$$R'_t(n_1, n_2) = x(n_1, n_2) - x_0(n_1, n_2) \quad (56)$$

В дальнейшем анализируются такие разности уже для каждой пары соседних кадров видео:

$$K_t = \text{ВКФ}(R'_t, R'_{t+1}) \quad (57)$$

В случае, если для встраивания во всех кадрах используется один и тот же паттерн то полученное значение $K_t \rightarrow 1$. Подобное поведение позволяет атакующему оценить или даже восстановить сам ЦВЗ путём усреднения большого числа кадров.

Ниже приведены сравнение представленного базового метода, представленного в данной диссертации с покадровым методом [35], а также методами, позволяющими встраивать ЦВЗ во всё видео [36,65,97]. Эксперименты проводились на видео “Road1”. В качестве основных показателей использовались среднее, максимальное и минимальное значение коэффициента корреляции между шумами соседних кадров.

Таблица 6 - Сравнение результатов корреляционного анализа

	Коэффициент корреляции				
	[35]	[97]	[65]	[36]	Фазовый метод
Mean	0,28	0,49	0,32	0.02	0,18
Max	0,43	0,74	0,48	0.03	0,34
Min	0,02	0,02	0,03	-0.03	0

По результатам корреляционного анализа можно заметить, что предложенный метод демонстрирует наименьшее значение средней корреляции, что свидетельствует о том, что вносимый ЦВЗ практически невозможно определить усреднением.

В настоящее время распространены подходы, основанные на использовании нейронных сетей для встраивания ЦВЗ. Однако такой подход имеет недостаток, связанный с фиксированным форматом данных на вход сети. Так в работах [45,65] вход ЦВЗ должен представлять собой бинарную последовательность из 256 бит информации. В случае необходимости встроить меньшую информацию, последовательность требуется искусственно дополнять нулями, а использование большего объёма информации, как, например, для встраивания ЭЦП [96], невозможно. Также такой подход ограничивает возможность использования в качестве ЦВЗ векторное представление данных.

Среди методов, позволяющих распределять ЦВЗ по нескольким кадрам без использования нейронных сетей, можно отметить методы [97] и [36]. Однако первый метод является неустойчивым к потере синхронизации, поскольку распределяет части сообщения группам кадров, тем самым при начале извлечения с произвольного момента видео ЦВЗ полностью не восстановится.

Метод, представленный в работе [36], позволяет извлекать ЦВЗ в произвольный момент времени за счёт псевдослучайного распределения ЦВЗ по пространству видео. Поэтому проведем сравнение этого метода с тем, который предложен в данной диссертации по количеству кадров, требуемому для извлечения из несжатого фрагмента видео.

Таблица 7 - Сравнение точности извлечения

Название видео	Количество кадров для извлечения	
	[36]	Фазовый метод
RealBarca	300	25
LutGaya	430	190
Road1	350	15

Из результатов эксперимента видно, что при использовании фазового метода требуется существенно меньшее количество кадров для полностью корректного извлечения встроенной последовательности.

Выводы и результаты по пятому разделу

1) В данном разделе приведены экспериментальные исследования, рассматривающие эффективность работы каждого из трёх рассмотренных в предыдущих разделах подходов (базовый, упрощённый и спектральный) при сжатии с потерями, а также их стойкость к наиболее распространённым

искажениям. Для сжатия рассматривались три разных по содержанию видео и три наиболее распространённых кодека: H.264, H.265 и MPEG-2.

2) При сравнении подходов оказалось, что худшие результаты показывает упрощённый метод, который при сильном сжатии (до 5 Мбит/сек) не позволяет корректно извлекать ЦВЗ. Использование базового и спектрального подходов сопоставимо по вероятности корректного извлечения, но спектральный позволяет накапливать ЦВЗ за меньшее число кадров. При этом стоит отметить, что при одинаковой амплитуде, использование упрощённого подхода вносит наибольшее искажение в видео, а использование спектрального подхода – наименьший.

3) Каждый из рассматриваемых подходов обладает стойкостью к другим из рассмотренных искажений: потеря синхронизации, зашумление, поворот и контрастирование. А упрощённый метод позволяет за наименьшее количество кадров извлекать ЦВЗ в условии отсутствия компрессии.

