

## ОТЗЫВ

**официального оппонента доктора технических наук, доцента  
Коваленко Анны Владимировны на диссертационную работу  
Бергермана Максима Валерьевича «Моделирование высокоскоростного  
сжатия и восстановления изображений на основе дискретного вейвлет-  
преобразования с вычислениями по методу Винограда», представленной  
на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ (технические науки).**

### Актуальность темы исследования

Цифровая обработка изображений (ЦОИ) и сигналов (ЦОС) имеет важное значение в самых разных областях — от электроники и связи до медицины и инженерии. Широкое внедрение этих технологий предъявляет всё более жёсткие требования к вычислительной эффективности реализующих их систем. Особенно актуальным становится совершенствование алгоритмов сжатия визуальных данных, поскольку рост объёмов информации и необходимости её высокоскоростной обработки опережает возможности стандартных методов. В большинстве современных стандартов сжатия лежит один из двух подходов:

1. Сжатие с потерями. Данный подход применяется для достижения максимального возможного сжатия за счёт удаления визуально наименее значимых данных с допустимым снижением качества.
2. Сжатие без потерь. Такой подход используется для сохранения высокого качества изображения, но с ограниченным коэффициентом сжатия.

Одним из наиболее эффективных математических инструментов для выполнения сжатия изображений является дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Применение вейвлет-фильтров позволяет сжимать данные, отделяя существенную информацию от избыточной. Это обеспечивает высокую степень сжатия при минимальных визуальных потерях. Данные принципы реализованы в современном стандарте JPEG XS, который ориентирован на минимальную задержку, низкую вычислительную сложность и экономию энергии. В отличие от стандартного JPEG, данный формат ориентирован на сжатие без потерь с сохранением высокого качества изображений и видео, что делает его идеальным для задач телевидения, IP-трансляций, телемедицины, а также для систем дополненной и виртуальной реальности, автономных автомобилей, дронов и мобильных платформ.

## Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (129 наименований) и 10 приложений. Изложение сопровождается 16 таблицами и 36 рисунками. Общий объем диссертации составляет 189 страниц.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и научная задача, приведены объект и предмет исследования, представлена научная новизна, практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу известных способов сжатия и восстановления цифровых изображений. В качестве перспективного стандарта для высокоскоростного сжатия и восстановления изображений выделен современный стандарт JPEG XS, основанный на ДВП. Стандартные методы выполнения ДВП основаны на операциях свертки и использовании лифтинговой схемы, выполняющие последовательную обработку пикселей. Рассмотрены способы повышения скорости выполнения сжатия и восстановления изображений. Метод Винограда считается наиболее перспективным для достижения высокой скорости сжатия и восстановления изображений. Сформулирована математическая постановка общей научной задачи и обозначены ключевые ограничения для ее применения.

**Во второй главе** описывается способ вычисления прямого и обратного ДВП по методу Винограда, так как выполнение данных преобразований в формате JPEG XS занимает большую часть времени. Метод Винограда в отличие от стандартного матричного умножения имеет низкую вычислительную сложность. Представлена формула выполнения одномерной свертки по методу Винограда. Разработаны схемы прямого и обратного ДВП с вычислениями по методу Винограда. На основе разработанных архитектур выполнения прямого и обратного ДВП разработаны математические модели сжатия и восстановления изображений на основе матричных вычислений по методу Винограда.

**В третьей главе** разработан численный метод и алгоритмы составления матриц преобразования метода Винограда. Параметры этих матриц (размерность и значения элементов) определяются тремя ключевыми переменными: размером обрабатываемого блока пикселей, размером вейвлет-фильтра и выбором наборов точек для построения интерполяционного многочлена Лагранжа. На основе заданных параметров определяется количество используемых операций умножения и сложения с различным

числом обрабатываемых пикселей изображения. Увеличение числа обрабатываемых пикселей уменьшает среднее количество операций умножения и увеличивает количество операций сложения на 1 пиксель.

**В четвертой главе** разработан программный комплекс выполнения сжатия и восстановления изображений с применением метода Винограда. Проведено программно-аппаратное моделирование сжатия и восстановления изображений. Разработанный метод на основе алгоритма Винограда продемонстрировал превосходство в производительности вычислений по сравнению с существующими аналогами. Результаты моделирования показали увеличение производительности более чем в 2 раза при выполнении прямого ДВП и в 2,4 раза при выполнении обратного ДВП. При этом отмечен рост аппаратных и энергетических затрат.

**В заключении** систематизированы основные теоретические выводы и обобщены практические результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

### **Научная новизна исследования**

Научная новизна диссертационного исследования состоит в следующем:

1. Предложены новые математические модели сжатия и восстановления изображений, основанные на ДВП с использованием алгоритма Винограда. Их отличием и преимуществом является применение групповой обработки фрагментов изображения.

2. Разработан численный метод составления матриц преобразования Винограда для задач обработки изображений, который отличается от аналогов возможностью произвольного выбора размера фрагмента изображения и типов вейвлет-фильтров.

3. Разработан программный комплекс для моделирования процессов сжатия и восстановления изображений на основе ДВП с вычислениями по методу Винограда. Основным преимуществом комплекса является высокая производительность выполнения как прямого, так и обратного ДВП.