4) В сравнении с другими методами, предложенный базовый метод позволяет встраивать ЦВЗ нефиксированного размера, а в качестве ЦВЗ может использоваться вектор вещественных чисел. В сравнении с большинством используемых покадровых методов, предложенный в данной диссертации даёт сравнительно низкий уровень межкадровой корреляции, что делает метод менее уязвимым к атакам оценивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационной работы разработан и исследован новый метод защиты цифрового видеоконтента с использованием фазовых цифровых водяных знаков (ЦВЗ), основным преимуществом которого является невозможность извлечения ЦВЗ из одного отдельного кадра видео при небольшом использовании вычислительных ресурсов по сравнению с нейросетевыми методами.

Основные результаты диссертационной работы:

1. В результате аналитического обзора мирового состояния разработки методов активной защиты цифровых видео установлена целесообразность разработки нового метода, обладающего преимуществами перед существующими.

2. Разработан метод защиты видео фазовым ЦВЗ, основанный на встраивании в каждый пиксель видеокadra, рассматриваемый как функция времени, слабой синусоиды с индивидуальной фазой.

3. Разработаны алгоритмы, позволяющие осуществлять встраивание и извлечение из видео двумерного поля фазового ЦВЗ.

4. Разработана модификация метода, использующая предельно высокую частоту встраиваемой синусоиды и тем самым позволяющая снизить вычислительную сложность более чем в 5 раз по сравнению с исходным методом.

5. Разработана модификация метода защиты видео, использующая для повышения уровня защиты вторичный спектральный контейнер, а также метод синтеза шумоподобного полутонового изображения фазового ЦВЗ с дискретным спектром в виде QR-кода.

6. Обосновано использование в качестве ЦВЗ двумерного бинарного QR-кода с оценкой качества его извлечения по вероятности правильного получения каждого элемента кода.

7. Предложена статистическая модель цифровых видео, описывающая их свойства на уровне автокорреляционных функций, предложен эвристические алгоритмы оценки её параметров. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие возможность её применимости к задаче предварительного исследования метода и алгоритмов защиты видео.

8. Проведены экспериментальные исследования разработанного метода и алгоритмов на видеофайлах, синтезированных по предложенной статистической модели. Установлена слабая зависимость эффективности метода от всех параметров модели в широком диапазоне их изменения, кроме параметра интенсивности случайного потока смены сцен. Для типовых значений параметров видео корректное извлечение ЦВЗ обеспечивается уже к 30 кадру с начала процедуры анализа видео.

9. Проведено экспериментальное исследование разработанного метода и алгоритмов на реальных видеофайлах, показавшее стойкость метода к сжатию с потерями при использовании популярных кодеков: H.264, H.265 и MPEG-2, а также стойкость к другим распространённым атакам на видео.

Важно отметить, что предложенный метод является универсальным и его возможно использовать не только для защиты видео, но и для защиты других типов данных, например мультиспектральных или гиперспектральных изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu, Q. Digital rights management for content distribution / Q. Liu, R. Safavi-Naini, N. P. Sheppard // *Conferences in Research and Practice in Information Technology Series*. – 2003. – Vol. 34. – P. 49–58.
2. Cox, I. J. A review of watermarking principles and practices / I. J. Cox [et al.] // *Digital Signal Processing for Multimedia Systems*. – 2018. – P. 461–485.
3. Грибунин, В. Г. Цифровая стеганография / В. Г. Грибунин, И. Н. Оков, И. В. Туринцев. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2023. — 262 с.
4. Artru, R. Digital watermarking of video streams: Review of the state-of-the-art / R. Artru, A. Gouaillard, T. Ebrahimi // *arXiv preprint arXiv:1908.02039*. — 2019.
5. Fridrich, J. Applications of data hiding in digital images / J. Fridrich // *ISSPA'99. Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and its Applications*. – IEEE, 1999. – Vol. 1. – P. 9.
6. Aberna, P. Digital image and video watermarking: methodologies, attacks, applications, and future directions / P. Aberna, L. Agilandeewari // *Multimedia Tools and Applications*. – 2024. – Vol. 83, No. 2. – P. 5531–5591.
7. Ben Jabra, S. Deep learning-based watermarking techniques challenges: a review of current and future trends / S. Ben Jabra, M. Ben Farah // *Circuits, Systems, and Signal Processing*. — 2024. — Vol. 43, No. 7. — P. 4339–4368.
8. Fridrich, J. Steganalysis of LSB encoding in color images / J. Fridrich, M. Long // *2000 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME2000)*. – IEEE, 2000. – Vol. 3. – P. 1279–1282.
9. Sharma, V. A spatial domain based secure and robust video watermarking technique using modified LSB and secret image sharing / V. Sharma, M. Gangarde, S. Oza // *ICTACT Journal on Image and Video Processing*. – 2019. – Vol. 10, No. 1. – P. 2061–2070.

10. Lee, G. J. A new LSB based digital watermarking scheme with random mapping function / G. J. Lee, E. J. Yoon, K. Y. Yoo // 2008 International Symposium on Ubiquitous Multimedia Computing. – IEEE, 2008. – P. 130–134.
11. Munir, R. Application of Chaos-Based Fragile Watermarking to Authenticate Digital Video / R. Munir, H. Harlili // Digital Forensic Science. – IntechOpen, 2020.
12. Elgamal, A. F. A fragile video watermarking algorithm for content authentication based on block mean and modulation factor / A. F. Elgamal, N. A. Mosa, W. K. ElSaid // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 80, No. 4. – P. 0975–8887.
13. Lin, E. T. A review of fragile image watermarks / E. T. Lin, E. J. Delp // Proceedings of the ACM Multimedia Security Workshop. – 1999. – P. 47–51.
14. Lancini, R. A robust video watermarking technique in the spatial domain / R. Lancini, F. Mapelli, S. Tubaro // Proceedings of the International Symposium on VIPromCom Video/Image Processing and Multimedia Communications. – Zadar, Croatia, 2002. – P. 251–256.
15. Chen, G. A Robust Video Watermarking Algorithm Based on Spatial Domain / G. Chen [et al.] // Proceedings of the 2018 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018). – Shenzhen, China, 2018. – P. 412–419.
16. Mitekin, V. A new method for high-capacity information hiding in video robust against temporal desynchronization / V. Mitekin, V. A. Fedoseev // Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2014). – SPIE, 2015. – Vol. 9445. – P. 255–261.
17. Koziel, G. Simplified steganographic algorithm based on Fourier transform / G. Koziel // Advanced Science Letters. – 2014. – Vol. 20, No. 2. – P. 505–509.
18. Chen, P. Y. A DWT based approach for image steganography / P. Y. Chen [et al.] // International Journal of Applied Science and Engineering. – 2006. – Vol. 4, No. 3. – P. 275–290.

19. Khayam, S. A. The discrete cosine transform (DCT): theory and application / S. A. Khayam // Michigan State University. – 2003. – Vol. 114, No. 1. – P. 31.
20. Durafe, A. Development and analysis of IWT-SVD and DWT-SVD steganography using fractal cover / A. Durafe, V. Patidar // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34, No. 7. – P. 4483–4498.
21. Melnikov, G. A jointly optimal fractal/DCT compression scheme / G. Melnikov, A. K. Katsaggelos // IEEE Transactions on Multimedia. – 2002. – Vol. 4, No. 4. – P. 413–422.
22. The JPEG 2000 suite / P. Schelkens, A. Skodras, T. Ebrahimi (eds.). — John Wiley & Sons, 2009.
23. Nag, A. A novel technique for image steganography based on Block-DCT and Huffman Encoding / A. Nag [et al.] // arXiv preprint arXiv:1006.1186. – 2010.
24. Patel, R. An efficient DCT-SBPM based video steganography in compressed domain / R. Patel [et al.] // International Journal of Information Technology. – 2021. – Vol. 13. – P. 1073–1078.
25. Kashyap, N. Image watermarking using 3-level discrete wavelet transform (DWT) / N. Kashyap, G. R. Sinha // International Journal of Modern Education and Computer Science. – 2012. – Vol. 4, No. 3. – P. 50.
26. Shukla, D. Robust scene-based digital video watermarking scheme using level-3 DWT: approach, evaluation, and experimentation / D. Shukla, M. Sharma // Radioelectronics and Communications Systems. – 2018. – Vol. 61. – P. 1–12.
27. Hoshi, A. R. A robust watermark algorithm for copyright protection by using 5-level DWT and two logos / A. R. Hoshi [et al.] // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 22, No. 2. – P. 842–856.