### **Практическая значимость диссертационного исследования**

Практическая значимость диссертационной работы состоит в создании математических моделей, численного метода и программного комплекса для высокоскоростного сжатия и восстановления изображений любого размера. Проведенное моделирование подтвердило, что предложенное решение превосходит существующие аналоги по скорости обработки. Это открывает возможность его применения в областях, требующих работы с высококачественными изображениями (разрешение до 8К включительно),

таких как телемедицина, телевещание, а также устройства виртуальной и дополненной реальности.

### **Обоснованность результатов диссертации**

Обоснованность теоретических результатов и выводов диссертационного исследования обеспечивается корректным использованием апробированных методов, строгими доказательствами и результатами практической реализацией. Разработанные модели и метод были результатами анализа их эффективности в среде Matlab и на платформах FPGA и ASIC с использованием САПР Xilinx Vivado и OpenLane. Теоретические положения полностью подтверждены экспериментальными данными.

### **Внедрение и реализация результатов исследования**

Разработки, выполненные в диссертационной работе, успешно внедрены и используются в образовательном процессе программы 01.03.02 «Прикладная математика и информатика» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказского федерального университета», в практической деятельности компаний ООО «Стилсофт» и ООО «Онлайн патент», в прикладных научных исследованиях в рамках проекта АПУ-131/МК и грантов: проектов РНФ (№ 21-71-00017, № 23-71-10013 и № 24-71-10016), грантов Президента РФ для молодых ученых (МК-3918.2021.1.6 и МК-371.2022.4) и проекта «Северо-Кавказский центр математических исследований» (соглашения № 075-02-2023-938 и № 075-02-2024-1451). Это подтверждает востребованность и практическую значимость полученных результатов.

### **Публикация и апробация результатов исследования**

По результатам диссертационного исследования опубликовано 12 научных работ, включая: 2 статьи в журналах из перечня ВАК (для публикации основных результатов диссертации); 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science; 3 публикации тезисов докладов в материалах конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science. Также по теме работы получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на международных конференциях:

1. «International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems» в 2021 году;
2. «Mediterranean Conference on Embedded Computing» в 2022 году;

3. «International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» в 2023 году.

### **Соответствие паспорту научной специальности**

Результаты диссертационного исследования соответствуют паспорту научной специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические науки) по следующим пунктам:

1. П.6. (Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов). Разработан и реализован программный комплекс для программно-аппаратного моделирования процессов сжатия и восстановления изображений на основе созданной математической модели ДВП с использованием метода Винограда.

2. П.8. (Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования). Проведено исследование математических моделей высокоскоростной вейвлет-обработки изображений, основанных на матричных вычислениях, и технической проблемы их аппаратно-программной реализации. Исследование выполнено с применением технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента в средах MatLab и САПР OpenLane.

3. П.9. (Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов). Проведена серия численных экспериментов по генерации матриц преобразования метода Винограда и их использованию в моделях сжатия и восстановления изображений с последующим анализом результатов.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Почему для аппаратного моделирования используются только случаи  $m=2\dots 5$ ? Результаты в таблице 4.10 и 4.11 диссертации не позволяют провести интерполяцию полученных значений и спрогнозировать максимально эффективные по производительности вычислений параметры метода Винограда, из-за чего анализ видится достаточно поверхностным, результаты воспринимаются неоднозначно, а выводы кажутся недостоверными.

2. В диссертации указаны результаты моделирования прямого и обратного вейвлет-преобразования изображений. При этом сама работа посвящена сжатию и восстановлению изображений, а не простому вейвлетному разложению и восстановлению. Тем не менее, выводы о ресурсозатратах на обработку изображений делаются не на основе результатов реализации алгоритмов сжатия и восстановления, в частности, согласно формату JPEG XS, а лишь по ресурсозатратам на прямое и обратное вейвлет-

преобразование, которые представляют собой лишь 2 этапа обработки из 9, согласно схеме на рисунке 1.3 диссертации.

3. В работе при выполнении ДВП используется фильтр Ле Галла 5/3. Непонятно, почему не были рассмотрены другие вейвлеты (например, Добеши, Койфлета) и как их использование могли бы повлиять на результаты.

Выявленные замечания не снижают научную и практическую ценность работы и общую положительную оценку проведенных исследований.

### Выводы и заключение

Анализ представленных материалов свидетельствует, что диссертация М. В. Бергермана является самостоятельным, завершенным научным исследованием, имеющим существенную актуальность. Работа выполнена с соблюдением современных методологических требований и на должном научно-техническом уровне. Полностью подтверждаются заявленные научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов. Личный вклад автора является определяющим. Выводы работы логически вытекают из представленных достоверных результатов, которые соответствуют паспорту специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические науки). Автореферат точно отражает основное содержание диссертации. Диссертационная работа и ее автор соответствуют положениям п. 9-11, 13, 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней.

Считаю, что автор диссертационной работы, Бергерман Максим Валерьевич, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические науки).

### Официальный оппонент

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой анализа данных и искусственного интеллекта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет»



Коваленко Анна Владимировна<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149  
Тел. +7 (861) 219-95-78, e-mail: savanna-05@mail.ru