28. Porwik, P. The Haar-wavelet transform in digital image processing: its status and achievements / P. Porwik, A. Lisowska // *Machine Graphics and Vision*. — 2004. — Vol. 13, No. 1/2. — P. 79–98.
29. Vonesch, C. Generalized Daubechies wavelet families / C. Vonesch, T. Blu, M. Unser // *IEEE Transactions on Signal Processing*. — 2007. — Vol. 55, No. 9. — P. 4415–4429.
30. Jiang, Q. Orthogonal and biorthogonal FIR hexagonal filter banks with sixfold symmetry / Q. Jiang // *IEEE Transactions on Signal Processing*. — 2008. — Vol. 56, No. 12. — P. 5861–5873.
31. Joshi, A. M. Combined DWT–DCT-based video watermarking algorithm using Arnold transform technique / A. M. Joshi [et al.] // *Proceedings of the International Conference on Data Engineering and Communication Technology: ICDECT 2016*. – Singapore : Springer, 2017. – P. 455–463.
32. Hazim, H. T. A Novel Method of Invisible Video Watermarking Based on Index Mapping and Hybrid DWT-DCT / H. T. Hazim, N. Alseelawi, H. T. H. Alrikabi // *International Journal of Online & Biomedical Engineering*. – 2023. – Vol. 19, No. 4.
33. Bhatnagar, G. A new robust reference watermarking scheme based on DWT-SVD / G. Bhatnagar, B. Raman // *Computer Standards & Interfaces*. — 2009. — Vol. 31, No. 5. — P. 1002–1013.
34. Adul, V. A robust video watermarking approach based on a hybrid SVD/DWT technique / V. Adul, E. Mwangi // *2017 IEEE AFRICON*. – IEEE, 2017. – P. 309–313.
35. Mawande, S. Video watermarking using DWT-DCT-SVD algorithms / S. Mawande, H. Dakhore // *2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*. – IEEE, 2017. – P. 1161–1164.
36. Митекин, В. А. Метод встраивания информации в видео, стойкий к ошибкам потери синхронизации / В. А. Митекин, В. А. Федосеев // *Компьютерная оптика*. — 2014. — Т. 38, № 3. — С. 564–573.

37. Ponni alias Sathya, S. Fibonacci based key frame selection and scrambling for video watermarking in DWT–SVD domain / S. Ponni alias Sathya, S. Ramakrishnan // *Wireless Personal Communications*. – 2018. – Vol. 102. – P. 2011–2031.
38. Bhardwaj, A. Robust video watermarking using significant frame selection based on coefficient difference of lifting wavelet transform / A. Bhardwaj, V. S. Verma, R. K. Jha // *Multimedia Tools and Applications*. – 2018. – Vol. 77. – P. 19659–19678.
39. Schaathun, H. G. Attack Analysis for He & Wu's Joint Watermarking/Fingerprinting Scheme / H. G. Schaathun // *International Workshop on Digital Watermarking*. — Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. — P. 45–59.
40. Kashyap, N. Data synchronization with timing / N. Kashyap, D. L. Neuhoff // *IEEE Transactions on Information Theory*. — 2002. — Vol. 47, No. 4. — P. 1444–1460.
41. Jiang, M. Video watermarking scheme based on MPEG-2 for copyright protection / M. Jiang [et al.] // *Procedia Environmental Sciences*. – 2011. – Vol. 10. – P. 843–848.
42. Lin, E. T. Temporal synchronization in video watermarking / E. T. Lin, E. J. Delp // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2004. – Vol. 52, No. 10. – P. 3007–3022.
43. Wang, K. Robust image watermarking with synchronization using template enhanced-extracted network / K. Wang [et al.] // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. – 2024.
44. Ibrahim, M. M. Video multiple watermarking technique based on image interlacing using DWT / M. M. Ibrahim, N. S. Abdel Kader, M. Zorkany // *The Scientific World Journal*. – 2014. – Vol. 2014, No. 1. – Art. 634828.
45. Luo, X. Dvmark: a deep multiscale framework for video watermarking / X. Luo [et al.] // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2023.

46. Yang, X. A Robust Video Watermarking Algorithm Based on Two-Dimensional Discrete Fourier Transform / X. Yang [et al.] // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, No. 15. – Art. 3271.
47. Huang, I. C. RBMark: Robust and blind video watermark in DT CWT domain / I. C. Huang, J. Y. Wu, W. T. Ooi // *Journal of Visual Communication and Image Representation*. — 2025. — Vol. 109. — Art. 104438.
48. Karwowski, D. 20 years of progress in video compression—from MPEG-1 to MPEG-h HEVC. General view on the path of video coding development / D. Karwowski [et al.] // *International Conference on Image Processing and Communications*. – Cham : Springer International Publishing, 2016. – P. 3–15.
49. Biswas, S. An adaptive compressed MPEG-2 video watermarking scheme / S. Biswas, S. R. Das, E. M. Petriu // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. — 2005. — Vol. 54, No. 5. — P. 1853–1861.
50. Wang, Y. Blind MPEG-2 video watermarking robust against geometric attacks: a set of approaches in DCT domain / Y. Wang, A. Pearmain // *IEEE Transactions on Image Processing*. — 2006. — Vol. 15, No. 6. — P. 1536–1543.
51. Biswas, S. N. MPEG-2 digital video watermarking technique / S. N. Biswas [et al.] // *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. — IEEE, 2012. — P. 225–229.
52. Barni, M. Watermarking of MPEG-4 video objects / M. Barni, F. Bartolini, N. Checcacci // *IEEE Transactions on Multimedia*. — 2005. — Vol. 7, No. 1. — P. 23–32.
53. Belhaj, M. MPEG-4 AVC robust video watermarking based on QIM and perceptual masking / M. Belhaj [et al.] // *2010 8th International Conference on Communications*. — IEEE, 2010. — P. 477–480.
54. Zhang, J. Robust video watermarking of H.264/AVC / J. Zhang [et al.] // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. — 2007. — Vol. 54, No. 2. — P. 205–209.

55. Mansouri, A. A low complexity video watermarking in H.264 compressed domain / A. Mansouri [et al.] // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. — 2010. — Vol. 5, No. 4. — P. 649–657.
56. Zhang, Y. A novel deep video watermarking framework with enhanced robustness to H.264/AVC compression / Y. Zhang [et al.] // Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia. — 2023. — P. 8095–8104.
57. Li, S. An improved DC recovery method from AC coefficients of DCT-transformed images / S. Li [et al.] // 2010 IEEE International Conference on Image Processing. — IEEE, 2010. — P. 2085–2088.
58. Tu, Y. K. An efficient criterion for mode decision in H.264/AVC / Y. K. Tu, J. F. Yang, M. Sun // 2006 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. — IEEE, 2006. — P. 1705–1708.
59. Kaczyński, M. High-quality video watermarking based on deep neural networks for video with HEVC compression / M. Kaczyński, Z. Piotrowski, D. Pietrow // Sensors. — 2022. — Vol. 22, No. 19. — Art. 7552.
60. Kaur, G. An efficient watermarking scheme for enhanced high efficiency video coding/H.265 / G. Kaur, S. S. Kasana, M. K. Sharma // Multimedia Tools and Applications. — 2019. — Vol. 78, No. 9. — P. 12537–12559.
61. Gaj, S. Drift-compensated robust watermarking algorithm for H.265/HEVC video stream / S. Gaj [et al.] // ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications. — 2017. — Vol. 13, No. 1. — P. 1–24.
62. Yang, S. A video encryption method based on chaotic maps in DCT domain / S. Yang, S. Sun // Progress in Natural Science. — 2008. — Vol. 18, No. 10. — P. 1299–1304.
63. Hamamoto, I. Neural watermarking method including an attack simulator against rotation and compression attacks / I. Hamamoto, M. Kawamura // IEICE Transactions on Information and Systems. — 2020. — Vol. 103, No. 1. — P. 33–41.

64. Zhang, K. A. Robust invisible video watermarking with attention / K. A. Zhang, L. Xu, A. Cuesta-Infante, K. Veeramachaneni // arXiv preprint arXiv:1909.01285. — 2019.
65. Fernandez, P. Video seal: Open and efficient video watermarking / P. Fernandez [et al.] // arXiv preprint arXiv:2412.09492. — 2024.
66. Федосеев, В. А. Цифровые водяные знаки и стеганография : учебное пособие / В. А. Федосеев. — 2-е изд., испр. и доп. — Самара : Самарский университет, 2019. — 144 с. — ISBN 978-5-7883-1370-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/148589> (дата обращения: 11.11.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
67. QR Code [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.qrcode.com/en/about> (дата обращения: 11.11.2024).
68. Wu, W. C. Application of QR-code steganography using data embedding technique / W. C. Wu, Z. W. Lin, W. T. Wong // Information Technology Convergence: Security, Robotics, Automations and Communication. — Dordrecht : Springer Netherlands, 2013. — P. 597–605.
69. Choi, Y. Watermark detection based on error probability and its applications to video watermarking / Y. Choi, K. Aizawa // Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science). — 2004. — Vol. 87, No. 6. — P. 66–76.
70. ISO/IEC 18004:2006. Information technology — Automatic identification and data capture techniques — QR Code 2005 bar code symbology specification. — Geneva : ISO, 2006.
71. Wicker, S. B. Reed-Solomon Codes and their Applications / S. B. Wicker, V. K. Bhargava. — New York : IEEE Press, 1994.
72. Shapiro, D. Improved ECC-based Phase Watermarking Method for Video Copyright Protection / D. Shapiro, V. Sergeyev, V. Fedoseev // 2023 11th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS). — IEEE, 2023. — P. 1–6.

73. Soomro, K. UCF101: A dataset of 101 human actions classes from videos in the wild / K. Soomro, A. R. Zamir, M. Shah // arXiv preprint arXiv:1212.0402. — 2012.
74. Kaufmann, M. Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces / M. Kaufmann // San Francisco, CA : Poynton C. Publishers Inc., 2003.
75. Shapiro, D. A. A Method for Synthesizing Test Videos Based on the Evaluation of the Autocorrelation Function / D. A. Shapiro // International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. — Singapore : Springer Nature Singapore, 2025. — P. 347–358.
76. Сергеев, В. В. Алгоритм генерации тестовых мозаичных изображений / В. В. Сергеев, О. Н. Сигунова // Автоматизация научных исследований : межвуз. сб. науч. тр. — Куйбышев : Куйбышевский авиационный институт, 1984. — С. 129–134.
77. Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгердт ; пер. с англ. — М. : Техносфера, 2010. — 560 с.
78. Sergeev, V. Parametric model of the autocorrelation function of cosmic hyperspectral images / V. Sergeev, R. Iuzkiv // Computer Optics. — 2016. — Vol. 40, No. 3. — P. 416–421. — DOI: 10.18287/0134-2452-2016-40-3-416-421.
79. Korn, G. A. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review / G. A. Korn, T. M. Korn. — Courier Corporation, 2000.
80. Modestino, J. W. Stochastic image models generated by random tessellations of the plane / J. W. Modestino, R. W. Fries, A. L. Vickers // Computer Graphics and Image Processing. — 1980. — Vol. 12, No. 1. — P. 74–98.
81. Ahuja, N. Some experiments with mosaic models for images / N. Ahuja, T. Dubitzki, A. Rosenfeld // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1980. — Vol. SMC-10, No. 11. — P. 744–749.

82. Методы компьютерной обработки изображений / М. В. Гашников [и др.] ; под ред. В. А. Сойфера. — 2-е изд., испр. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 784 с.

83. Sergeyev, V. Phase watermarking method for video copyright protection / V. Sergeyev, V. Fedoseev, D. Shapiro // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. — 2022. — Vol. 58. — P. 3–13. — DOI: 10.15372/AUT20220501.

84. Шапиро, Д. А. Метод защиты видео при помощи фазовых цифровых водяных знаков / Д. А. Шапиро, В. В. Сергеев, В. А. Федосеев // VIII Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2022). — 2022. — Т. 3.

85. Jones, R. H. Exponential smoothing for multivariate time series / R. H. Jones // *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. — 1966. — Vol. 28, No. 1. — P. 241–251.

86. Shapiro, D. A Simple Method to Protect Video Using Binary Phase Watermarks / D. Shapiro, V. Sergeyev // 2024 X International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). — IEEE, 2024. — P. 1–6.

87. Сергеев В.В. Простой метод защиты видео с помощью бинарных фазовых водяных знаков / В.В. Сергеев, Д.А. Шапиро // X Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2024). — 2024. — Т. 4.

88. Выборнова, Ю. Д. Новый метод встраивания цифровых водяных знаков в векторные картографические данные / Ю. Д. Выборнова, В. В. Сергеев // *Компьютерная оптика*. — 2017. — Т. 41, № 6. — С. 913–919.

89. Barannik, V. Indirect information hiding technology on a multiadic basis / V. Barannik, N. Barannik, O. Slobodyanyuk // *Informatyka, Automatyka, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. — 2021. — Vol. 11.

90. Шапиро, Д. А. Использование спектрального вторичного контейнера в методе защиты видео с помощью фазовых ЦВЗ / Д. А. Шапиро, В. В. Сергеев // *Компьютерная оптика*. — 2025. — Т. 49, № 5. — С. 805–810.

91. Макс, Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2 т. / Ж. Макс; пер. с франц. — М. : Мир, 1983. — Т. 1. — 312 с.
92. Кандидов, В. П. Дискретное преобразование Фурье : учебно-методическое пособие / В. П. Кандидов, С. С. Чесноков, С. А. Шленов. — Москва : Физический факультет МГУ, 2019. — 87 с.
93. Jayaratne, M. Comparison of H.264 and H.265 / M. Jayaratne, L. K. Gunawardhana, U. Samarathunga // *Engineering and Technology Quarterly Reviews*. — 2022. — Vol. 5, No. 2.
94. Akiyama, T. MPEG2 video codec using image compression DSP / T. Akiyama [et al.] // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. — 1994. — Vol. 40, No. 3. — P. 466–472.
95. Шелухин, О.И. Стеганография. Алгоритмы и программная реализация / О.И. Шелухин, С.Д. Канаев. — М.: Горячая линия - Телеком, 2017. — 592 с.
96. Белобокова, Ю. А. Метод встраивания цифровых водяных знаков для доказательства подлинности фотоизображений / Ю. А. Белобокова // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. — 2013. — № 3. — С. 106–110.
97. Wang, Y. A dtcwt-svd based video watermarking resistant to frame rate conversion / Y. Wang [et al.] // *2022 International Conference on Culture-Oriented Science and Technology (CoST)*. — IEEE, 2022. — P. 36–40.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в
учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»



_____ А.В. Гаврилов

«16» 03 2026 г.


АКТ

о внедрении результатов диссертационного
исследования в учебный процесс


Результаты диссертационной работы Шапиро Давида Александровича на тему: «Фазовые водяные знаки, обеспечивающие защиту цифрового видеоконтента в информационных процессах», выполненной на кафедре геоинформатики и информационной безопасности Самарского университета, внедрены в учебный процесс на основании решения кафедры (протокол №5 от 20.02.2026).

Разработанный метод, предназначенный для защиты видеоконтента в информационных процессах, используется в курсе «Цифровые водяные знаки и стеганография» для обучения студентов по специальности 10.05.03 «Информационная безопасность автоматизированных систем».


Заведующий кафедрой
геоинформатики и информационной
безопасности


В.А. Федосеев
«10» 03 2026 г.

Начальник
учебно-методического управления


Н.В. Соловова
«12» 03 2026 г.

Начальник отдела
сопровождения научных исследований


Л.В. Родионов
«12» 03 2026 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внесении результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по науке
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»



А.И. Розенцвайг

« 18 » 03 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования
Шапиро Давида Александровича
«Фазовые водяные знаки, обеспечивающие защиту
цифрового видеоконтента в информационных процессах»

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Шапиро Д.А. включены в тематику и отчетные материалы по проекту «Методы защиты перспективных типов и форматов данных цифровыми водяными знаками» (грант Российского научного фонда № 22-71-10097, <https://rscf.ru/project/22-71-10097/>).

В качестве сотрудника НИЛ-55 Шапиро Д.А. подготовил, опубликовал и представил на международных конференциях работы о методе использования цифровых водяных знаков для защиты видеоконтента, примененного для защиты авторских прав.

Научный результат диссертации Шапиро Д.А. (реализованный метод, обеспечивающий защищенную передачу видеоконтента) имеет высокое прикладное значение и может быть использован при эксплуатации программного комплекса, использующего защищенную передачу видео по каналам передачи информации.

Руководитель работ
по гранту РНФ № 22-71-10097
к.ф.-м.н., доцент

В.А. Федосеев

Научный руководитель НИЛ-55
д.т.н., профессор

В.В. Сергеев

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о введении результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по науке

федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королёва»



А.И. Розенцвайг

«23» 03 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования
Шапиро Давида Александровича
«Фазовые водяные знаки, обеспечивающие защиту
цифрового видеоконтента в информационных процессах»

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Шапиро Д.А. использованы при реализации проекта в рамках государственного задания министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме НИР: "Методы идентификации мобильных динамических объектов по оптическим изображениям" (шифр проекта FSSS-2026-0003).

В качестве сотрудника НИЛ-35 Шапиро Д.А. применил метод встраивания водяных знаков для защиты набора оптических изображений.

Научный результат диссертации Шапиро Д.А. имеет высокое прикладное значение и может быть использован в комплексе для улучшения современных методов защиты динамических объектов.

Ответственный исполнитель темы
к.т.н., доцент

С.А. Бибииков

Заведующий
научно-исследовательской
лабораторией (НИЛ-35)
д.ф.-м. н., профессор

Р.В. Скиданов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт о внесении результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

АО «Самара-Информспутник», к.т.н.

 Н.И. Глумов

«12» 03 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования
Шапиро Давида Александровича
«Фазовые водяные знаки, обеспечивающие защиту
цифрового видеоконтента в информационных процессах»

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Шапиро Д.А. использованы при реализации проектов:

- 1) Договор № 22/24 от 01.02.2024 с ФГУП ГосНИИПП (г.Санкт-Петербург) на оказание услуг по разработке и программной реализации методов обработки и получения визуальной информации,
- 2) Договор № 98/23 от 13.07.2023 с МИИГАиК (г. Москва) на выполнение НИОКР «Технологии автоматической геопривязки, совмещения и пространственно-временного оперативного анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)»

В качестве сотрудника АО «Самара-Информспутник» Шапиро Д.А. внедрял метод встраивания водяных знаков для защиты видео в рамках программного комплекса по обработке видеозаписей в режиме реального времени.

Также в качестве сотрудника Шапиро Д.А. применил метод, использующий фазовые цифровые водяные знаки для разработки механизма верификации подлинности снимков ДЗЗ.

Начальник отдела обработки изображений
д.ф.-м.н.



В.В. Мясников

Начальник отдела геоинформационных
систем



Е.В. Иванова

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025660321

**Метод защиты видео с помощью фазовых цифровых
водяных знаков**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "САМАРСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П.КОРОЛЕВА"
(RU)**

Авторы: **Шапиро Давид Александрович (RU), Сергеев Владислав
Викторович (RU)**

Заявка № 2025618108

Дата поступления 11 апреля 2025 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 23 апреля 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0492e765c4300c554426166320e012026
Выдатель: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.01.2024 по 01.10.2025

Ю.С. Зубов